

**SÜRTÜNME ESASLI SÖNÜMLEYİCİLİ ÇELİK RAF
SİSTEMLERİNİN DEPREM TASARIMI VE
PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ**

Burak Sait YILDIRIM



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRTÜNME ESASLI SÖNÜMLEYİCİLİ ÇELİK RAF SİSTEMLERİNİN
DEPREM TASARIMI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ**

Burak Sait YILDIRIM
0009-0008-0376-4176

Prof. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜRTÜNME ESASLI SÖNÜMLEYİCİLİ ÇELİK RAF SİSTEMLERİNİN DEPREM TASARIMI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Burak Sait YILDIRIM

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER

Hafif çelik raf sistemleri, endüstriyel yapılarda ürünlerin güvenli bir şekilde depolanması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Değerli ürünlerin hasar görmesini önlemek için bu sistemlerin tasarım depremi altında elastik davranış göstermesi hedeflenebilir. Bu amaçla, sürtünme esaslı sönümleyicilerin kullanımı etkili bir çözüm sunabilir. Ancak geleneksel sönümleyiciler, deprem sonrası oluşabilecek kalıcı yer değiştirmeler nedeniyle sistemin stabilitesini olumsuz etkileyebilir. Bu sorunu aşmak için, deprem sonrası yapıyı başlangıç konumuna döndüren kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyiciler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, yalnızca çekme çaprazlı sistem içeren ve kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyici kullanan raf sistemleri tasarlanmış ve deprem altındaki performansları incelenmiştir. F_{slip}/F_{ult} oranı için 0.20, 0.50 ve 0.80 olmak üzere üç farklı değer kullanılmış ve bu oranların sistem performansına etkisi değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla sönümleyicisiz bir model de tasarlanmıştır. Tüm modeller, statik itme analizi ve 11 ölçeklenmiş deprem kaydıyla doğrusal olmayan dinamik analizler ile test edilmiştir.

Sonuçlar, sürtünme tipi sönümleyicili raf sistemlerinin deprem etkisi altında başarılı bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Hafif çelik raf sistemleri, kendiliğinden merkezli sönümleyiciler, düşük hasarlı tasarım, parametrik analiz, dinamik analiz

ABSTRACT

MSc Thesis

SEISMIC DESIGN AND PERFORMANCE ASSESSMENT OF STEEL RACK SYSTEMS WITH FRICTION-BASED DAMPERS

Burak Sait YILDIRIM

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER

Steel storage pallet rack systems are widely used in industrial structures for the safe storage of products. To prevent damage to valuable items, these systems are often designed to exhibit elastic behavior under design-level earthquake conditions. Friction-based dampers offer an effective solution for achieving this objective. However, traditional friction-based dampers can adversely affect the stability of the system due to residual displacements that may occur after an earthquake. To address this issue, self-centering friction-based dampers, capable of restoring the structure to its original position after an earthquake, have been developed.

In this study, shelf systems with only tensile bracing and self-centered friction-based dampers are designed and their performance under earthquakes is investigated. Three different values for the $F_{\text{slip}}/F_{\text{ult}}$ ratio, 0.20, 0.50 and 0.80, are used and their effect on the system performance is evaluated. A model without dampers was also designed for comparison. All models were tested by static thrust analysis and nonlinear dynamic analysis with 11 scaled earthquake records.

The results show that the shelf systems with friction type dampers perform well under earthquake action.

Keywords: Light steel racking systems, self-centred dampers, low damage design, parametric analysis, dynamic analysis

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince her zaman destek olan, yol gösteren, tüm bilgi ve birikimini aktarmaktan kaçınmayan, tez çalışmamın yanı sıra mühendislik kariyerimin başlamasına vesile olan değerli danışmanım ve saygıdeğer büyüğüm Sayın Prof. Dr. Hakan Tacettin Türker'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında bana motivasyon katan ve her zaman yanımda olmaya çalışan dostlarıma, arkadaşlarıma ve dualarını esirgemeyen tüm sevdiklerime teşekkür ederim.

Hayatımın her anında bana inanan, güvenen, yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama, abime ve kardeşlerime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Burak Sait YILDIRIM
23/12/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1 GİRİŞ	1
2 KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Literatür Taraması	3
2.2 İnce Cidarlı Kesitler	16
2.3 Raf Sistemler	18
2.4 Raf Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış	20
2.4.1 Kiriş-Dikme Birleşimi	22
2.4.2 Taban Plakası- Dikme Bağlantısı	24
2.4.3 Dikmelerin Davranışı	26
2.4.4 Çaprazların Davranışı	28
2.4.5 Kirişlerin Davranışı	28
2.5 Kendiliğinden Merkezli Sürtünme Esaslı Sönümleyiciler	29
2.5.1 Kendiliğinden Merkezli Sürtünme Esaslı Sönümleyici Tanımlanması	30
3 MATERYAL ve YÖNTEM	32
3.1 Sistem Tanım ve Parametreleri	32
3.1.1 Taşıyıcı Sistem Geometrisi	32
3.1.2 Yükler	36
3.1.3 Kütle Tanımı	37
3.1.4 Kiriş-Dikme Birleşimi ve Modellemesi	37
3.1.5 Kiriş Özellikleri	38
3.1.6 Dikme Modellemesi ve Özellikleri	40
3.1.7 Gergi Tipi Çapraz Modellemesi ve Özellikleri	41
3.1.8 Düzlem Çaprazların ve Çapraz Koridor Diyagonellerin Modellenmesi	41
3.1.9 Bağlantı Elemanlarının Modellenmesi ve Özellikleri	42
3.2 Zemin ve Deprem Parametreleri	44
3.3 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz	44
3.3.1 Sürtünme Esaslı Sönümleyicili Çapraz Sistemlerin Tasarımı	46
4 BULGULAR ve TARTIŞMA	48
4.1 Çaprazlı Sistem	48
4.1.1 Dinamik Analiz Sonuçları	49
4.2 Sönümleyicili Sistem Tasarım ve Analizi	51
4.2.1 $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ Durumu	51
4.2.2 $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ Sistemi	63
4.2.3 $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ Sistemi	74
4.2.4 Sönümleyicili Raf Sisteminin Kendiliğinden Merkezleme Davranışı	88
4.3 Parametrik Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi	91
5 SONUÇLAR	94
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	100

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
R_a	Deprem yükü azaltma katsayısı
θ	Görelî kat ötelemesi
E	Elastisite modülü
A	Kesit Alanı
h_i	kat yüksekliği
L	Açıklık mesafesi
L_i	Eleman boyu
k_0	Başlangıç rijitliği
k_1	Kayma rijitliği (Yükleme durumu)
k_2	Kayma rijitliği (Boşaltma durumu)
d_s	Maksimum deplasman
d_c	Ön sıkıştırma deplasmanı
h_i	Kat yüksekliği
T_1	Hakim titreşim periyodu
V_{te}	Taban kesme kuvveti

Kısaltmalar	Açıklama
EDYY	Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi
KMSES	Kendiliğinden Merkezli Sürtünme Esaslı Sönümleyici

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Sıcak ve soğuk hadde çelik davranışı (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).....	17
Şekil 2.2.	Raf sistemlerin doğrultuları (Haberdar, 2023)	19
Şekil 2.3.	Tipik Raf Sistem (Yin vd., 2018).....	19
Şekil 2.4.	Raf Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış Beklenen Bölgeler (Αδαμάκος & Adamakos, 2018)	21
Şekil 2.5.	Test edilen bağlantıların ana elemanları: (a,b) dikme-konektör-kiriş montajı, (c,d) dikme, (e,f) kaynaklı kiriş ucu konektörüne sahip kiriş.(Dumbrava & Cerbu, 2020).....	23
Şekil 2.6.	Çevrimsel yükleme altında tipik bir kiriş-dikme birleşiminin moment-dönme davranışı (Kadi vd., 2017).....	24
Şekil 2.7.	Taban plakası kesitleri (Baldassino & Zandonini, 2008).....	25
Şekil 2.8.	Taban plakası dönme bileşenleri (Gilbert & Rasmussen, 2011).....	25
Şekil 2.9.	Basınç kuvvetleri altında taban plakası moment-dönme davranışı (Firouzianhaj vd., 2022).....	26
Şekil 2.10.	Lokal burkula örneği (Talebian vd., 2020).....	27
Şekil 2.11.	Esnek Sürtünmeli Kayma Bağlantıları (RSFJ) (Hashemi vd., 2020)	29
Şekil 2.12.	Kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyici histerik davranışı	31
Şekil 3.1.	Plan görüntüsü	33
Şekil 3.2.	1 Aksı görüntüsü.....	33
Şekil 3.3.	2 Aksı görüntüsü.....	34
Şekil 3.4.	3 Aksı görüntüsü.....	34
Şekil 3.5.	A aksı görüntüsü.....	35
Şekil 3.6.	Modelin üç boyutlu görünümü	36
Şekil 3.7.	M150 Çevrimsel yükleme altında moment-dönme davranışı (Shahshenas, 2015).....	38
Şekil 3.8.	S235 gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı.....	39
Şekil 3.9.	DD140 ve DD150 kesitleri (Shahshenas, 2015).....	39
Şekil 3.10.	Dikme kesiti için malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	40
Şekil 3.11.	Modellerde kullanılan dikmelerin kesit ve genel görünümü.....	41
Şekil 3.12.	Çapraz kesit tanımı	42
Şekil 3.13.	Plan görünümünde bağlantı elemanları	42
Şekil 3.14.	Bağlantı elemanı kesiti	43
Şekil 3.15.	Çapraz kirişleri kesitleri	43
Şekil 3.16.	Ölçeklenmiş deprem kayıtları ve hedef spektrum	45
Şekil 3.17.	Sürtünme esaslı sönümleyicili çapraz sistemlerin tasarımı için izlenen prosedürü gösteren akış diyagramı	46
Şekil 3.18.	Kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyicilerin yük-deplasman eğrisi parametrelerinin hesaplanması için izlenen prosedürü gösteren akış diyagramı.....	47
Şekil 4.1.	Çaprazlı sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler.....	50
Şekil 4.2.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Pushover analiz sonucu.....	54

Şekil 4.3.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler.....	55
Şekil 4.4.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem görel kat ötelemeleri	56
Şekil 4.5.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem görel kat ötelemeleri sütun grafiği.....	57
Şekil 4.6.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon Pushover sonucu.....	58
Şekil 4.7.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler	60
Şekil 4.8.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri.....	61
Şekil 4.9.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri.....	62
Şekil 4.10.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Pushover analiz sonucu.....	65
Şekil 4.11.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler.....	66
Şekil 4.12.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem görel kat ötelemeleri	67
Şekil 4.13.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem görel kat ötelemeleri sütun grafiği.....	68
Şekil 4.14.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon Pushover sonucu.....	70
Şekil 4.15.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler ..	71
Şekil 4.16.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri ...	72
Şekil 4.17.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri ...	73
Şekil 4.18.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Pushover analiz sonucu.....	76
Şekil 4.19.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler.....	77
Şekil 4.20.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem görel kat ötelemeleri	78
Şekil 4.21.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem görel kat ötelemeleri sütun grafiği.....	79
Şekil 4.22.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon Pushover sonucu.....	80
Şekil 4.23.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler ...	82
Şekil 4.24.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri ...	83
Şekil 4.25.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri ...	84
Şekil 4.26.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon Pushover sonucu.....	85
Şekil 4.27.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler...	86
Şekil 4.28.	Birinci kattaki sönümleyicinin $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ durumunda Mogan Hill depremi altındaki davranışı	88
Şekil 4.29.	Birinci kattaki sönümleyicinin $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ durumunda Mogan Hill depremi altındaki davranışı	88
Şekil 4.30.	Birinci kattaki sönümleyicinin $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ durumunda Mogan Hill depremi altındaki davranışı	89
Şekil 4.31.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Managua_ Nicaragua-01 depremi çatı deplasmanı.....	90
Şekil 4.32.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Managua_ Nicaragua-01 depremi çatı deplasmanı.....	90
Şekil 4.33.	$F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Managua_ Nicaragua-01 depremi çatı deplasmanı.....	90
Şekil 4.34.	Farklı F_{slip}/F_{ult} sahip sistemlerin Pushover eğrileri	91
Şekil 4.35.	Farklı F_{slip}/F_{ult} sahip sistemlerin görel kat ötelemeleri	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Raf sistemine etkiyen toplam düşey yükler.....	37
Çizelge 3.2. Deprem Kütleleri.....	37
Çizelge 3.3. Deprem Parametreleri.....	44
Çizelge 3.4. Seçilen Deprem kayıtları.....	45
Çizelge 4.1. EDYY iterasyonları sonucu parametreler.....	49
Çizelge 4.2. İterasyon sonucu seçilen çapraz kesitleri.....	49
Çizelge 4.3. Çaprazlı sistem Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ($R_a=1$).....	49
Çizelge 4.4. Çaprazlı sistem taban kesme kuvvetleri.....	50
Çizelge 4.5. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ($R_a=2.50$). ..	51
Çizelge 4.6. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem k_0 başlangıç eğiminin belirlenmesi.....	52
Çizelge 4.7. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem FD Cihazı tanım parametreleri.....	52
Çizelge 4.8. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Sap2000 Friction Damper Parametreleri.....	53
Çizelge 3.5. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler.....	55
Çizelge 4.9. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar.....	56
Çizelge 4.10. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ($R_a=2.64$). ..	58
Çizelge 4.11. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem 1.iterasyon sönümleyici tanım parametreler ..	58
Çizelge 4.12. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler....	59
Çizelge 4.13. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar....	60
Çizelge 4.14. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem k_0 başlangıç eğiminin belirlenmesi.....	63
Çizelge 4.15. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem FD Cihazı tanım parametreleri.....	64
Çizelge 4.16. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Sap2000 Friction Damper Parametreleri.....	64
Çizelge 4.17. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler.....	66
Çizelge 4.18. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar.....	67
Çizelge 4.19. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ($R_a=2.23$). ..	69
Çizelge 4.20. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon sönümleyici tanım parametreleri ..	69
Çizelge 4.21. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler ..	70
Çizelge 4.22. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ 1.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar	71
Çizelge 4.23. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem k_0 başlangıç eğiminin belirlenmesi.....	74
Çizelge 4.24. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem FD Cihazı tanım parametreleri.....	75
Çizelge 4.25. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Sap2000 Friction Damper Parametreleri.....	75
Çizelge 4.26. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler.....	77
Çizelge 4.27. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar.....	78
Çizelge 4.28. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ($R_a=1.75$). ..	80
Çizelge 4.29. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon sönümleyici tanım parametreler ..	80
Çizelge 4.30. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler ...	81
Çizelge 4.31. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ 1.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar	82
Çizelge 4.32. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ($R_a=1.65$). ..	84
Çizelge 4.33. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon sönümleyici tanım parametreler ..	85
Çizelge 4.34. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler ...	86
Çizelge 4.35. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ 2.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar.....	87
Çizelge 4.36. Sistemlerin depremlerin sonunda çatı deplasmanı.....	89
Çizelge 4.37. Farklı F_{slip}/F_{ult} sahip sistemlerin deprem yükü azaltma katsayısı.	93

1 GİRİŞ

Hafif çelik raf sistemleri, endüstriyel ve ticari alanlarda depolama çözümlerinin vazgeçilmez bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, değerli ürünlerin güvenli bir şekilde depolanmasını sağlamalarının yanı sıra, ince cidarlı ve narin elemanlardan oluşmaları nedeniyle deprem gibi dinamik yükler altında özel bir tasarım yaklaşımı gerektirmektedir. Özellikle, ikincil mertebe etkileri (P-Delta etkisi), bu tür yapıların stabilitesini ve performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Raf sistemlerinin tasarımı, genellikle belirli bir tasarım depremine dayanacak şekilde yapılmaktadır. Bu durumda, yapının belirli düzeyde hasar görmesi kabul edilir, ancak yıkılması önlenmektedir. Ancak, değerli ürünlerin depolandığı raf sistemlerinde bu yaklaşım yeterli değildir; çünkü oluşabilecek hasarlar ekonomik ve işlevsel kayıplara yol açabilir. Bu bağlamda, düşük hasar seviyelerini hedefleyen yenilikçi tasarım stratejileri ve sönümleyici sistemlerin kullanımı, raf sistemlerinin performansını artırmak için önem kazanmaktadır.

Sürtünme esaslı sönümleyiciler, bu tür sistemlerin performansını iyileştirmede etkili bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu cihazlar, deprem sırasında enerjiyi emerek, hasarın yalnızca sönümleyicilerde yoğunlaşmasını sağlamakta ve diğer taşıyıcı elemanlarda doğrusal olmayan davranış oluşumunu engellemektedir. Ancak, sürtünme esaslı sönümleyicilerin deprem sonrası kalıcı yer değiştirmelere yol açabilmesi, raf sistemlerinin işlevselliği açısından önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu tür kalıcı yer değiştirmeler, raf sistemlerinin stabilitesini tehlikeye atabilir ve kullanım ömrünü kısaltabilir. Bu soruna çözüm olarak, kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyiciler tasarlanmıştır. Bu sönümleyiciler, deprem sonrası başlangıç konumlarına geri dönerek, sistemde kalıcı yer değiştirme oluşumunu engellerler. Bu özellik, özellikle raf sistemleri gibi narin yapı elemanlarının stabilitesi için kritik öneme sahiptir.

Literatürde, raf sistemlerinde aşağı koridor doğrultusunda sürtünme esaslı sönümleyicilerin kullanımı üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, kendiliğinden merkezlenen sürtünme esaslı sönümleyicilerin raf sistemlerinde

uygulanmasına yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı ve raf sistemlerinin deprem performansını artırmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, hafif çelik raf sistemlerinin, aşağı koridor doğrultusunda kendiliğinden merkezlenen sürtünme esaslı sönümleyicilerle tasarlanması ve sönümleyicilerin F_{slip}/F_{ult} oranının, sistem üzerindeki etkisini belirlemek için etkisi parametrik olarak ele alınmıştır. Çalışma kapsamında dört farklı model geliştirilmiştir. Birinci model, geleneksel yalnızca çekme dayanımlı (tension-only) çaprazlı sistemden oluşurken; ikinci, üçüncü ve dördüncü model sırasıyla, çaprazların uçlarına kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyicilerin eklendiği, F_{slip}/F_{ult} değerleri 0.20, 0.50 ve 0.80 olan sistemdir. Tüm modellerin tasarım depreminde doğrusal elastik davranış sergilemesi ve görelî kat ötelemeleri tasarımda ön görülen sınırı aşmaması beklenmektedir. Deprem yükleri TBDY 2018'de tanımlanan eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Sistemlerin performansı ve davranış katsayıları, statik itme (pushover) analizi ve 11 adet ölçeklenmiş deprem kaydıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda her iki sistemin deprem yükü azaltma katsayısı belirlenmiş ve görelî kat ötelemeleri tasarım sınır değerleriyle karşılaştırılmıştır.

2 KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Literatür Taraması

(European Commission. Directorate-General for Research, 2009) "SEISRACKS" projesinde (2009), palet raf sistemlerinin sismik tasarımı incelenmiştir. Çalışma, perakende alanlarında kullanılan çelik palet raf sistemlerine odaklanmış ve bu sistemlerin dinamik davranışı değerlendirilmiştir. Proje kapsamında, tam ölçekli itme, psödo-dinamik ve dinamik sarsma tablası testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, depolama raflarının taban izolatörleriyle donatılmasının sismik performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve q-faktörü değerleri belirlenmiştir. Projenin sonuçları, depolama raflarının sismik yükler altındaki davranışını anlamak için önemli bilgiler sağlamış ve gelecekteki tasarım standartlarına katkıda bulunmuştur.

(Castiglioni vd., 2014) "SEISRACKS 2" Projesinde, palet raf sistemlerinin sismik tasarımı incelenmiştir. Çalışma, perakende alanlarında kullanılan çelik palet raf sistemlerine odaklanmış ve bu sistemlerin dinamik davranışı değerlendirilmiştir. Proje kapsamında, tam ölçekli itme, psödo-dinamik ve dinamik sarsma tablası testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, depolama raflarının taban izolatörleriyle donatılmasının sismik performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve q-faktörü değerleri belirlenmiştir. Projenin sonuçları, depolama raflarının sismik yükler altındaki davranışını anlamak için önemli bilgiler sağlamış ve gelecekteki tasarım standartlarına katkıda bulunmuştur.

(Bajoria & Talikoti, 2006) çalışmasında geleneksel palet raf sistemlerinde kullanılan kiriş-kolon bağlantı elemanlarının esnekliğini belirlemek için yeni bir test yöntemi tanıtmaktadır. Çalışmada, konektörlerin esnekliğini belirlemek için iki farklı yöntem kullanılmıştır: geleneksel konsol yöntemi ve yeni önerilen çift konsol yöntemi. Her iki testten elde edilen sonuçlar, tam ölçekli bir çerçeve testi ile doğrulanmıştır. Çift konsol testinde, konektör moment, kesme ve eksenel çekme kuvvetlerine maruz bırakılarak, konektörlerin pratik kullanım koşullarına yakın bir davranış sergilemesi sağlanmıştır. Sonuçlar hem deneysel hem de sonlu eleman analizleri ile karşılaştırılmış ve çift konsol testinin, geleneksel tek konsol testine göre daha üstün olduğu belirlenmiştir.

(Markazi vd., 1997) çalışmasında, yarı rijit tırnaksız bağlantı elemanlarının deneysel analizini sunmaktadır. Çalışma, çelik depolama raf sistemlerindeki kiriş-kolon bağlantılarının davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, bağlantıların rijitlik ve dayanım özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. Sonuçlar, bu tür bağlantı elemanlarının pratik kullanımdaki performansını değerlendirmek için önemli veriler sağlamaktadır. Deneysel veriler, özellikle döngüsel yükleme altında bağlantı elemanlarının performansını anlamak için kullanılmıştır.

(Kadi vd., 2017) çalışmasında, palet tipi çelik depolama raf yapılarının sismik performansını incelemektedir. Deprem sırasında raf sistemlerinin aşağı koridor yönündeki tepkisi, kiriş-kolon bağlantılarının doğrusal olmayan moment-rotasyon tepkisinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Çalışmada, tipik kancalı tırnaksız kiriş-kolon bağlantılarının doğrusal olmayan tersinir döngüsel moment-rotasyon tepkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, standart kancaların yanı sıra ek bulonlar içeren bileşik tip bağlantılar da benzer koşullar altında test edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, bazı önemli performans göstergeleri açısından karşılaştırılmış ve sismik performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, önerilen yükseltme yönteminin, kancalı bağlantıların ve dolayısıyla raf çerçevelerinin sismik performansını artırmada çok pratik ve etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

(Gusella vd., 2018) çalışmasında, yarı rijit bağlantılara sahip çelik depolama raflarının sismik davranışı incelenmiştir. Çalışmada, çeşitli bağlantı elemanlarının sismik yükler altındaki performansını belirlemek amacıyla deneysel ve sayısal analizler yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, raf sistemlerinin deprem sırasında nasıl davrandığını anlamak için kullanılmıştır. Ayrıca, bağlantı elemanlarının rijitlik ve dayanım özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, yarı rijit bağlantıların raf sistemlerinin sismik dayanımını artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

(Zhao vd., 2018) çalışmasında, bulonlu çelik depolama raf bağlantılarının döngüsel davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, çeşitli bulonlu bağlantı elemanlarının sismik yükler altındaki performansını belirlemek amacıyla deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler, raf sistemlerinin deprem sırasında nasıl

davrandığını anlamak için kullanılmıştır. Sonuçlar, bulonlu bağlantıların döngüsel yükler altındaki davranışını ve dayanımını değerlendirmektedir.

(Yin vd., 2016) çalışmasında, raf sistemlerde bağlantının eğilme durumunda davranışının modellenmesi için monotonik yüklemeler altında davranışının tanımlanmasının yetersiz olacağını, monotonik yükleme altında elastik rijitliğin elde edilmesini ve bağlantının davranışının çevrimsel yüklemeler altında yapılan deney sonucu idealize edilen davranışın modellenmesini önermektedir.

(Gilbert & Rasmussen, 2011) makalesinde, raf sistemlerin taban plakası montajlarının rijitlik ve kapasitelerinin belirlenmesi sorunu ele almıştır. Ayrıca, taban plakası montajlarının deformasyonlarına katkıda bulunan unsurlar belirlemiş ve her bir bileşenin rijitliği için basit ifadeler önermiştir. Deneysel test sonuçlarına göre, taban plakası bağlantılarının başlangıç rijitliği, esas olarak dikmenin eğilmesi ve zeminin elastik deformasyonundan kaynaklanmaktadır.

(Firouziyanhaj vd., 2022) çalışmasında, soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) raf sistemlerinde kullanılan taban plakası bağlantılarının moment-dönme karakteristiklerinin, zemin ankraj düzenlemeleri ve dikmelerdeki eksenel basınç kuvvetlerinden nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Sonuçlar, farklı ankraj düzenlemelerinin farklı taban plakası davranışlarına yol açtığını ve taban plakası bağlantılarının rijitlik ve moment kapasitesinin dikmelere uygulanan eksenel basınç yüklerinin büyüklüğünden etkilendiğini göstermiştir.

(Çelik vd., 2022) çalışmasında, koridor aşağı palet raf sistemlerinde farklı taban plaka tiplerinin sistem davranışına etkisi incelenmiştir. Çalışmada, düşük katlı raf sistemleri için üç farklı taban plaka tipi ile statik itme testleri ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, sistemdeki çaprazların rijitlik sağladığını, ancak tek modüllü raf sistemlerinde dış çaprazların burulma etkilerine neden olduğunu göstermiştir. Taban desteklerinin dönme rijitliği arttıkça burulma etkilerinin kısıtlandığı ve sistem stabilitesinin arttığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, düşük katlı, tek modüler raf sistemlerinde daha yüksek

rijitlik değerine sahip taban plakalarının kullanımı, daha iyi sistem stabilitesi ve ekonomik çözümler sağlayabilir.

(Romeo vd., 2023) çalışmasında, hafif çelik raf sistemlerin taban plakası bağlantılarının eğilme momenti ve aksenal basınç kuvveti altındaki dönme mukavemeti ve rijitliğinin analitik tahminini ele alır. Bu çalışma, bileşen yöntemi kullanılarak bağlantının genel mukavemet ve rijitliğini tahmin etmek için bir analitik prosedür önermektedir. Araştırma sonuçlarına göre, bileşen yönteminin kullanılması, taban plakası bağlantılarının mukavemet ve rijitlik tahminlerinde başarılı olmuştur. Ancak, rijitliğin doğrusal olmayan moment-rotasyon eğrilerini tanımlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Mukavemet sonuçları daha doğru olup, artan basınç ile mukavemet kaybını ve göçme modunu doğru bir şekilde öngörmeye başarılı olmuştur.

(Zhao, Ren, vd., 2017) çalışmasında, delikli ve deliksiz raf sistemlerin dikmelerinin aksenal basınç altındaki davranışını araştırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada, dört farklı kesitte, çeşitli uzunluklarda ve delikli ve deliksiz örneklerde toplam 67 tam ölçekli örnek test edilmiştir. Testler, dikmelerin performansını ve arıza modlarını belirlemede perforasyonların etkisini incelemektedir. Elde edilen sonuçlar, mevcut Doğrudan Mukavemet Yöntemi (DSM) eğrisinin, delikli çelik depolama rafı dikmeleri için dayanımın tahmininde yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, test sonuçlarına dayanarak, delikli dikmeler için modifiye edilmiş bir DSM önerilmiştir.

(Bonada vd., 2016) çalışmasında, aksenal basınç ve eğilme momentine maruz kalan palet rafı dikmelerinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki distorsiyonel etkisini analiz etmektedir. Çalışmada, deneysel testler ve sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak, dikmelerin performansı ve arıza modları incelenmiştir. Ayrıca, Avrupa Standartları'na göre hesaplanan nihai yükler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma, özellikle eğilme momentinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini vurgulamakta ve bu tür yüklemelerin doğru bir şekilde simüle edilmesi gerektiğini belirtmektedir. Deneysel testler ve sonlu elemanlar analizi sonuçları, eksantrik olarak uygulanan aksenal kuvvetin neden olduğu eğilme momentinin, dikmenin yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Distorsiyonel burkulma etkilerinin dikkate alınması,

doğru tahminler yapmak için gereklidir. Analitik model, deneysel test sonuçları ile iyi bir uyum göstermiştir ve Avrupa Standartları'nın kullanımıyla elde edilen sonuçlar, deliklerin ve distorsiyonel burkulmanın etkilerini yönetmede başarılı olmuştur. Çalışmanın bulguları, mevcut Avrupa normlarının genel olarak güvenliği sağladığını, ancak bazı durumlarda aşırı muhafazakâr olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, zayıf eksen etrafındaki eğilme momenti altındaki eksantriklik durumlarında normatif düzenlemelerin aşırı temkinli olduğu ve bu durumun çelik kullanımını gereksiz yere artırabileceği belirlenmiştir.

(Bertocci vd., 2017) çalışmasında, palet raf sistemlerinin soğuk şekillendirilmiş, delikli çelik dikmelerinin merkezi ve eksantrik basınç altındaki davranışlarını kapsamlı bir deneysel kampanya ile incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, çeşitli aksenal yük ve eksantriklik konfigürasyonlarında altı farklı kesitte dikmeler üzerinde gerçekleştirilen deneylerle, bu yapı elemanlarının kararlılık ve yük taşıma kapasitelerini araştırmaktadır. Deneysel sonuçlar, sonlu eleman analizi (FEA) ile genişletilerek, mevcut Avrupa normlarıyla karşılaştırılan üç boyutlu baskı-moment etkileşim alanlarının elde edilmesini sağlamıştır. Sonuçlar, normatif düzenlemelerin güvenliği sağladığını ve deneysel-verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir.

(Yin vd., 2018) çalışmasında, omurga çaprazları olan raf sistemlerin sismik performansını, bulonlu hız kilidi bağlantıları kullanarak araştırmaktadır. Çalışma, önceki deneysel çalışmalara dayanarak elastik-plastik bağlantı modelleri geliştirmiştir. Bu modeller, farklı bağlantı türleri altındaki rafların sismik tepkilerini incelemek için tek girişli ve çift girişli rafların aşırı itme analizlerinde kullanılmıştır. Araştırma, farklı bağlantı türleri kullanan rafların performansındaki farklılıkları ve göçme mekanizmalarını vurgulamaktadır. Sonuçlar, üst cıvatalar ve kaynakların sismik performansı önemli ölçüde iyileştirdiğini ve çift girişli rafların tek girişli raflara göre daha iyi deformasyon ve sismik performans gösterdiğini göstermektedir. Tek girişli ve çift girişli rafların R-faktörleri sırasıyla yaklaşık 3.26 ve 3.63-4.34 olarak bulunmuştur.

(Nuñez vd., 2023) çalışmasında, Şili depremlerine maruz kalan çelik depolama raflarının sismik performansı değerlendirilmiştir. Araştırmada, farklı yükseklik ve narinlik

oranlarına sahip modeller, doğrusal olmayan pushover ve dinamik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, aşağı koridor yönünde deformasyonların arttığını ve katlar arası kaymayı kontrol etmek için çaprazların kullanılmasının gerekli olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yatay ve yanal desteklerin kullanımı, yapıların sismik performansını iyileştirmektedir. Bu çalışma, çelik depolama raflarının Şili tasarım felsefesine uygun olarak daha ciddi düzenlemelere ihtiyaç duyduğunu vurgulamaktadır.

(Kanyılmaz vd., 2016) çalışmasında, aşağı koridor yönünde çaprazsız çelik depolama raflarının sismik davranışı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Araştırmada, 4 desteksiz raf numunesi üzerinde tam ölçekli itme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu yapıların yatay yükler altındaki küresel kapasite eğrilerini, sismik eylemler altındaki temel faktörleri ve rafların farklı tipolojilerinin arıza mekanizmalarını ortaya koymuştur. Çaprazsız rafların yumuşak kat mekanizmasına karşı savunmasız olduğu belirlenmiş ve nedenleri açıklanmıştır. Tasarım yönergeleri, yumuşak kat mekanizmasını önlemek için sunulmuştur. Bu çalışma, sismik eylemler altında desteksiz rafların küresel sünekliğini ve davranış faktörlerini (q) değerlendirmiştir. Sonuçlar, bazı numunelerin q değerlerinin tasarım aşamasında öngörülen değerlerin altında kaldığını göstermiştir. Bu da inelastik davranışın yapının tüm yüksekliği boyunca homojen olarak dağıtılması gerektiğini ve bu durumun tasarım aşamasında dikkatle incelenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

(Mei vd., 2021) çalışmasında, raf yapıların sismik değerlendirilmesi için doğrusal olmayan statik analiz (NSA) ve artımlı dinamik analizler (IDA) kullanılarak soğuk şekillendirilmiş çelik raf yapıların sismik davranışı karşılaştırılmıştır. Çalışmada, toplam 140 doğal yer hareketi kaydı ve NSA için iki farklı kuvvet dağılımı uygulanarak örnek olay modelinde geometrik doğrusal olmayanlıklar ($P-\Delta$ etkileri) dikkate alınmıştır. IDA'dan elde edilen veriler istatistiksel olarak işlenmiş ve NSA ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, NSA'nın sistemin yer değiştirme talebini olduğundan az ve göçme yoğunluğunu (kapasite spektral ivmesi) olduğundan fazla tahmin ettiğini, dolayısıyla her zaman güvenli tarafta olmadığını göstermektedir. Çalışma, NSA ve IDA arasındaki farkları ortaya koyarak soğuk şekillendirilmiş çelik raf yapıların sismik davranışını daha iyi anlamaya yönelik önemli katkılar sağlamaktadır.

(Τσαρπαλής & Tsarpalis, 2022) çalışmasında, raf sistemlerde kütle baskın kayma içeriklerinin sismik değerlendirilmesi için üç yaklaşım incelenmiştir. Bu yaklaşımlar, kayma etkileşimini (CSSI) yakalamak için geliştirilmiştir: (i) her palet için sürtünme sürgüleri ekleyerek doğrusal olmayan tepki geçmişi analizi yapmak, (ii) model viskoz sönümlemesini artırarak elastik tepki geçmişi analizi kullanmak ve (iii) modal tepki spektrumu analizi ile birlikte yatay sismik yükleri azaltmak. Bu yaklaşımlar, depolama raf sistemlerinde kayma yer değiştirmesini değerlendirmek için farklı seviyelerde doğruluk ve modelleme/analiz ihtiyaçları sunar. Üç örnek olay çalışması, sönümleme amplifikasyonu ve sismik yük azaltımı için ampirik ilişkileri kalibre etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışma, gelecekteki kod uygulamaları için zemini düzleştirerek, depolama raf sistemlerinin sismik performansının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

(Popov vd., 1995) çalışmasında, dünya genelindeki mevcut sismik tasarım uygulamaları ve gelişmiş sürtünmeli enerji yutucu bağlantıların performansı ele alınmaktadır. Çalışma, Meksika City depremi gibi çeşitli deprem kayıtlarına dayanarak doğrusal olmayan yapısal tepki spektrumlarını sunmaktadır. Ayrıca, üç katlı bir çelik yapının sarsma tablası testlerinde kullanılan basit bir sürtünmeli enerji yutucu bağlantı (SBC) detaylandırılmıştır. Bu SBC bağlantıları, sürtünme yoluyla enerji yutarak yapıların deprem sonrası kalıcı deformasyonlarını minimize etmektedir. SBC'nin deneysel testlerinde, bağlantıların tekrarlanabilir ve güvenilir bir enerji yutma kapasitesi sunduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, pasif enerji yutucuların sismik tasarımda yaygın kullanımının avantajlarını ortaya koymaktadır ve bu teknolojiye olan ilginin arttığını vurgulamaktadır.

(Ricles vd., 2001) çalışmasında, çelik moment dirençli çerçeveler (MRF) için deprem dayanıklılığını artırmayı amaçlayan art germe yöntemli yeni bir bağlantı türü ele alınmıştır. Bağlantı, kirişlerin kolonlara yüksek dayanımlı çelik tellerle art germe yöntemiyle birleştirilmesiyle oluşturulmuştur ve enerji yutma işlevi gören bağlantı açılı eklenmiştir. Bu yenilikçi bağlantı sistemi, sahada kaynak gerektirmemesi, kendiliğinden merkezlenme yeteneği sağlaması ve MRF yapısında kalıcı deformasyonu önlemesi gibi avantajlar sunmaktadır. Çalışmada geliştirilen analitik modelle yapılan doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler, art germeli MRF sistemlerinin deprem yükleri altındaki

performansını değerlendirmiştir. Yapılan sarsma masası testleri ve zaman-tanım alanında deprem analizleri, art germeli bağlantıların geleneksel kaynaklı bağlantılara kıyasla daha yüksek dayanım, süneklik ve enerji sönümlene kapasitesi sağladığını ortaya koymaktadır

(Bora vd., 2007) çalışmasında, prefabrik beton perde duvar sistemlerinin deprem yüklerine dayanabilmesi için geliştirilmiş özel bir bağlantı sistemi önermektedir. Tipik prefabrik beton panellerin ince kesitleri sismik yüklere karşı yeterli sünekliği sağlayamazken, önerilen bağlantı sistemi, ince kesitli panellerin temel bağlantısındaki yükselme kuvvetlerini sınırlandırarak kırılma bağlantı problemlerini önlemektedir. Çalışma, geliştirilmiş sürtünmeli veya yarıklı-civatalı bağlantıların sismik enerjiyi sönümleyebilme yeteneğini ortaya koymakta ve bu bağlantılarla yapılmış testlerin sonuçları, sistemin mevcut yapı standartları ile uyumlu olarak yeterli performans sağladığını göstermektedir. Çalışma sonucunda, yeni bağlantı sisteminin kod onayı almak için gerekli olan tüm deneysel ve analitik doğrulamaların sağlandığı belirtilmiştir.

(Garlock vd., 2007) çalışmasında, deprem dayanıklı öngerilmeli çelik moment dirençli çerçevelerin (MRF) tasarımı ve performansını ele almaktadır. Öngerilmeli bağlantılar, kiriş ve kolonlar arasında yüksek dayanımlı çelik teller kullanılarak oluşturulmakta olup, deprem sonrası yapıdaki kalıcı ötelenmeleri önlemek için kendiliğinden merkezlenme sağlayan bir geri kazanım kuvveti sunmaktadır. Çalışmada öngerilmeli çerçeve sistemlerinin sismik performans seviyeleri, giriş seviyeleri, yapısal sınır durumları ve talepler tanımlanmış ve adım adım bir tasarım prosedürü sunulmuştur. Öngerilmeli çerçeve sistemlerinin yapısal kapasitesi, zaman-tarih analizleri ile değerlendirilmiştir ve bu sistemlerin, geleneksel çelik çerçevelere kıyasla daha yüksek dayanım, süneklik ve enerji sönümlene kapasitesi sağladığı ortaya konulmuştur. Çalışma, öngerilmeli çerçeve sistemlerinin sismik tasarımda uygulanabilirliğini artırmak için kapsamlı bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır.

(Kim & Christopoulos, 2008) çalışmasında, sürtünme sönümleyicili kendiliğinden merkezlenen (SCFR) çelik moment dirençli çerçeve bağlantılarının deprem dayanımı incelenmiştir. Çalışma, öngerme elemanlarının kendiliğinden merkezlenme yeteneği sağlaması ve sürtünme mekanizmalarının enerji yutması amacıyla entegre edildiği yeni

bir bağlantı sistemi önermektedir. Deneysel testlerde, sürtünme mekanizmalarının döngüsel yükleme altında stabil, tekrarlanabilir ve öngörülebilir bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Hem iç hem de dış SCFR bağlantılar üzerinde yapılan testler, bu sistemlerin büyük deformasyonlara dayanabildiğini, enerji yutma kapasitesinin yüksek olduğunu ve yapısal elemanlarda kalıcı deformasyon olmadan geri kazanım sağladığını göstermektedir. SCFR bağlantılar, kendiliğinden merkezlenme sınırını aşan durumlarda bile ani dayanım kaybı olmadan sünek bir davranış sergileyerek yapının genel dayanıklılığına katkı sağlamaktadır.

(Tsai vd., 2008) çalışmasında, kendiliğinden merkezlenen (self-centering) çelik kiriş-kolon moment bağlantılarında sürtünme cihazları kullanılarak yapılan yenilikçi bir tasarımın sismik performansını incelemektedir. Öngerilmeli (post-tensioned) çelik kirişlerin kolonlara bağlanmasında, sürtünme cihazlarının enerji yutma kapasitesini artırdığı ve yapının depremlerden sonra kalıcı ötelenme olmadan toparlanmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmada dört farklı sürtünme cihazı (FD) prototipi ile dört tam ölçekli kiriş-kolon birleşim alt grubu test edilmiştir. Testler sonucunda, sürtünme cihazlarının histeretik davranışının oldukça stabil olduğu, öngerilmeli kirişlerin belirgin bir şekilde enerji yutma kapasitesine sahip olduğu ve bağlantıların döngüsel deformasyon altında kalıcı deformasyona uğramadığı ortaya konmuştur. Bu tasarımın sismik performansı, öngerilmeli kirişlerin enerji yutucu cihazlarla birleşiminin yapının sünekliğini ve toparlanabilirliğini artırdığı sonucunu desteklemektedir.

(Iyama vd., 2009) çalışmasında, kendiliğinden merkezlenen (SC) moment dirençli çerçeve (MRF) sistemlerinde kullanılan alt flanş sürtünme cihazlarının (BFFD) sismik performansı araştırılmıştır. BFFD, çelik kiriş-kolon bağlantılarında enerji sönmüleyici olarak görev yapmakta ve döşemeye müdahale etmemesi için alt flanşa yerleştirilmektedir. Çalışmada, bu asimetric bağlantıların, pozitif ve negatif moment kapasiteleri arasındaki farklılıklar nedeniyle yapısal performansı nasıl etkilediği ele alınmıştır. Statik ve dinamik analiz sonuçları, BFFD kullanılan SC-MRF sistemlerinde kiriş üst flanşında daha yüksek inelastik gerilmeler oluştuğunu, bu nedenle burkulma riskinin arttığını göstermektedir. Bu durumun önlenmesi için üst flanşların daha uzun takviye plakalarıyla güçlendirilmesi önerilmiştir. Çalışma sonuçları, BFFD'lerin deprem

sonrası kalıcı deformasyonları azaltmada etkili olduğunu, ancak asimetrik davranıştan kaynaklanan yapı elemanlarına olan etkilerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

(Lin vd., 2013) çalışmasında, kendiliğinden merkezlenen (SC) çelik moment dirençli çerçeve (MRF) sistemlerinin tasarım depremi altında davranışını incelemektedir. Yüksek dayanımlı öngerilmeli çelik teller ile kolonlara bağlanan çelik kirişlerin, deprem etkisiyle oluşan açıklıkları kapatarak yapının başlangıç konumuna dönmesini sağladığı gözlemlenmiştir. Enerji yutucu cihaz olarak kullanılan kiriş-kolon bağlantı noktalarındaki sürtünme elemanları, depremler sırasında enerjiyi sönümleyerek hasarsız bir performans sağlamaktadır. Deneysel olarak dört katlı bir prototip yapı üzerinde gerçekleştirilen hibrid simülasyonlar, SC-MRF sistemlerinin, geleneksel kaynaklı çelik çerçeve (W-SMRF) yapılarla karşılaştırıldığında daha düşük kalıcı deformasyonlar ve daha yüksek toparlanma yeteneği sunduğunu göstermiştir. Çalışma, SC-MRF sistemlerinin tasarım depremi altında önemli bir hasar almadan ayakta kalabileceğini, bu nedenle yüksek performanslı deprem dayanıklılık sistemleri için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

(Erochko vd., 2013) çalışmasında, kendiliğinden merkezlenen enerji yutucu çapraz çerçevenin (SCED) tam ölçekli sarsma tablası testleri yapılmıştır. SCED çaprazları, çerçevenin kalıcı ötelenme yapmadan depreme dayanmasını sağlamıştır ve testlerde herhangi bir aşınma veya özellik kaybı gözlenmemiştir. Hem detaylı hem de basitleştirilmiş sayısal modeller, yapıdaki kat ötelenmeleri, kat kesme kuvvetleri ve kolon kuvvetleri gibi performans verilerini doğru bir şekilde tahmin etmiştir. Çalışmanın sonuçları, SCED çaprazlarının pratik mühendislik uygulamaları için yeterli doğrulukta performans sağladığını ortaya koymaktadır.

(Loo vd., 2014) çalışmasında, ahşap perde duvarların sismik performansını artırmak için sürtünmeli kayma bağlantıları içeren yenilikçi bir kaya hareketi (rocking) mekanizması test edilmiştir. Araştırmada, sürtünme eşik kuvveti sağlanana kadar yapı temelden yükselerek kaya hareketi sergilemiş ve bu sayede duvarın maksimum kuvvet seviyeleri sınırlandırılmıştır. Deneysel sonuçlar, bu bağlantıların süneklik ve elasto-plastik davranış kazandırarak duvarların hasar almadan deprem yüklerine karşı koyabildiğini göstermiştir.

Ayrıca, kendiliğinden merkezlenme potansiyelinin de yüksek olduğu bulunmuştur. Tasarlanan bağlantılar, 14 metre kayma hareketi gerçekleştirmesine rağmen performans kaybı göstermemiş ve bu bağlantıların dayanıklılığı kanıtlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, sismik yükler altında hasarı önlemeye yönelik yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

(Loo vd., 2014) çalışmasında, ahşap perde duvarlarında kullanılan sürtünmeli kayma bağlantılarının sismik performansa etkisini sayısal olarak incelemektedir. Geleneksel çivili bağlantılar yerine kullanılan bu kayma bağlantıları, belirli bir kuvvet eşiği aşıldığında çelik plakaların kaymasına izin vererek kesme duvarının ötelenmesini sağlar. Çalışmada elde edilen sonuçlar, sürtünmeli kayma bağlantılarının, ahşap duvarlarda kesme, çerçeve ve çivi bağlantılarını aşırı gerilmelerden ve deformasyonlardan koruduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu bağlantıların yüksek süneklik ve enerji sönümleme kapasitesi sunduğu, deprem sonrası kendiliğinden merkezlenme yeteneğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu yenilikçi tasarım yaklaşımı, duvar elemanlarını kalıcı hasarlardan koruyarak yapının dayanıklılığını artırmaktadır.

(Dal Lago vd., 2017) çalışmasında, hazır beton panellerin sismik dayanımını artırmak amacıyla geliştirilen sürtünme temelli enerji sönümleyici cihazlar (FBD'ler) incelenmiştir. Çalışma, dikey veya yatay paneller arasına yerleştirilen sürtünme cihazlarının, yapısal bütünlüğü sağlamada ve sismik yükler altında enerji yutma kapasitesini artırmada etkinliğini ortaya koymaktadır. Çalışmada tekli bağlantılar ve iki tam ölçekli panelden oluşan yapısal alt gruplarla yapılan deneysel testlerin sonuçları sunulmuştur. Testler, pirinç levha gibi malzeme seçimlerinin ve teknolojik bileşenlerin cihazın histeretik davranışını istikrarlı kılmada etkili olduğunu göstermektedir. Çalışmanın bulguları, tam ölçekli prototipler üzerinde yapılan döngüsel ve psödo-dinamik testlerle de desteklenmiş olup, FBD'lerin ön döküm yapılar üzerinde sismik performansı nasıl iyileştirdiğini detaylandırmaktadır.

(Hashemi vd., 2017) çalışmasında, yenilikçi Esnek Sürtünmeli Eklem (RSF) kullanılarak tasarlanan kaya hareketli çift duvar sistemlerinin sismik dayanımı araştırılmıştır. RSF eklemleri, duvarların birbirine bağlandığı veya çelik sınır kolonları ile olan bağlantılarında sünek bir bağlantı görevi görür. Sistem, kendiliğinden merkezlenme

yeteneği ile sismik enerji yutma kapasitesini birleştirerek, deprem sonrası hızlıca toparlanabilme özelliği sunar. Çalışmada, RSF eklemleri üzerinde gerçekleştirilen bileşen testleri ve sayısal analizler, RSF'nin döngüsel yükler altında stabil ve tekrar edilebilir bir performans gösterdiğini doğrulamıştır. RSF ile donatılmış duvar sisteminin, sismik yükler altında düşük hasarlı bir dayanım sunma potansiyeline sahip olduğu ve yüksek dayanıklılık gerektiren yapılar için uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

(Hashemi vd., 2019) alışmasında, Resilient Slip Friction Joint (RSFJ) olarak bilinen ve kendiliğinden merkezlenen düşük hasarlı bir gergi sisteminin sismik performansı incelenmiştir. RSFJ, enerji yutma ve kendiliğinden merkezlenme özelliklerini tek bir cihazda sunarak yapısal dayanıklılığı artırır. Tasarım konsepti, yüksek deprem taleplerinde dahi yapının ciddi hasar almadan hızlıca kullanılabilir duruma gelmesini sağlamak üzerine kuruludur. Özellikle RSFJ'nin içinde bulunan ikincil göçme önleyici sigorta mekanizması, tasarım yükünün üzerine çıkıldığında devreye girer ve cihazın esnekliğini artırarak aşırı yüklere karşı emniyet sağlar. Bu zellik, RSFJ'nin kendiliğinden merkezlenme davranışını sürdürerek büyük deformasyonları karşılamasına olanak tanır. Deneysel testler ve sayısal analizler, RSFJ'nin hem kk hem de büyük ölçekli yapılar için güvenilir bir sismik performans sağladığını ortaya koymaktadır.

(Bagheri vd., 2020) alışmasında, dayanıklı kayma-sürtünme eklemine (RSFJ) sahip yeni bir kendiliğinden merkezlenen tek yönlü gergi sisteminin sismik performansı incelenmiştir. RSFJ, tek yönlü olarak çalışmakta olup, enerji yutma kapasitesine sahip ve kalıcı ötelenme göstermeyen bir histeretik davranış sergilemektedir. Deneysel testlerde, tam ölçekli iki boyutlu bir elik ereve modeli kullanılarak, yaklaşık %5 yatay öteleme kapasitesine ulaşan deprem etkileri uygulanmıştır. Dinamik etkilerin sistem üzerinde kayma kuvvetini artırdığı, ancak maksimum kuvveti etkilemediği gözlemlenmiştir. Sayısal analizlerde, RSFJ'lerin geleneksel gergi sistemleri ile karşılaştırıldığında taban kesme kuvvetini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Bu alışma, RSFJ'li sistemlerin yeni yapılarda veya mevcut yapıların güçlendirilmesinde düşük hasarlı ve güvenilir zmler sunduğunu ortaya koymaktadır.

(Hashemi vd., 2020) çalışmasında, çelik çerçeveli yapıların deprem dayanımını artırmak amacıyla geliştirilmiş, Esnek Sürtüneli Kayma Bağlantıları (RSFJ) ile donatılmış yalnızca çekme dayanımlı gergi sistemleri için adım adım bir tasarım prosedürü önermektedir. Canterbury deprem dizisinden sonra sismik dayanıklı sistemlerin performansı göz önünde bulundurularak, düşük hasar konsepti doğrultusunda tasarım hedefleri belirlenmiştir. Çalışmada, RSFJ ile donatılmış beş katlı bir çelik yapı modeli, kapasite tasarımı prensiplerine uygun olarak boyutlandırılmış ve SAP2000 yazılımı ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, RSFJ bağlantılarının düşük hasar ve kendiliğinden merkezlenme davranışı sağladığını, kalıcı deformasyonları minimize ettiğini ve tekrar eden yükleme altında stabil bir performans sunduğunu göstermiştir. Bu araştırma, düşük hasar tasarım konsepti doğrultusunda yenilikçi bir sismik dayanım çözümü sunmaktadır.

(Hashemi vd., 2021) çalışmasında, sürtünme sönümleyici ile donatılmış çelik çerçevelerin, kendiliğinden merkezlenen (self-centering) dayanıklı tek yönlü gergi sistemleriyle entegre edilerek sismik performansının iyileştirilmesini ele alır. Geliştirilen konseptte, yüksek öneme sahip yapılarda sismik yüklerin karşılanabilmesi için katlar arası yanal ötelenmelerin kontrollü bir şekilde sınırlandırılması hedeflenmiştir. Çalışmada, dayanıklı tek yönlü gergi sistemi ile sürtünme sönümleyicili çelik çerçevelerin entegrasyonu adım adım uygulanarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, önerilen sistemin tasarım limitlerini sağladığını ve sismik dayanımı artırarak geleneksel sistemlere kıyasla kalıcı deformasyonları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu araştırma, düşük hasarlı tasarım hedeflerine ulaşmak amacıyla dayanıklı gergi sistemlerinin faydalarını ve kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

(Hashemi, 2023) çalışmasında, düşük hasarlı tasarım konsepti kapsamında, servis verebilirlik sınır durumu (SLS) ve aşırı dayanım mekanizmasının, kendiliğinden merkezlenen (self-centering) yapısal sistemlerin sismik performansı üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Yeni Zelanda standardına dayalı olarak, düşük hasarlı yapılar için iki sınır durumu olan SLS ve göçme sınır durumu (MCE) incelenmiştir. Özellikle, yanal yük taşıyan elemanların (örneğin çaprazlı çerçeveler ve sallanan duvarlar) performansı, doğrusal olmayan dinamik analizlerle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çaprazlı

çerçevelerin, sallanan duvarlara kıyasla daha küçük bir aşırı dayanım kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma ayrıca, tasarımcıların düşük hasarlı sistemlerin performansını optimize etmek için SLS ve MCE sınır durumlarını dikkate almaları gerektiğini vurgulamaktadır. Bu araştırma, mühendislerin kendiliğinden merkezlenen sistemler için daha verimli ve güvenilir tasarım çözümleri geliştirmelerine yardımcı olacak bulgular sunmaktadır.

2.2 İnce Cidarlı Kesitler

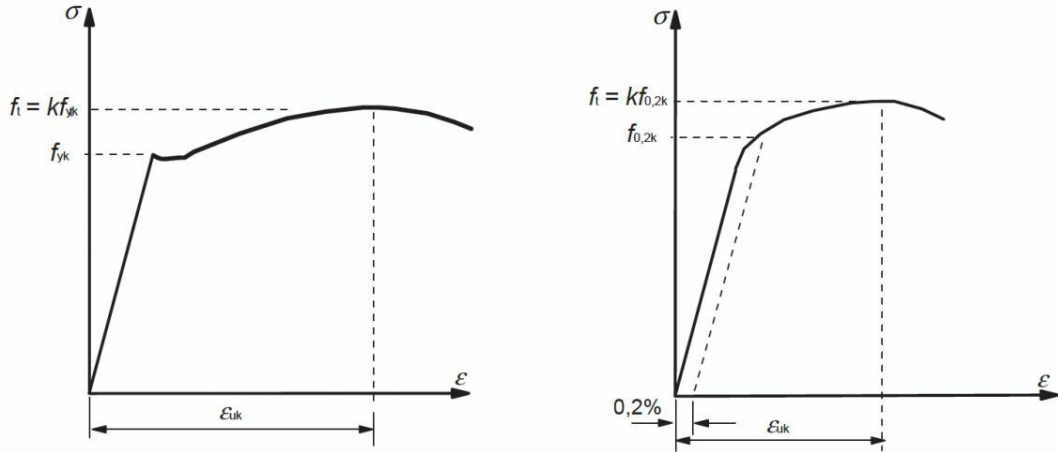
Modern yaşamın birçok alanında ince cidarlı soğuk şekillendirilmiş ürünlerin kullanımının artması, bu malzemelerin içecek kutularından yapısal taşıyıcı elemanlara kadar geniş bir yelpazede uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. İnce cidarlı soğuk şekillendirilmiş elemanlar, özellikle dayanım ve rijitlik açısından oldukça verimli olup, genellikle kalınlıkları 1-6 mm arasında değişen hafif yapılar olarak karşımıza çıkar. Bu elemanların kalınlıklarının 1 mm'den bile az olabilmesi, onları özellikle hafiflik gerektiren uygulamalarda tercih edilir kılmaktadır (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).

Yapısal elemanlar bağlamında, bu profiller sabit veya değişken, açık tip basit veya kompozit, kapalı tip ve kompozit formlarda olabilirler. Soğuk şekillendirme ile genellikle bir ekseninde veya noktada simetrik ve takviyeler ile güçlendirilmiş daha karmaşık profiller elde edilebilmektedir. Ancak, bu karmaşık profillerin tasarımında, mevcut yönetmeliklerin kapsamı dışında kalan sorunlarla karşılaşılabilir. Bu durumda, Sonlu Elemanlar Yöntemi gibi sayısal yöntemlerin kullanımı mümkündür, ancak yapısal formların ve çeşitli bağlantıların özellikleri nedeniyle modellemeyi zorlaştırabilir. Bu tür durumlar için birçok yönetmelik, analitik yöntemlerin yanı sıra deneysel yöntemlerin de uygulanmasını önermektedir (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).

Kullanılan çeliklerin akma sınırı genellikle 250-550 MPa arasında değişmekte olup, daha yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Soğuk şekillendirme prosedürüne uygun olan çelik türleri, aynı zamanda kaynak ve galvanizleme işlemleri için de uygun olmalıdır. Bu çelik türleri, akma sınırlarını ve çekme

dayanımlarını belirleyen Avrupa ve uluslararası yönetmeliklerle tanımlanmıştır (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).

Soğuk şekillendirilmiş ve sıcak şekillendirilmiş çelikler arasındaki temel fark, gerilme-şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde daha iyi gözlemlenebilir. Sıcak şekillendirilmiş çelik, kontrollü deformasyon altında çekme testleri ile belirli bir akma sınırına sahipken, soğuk şekillendirilmiş çelikte belirli bir akma sınırı bulunmamaktadır. Soğuk şekillendirilmiş çelik için geleneksel olarak %0,2 sınırı kullanılır; bu, herhangi bir boşaltmanın %0,2'lik bir kalıcı deformasyonla sonuçlanacağı gerilme anlamına gelir (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).



Şekil 2.1. Sıcak ve soğuk hadde çelik davranışı (Αδαμάκος & Adamakos, 2018)

İnce cidarlı profiller ve yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı, hesaplama süreçlerinde geleneksel çelik yapılarda karşılaşılmayan sorunları ortaya çıkarmaktadır. Stabilité problemleri, elemanların lokal burkulmaya karşı direncinin azalması nedeniyle çok daha sık görülür.

Soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin yapılarda kullanılması aşağıdaki avantajları sağlar (Αδαμάκος & Adamakos, 2018):

- Sıcak hadde çeliklere göre daha hafiftirler.
- Taşıma kapasitesi/ağırlık oranı açısından ekonomik olarak üretilen sıcak hadde çeliklere kıyasla daha karmaşık profil türleri elde etmeyi mümkün kılar.

- Saklama ve taşıma açısından sıcak hadde çeliklere göre daha pratiktirler.
- Taşıyıcı levhalar, sadece düzlemlerine dik değil, aynı zamanda düzlemleri içindeki kuvvetlere de dayanabilirler. Uygun şekilde biçimlendirildiklerinde diyafram olarak çalışabilirler.

Bu profillerin üretim süreci, büyük ölçüde lokal burkulma davranışlarını belirler. İlk olarak, çeliğin gerilme-şekil değiştirme diyagramını değiştirir. Soğuk şekillendirme süreci, başlangıçtaki malzemeye kıyasla akma gerilmesi sınırını artırır ve bazen flanşların ve köşelerin çekme mukavemeti artarken, basınç altındaki flanşların özellikleri değişmez (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).

Akma gerilmesi sınırındaki bu artış, malzemenin sertleşmesinden kaynaklanmakta olup, çeliğin kalitesine bağlıdır. Çekme mukavemetindeki artış ise, deformasyon nedeniyle malzemenin eskimesiyle ilişkilidir. Soğuk şekillendirilmiş profillerde artık gerilmeler genellikle eğilme kaynaklıdır ve burkulma mukavemetini fazla etkilemez (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).

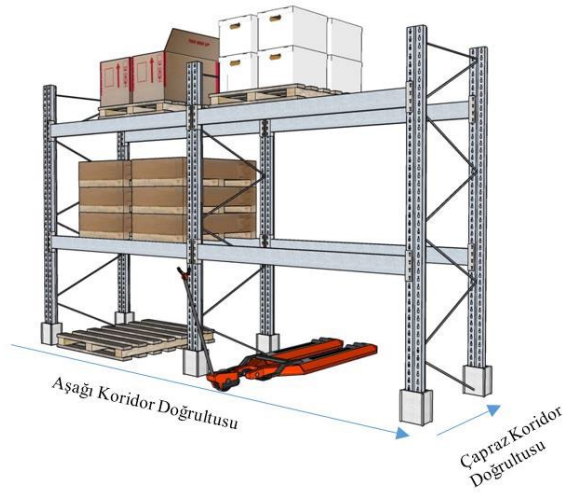
2.3 Raf Sistemler

Hafif çelik raf sistemler, endüstride paletler üzerinde yerleştirilmiş malzemelerin depolanması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılar, bağımsız olarak duran ve kendi başlarına yapı olarak işlev gören sistemlerdir. Raf sistemler, palet yüklerini taşıyacak ve forkliftlerin yerleştirme ve darbe kuvvetlerine karşı dayanacak şekilde tasarlanır. Yoğun şekilde yüklenirler ve rekabetçi endüstri koşullarında mümkün olduğunca hafif tasarlanırlar.

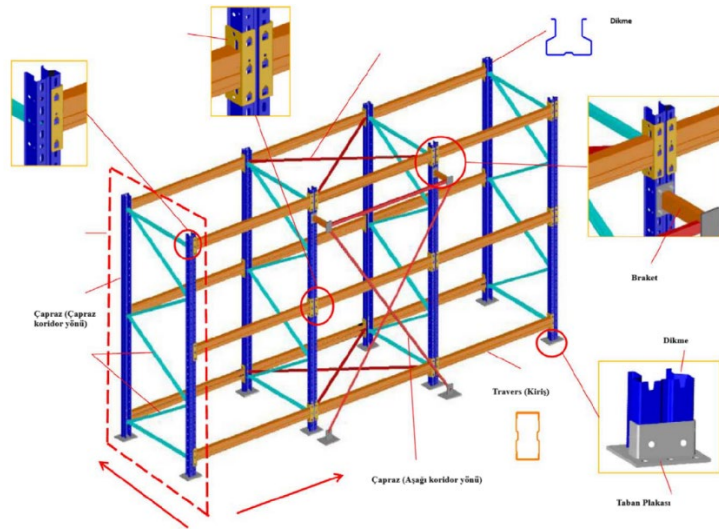
Raf yapıları tipik olarak kendi ağırlığı, palet yükleri, yangın yükleri, forkliftlerin neden olduğu darbe yükleri ve sismik kuvvetlere maruz kalır. Paletler, tüm raflar tamamen yüklendiğinde maksimum palet tasarım yükünü taşımak üzere tasarlanır. Depolanan malzemeler arasında, tehlikeli maddeler yangın gibi durumlarda ek sorunlar oluşturur. Deprem, forklift çarpmaları, aşırı yükleme gibi sorunlar ve sonuç olarak, çoğu göçme mekanizması kararsızlık etkilerinden kaynaklanır. Bu tür göçme mekanizmasının bir sonucu olarak, mal kaybının ekonomik boyutunun yanında, depolanan malların saçılması

sonucu kimyasal vb. sonuçlar doğrudan insan sağlığını etkileyebilmektedir (Αδαμάκος & Adamakos, 2018).

Raf sistemlerinde plan düzleminde iki farklı doğrultu tanımlanır: aşağı koridor doğrultusu ve çapraz koridor doğrultusu. Raf sistemleri; dikmeler, kirişler (traversler), plan çaprazları ve taşıyıcı çapraz elemanlardan oluşur. Raf sistem doğrultuları Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.2. Raf sistemlerin doğrultuları (Haberdar, 2023)

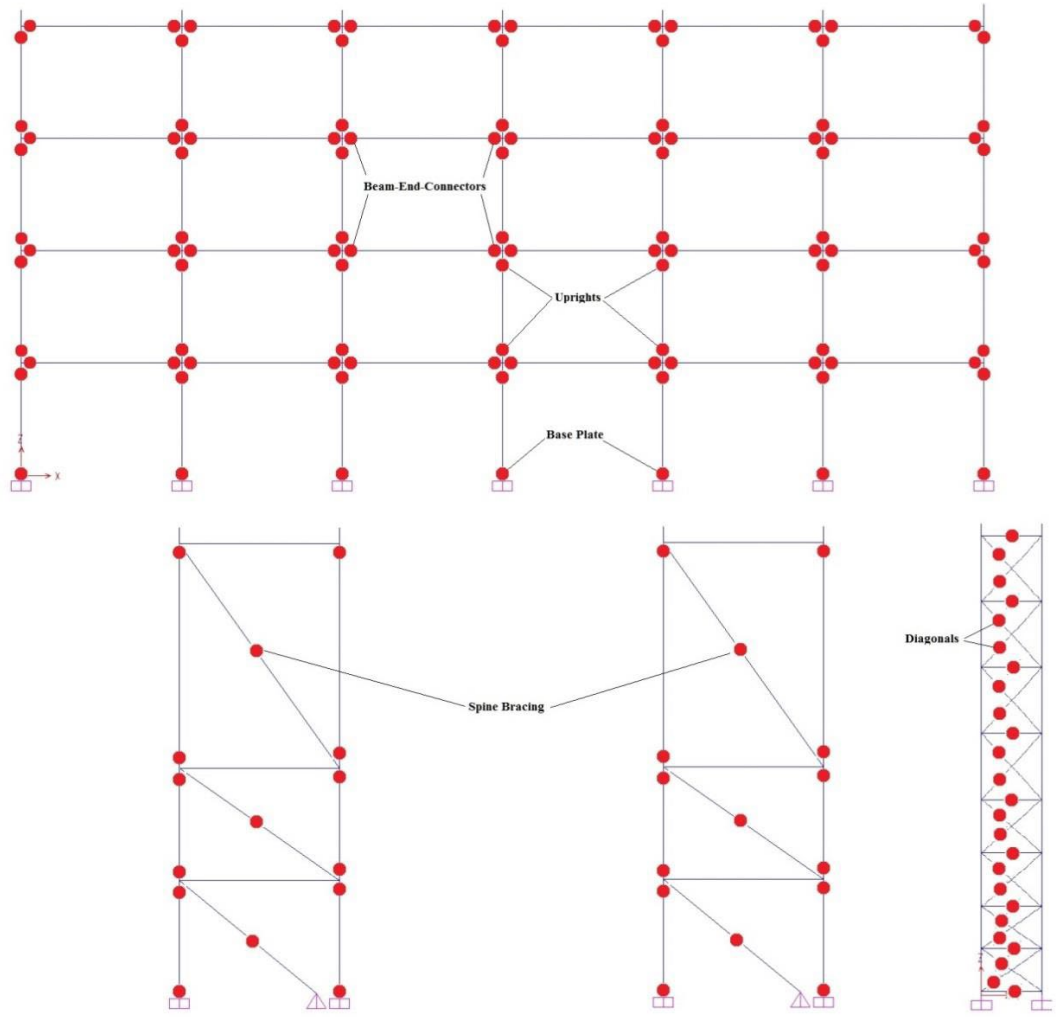


Şekil 2.3. Tipik Raf Sistem (Yin vd., 2018)

2.4 Raf Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış

Sismik etkiler altında raf sistemlerin davranışını inceleyebilmek için raf sistemlerini oluşturan bileşenler detaylıca incelenecektir. Bu bölümde raf sistemlerde sismik yükler altında doğrusal olmayan davranış beklenen eleman veya birleşim bölgeleri detaylıca ele alınmaktadır.

Raf sistemlerindeki profillerin genellikle soğuk şekillendirilmiş ve/veya ince cidarlı olduğu, bu nedenle plastik özelliklerinin gelişemediği unutulmamalıdır. Bu nedenle, "inelastik" terimi bundan sonra, uygulanabilir olması durumunda elemanların gerçek plastik özelliklerine (akma) veya (daha olası olarak) lokal deformasyonlar veya lokal burkulma sonucu ortaya çıkan eşdeğer doğrusal olmama durumuna atıfta bulunmaktadır. Her bir elemanın inelastik özellikleri yazılıma ya doğrusal olmayan yay elemanları kullanılarak ya da elemanların uç noktalarına (kiriş elemanları için) veya orta noktalarına (makas elemanları için) doğrudan plastik mafsallar yerleştirilerek tanımlanmaktadır. (Αδαμάκοϋ & Adamakos, 2018)



Şekil 2.4. Raf Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış Beklenen Bölgeler (Αδαμάκοϋ & Adamakos, 2018)

Raf sistemlerde doğrusal olmayan analizlerde doğrusal olmayan davranışın beklendiği bölgeler Şekil 2.4'te verilmiştir. Burada kırmızı renk, doğrusal olmayan davranışın beklendiği kesitlerin yığılı plastik model gösterimidir. Doğrusal olmayan davranış; kiriş-dikme birleşim bölgesinde, çapraz elemanlarda, taban plakalarında ve dikmelerde beklenmektedir.

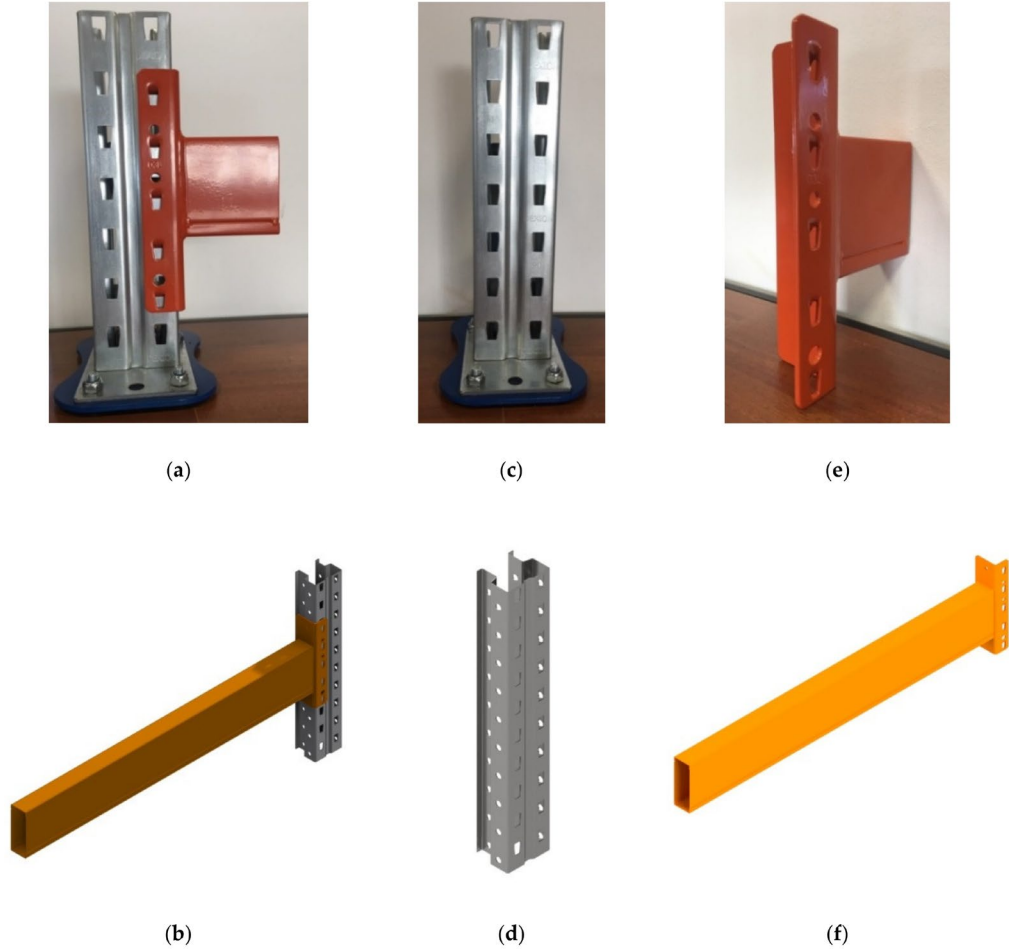
Kiriş-dikme birleşimi ve dikme-taban plakası birleşimi yarı rijit birleşimdir. Aşağıda bu yarı rijit birleşim ve doğrusal olmayan davranış beklenen elemanların doğrusal olmayan davranışı detaylı olarak incelenmiştir.

2.4.1 Kiriş-Dikme Birleşimi

Tipik bir palet rafının yapısal elemanları, genellikle gövde ve/veya başlık boyunca delikli soğuk şekillendirilmiş çelik dikmeler ve genellikle dikdörtgen veya dikdörtgen olmayan kutular şeklinde soğuk şekillendirilmiş çelik kaynaklı kirişlerden oluşur. Kirişler, kirişlerin uçlarına önceden kaynaklanmış olan uç bağlantı elemanları ile dikmelere bağlanır. Konektör tırnakları, dikmenin deliklerine yerleştirilir ve kiriş, dikmeye bağlanmak için aşağı doğru itilerek oturtulur. Ayrıca, bir kaldırma kuvveti varlığında uç bağlantı elemanının dikmeden çekilmesini önlemek için genellikle bir kilitleme pimi (emniyet cihazı) kullanılır (Zhao vd., 2014).

Ticari olarak temin edilebilen kiriş uç bağlantı elemanları, farklı şekil ve boyutlarda gelir ve tasarımı (Markazi vd., 1997) tarafından şu şekilde sınıflandırılmıştır: Sınıf (A) — dil ve yuva tasarımı. Bu tasarımda, uç bağlantı braketi (dil) üzerindeki konsol tırnağı şekillendirilip delinir ve bağlantıyı oluşturmak için dikme yuvalarına kaydırılır. Sınıf (B) — boşaltma tasarımı. Bu sınıf tasarımda, bir boşaltma işlemi, dikmenin tasarımına bağlı olarak, uç bağlantı tırnaklarını üretir ve bunlar dikmenin ağzına paralel veya dik olarak kilitlenir. Sınıf (C) — sap dahil tasarım. Sınıf (A) dil ve yuva tasarımında kullanılan tırnakların yerini saplar alır. Saplar, uç bağlantı braketi üzerindeki önceden delinmiş deliklere presle oturtulur. Sınıf (D) — çift bütünleşmiş tırnak tasarımı. Tırnaklar, bağlantı braketi üzerindeki iki noktada birleştirilecek şekilde şekillendirilip delinir.

Tipik bir kiriş-dikme bağlantısı ve elemanları Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



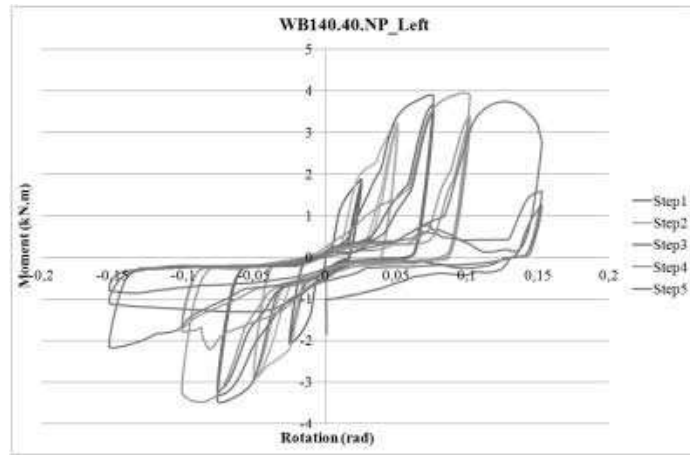
Şekil 2.5. Test edilen bağlantıların ana elemanları: (a,b) dikme-konektör-kiriş montajı, (c,d) dikme, (e,f) kaynaklı kiriş ucu konektörüne sahip kiriş.(Dumbrava & Cerbu, 2020)

Kiriş-dikme birleşimi, daha önce de belirtildiği gibi, yarı rijit bir birleşimdir. Bu birleşimin dayanımını etkileyen parametreleri belirlemek ve başlangıç rijitliğinin analitik olarak hesaplayabilmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. (Zhao, Dai, vd., 2017, Gusella vd., 2019; Rasmussen vd., 2019.; Zhu vd., 2019). (Zhao, Dai, vd., 2017) birleşim bölgesinin rijitliğini belirleyen unsurları: tırnakların eğilmesi ve kesmesi, bulonların veya tırnakların yatakların ezilmesi, kaynak kırılması, travers flanşının ezilmesi, konektörün traversin ötesindeki kısmının eğilmesi ve kolon gövdesinin kesilmesi olarak belirlemiştir.

Avustralya Standardı AS 4084, Raf Üreticileri Enstitüsü (RMI) yönetmeliği ve Avrupa Standardı EN 15512 gibi uluslararası depolama raf sistemi tasarım yönetmelikleri, dikme-

kiriş bağlantısının gerçekçi eğilme özelliklerini elde etmek için deneyler yapmayı önermektedir (Zhao, Dai, vd., 2017).

Tipik bir kiriş-dikme birleşiminin moment-dönme ilişkisi Şekil 2.6’da verilmiştir.

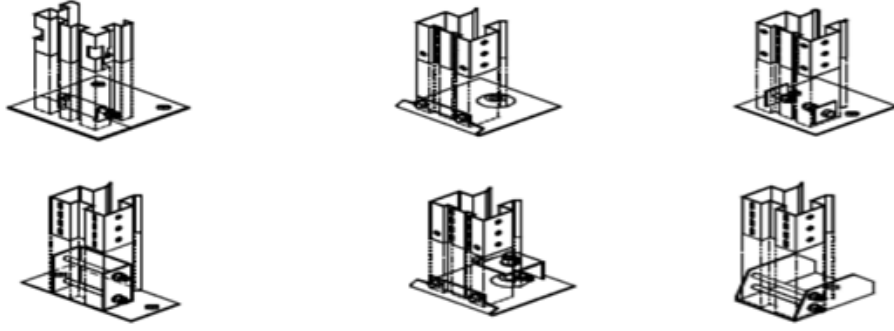


Şekil 2.6. Çevrimsel yükleme altında tipik bir kiriş-dikme birleşiminin moment-dönme davranışı (Kadi vd., 2017)

2.4.2 Taban Plakası- Dikme Bağlantısı

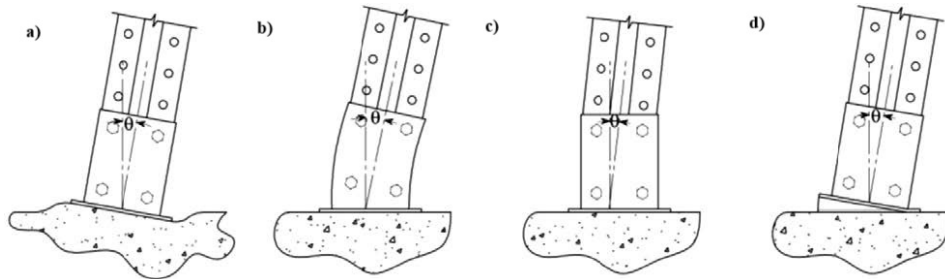
Yapısal açıdan bakıldığında, hafif çelik raf sistemler yarı rijit bağlantılara sahip hafif çelik çerçevesel yapılar olarak kabul edilir ve ikincil mertebeye etkilere oldukça duyarlıdır. Çapraz koridor yönünde, çerçeve stabilitesi diyagonal sistemleri ile sağlanırken, aşağı koridor yönündeki alt çerçeve, palet girişini dikmeye bağlayan yarı rijit kiriş uç bağlantıları ve zemine ankrajlı taban plaka montajları tarafından yaratılan önemli bir yedeklilik ile karakterize edilir (Romeo vd., 2023). Ancak, kiriş uç bağlantısı tarafından sağlanan rijitlik oldukça sınırlı olabileceğinden, taban plaka montajının rijitliği, çelik rafın genel stabilitesi ve ikincil mertebeye etkilerinin kısıtlanması üzerinde kritik bir etkiye sahiptir (Bernuzzi & Castiglioni, 2001). Ayrıca, taban plakasının moment kapasitesi, bir deprem sırasında raf sistemin çökme riskini azaltarak sismik kuvvetlerin azaltılmasına yardımcı olabilir. Sonuç olarak, dikmeyi zemine bağlayan iyi tasarlanmış bir taban plaka bağlantısı, tüm yapının hem rijitliği hem de moment kapasitesi açısından avantajlar sunar. Tipik

olarak, dikme kesiti ya civatalarla ya da sekmeler aracılığıyla taban plakasına bağlanabilir ve genellikle zemin ankrajları önceden kurulmuş mekanik bağlantı elemanları veya yapışkan ankrajlar kullanılarak yapılır (Gilbert & Rasmussen, 2011). Taban plakası bağlantı örnekleri Şekil 2.7’de verilmiştir.



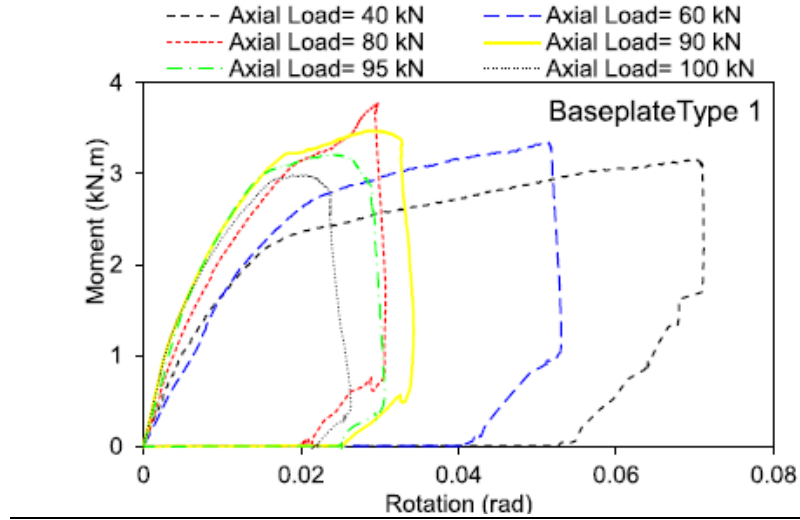
Şekil 2.7. Taban plakası kesitleri (Baldassino & Zandonini, 2008)

Taban plakası bağlantısı uygulanan bir momente maruz kaldığında, deformasyon dört ana bileşene ayrılabilir. Bu deformasyonların her biri, dikmenin toplam dönüşüne katkıda bulunur ve aynı anda belirgin olmayabilir. Taban plakasının altındaki beton blok lokal olarak deforme olur (Şekil 2.8(a)), taban plaka montajının braketleri eğilir (Şekil 2.8(b)), dikme taban plaka montajına göre bükülür ve döner (Şekil 2.8(c)) ve taban plakada bir kombinasyon olarak eğilme ve akma hatları oluşarak, taban plakanın üzerindeki montajın rijit bir cisim olarak dönmesine izin verir (Şekil 2.8(d)) (Gilbert & Rasmussen, 2011)



Şekil 2.8. Taban plakası dönme bileşenleri (Gilbert & Rasmussen, 2011)

Farklı ankraj düzenlemelerinin farklı taban plaka davranışlarına yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, taban plaka bağlantılarının rijitliği ve moment kapasitesi, eksenel basınç yüklerinin büyüklüğünden etkilenmektedir (Firouzianhaj vd., 2022). Aynı taban plakasının farklı eksenel basınç kuvveti altında moment-dönme değerleri Şekil 2.9'da verilmiştir.



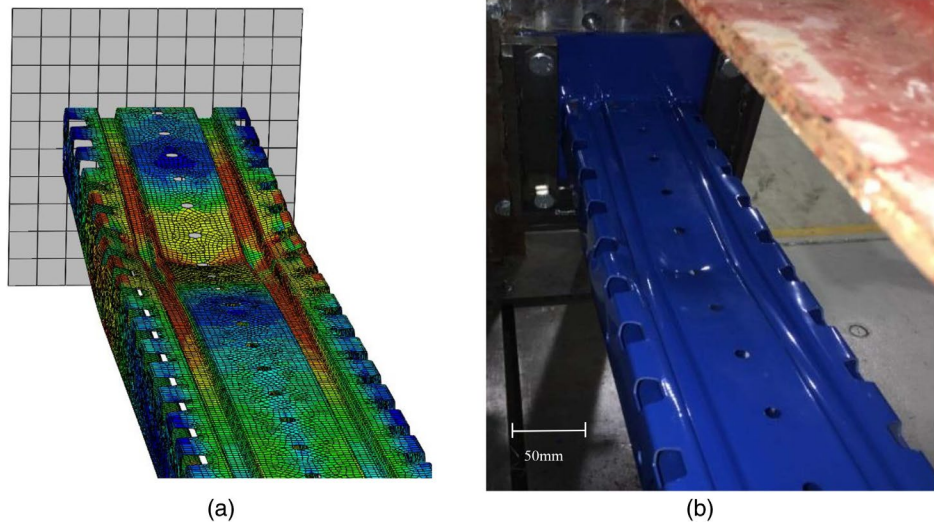
Şekil 2.9. Basınç kuvvetleri altında taban plakası moment-dönme davranışı (Firouzianhaj vd., 2022)

2.4.3 Dikmelerin Davranışı

Raf sistemlerde kullanılan dikmeler, ince cidarlı soğukta şekillendirilmiş, boşluklu ve narin kesitlerdir. Kesitin taşıma kapasitesi hesapları geleneksel çelik yapılardan farklıdır. Lokal burkulma riski nedeniyle, soğuk şekillendirilmiş profiller genellikle kategori/sınıf 4'e (hatta bazen 3'e) ait kesitlere sahiptir. Bunun dışında, soğuk şekillendirilmiş malzemelerin sünekliği üretim prosedürleri nedeniyle azalır, bu nedenle plastik tasarıma izin verilmez. İnelastik kapasite çok sınırlıdır. Ancak Yönetmelikler, eğilme altındaki elemanlarda çekme inelastik kapasitesi ile ilgili olarak bir tolerans payı tanınmasına izin vermektedir (Αδαμάκοç & Adamakos, 2018).

Bu elemanlar genellikle aksenal yük ve momente maruz kaldıklarından, kesitlerin inceliği ve açıklığı nedeniyle burkulma arızalarına yol açabilirler. Geleneksel olarak üç tür burkulma ayırt edilir: lokal burkulma, distorsiyonel burkulma ve genel burkulma. Her burkulma modu, farklı bir sonrası burkulma davranışı sergiler. Bu durum, soğuk şekillendirilmiş yapıların tasarımında dikkate alınmalıdır ve günümüzde neredeyse her çelik yönetmeliği, lokal, distorsiyonel ve global burkulma fenomenlerini ve bunların karşılıklı etkileşimlerini göz önünde bulunduran rafine tasarım yaklaşımları önermektedir. Ancak, piyasada bulunan çok sayıda kesit şekli ve delik düzeni nedeniyle, birçok yönetmelik, tasarımı desteklemek için laboratuvar testlerinin yapılmasını önermektedir (Bertocci vd., 2017).

Palet kirişleri tarafından taşınan yükler, yarı rijit bağlantılar aracılığıyla dikmelere iletilir. Yükler simetrik olarak dağıldığında, dikme saf basınç altında çalışır. Ancak, yükleme şeması asimetrik olduğunda, dikme basınç ve eğilme momentine maruz kalır. Saf aksenal yük durumu raf tasarım pratiğinde son derece nadirdir ve genellikle kafeslerin doğrulanması ile ilişkilidir. Dikmelerle ilgili olarak, aksenal yükün katkısına ek olarak, kesitlerin ana eksenleri boyunca eğilme momentlerinin varlığını dikkate almak da temel öneme sahiptir (Bonada vd., 2016).



Şekil 2.10. Lokal burkulma örneği (Talebian vd., 2020)

Lokal burkulmanın bir örneği Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekil 2.10'da sırasıyla a ve b, sonlu elemanları yöntemi kullanılan paket programla çözülmüş analiz sonucu, deney sonucu olarak verilmiştir.

2.4.4 Çaprazların Davranışı

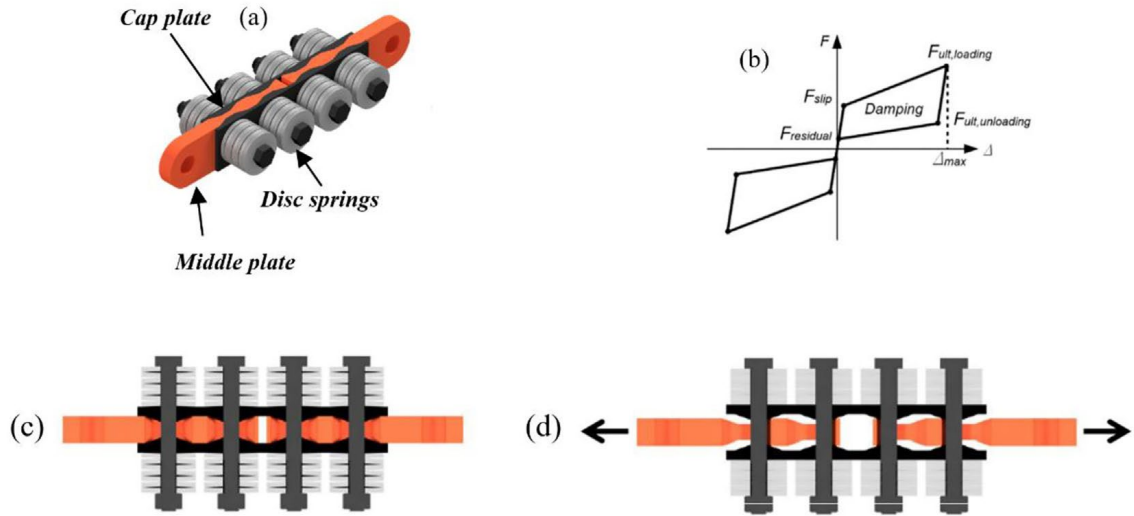
Diyagonaller ve omurga (sırt, arka, bel) çaprazlama elemanları, mafsallar aracılığıyla plastik özellikleri tanımlanan çapraz elemanlarıdır (eksenel kuvvet vs. ekseneel yer değiştirme). Bir diyagonal eleman, burkulma (basınç altında) ve/veya akma (çekme altında) nedeniyle ya da bağlantı hatası nedeniyle hasar görebilir. Burkulma, özel montajların potansiyel eksantriklikleri nedeniyle ekseneel kuvvetler ve ikincil eğilme momentleri altında dikme çerçevelerinin diyagonallerinde meydana gelir. Akma ise çekme altındaki elemanların akma gerilmesine ulaştığında gerçekleşir. Bağlantı hatası, genellikle bulonlu bağlantılar, bağlantılardaki kuvvetlerin bağlantı elemanlarının taşıma kapasitesini ve/veya bulonların kesme dayanımını aştığında meydana gelir. Bazen birden fazla hasar mekanizması bir arada bulunabilir; bu durum, tüm hasar mekanizmasını iyi bir şekilde tanımlamak için daha karmaşık bir analiz gerektirir. Son olarak, doğrudan normlarla tanımlanmayan bağlantı detayları vardır ve bu nedenle montajların kesin davranışını belirlemek için sonlu elemanlar yazılımı ile sayısal analizler yapılması şiddetle tavsiye edilir.(Αδαμάκοϋ & Adamakos, 2018)

2.4.5 Kirişlerin Davranışı

Teorik olarak palet kirişleri de sistem için potansiyel doğrusal olmama durumu olabilir; ancak, eğilme kapasiteleri kiriş ucu bağlantı elemanlarına kıyasla daha yüksek olduğundan, modeli basitleştirmek amacıyla ihmal edilebilirler. Bu durum, kirişlerin eğilme ve burulma kapasiteleri açısından yeterli şekilde tasarlanmış olduğunu ve tipik boş palet-kiriş kesitlerinin imalatında kullanılan bileşen-kesitler arasındaki kaynakların yeterliliğini varsayar (Αδαμάκοϋ & Adamakos, 2018).

2.5 Kendiliğinden Merkezli Sürtünme Esaslı Sönümleyiciler

Geleneksel yanal yük taşıyan yapısal çelik sistemler, genellikle yapı elemanlarında hasar meydana gelmesini gerektirdiğinden, şiddetli depremler sonrası önemli ekonomik kayıplara ve uzun süreli iş kesintilerine yol açabilmektedir. Bu bağlamda, düşük hasarlı kendiliğinden merkezlenme sistemlerine duyulan ihtiyaç artmıştır (Hashemi vd., 2017). (Hashemi vd., 2017) tarafından geliştirilen Esnek Sürtünmeli Kayma Bağlantıları (RSF), hem enerji yutma hem de kendiliğinden merkezlenme davranışlarını tek bir kompakt cihazda birleştirerek bu ihtiyaca yanıt vermektedir. RSF bağlantıları, düz çelik plakaların birbirleri üzerinde kaymasıyla çalışmakta ve özel olarak şekillendirilmiş oluklar ile Belleville yayları kullanılarak istenilen kendiliğinden merkezlenme davranışını sağlamaktadır. Bu yenilikçi bağlantılar, geleneksel sürtünme bağlantılarından farklı olarak, deprem sonrası yapının başlangıç pozisyonuna dönmesini sağlamak için ek sistemlere ihtiyaç duymazlar (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Esnek Sürtünmeli Kayma Bağlantıları (RSFJ) (Hashemi vd., 2020)

Şekilde (a) montaj, (b) histerik eğri, (c) dinlenme durumundaki bağlantı ve (d) maksimum sapmadaki bağlantı gösterilmektedir.

Söz konusu sönümleyicilerin histerik eğrisi bayrak şeklini anımsattığı için bu histerik eğriye “bayrak şekilli eğri” denmektedir (Şekil 2.11(b)).

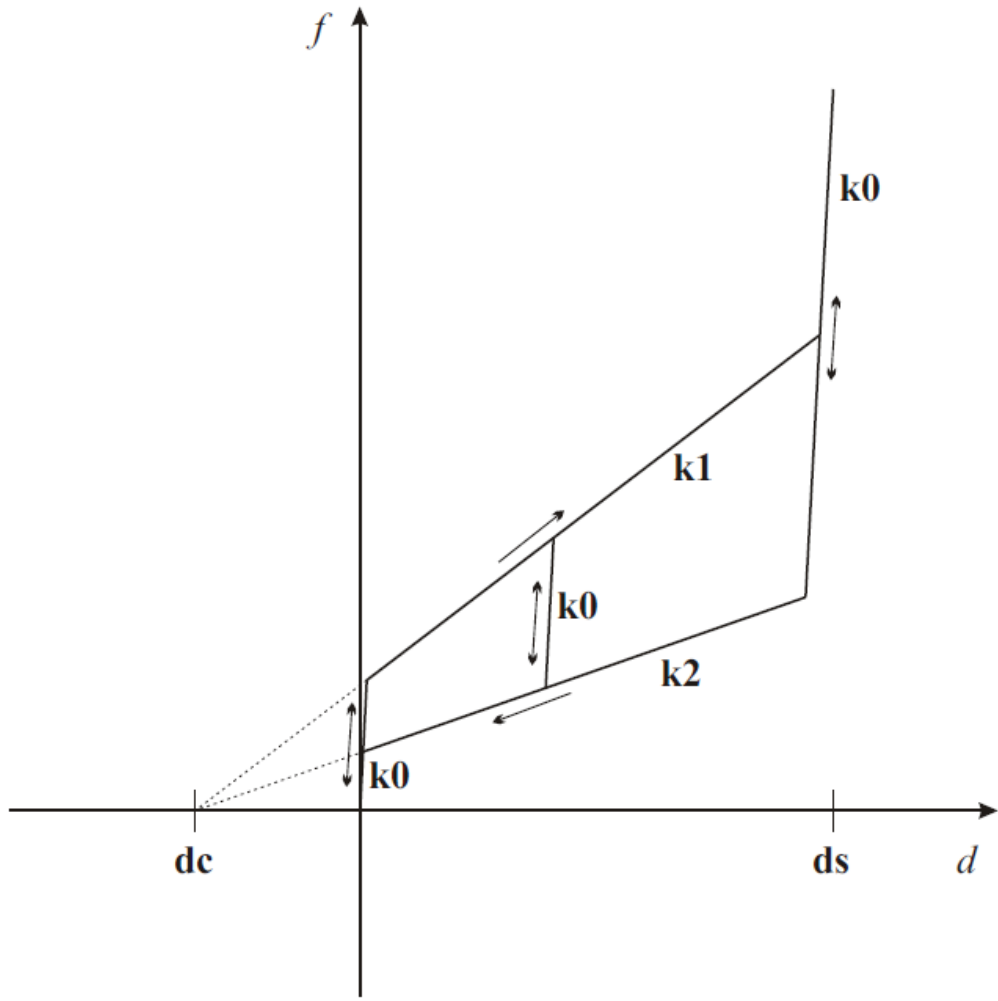
2.5.1 Kendiliğinden Merkezli Sürtünme Esaslı Sönümleyici Tanımlanması

Sap2000 manuel dokümanında kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyicilerin modellenmesi için “Damper-Friction Spring” modeli tanımlanmaktadır.

Tez kapsamında sürtünme esaslı sönümleyiciler koridor aşağı doğrultudaki sadece çekme kuvvetine çalışan çapraz elemanlara bağlı olacaktır. Verilecek tanımlar da çapraz elemanlar için geçerli olan tanımlardır.

Sap2000 programında kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyici tanımlayabilmek için Şekil 9’de gösterilen parametrelerin girilmesi gerekmektedir.

Şekil 2.12’de k_0 , başlangıç eğimidir. Sürtünme esaslı sönümleyicide kayma meydana gelmeden önce çapraz elemanın aksenal rijitliğidir. k_1 , yükleme eğimidir. Sürtünme esaslı sönümleyicide kayma meydana geldiği andan maksimum kapasiteye ulaşana kadarki eğimdir. Sistem tersine yüklendiğinde kuvvet deplasman ilişkisinin eğimi tekrar k_0 eğimidir. Sistem tersine yüklenmeye başlandığı anda sürtünme esaslı sönümleyicide kayma sürtünme kuvveti aşılanaya kadar sistem tekrar k_0 eğimi ile tepki verecektir. Kayma gerçekleştikten sonra k_1 eğiminden küçük k_2 , boşaltma eğimi, ile tepki verecektir. d_s , maksimum deplasman, sistemin ulaşabileceği maksimum deplasmandır. Burada unutulmaması gereken önemli bir detay, d_s değerinin maksimum sürtünme mesafesine değil, elemanın yapacağı toplam deplasmandır. D_s değeri sıfır girildiğinde sistem sonsuza kadar deplasman yapabilmektedir. d_c , ön basınç sıkıştırma değeridir.



Şekil 2.12. Kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyici histerik davranışı

Sap2000 de “Damper-Friction Spring” model, yalnızca basınç kuvvetlerinde veya yalnızca çekme kuvvetlerinde aktif olabileceği gibi her iki kuvvette de aktif olacak şekilde tanımlanabilmektedir.

3 MATERYAL ve YÖNTEM

Tez kapsamında toplamda dört model oluşturulmuştur. Bunlardan birincisi tasarım depreminde doğrusal elastik davranacak olan, sadece çekmeye çalışan çaprazlı sistemdir. Diğer üçü farklı F_{slip}/F_{ult} oranına sahip, sırasıyla; 0.20, 0.50 ve 0.80 sadece çekmeye çalışan çaprazların uçlarına bayrak şekilli histerik eğriye sahip, kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyici montajlanan sistemdir.

Sürtünme esaslı sönümleyici tasarımı, görelî kat ötelemeleri (θ_i) %2,00 değerini aşmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Raf sistemlerine statik itme (pushover) analizi uygulanmıştır. Bu analiz kapsamında, raf sisteminin görelî kat öteleme sınırlarını aşp aşmadığı ve sürtünme esaslı sönümleyicilerin kapasitelerini aşp aşmadığı kontrol edilmiştir.

Sürtünme esaslı sönümleyiciye sahip yalnızca çekme çaprazlı taşıyıcı sistemin deprem yükü azaltma katsayısı (R_a), iteratif bir yöntemle belirlenmiştir. Bu kapsamda, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

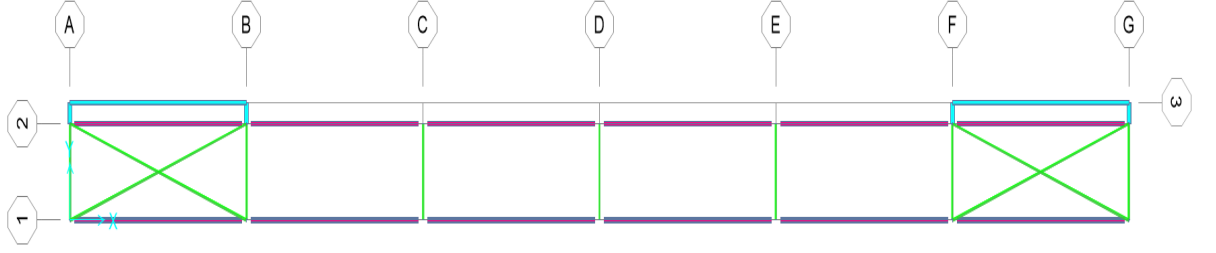
Dört farklı model, SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulmuştur. Deprem yükü, TBDY 2018'de tanımlanan eşdeğer deprem yükü yöntemiyle hesaplanmıştır. Aşağı koridor doğrultusunda, doğrusal olmayan tek modlu statik itme analizi (pushover) ve TBDY 2018 yönetmeliğine uygun olarak seçilen ve ölçeklendirilen 11 deprem kaydı kullanılarak, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerin sonucunda, sönümleyiciler haricindeki taşıyıcı elemanların doğrusal elastik davranış sergileyip sergilemediği kontrol edilmiştir.

3.1 Sistem Tanım ve Parametreleri

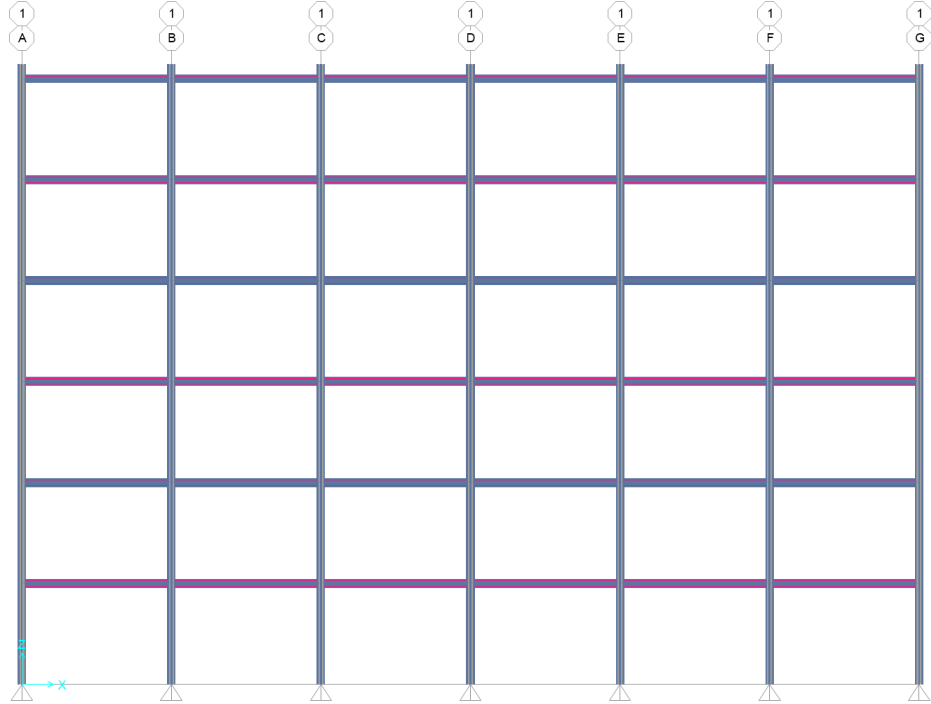
3.1.1 Taşıyıcı Sistem Geometrisi

Bu çalışmada dikkate alınan Raf sistemi, 6 açıklık ve 6 kattan oluşmaktadır. Açıkların tamamı eşit ve 2.7m uzunluktadır. Kat yüksekliği tüm katlarda eşit ve 1.82m

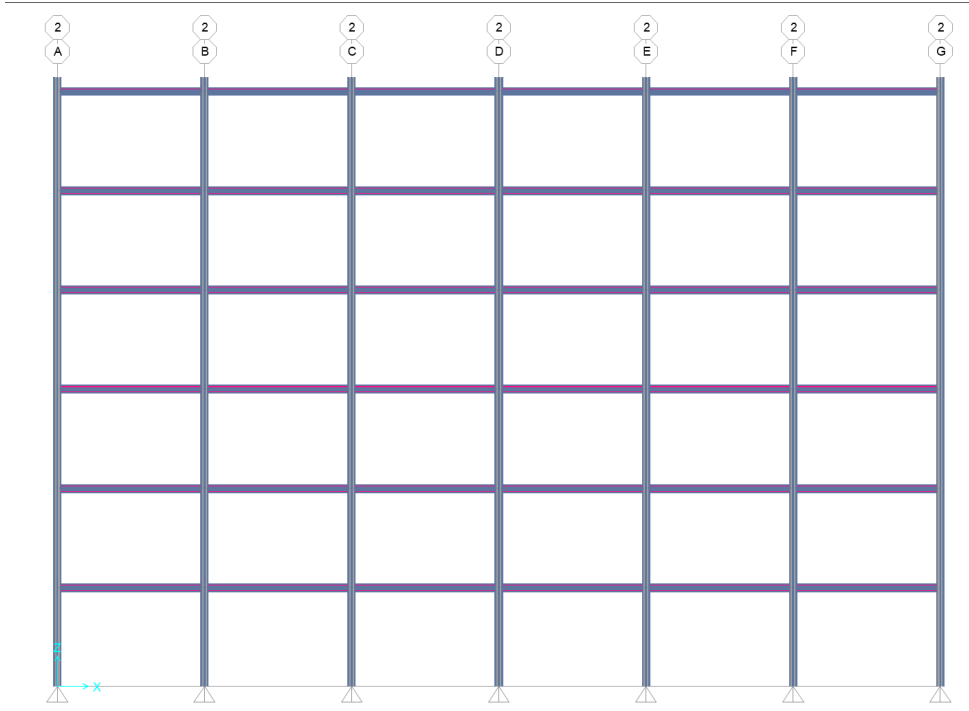
uzunluktadır. Raf sistemi yatayda 3 (1, 2, 3), dikeyde 7 (A, B, C, D, E, F, G) akstan oluşmaktadır. Sistemin plan görüntüsü Şekil 3.2’de, 1 Aksı Şekil 3.3’te, 2 Aksı Şekil 3.4’de, 3 Aksı Şekil 3.5’te ve çapraz koridor yönündeki diyagonalleri gösteren A aksı Şekil 3.6’da verilmiştir. Çapraz koridor yönünde kat yüksekliği boyunca 2 adet x çapraz kullanılmıştır. A, B, C, D, E, F, G akslarında diyagonal sistemi birbirinin aynısıdır.



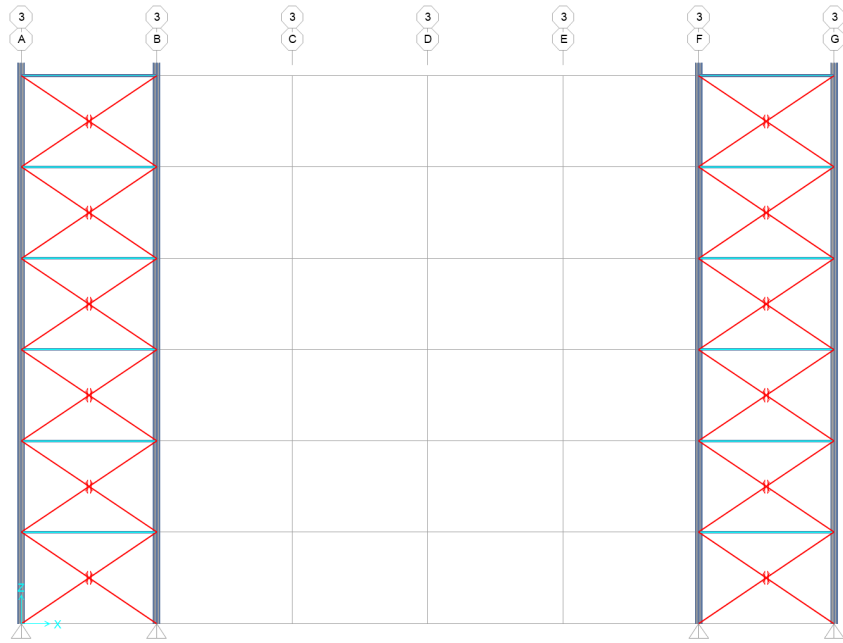
Şekil 3.1. Plan görüntüsü



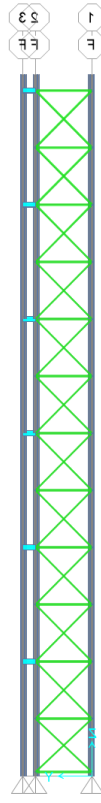
Şekil 3.2. 1 Aksı görüntüsü



Şekil 3.3. 2 Aksı görüntüsü

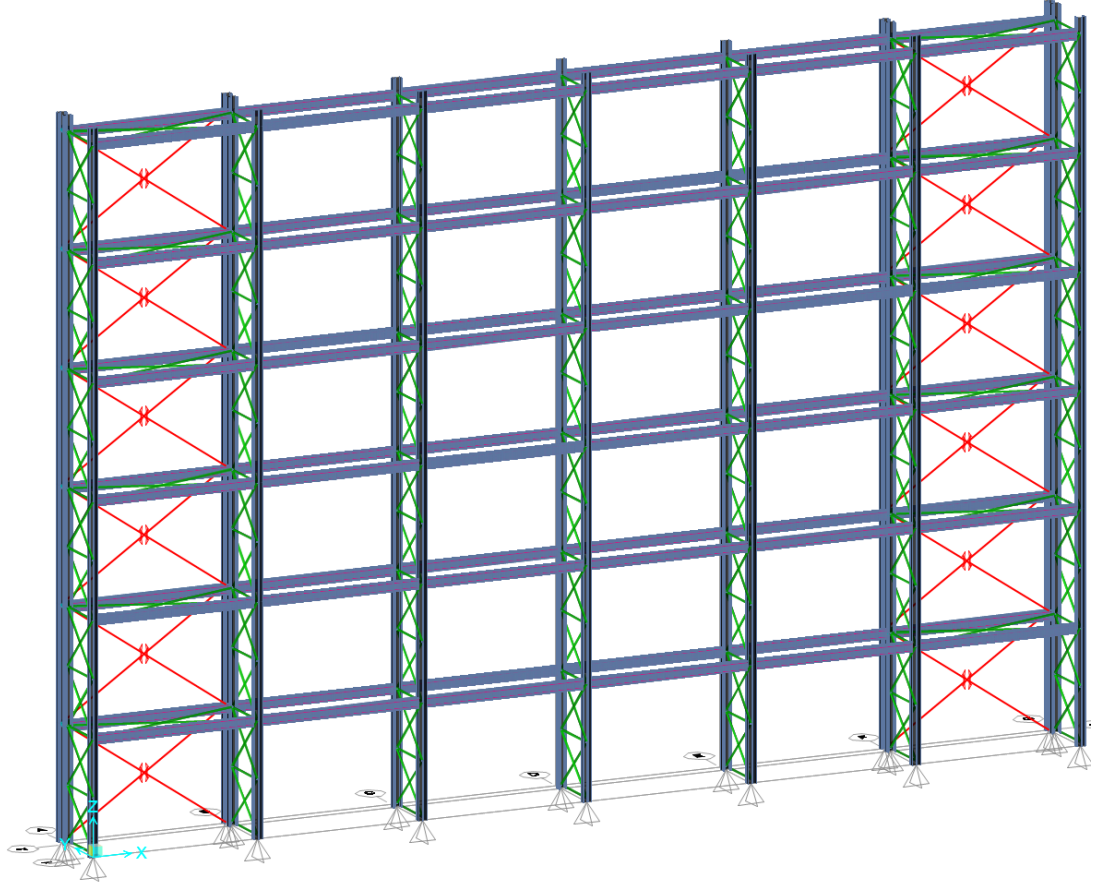


Şekil 3.4. 3 Aksı görüntüsü



Şekil 3.5. A aksı görüntüsü

Modelin üç boyutlu görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Modelin üç boyutlu görünümü

3.1.2 Yükle

Siteme düşey olarak elemanların kendi ağırlıkları (DEAD) ve palet yükleri (PL) etki etmektedir. Elemanların ağırlıkları Sap2000 programı tarafından hesaplanacak şekilde tanımlanmıştır Modelde açıklık başına 3 adet palet olacağı ve paletlerin ağırlıklarının 10kN olacağı kabul edilmiştir. Palet yükleri kirişlere düzgün yayılı yük olarak tanımlanmıştır. Bu durumda kirişlere gelen palet yükleri; $(10 / 2) \text{ kN} \times 3 / 2.7 \text{ m} = 5.556 \text{ kN/m}$ olarak hesaplanmıştır.

Raf sistemine etkiyen toplam düşey yükler, Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Raf sistemine etkiyen toplam düşey yükler

Yük Halleri	Tek girişli Sistem
DEAD	34 kN
Palet	1080 kN

3.1.3 Kütle Tanımı

Deprem yükü hesaplamasında kullanılacak toplam ağırlık, sabit yük ve palet yükünden oluşmaktadır. Hareketli yük katılım katsayısı (n) 1 olarak alınmıştır. Toplam ağırlık, $W = G + PL$ olarak tanımlanmıştır. Hesaplanan toplam ağırlık, Çizelge 3.2’de verilmiştir.

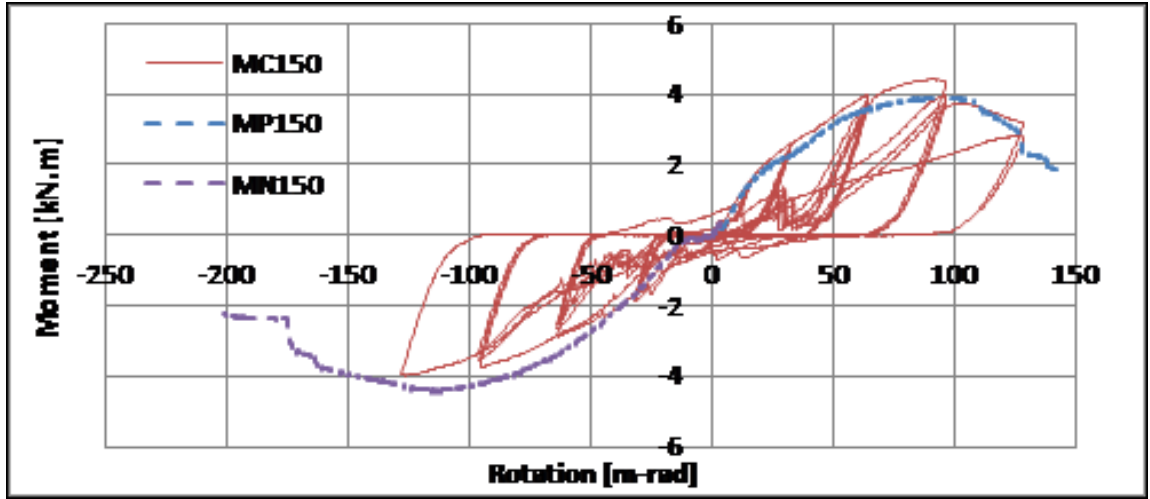
Çizelge 3.2. Deprem Kütleleri

W (DEAD + Palet)	Tek girişli Sistem
	1114 kN

3.1.4 Kiriş-Dikme Birleşimi ve Modellemesi

Kiriş-dikme birleşimlerinin dönme rijitlik değerleri, bu çalışmada kullanılan kiriş ve dikme boyutlarına uygun olarak Shahshenas'ın doktora tezinden alınmıştır (Shahshenas, 2015)

Kullanılan kiriş-dikme birleşimine ait deney sonuçları, Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Birleşim bölgesi karakteristiği, pozitif eğilme davranışı için ilgili tezde “MP 150”, negatif eğilme davranışı için “MN 150” olarak tanımlanan birleşim deneyi ile belirlenmiştir (Şekil 3.7).

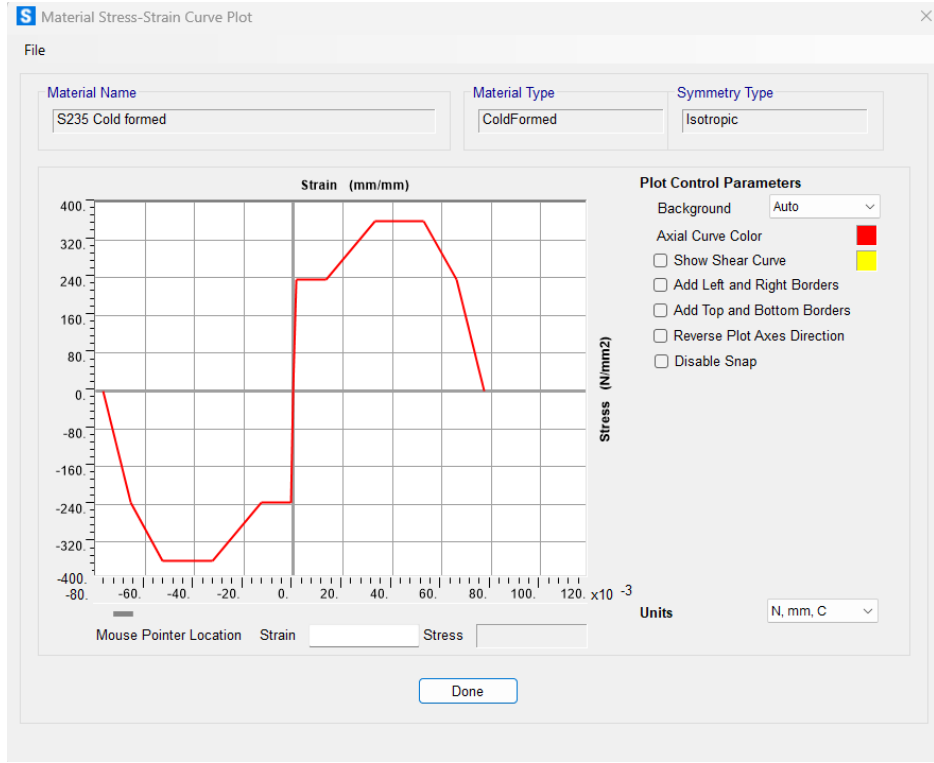


Şekil 3.7. M150 Çevrimsel yükleme altında moment-dönme davranışı (Shahshenas, 2015)

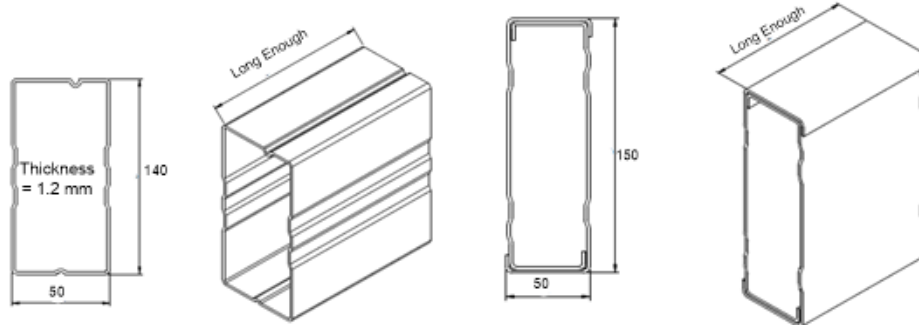
Doğrusal analiz kullanılan dönme rijitliği, k_{θ} , idealize edilen eğrilerin başlangıç eğimlerinden küçük olanı kabul edilmiştir. $k_{\theta} = 60 \text{ kNm/rad}$.

3.1.5 Kiriş Özellikleri

Modellerde kullanılan kirişler, S235 çelik sınıfına ait olup, Şekil 3.9'da gösterilen DD150 kesitine sahiptir.



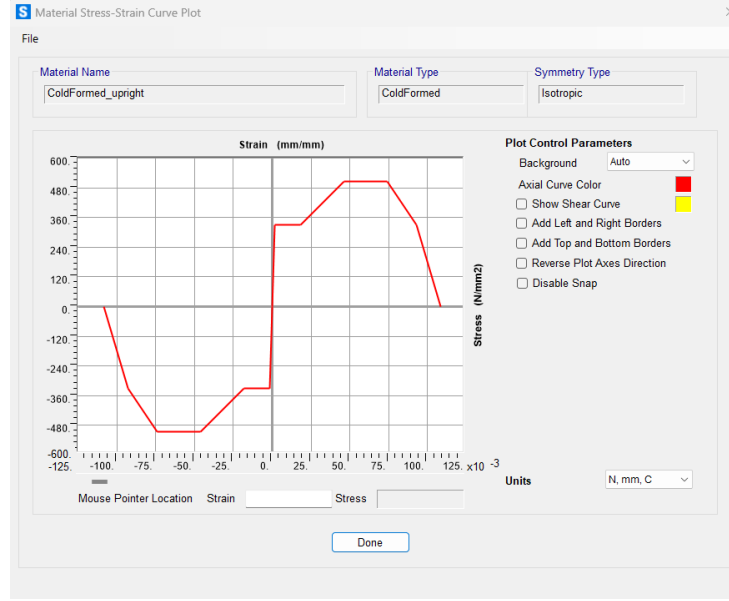
Şekil 3.8. S235 gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı



Şekil 3.9. DD140 ve DD150 kesitleri (Shahshenas, 2015)

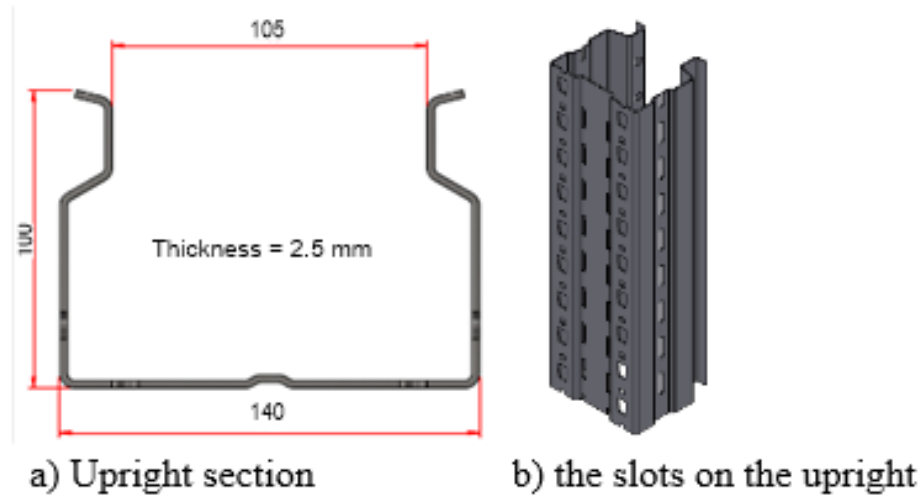
3.1.6 Dikme Modellemesi ve Özellikleri

Tez kapsamında modellenen dikmeler, soğuk haddeleme yöntemiyle üretilmiş çelik malzemeden yapılmıştır. Malzeme özellikleri, akma dayanımı $F_y = 330 \text{ N/mm}^2$ e maksimum çekme dayanımı $F_u = 505 \text{ N/mm}^2$ olacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Dikme kesiti için malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

Modellerde kullanılan dikmelerin kesit görünümü ve genel görünümü Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Modellerde kullanılan dikmelerin kesit ve genel görünümü

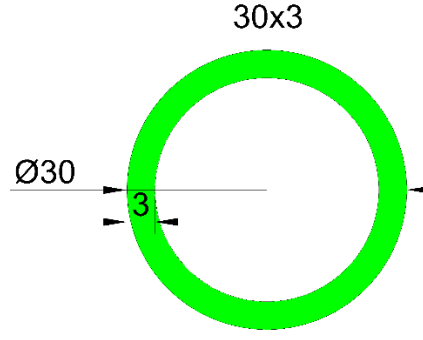
Dikmelerin doğrusal olmayan davranışları Fiber P-M2-M3 plastik mafsal tanımlanarak dikkate alınmıştır.

3.1.7 Gergi Tipi Çapraz Modellemesi ve Özellikleri

Aşağı koridor doğrultusunda yer alan çaprazlar, S420 yapısal çelik sınıfından üretilmiş olup dairesel kesit özelliklerine sahiptir. Bu çaprazların tasarım depremi altında elastik davranış sergilemesi hedeflenmiştir. Bu nedenle, ilgili elemanlar için doğrusal olmayan malzeme davranışı tanımlanmamıştır.

3.1.8 Düzlem Çaprazların ve Çapraz Koridor Diyagonellerin Modellenmesi

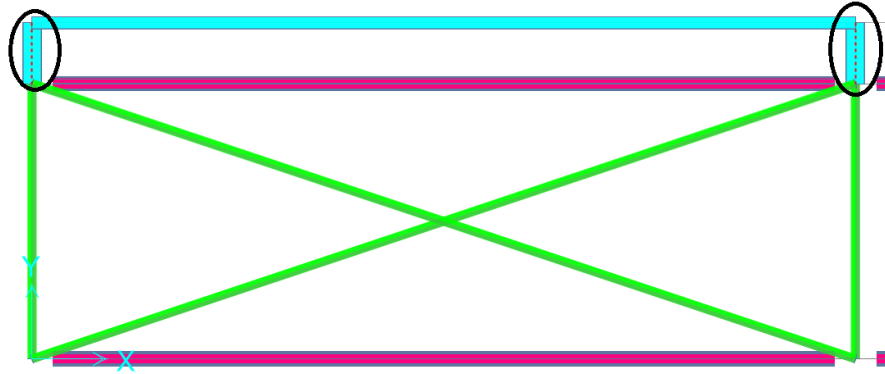
Düzlem çaprazlar ve çapraz koridor doğrultusunda çalışan diyagonaller, S235 yapısal çelik sınıfından üretilmiş olup, 30x3 boru kesitleri kullanılarak modellenmiştir. Bu elemanlar, tasarım depremi altında hasar görmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde doğrusal elastik malzeme modeli tercih edilmiş ve analizler buna göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12).



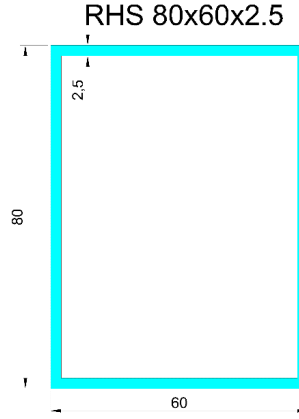
Şekil 3.12. Çapraz kesit tanımı

3.1.9 Bağlantı Elemanlarının Modellenmesi ve Özellikleri

Sırt çaprazları, kat hizalarında dikmelere moment aktaran birleşimlerle bağlı olan bağlantı elemanlarına (Şekil 3.13) bağlanmıştır. Bağlantı elemanı olarak, S235 yapısal çelik sınıfına ait 2.5mm kalınlığa sahip 80x60 boyutlu kutu kesit (RHS 80x60x2.5) kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.13. Plan görünümünde bağlantı elemanları

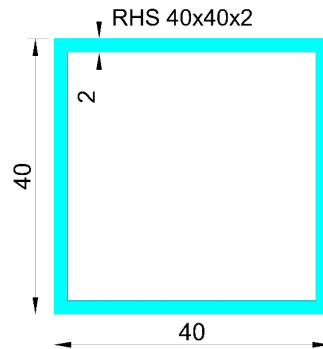


Şekil 3.14. Bağlantı elemanı kesiti

Bağlantı elemanları, tasarım depreminde hasar görmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, analizlerde bu elemanların doğrusal elastik davranış sergilemesi beklenmektedir. Ancak, doğrusal olmayan analizlerde kontrol etmek amaçlı bu elemanlara plastik mafsallar tanımlanmıştır.

3.2.7 Çapraz Kirişlerinin Modellemesi ve Özellikleri

Çapraz kirişleri, aşağı koridor yönünde sırt çaprazlarını birbirine bağlayan, S420 çelik sınıfına sahip elemanlardır. Çapraz kirişlerinin kesitleri Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3.15. Çapraz kirişleri kesitleri

Çapraz kirişler, tasarım depreminde hasar görmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, analizlerde bu elemanların doğrusal elastik davranış sergilemesi beklenmektedir. Ancak, doğrusal olmayan analizlerde kontrol etmek amaçlı bu elemanlara plastik mafsallar tanımlanmıştır.

3.2 Zemin ve Deprem Parametreleri

Tez kapsamında analizleri yapılacak modellerin deprem parametreleri TDTH AFAD sitesinden alınmıştır. Yapının Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünde bulunduğu kabul edilmiş olup, koordinatları 40.240059° enlem ve 28.962911° boylam olarak belirlenmiştir. Zemin sınıfı ZD (Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları), deprem düzeyi DD-2 (Standart tasarım yer hareketi) olarak kabul edilmiştir. Veriler Çizelge 3.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Deprem Parametreleri

DEPREM PARAMETRELERİ		DEĞERLER
Koordinatlar	Enlem	40.240059
	Boylam	28.962911
Deprem Düzeyi		DD-2
Zemin Sınıfı		ZD
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı	S1	0.243
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı	Ss	0.934
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı	Sds	0.514
1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı	Sd1	1.052
En büyük yer ivmesi (g)	PGA	0.394
En büyük yer hızı (cm/s)	PGV	23.559

3.3 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz

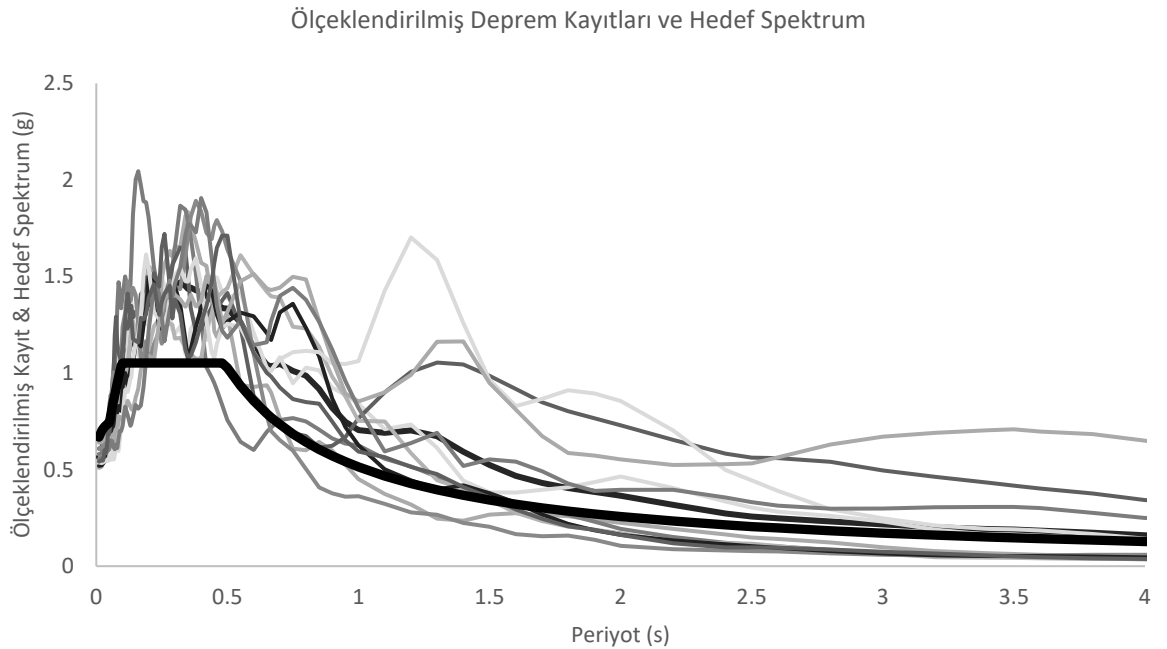
Tez kapsamında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde kullanılacak on bir deprem kaydı TBDY2018 yönetmeliğine uygun olarak; Yakın fay etkisini göz önüne alma amacıyla 1-10km yakınlıktaki istasyonlardan deprem kaydı seçilmiştir. Zemin hızı

ZD zemin sınıfına uygun aralıkta seçilmiştir. PEER'den seçilmiş olup deprem kayıtları basit ölçekleme yöntemi kullanılmıştır. Deprem dataları zaman tanım alanında ölçeklendirilmiştir. Veriler Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. Seçilen Deprem kayıtları

Deprem	Yıl	Ölçek Faktörü	PEER Adı
Imperial Valley-02	1966	1.54	RSN6
Managua_ Nicaragua-01	1972	1.02	RSN95
Coyote Lake	1976	1.72	RSN147
Imperial Valley-06	1979	2.10	RSN173
Morgan Hill	1979	1.66	RSN461
Chalfant Valley-01	1979	1.69	RSN547
Chalfant Valley-02	1980	0.86	RSN558
Kobe_ Japan	1983	0.58	RSN1120
Kocaeli_ Turkey	1983	1.63	RSN1176
Duzce_ Turkey	1983	0.89	RSN1605
Parkfield-02_ CA	1983	1.68	RSN4074

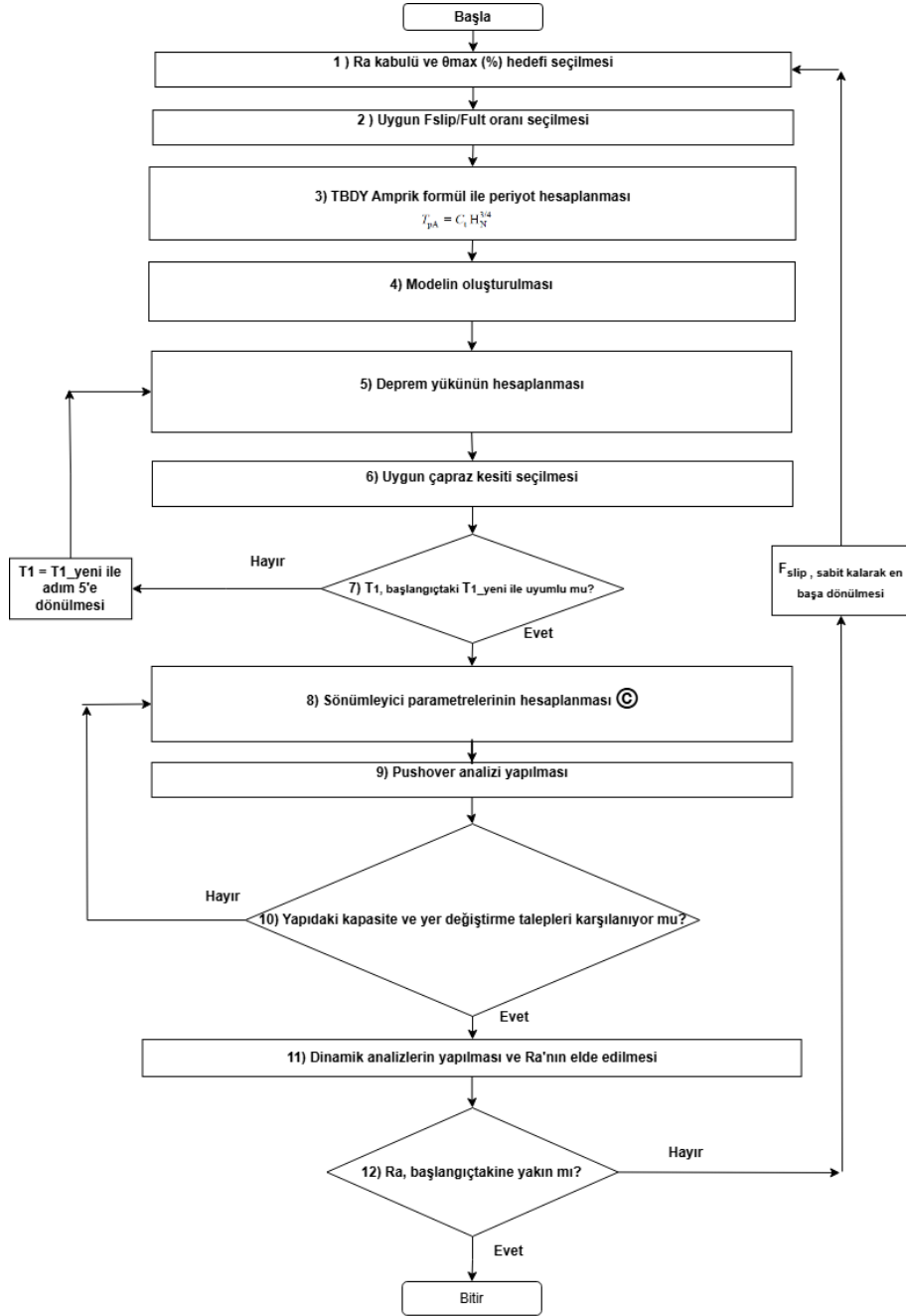
Ölçeklendirilmiş deprem dataları ve tasarım spektrumu Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Ölçeklenmiş deprem kayıtları ve hedef spektrum

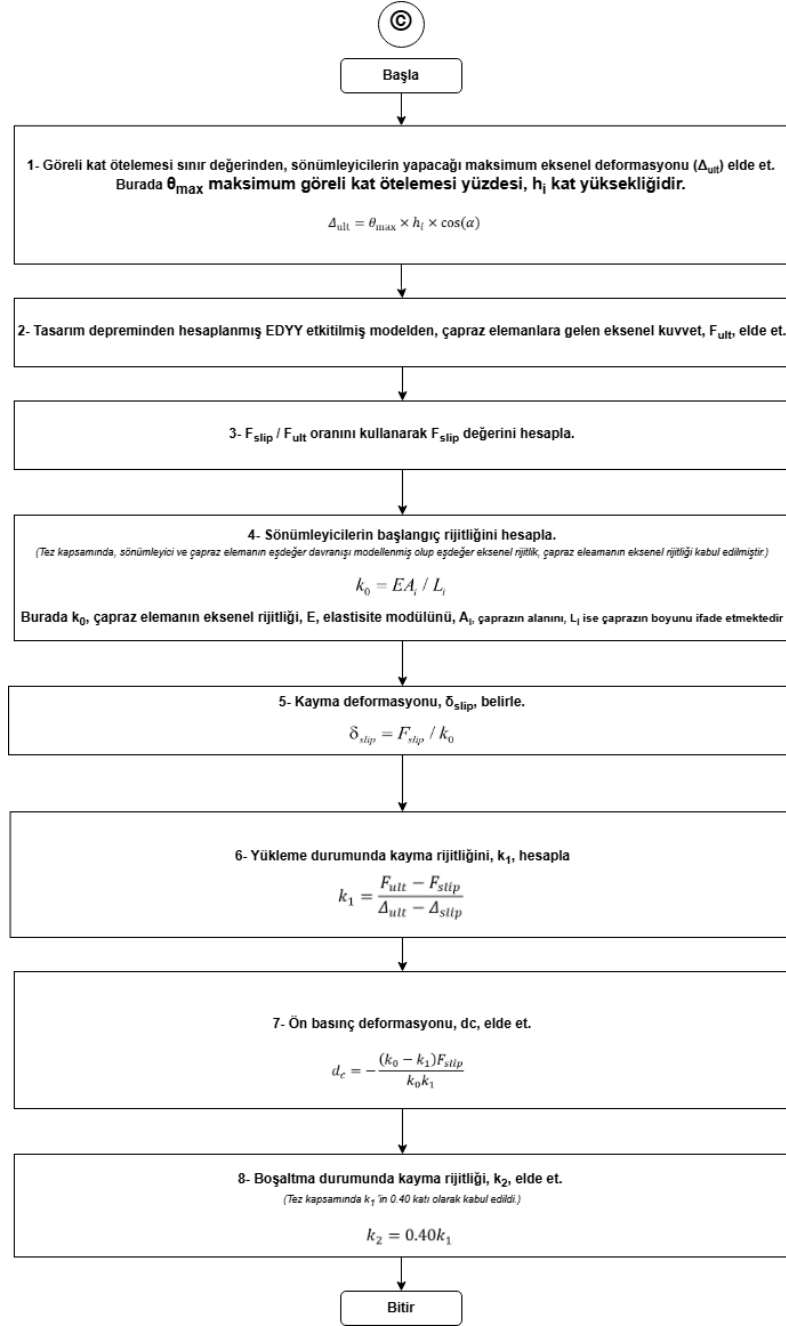
3.3.1 Sürtünme Esaslı Sönümleyicili Çapraz Sistemlerin Tasarımı

Sürtünme esaslı sönümleyicili çapraz sistemlerin tasarımı için izlenen prosedür, Şekil 3.17'de verilen akış diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Sürtünme esaslı sönümleyicili çapraz sistemlerin tasarımı için izlenen prosedürü gösteren akış diyagramı

Kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyicilerin yük-deplasman eğrisi, bayrak şekilli çevrimsel bir eğriye sahiptir (Şekil 2.12). Bu eğride tanımlanması gereken önemli parametreler şunlardır: D_{ult} , D_{slp} , F_{slp} , F_{ult} , k_0 , k_1 , k_2 ve d_c . Yük-deplasman eğrisinin tanımlanmasında kullanılan bu parametrelerin hesaplanmasına yönelik prosedür, Şekil 2.14'teki akış diyagramında verilmiştir.



Şekil 3.18. Kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyicilerin yük-deplasman eğrisi parametrelerinin hesaplanması için izlenen prosedürü gösteren akış diyagramı

4 BULGULAR ve TARTIŞMA

Geometrik özellikleri ve yük durumları Bölüm 3.1'de verilen raf sistemi, merkezli sürtünme esaslı sönümleyicili olarak tasarlanmıştır. Tasarımın başlangıç adımında, deprem yükü azaltma katsayısı $R_a=2.50$ olarak varsayılmış ve iterasyon sürecine bu değerle başlanmıştır. DD-2 deprem seviyesinde, görelî kat ötelemesinin maksimum %2.00 olarak kabul edilerek tasarım gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme esaslı sönümleyicilere sahip yalnızca çekme çaprazlı raf sisteminde, kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyiciler, SAP2000'de tanımlı olan bayrak şeklindeki yük-deplasman ilişkisine sahip doğrusal olmayan link elemanlar ile modellenmiştir. Çapraz eleman ile sönümleyici, birbirine bağılı olarak modellenbildiği gibi, çapraz eleman yerine yalnızca link eleman kullanılarak da modelleme yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, çaprazlı sönümleyici yerine yalnızca link eleman kullanılmıştır. Link elemanın başlangıç rijitliği, çapraz eleman ve sönümleyicinin eşdeğer rijitliği dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çaprazlı sistemde deprem yükü azaltma katsayısı, R_a , 1.00 alınmıştır. Bunun sebebi, çaprazlı sistemin DD-2 tasarım depreminde doğrusal elastik davranış gösterecek şekilde tasarlanmasıdır. Arka çaprazların tamamı dairesel kesit olacak şekilde seçilmiştir.

4.1 Çaprazlı Sistem

Bu bölümde, sönümleyici bulunmayan yalnızca çekme çaprazlı raf sisteminin tasarımı ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Ön tasarım süreci, Şekil 3.17'de verilen akış diyagramındaki ilk altı adım sırasıyla uygulanarak tamamlanmıştır.

Tasarım prosedürünü gösteren akış diyagramı takip edilerek gerçekleştirilen tasarım sonuçları, Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. EDYY iterasyonları sonucu parametreler

	0.iterasyon	1.iterasyon	2.iterasyon	3.iterasyon
R _a	1.00	1.00	1.00	1.00
T _x (sn)	0.375	0.625	0.641	0.642
V _{te} (kN)	1172	923	895	892

Çizelge 4.2. İterasyon sonucu seçilen çapraz kesitleri

KAT	1.iter	2.iter	3.iter
6	Φ30	Φ26	Φ26
5	Φ34	Φ34	Φ32
4	Φ40	Φ36	Φ36
3	Φ46	Φ40	Φ38
2	Φ48	Φ42	Φ40
1	Φ52	Φ44	Φ44

Çizelge 4.3. Çaprazlı sistem Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (R_a=1)

KAT	w _i (KN)	m _i (t)	h _i (m)	m _i * h _i	F _{vi} (KN)	V _i (KN)
1	186	19	1.82	34.43	42	892
2	186	19	3.64	68.87	84	849
3	186	19	5.46	103.30	126	765
4	186	19	7.28	137.74	169	639
5	186	19	9.10	172.17	211	470
6	186	19	10.92	206.60	260	260
TOPLAM	1114	114		723.11	892	

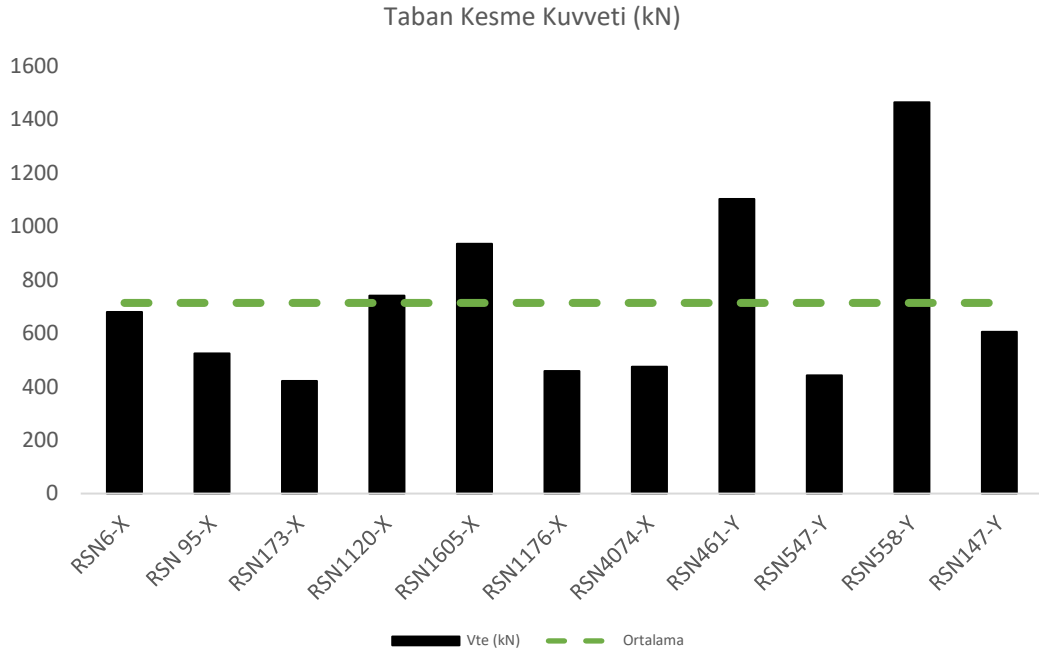
Burada w_i, kat ağırlıkları (kN), m_i, kat kütleleri (t), h_i, katların zeminden yükseklikleri (m), F_{vi}, katlara gelen deprem kuvvetleri (kN), V_i, katlara gelen kesme kuvvetlerini (kN) ifade etmektedir. F_{vi} değerlerinin toplam değeri V_{te} (Taban kesme kuvveti) = 892 kN olarak belirlenmiştir.

4.1.1 Dinamik Analiz Sonuçları

Çaprazlı sistemin zaman tanım alanında dinamik analiz sonucu elde edilen taban kesme kuvvetleri, Çizelge 4.4'te verilmiştir. Taban kesme kuvveti, on bir deprem için elde edilen maksimum değerlerin ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. Çaprazlı sistem taban kesme kuvvetleri

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	680
RSN 95-X	524
RSN173-X	421
RSN1120-X	741
RSN1605-X	934
RSN1176-X	458
RSN4074-X	475
RSN461-Y	1103
RSN547-Y	442
RSN558-Y	1464
RSN147-Y	600



Şekil 4.1. Çaprazlı sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Şekil 4.1'de her bir depremin maksimum taban kesme kuvveti (kN) siyah renkli sütunlarla, ortalamaları ise yeşil kesikli çizgiyle gösterilmektedir.

4.2 Sönümleyicili Sistem Tasarım ve Analizi

Sönümleyicili sistemin tasarımında, F_{ult} hesaplanırken görelî kat ötelemesi dikkate alınmıştır. F_{slip} , F_{ult} 'nin belirli bir oranı olarak alınmıştır. Yapının performansına F_{slip} 'in etkisini anlamak amacıyla, üç farklı F_{slip}/F_{ult} oranı dikkate alınmıştır: $F_{slip}/F_{ult}=0.2, 0.5$ ve 0.8

Sistemlerin tasarım aşamaları Şekil 3.17'de verilmiştir. Üç modelin her birinde on ikinci adımda iterasyon gerekmiştir.

4.2.1 $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ Durumu

Ön tasarım süreci, Şekil 3.16'da verilen akış diyagramında ilk yedi adım sırasıyla uygulanarak 4.1 çaprazlı sistem tasarım ve analiz süreci gerçekleştirilmiştir.

Bayrak şeklinde histerik eğriye sahip sönümleyici cihazın hesap ve tanım süreci Şekil 3.16'de verilen akış diyagramında sekizinci adım uygulanmıştır. Yedinci adımda, eşdeğer deprem yükü modele uygulanmış ve çapraz elemanlardaki iç kuvvetlerden sönümleyicilerin tasarımı için gerekli parametreler, Şekil 3.17'de verilen akış diyagramı ile hesaplanmıştır.

Başlangıçta deprem yükü azalma katsayısı $R_a=2,5$ alınarak hesaplanan katlara gelen deprem yükü ve kat kesme kuvvetleri, Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ($R_a=2.50$)

KAT	w_i (KN)	m_i (t)	h_i (m)	$m_i * h_i$	F_{vi} (KN)	V_i (KN)
1	186	19	1.82	34.43	17	357
2	186	19	3.64	68.87	34	340
3	186	19	5.46	103.30	51	306
4	186	19	7.28	137.74	67	256
5	186	19	9.10	172.17	84	188
6	186	19	10.92	206.60	104	104
TOPLAM	1114	114		723.11	357	

Çizelge 4.5'te verilen kat kesme kuvvetleri kullanılarak sönümleyicilerin F_{ult} değerleri hesaplanmıştır. Çaprazların boyutlandırması daha önceki bölümde $R_a=1$ olma durumu

için yapılmıştır. Çaprazların boyutları dikkate alarak k_0 değeri hesaplanıp Çizelge 4.6 da verilmiştir.

Çizelge 4.5'te verilen kat kesme kuvvetleri kullanılarak sönümleyicilerin F_{ult} değerleri hesaplanmıştır. Çaprazların boyutlandırması, önceki bölümde $R_a=1$ durumu için gerçekleştirilmiştir. Çaprazların boyutları dikkate alınarak k_0 değeri hesaplanmış ve Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem k_0 başlangıç eğiminin belirlenmesi

FD	L (mm)	E (Gpa)	D (mm)	A (mm ²)	k_0 (kN/mm)
FD6	3256	210	26	531	34
FD5	3256	210	32	804	52
FD4	3256	210	36	1018	66
FD3	3256	210	38	1134	73
FD2	3256	210	40	1257	81
FD1	3256	210	44	1521	98

Çizelge 4.6'da; FD, sönümleyicilerin isimlerini; L, çapraz elemanların uzunluğunu (mm); E, elastisite modülünü (MPa); D, çapraz elemanın çapını (mm); A, çapraz elemanlar için seçilen kesitin alanını (mm²); k_0 , elemanların aksel rijitliğini ifade etmektedir.

Şekil 3.18'deki akış diyagramı uygulandıktan sonra elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.7. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem FD Cihazı tanım parametreleri

FD	k_0 (kN/mm)	k_1 (kN/mm)	D_c (mm)	F_{slip}/F_{ult} t	F_{slip} (kN)	δ_{ult} (mm)	F_{ult} (kN)	k_2 (kN/mm)
FD6	34	1.881	7.03	0.20	14	30	70	0.752
FD5	52	3.094	6.99	0.20	23	30	115	1.237
FD4	66	4.310	6.94	0.20	32	30	160	1.724
FD3	73	5.124	6.90	0.20	38	30	190	2.050
FD2	81	5.801	6.88	0.20	43	30	215	2.320
FD1	98	6.466	6.93	0.20	48	30	240	2.586

Burada F_u , sönümleyicinin gerekli dayanımı (kN), k_0 , sönümleyicinin başlangıç eğimi (kN/mm), k_1 , sönümleyicinin yükleme eğimi (kN/mm), k_2 , sönümleyicinin boşaltma

eğimi (kN/mm), δ_{slip} , sönümleyicinin kayma başladığı andaki deplasmanı (mm), δ_u , sönümleyicinin gerekli deplasmanı (mm), F_{slip} , kaymanın başladığı kuvveti (kN) ifade etmektedir.

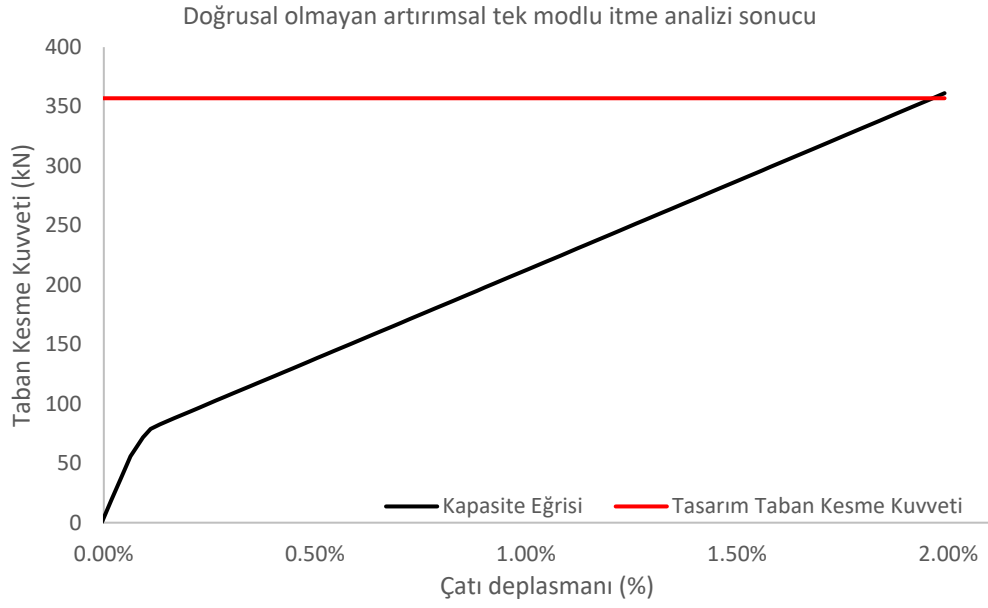
SAP2000 programında sönümleyiciler (FD), "Friction-Damper Link" modeli ile tanımlanmıştır. Bu tanımlamada kullanılan gerekli parametreler Çizelge 4.8'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.8. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Sap2000 Friction Damper Parametreleri

PARAMETRELER	FD6	FD5	FD4	FD3	FD2	FD1
Non-slipping stiffness (kN/mm)	34.24	51.87	65.65	73.15	81.05	98.07
Sliping stiffness (loading) (kN/mm)	1.88	3.09	4.31	5.12	5.80	6.47
Non-slipping stiffness (Unloading) (kN/mm)	0.75	1.24	1.72	2.05	2.32	2.59
Pre-compression displacement (mm)	-7.03	-6.99	-6.94	-6.90	-6.88	-6.93
Stop displacement (mm)	30.18	30.18	30.18	30.18	30.18	30.18
Active direction	Tension	Tension	Tension	Tension	Tension	Tension

Şekil 4.2'de doğrusal olmayan artırimsal tek modlu itme analiz (Pushover) sonucu verilmiştir. Siyah eğri, taban kesme kuvvetinin tepe noktası yerdeğiştirme oranına göre değişimini göstermektedir. Kırmızı doğru ise, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile elde edilen tasarım taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Şekil 3.17'deki akış diyagramında onuncu adım gereğince, %2.00 çatı kaymasında yapının kapasitesinin (siyah eğri), tasarım taban kesme kuvvetinden (kırmızı doğru) fazla olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekilde siyah renkli eğri kapasite eğrisini, kırmızı doğru ise tasarım taban kesme kuvvetini temsil etmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere, ilgili koşul sağlanmıştır.



Şekil 4.2. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Pushover analiz sonucu

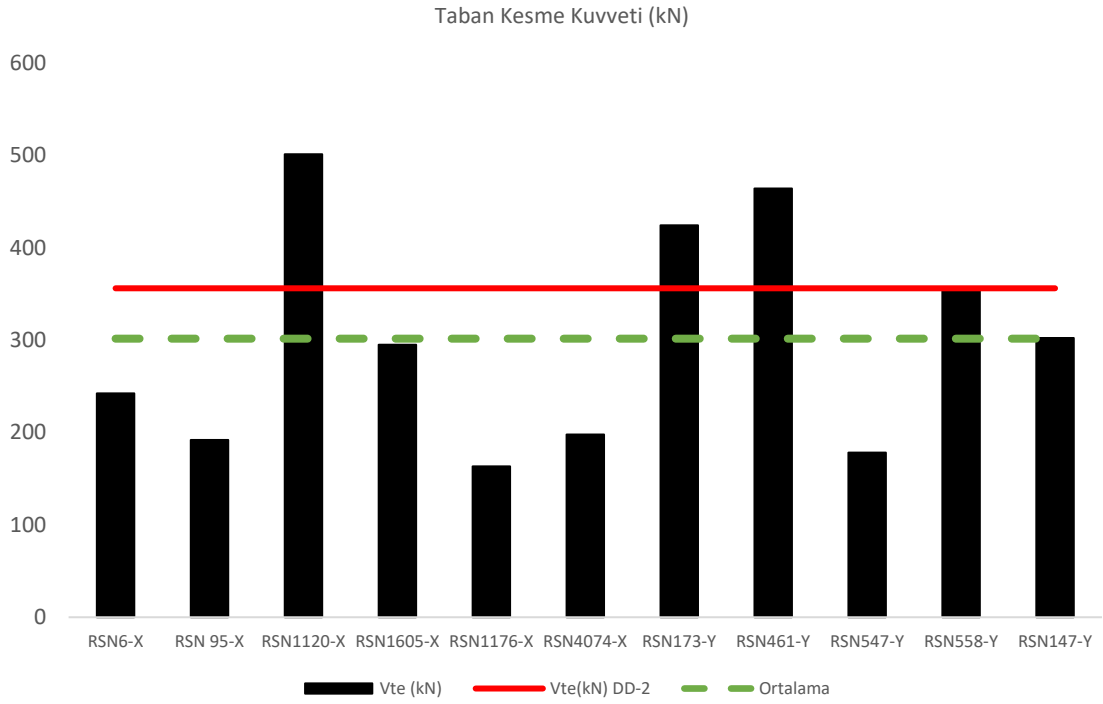
Şekil 3.17'deki akış diyagramında, on birinci adıma geçilmiştir. Bu adımda, sistemin zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarından elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri, çaprazlı sistemin taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, sistemin deprem yükü azaltma katsayısı (R_a) başlangıçta varsayılan $R_a=2.50$ değerinden farklı bir değer olarak $R_a=2.64$ bulunmuştur (Çizelge 4.9).

Dinamik analiz sonuçları, görelî kat ötelemelerinin ortalama değerlerinin %2.00 sınır değerinin altında olduğunu göstermektedir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).

Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi:

Çizelge 3.5. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	242
RSN 95-X	192
RSN1120-X	501
RSN1605-X	295
RSN1176-X	163
RSN4074-X	198
RSN173-Y	424
RSN461-Y	464
RSN547-Y	178
RSN558-Y	356



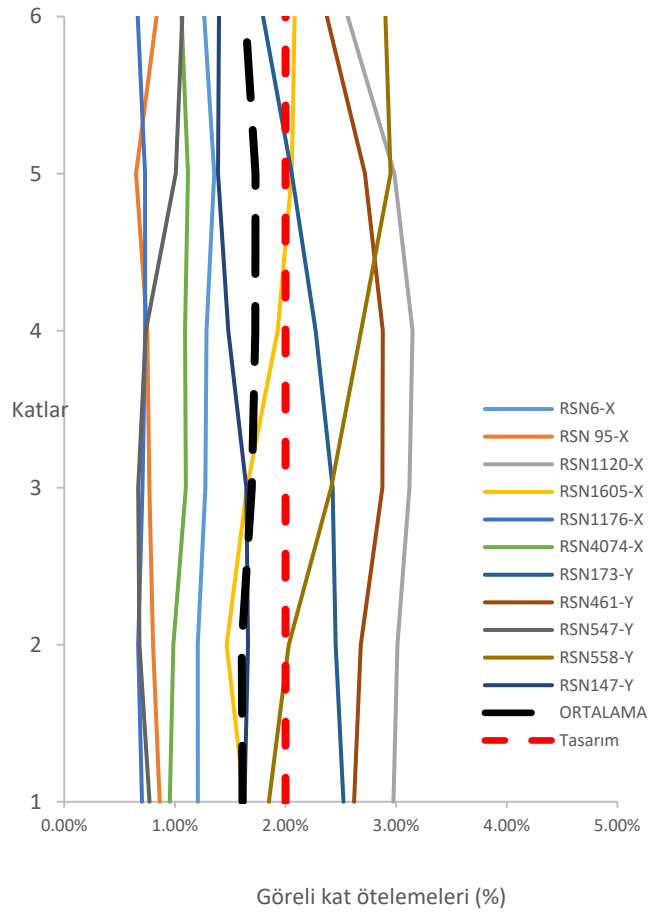
Şekil 4.3. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Şekil 4.3'de sütunlar, her bir depremin maksimum taban kesme kuvvetlerini (kN), yeşil kesikli çizgi, bu değerlerin ortalamasını ve kırmızı çizgi ise $R_a = 2.50$ için hesaplanmış taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Çizelge 4.9. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar

Depremler	Çaprazlı V_{te} (kN)	0.20 Sistem V_{te}	R_a
RSN6-X	680	242	2.80
RSN 95-X	524	192	2.73
RSN1120-X	421	401	1.04
RSN1605-X	741	295	2.51
RSN1176-X	934	163	5.72
RSN4074-X	458	198	2.32
RSN173-Y	475	424	1.12
RSN461-Y	1103	464	2.38
RSN547-Y	442	178	2.48
RSN558-Y	1464	356	4.11
RSN147-Y	606	302	2.00
ORTALAMA	713	301	2.64

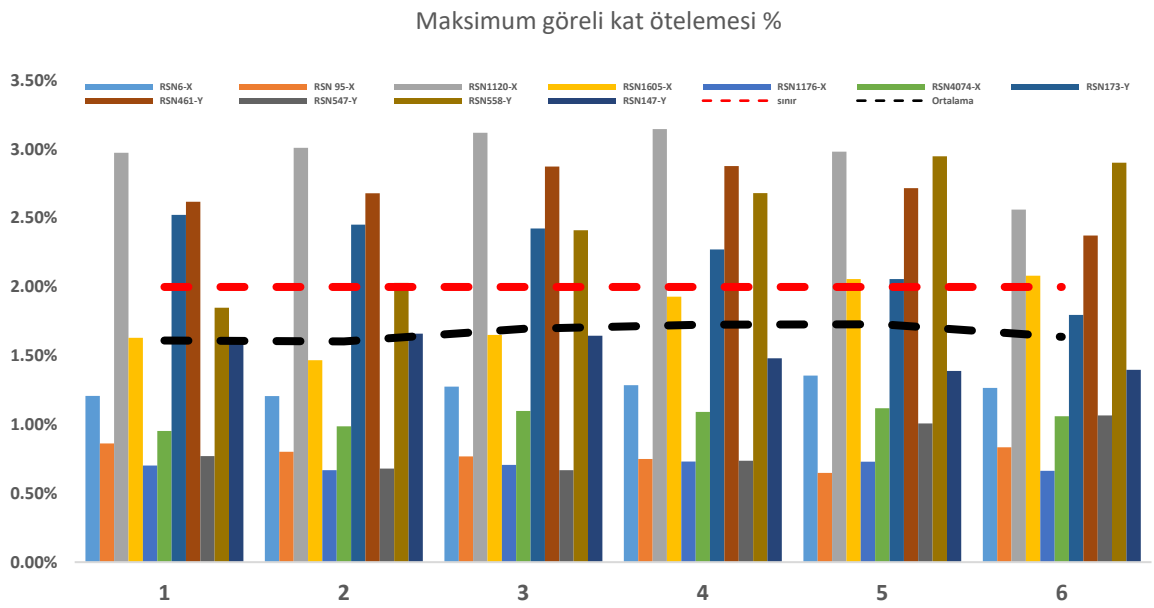
Görelî kat ötelemelerinin değerlendirilmesi:



Şekil 4.4. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem görelî kat ötelemeleri

Şekil 4.4'te, her bir depreme ait görelî kat ötelemelerinin maksimum değeri, farklı renkli çizgilerle gösterilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi tasarımda kabul edilen sınır değeri, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerinin maksimum değeri ortalamasını temsil etmektedir.

Ortalama değeri, kalın siyah kesikli çizgi ile, %2.00 sınır değeri ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Deprem sonucu oluşan görelî kat ötelemeleri sürekli çizgilerle ifade edilmiştir. Şekil 4.5'te, bu çizgi grafiğinin sütun grafiği biçimindeki gösterimi sunulmuştur.



Şekil 4.5. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem görelî kat ötelemeleri sütun grafiği

Görelî kat ötelemelerinin maksimumları Şekil 4.5'te farklı renkli sütunlarla verilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi, tasarımda kabul edilen sınır değeri, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerin maksimumların ortalamasıdır.

Dinamik analiz sonucu elde edilen yeni deprem yükü azaltma katsayısı $R_a=2.64$ için iterasyon yapılmıştır. Yeni iterasyonda hesaplanan deprem kuvveti Çizelge 4.10 da verilmiştir.

Çizelge 4.10. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ($R_a=2.64$)

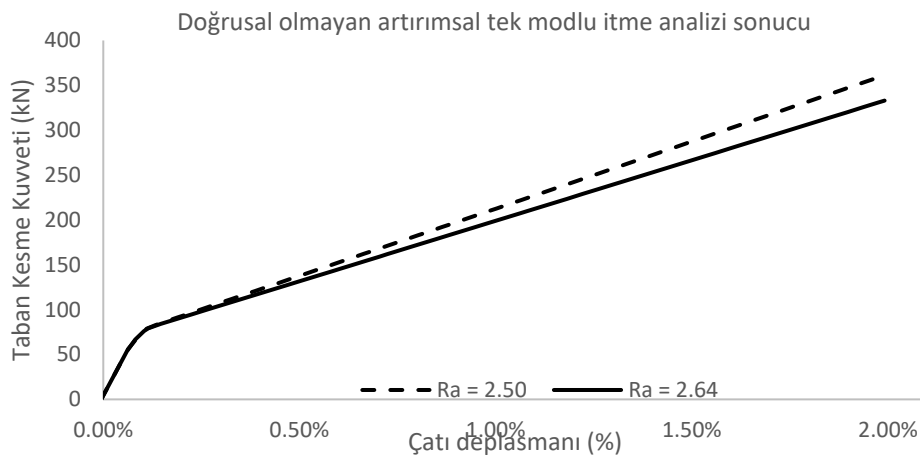
KAT	w_i (KN)	m_i (t)	h_i (m)	$m_i * h_i$	F_{vi} (KN)	V_i (KN)
1	186	19	1.82	34.43	16	338
2	186	19	3.64	68.87	32	322
3	186	19	5.46	103.30	48	290
4	186	19	7.28	137.74	64	242
5	186	19	9.10	172.17	80	178
6	186	19	10.92	206.60	98	98
TOPLAM	1114	114		723.11	338	

1.iterasyon sönümleyici parametreleri:

Çizelge 4.11. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem 1.iterasyon sönümleyici tanım parametreleri

FD	k_0 (kN/mm)	k_1 (kN/mm)	D_c (mm)	F_{slip}/F_{ult} t	F_{slip} (kN)	δ_{ult} (mm)	F_{ult} (kN)	k_2 (kN/mm)
FD6	34	1.780	3.52	0.12	7	30	60	0.712
FD5	52	3.144	3.21	0.11	12	30	105	1.258
FD4	66	4.344	3.20	0.11	16	30	145	1.738
FD3	73	5.259	3.09	0.11	19	30	175	2.104
FD2	81	5.851	3.14	0.11	22	30	195	2.340
FD1	98	6.601	3.15	0.11	24	30	220	2.640

Pushover analiz sonucu



Şekil 4.6. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon Pushover sonucu

Şekil 4. 6’da kesikli çizgi, $R_a=2.50$ (başlangıç iterasyonu) kapasite eğrisi, sürekli çizgi ise, $R_a=2.64$ (1.iterasyon) kapasite eğrisidir. F_{slip} değerinin sabit tutulduğu açıkça görülmektedir.

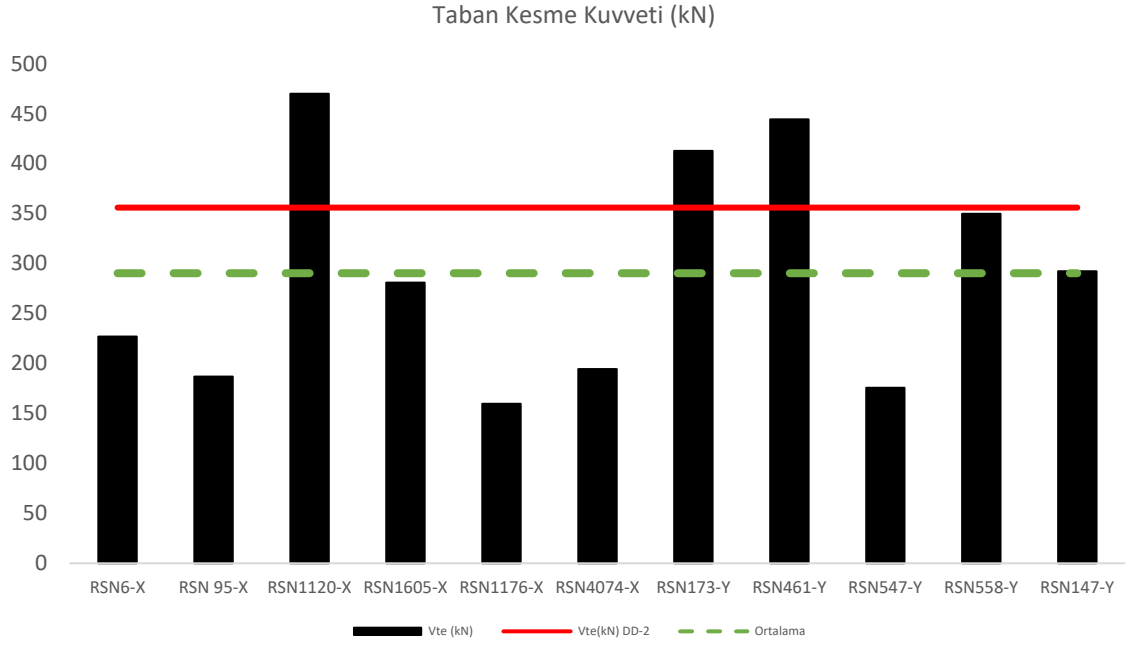
Şekil 3.17’deki akış diyagramında, on birinci adıma geçilmiştir. Bu adımda, sistemin zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarından elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri, çaprazlı sistemin taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, sistemin deprem yükü azaltma katsayısı (R_a) başlangıçta varsayılan $R_a=2.64$ değerinden farklı bir değer olarak $R_a=2.72$ bulunmuştur (Çizelge 4.13).

Dinamik analiz sonuçları, görelî kat ötelemelerinin ortalama değerlerinin %2.00 sınır değerinin altında olduğunu göstermektedir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9).

Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi:

Çizelge 4.12. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	227
RSN 95-X	187
RSN1120-X	470
RSN1605-X	281
RSN1176-X	160
RSN4074-X	194
RSN173-Y	413
RSN461-Y	444
RSN547-Y	176
RSN558-Y	350



Şekil 4.7. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

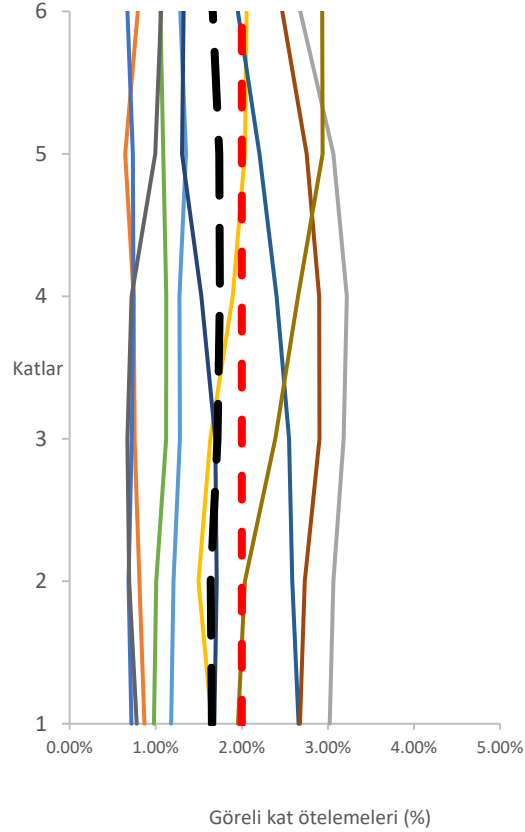
Şekil 4.7’de sütunlar, her bir depremin maksimum taban kesme kuvvetlerini (kN), yeşil kesikli çizgi, bu değerlerin ortalamasını ve kırmızı çizgi ise $R_a=2.64$ için hesaplanmış taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Çizelge 4.13. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar

Depremler	Çaprazlı V_{te} (kN)	0.20 Sistem V_{te}	R_a
RSN6-X	680	227	2.99
RSN 95-X	524	187	2.80
RSN1120-X	421	470	0.90
RSN1605-X	741	281	2.64
RSN1176-X	934	160	5.85
RSN4074-X	458	194	2.36
RSN173-Y	475	413	1.15
RSN461-Y	1103	444	2.48
RSN547-Y	442	176	2.52
RSN558-Y	1464	350	4.19
RSN147-Y	606	292	2.07
ORTALAMA	713	290	2.72

Analiz sonucunda yeni $R_a=2.72$ elde edilmiştir. Yeni R_a ile başlangıç R_a (%3 görelî fark) uyumlu bulunmuş ve görelî kat ötelemeleri değerlendirilmiştir.

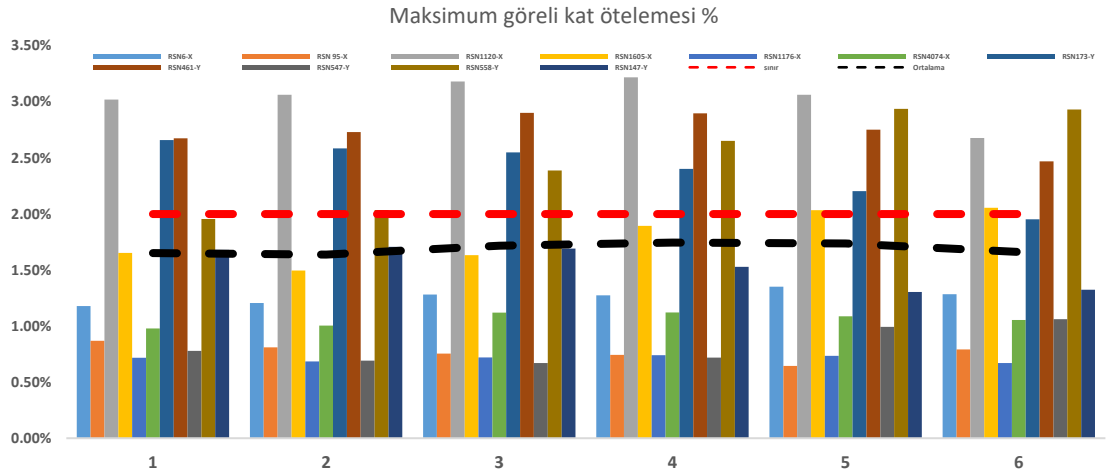
Görelî kat ötelemesi değerlendirmeleri:



Şekil 4.8. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon sonucu görelî kat ötelemeleri

Şekil 4.8’de, her bir depreme ait görelî kat ötelemelerinin maksimum değerleri, farklı renkli çizgilerle gösterilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi tasarımda kabul edilen sınır değerini, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerinin maksimum değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir.

Ortalama değer, kalın siyah kesikli çizgi ile, %2.00 sınır değeri ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Deprem sonucu oluşan görelî kat ötelemeleri sürekli çizgilerle ifade edilmiştir. Şekil 4.9’da, bu çizgi grafiğinin sütun grafiği biçimindeki gösterimi de sunulmuştur.



Şekil 4.9. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri

Görel kat ötelemelerinin maksimumları Şekil 4.9'da farklı renkli sütunlarla verilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi, tasarımda kabul edilen sınır değeri, siyah kesikli çizgi ise görel kat ötelemelerin maksimumların ortalamasıdır.

Görel kat ötelemelerinin ortalamalarının tasarım sınır değerinin altında olduğu ve yapıdaki ana taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirilen dinamik analizlerin hiçbirinde plastik mafsall oluşmadığı gözlemlenmiş, analiz bu şekilde tamamlanmıştır. Dinamik analiz sonuçlarına göre, sönümleyiciler maksimum 40 mm deplasman yapmıştır. Bu nedenle, sönümleyicilerin güvenlik açısından maksimum deplasman kapasitelerinin $40/30 = 1.33$ katından daha fazla olacak şekilde artırılması önerilmektedir.

4.2.2 $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ Sistemi

Ön tasarım süreci, Şekil 3.17’de verilen akış diyagramında ilk yedi adım sırasıyla uygulanarak 4.1 çaprazlı sistem tasarım ve analiz süreci gerçekleştirilmiştir.

Bayrak şeklinde histerik eğriye sahip sönümleyici cihazın hesap ve tanım süreci Şekil 3.17’de verilen akış diyagramında sekizinci adım uygulanmıştır. Yedinci adımda, eşdeğer deprem yükü modele uygulanmış ve çapraz elemanlardaki iç kuvvetlerden sönümleyicilerin tasarımı için gerekli parametreler, Şekil 3.18’de verilen akış diyagramı ile hesaplanmıştır.

Başlangıçta deprem yükü azalma katsayısı $R_a=2,5$ alınarak hesaplanan katlara gelen deprem yükü ve kat kesme kuvvetleri, Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5’te verilen kat kesme kuvvetleri kullanılarak sönümleyicilerin F_{ult} değerleri hesaplanmıştır. Çaprazların boyutlandırması, önceki bölümde $R_a=1$ durumu için gerçekleştirilmiştir. Çaprazların boyutları dikkate alınarak k_0 değeri hesaplanmış ve Çizelge 4.14’te sunulmuştur.

Çizelge 4.14. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem k_0 başlangıç eğiminin belirlenmesi

FD	L (mm)	E (Gpa)	D (mm)	A (mm ²)	k_0 (kN/mm)
FD6	3256	210	26	531	34
FD5	3256	210	32	804	52
FD4	3256	210	36	1018	66
FD3	3256	210	38	1134	73
FD2	3256	210	40	1257	81
FD1	3256	210	44	1521	98

Çizelge 4.15. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem FD Cihazı tanım parametreleri

FD	k_0 (kN/mm)	k_1 (kN/mm)	D_c (mm)	F_{slip}/F_{ult} t	F_{slip} (kN)	δ_{ult} (mm)	F_{ult} (kN)	k_2 (kN/mm)
FD6	34	1.20	28.14	0.20	35.00	30.18	70	0.48
FD5	52	1.98	27.97	0.20	57.50	30.18	115	0.79
FD4	66	2.76	27.75	0.20	80.00	30.18	160	1.10
FD3	73	3.29	27.59	0.20	95.00	30.18	190	1.32
FD2	81	3.73	27.53	0.20	107.50	30.18	215	1.49
FD1	98	4.14	27.74	0.20	120.00	30.18	240	1.66

SAP2000 programında sönümleyiciler (FD), "Friction-Damper Link" modeli ile tanımlanmıştır. Bu tanımlamada kullanılan gerekli parametreler Çizelge 4.16'da özetlenmiştir.

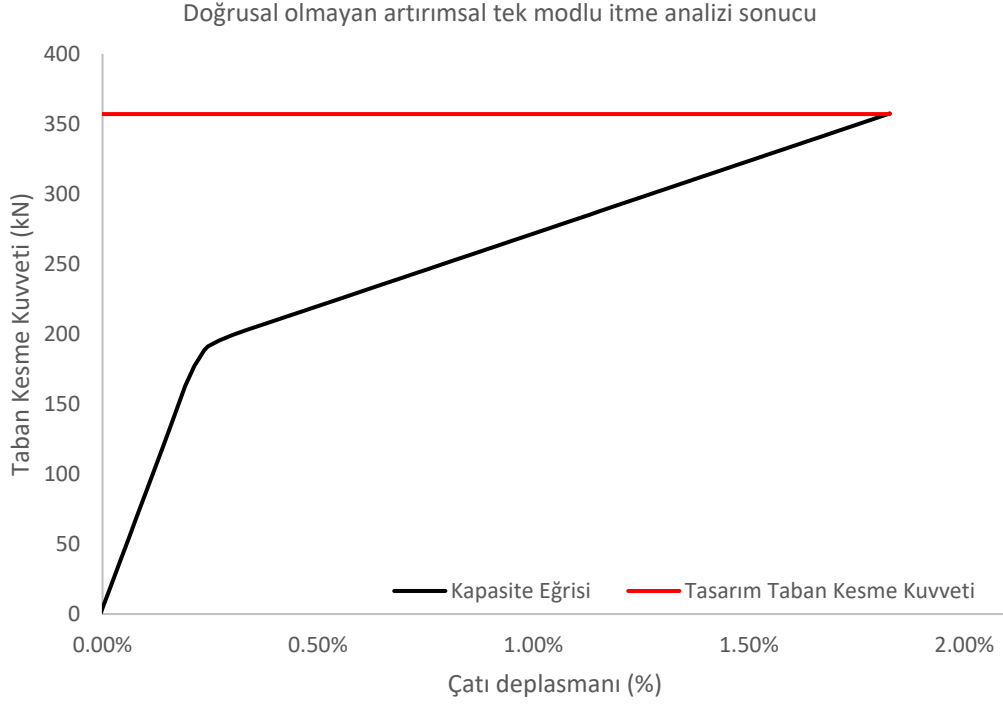
Çizelge 4.16. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Sap2000 Friction Damper Parametreleri

PARAMETRELER	FD6	FD5	FD4	FD3	FD2	FD1
Non-slipping stiffness (kN/mm)	34.24	51.87	65.65	73.15	81.05	98.07
Sliping stiffness (loading) (kN/mm)	1.20	1.98	2.76	3.29	3.73	4.14
Non-slipping stiffness (Unloading) (kN/mm)	0.48	0.79	1.10	1.32	1.49	1.66
Pre-compression displacement (mm)	-28.14	-27.97	-27.75	-27.59	-27.53	-27.74
Stop displacement (mm)	30.18	30.18	30.18	30.18	30.18	30.18
Active direction	Tension	Tension	Tension	Tension	Tension	Tension

Şekil 4.10'da doğrusal olmayan artırimsal tek modlu itme analiz (Pushover) sonucu verilmiştir. Siyah eğri, taban kesme kuvvetinin tepe noktası yerdeğiştirme oranına göre değişimini göstermektedir. Kırmızı doğru ise, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile elde edilen tasarım taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Şekil 3.17'teki akış diyagramında onuncu adım gereğince, %2.00 çatı kaymasında yapının kapasitesinin (siyah eğri), tasarım taban kesme kuvvetinden (kırmızı doğru) fazla olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekilde siyah renkli eğri kapasite eğrisini, kırmızı

doğru ise tasarım taban kesme kuvvetini temsil etmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere, ilgili koşul sağlanmıştır.



Şekil 4.10. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Pushover analiz sonucu

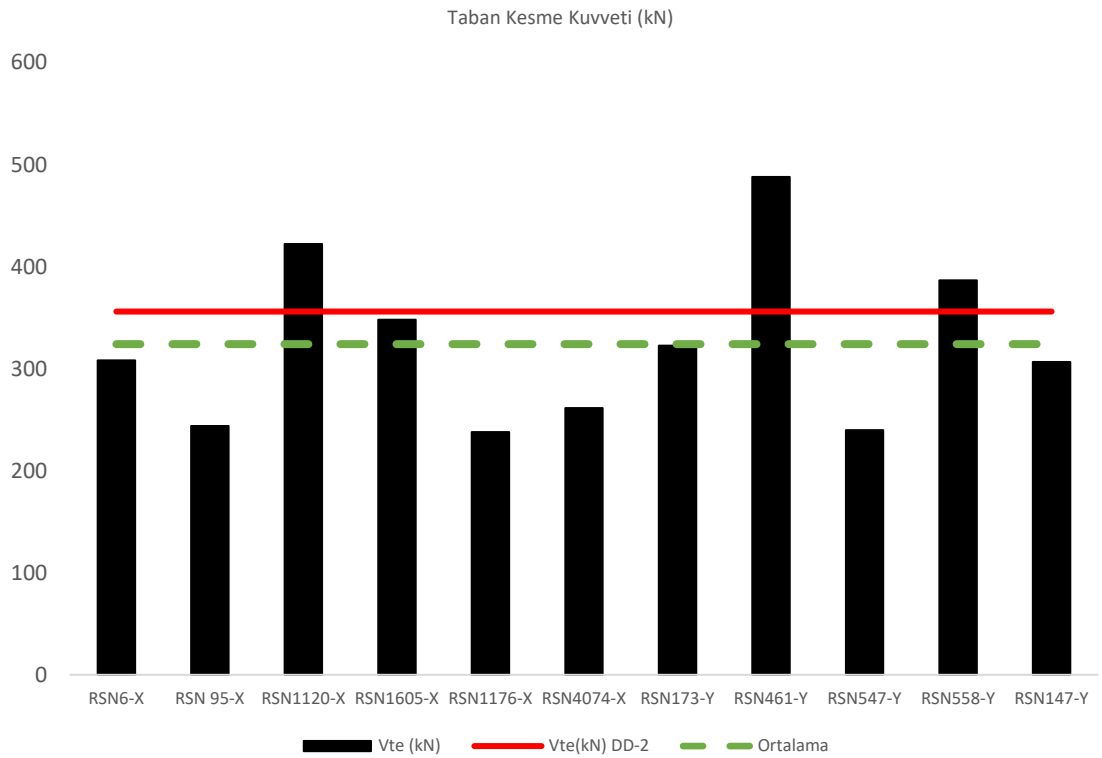
Şekil 3.17'deki akış diyagramında, on birinci adıma geçilmiştir. Bu adımda, Bu adımda, sistemin zaman tanım alanında gerçekteştirilen dinamik analiz sonuçlarından elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri, çaprazlı sistemin taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, sistemin deprem yükü azaltma katsayısı (R_a) başlangıçta varsayılan $R_a=2.50$ değerinden farklı bir değer olarak $R_a=2.64$ bulunmuştur (Çizelge 4.18).

Dinamik analiz sonucu, görelî kat ötelemeleri ortalama değerleri %2.00 sınır değerinin altında olduğu belirlenmiştir Şekil 4.12 ve Şekil 4.13).

Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi:

Çizelge 4.17. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	308
RSN 95-X	244
RSN1120-X	422
RSN1605-X	348
RSN1176-X	238
RSN4074-X	261
RSN173-Y	323
RSN461-Y	488
RSN547-Y	240
RSN558-Y	387



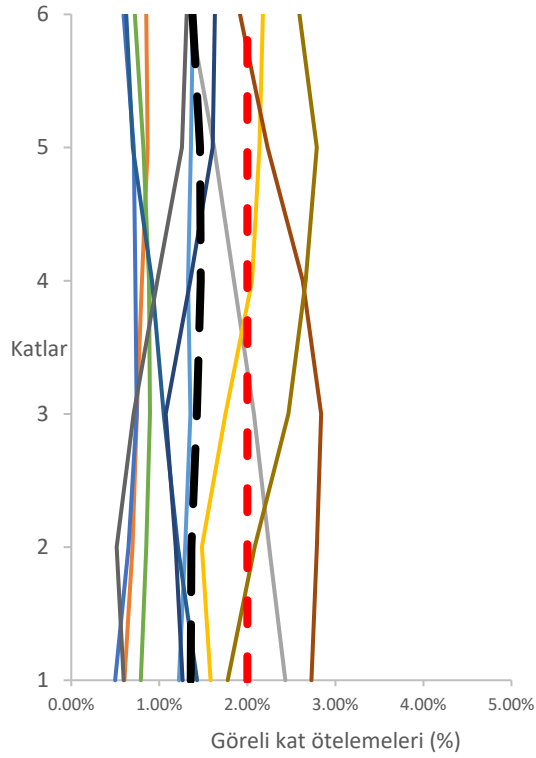
Şekil 4.11. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Şekil 4.11’de sütunlar, her bir depremin maksimum taban kesme kuvvetlerini (kN), yeşil kesikli çizgi, bu değerlerin ortalamasını ve kırmızı çizgi ise $R_a=2.50$ için hesaplanmış taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Çizelge 4.18. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar

Depremler	Çaprazlı V_{te} (kN)	0.50 Sistem V_{te}	R_a
RSN6-X	680	308	2.21
RSN 95-X	524	244	2.15
RSN1120-X	421	422	1.00
RSN1605-X	741	348	2.13
RSN1176-X	934	238	3.93
RSN4074-X	458	261	1.75
RSN173-Y	475	323	1.47
RSN461-Y	1103	488	2.26
RSN547-Y	442	240	1.84
RSN558-Y	1464	387	3.79
RSN147-Y	606	307	1.97
ORTALAMA	713	324	2.23

Görel kat ötelemelerinin değerlendirilmesi:

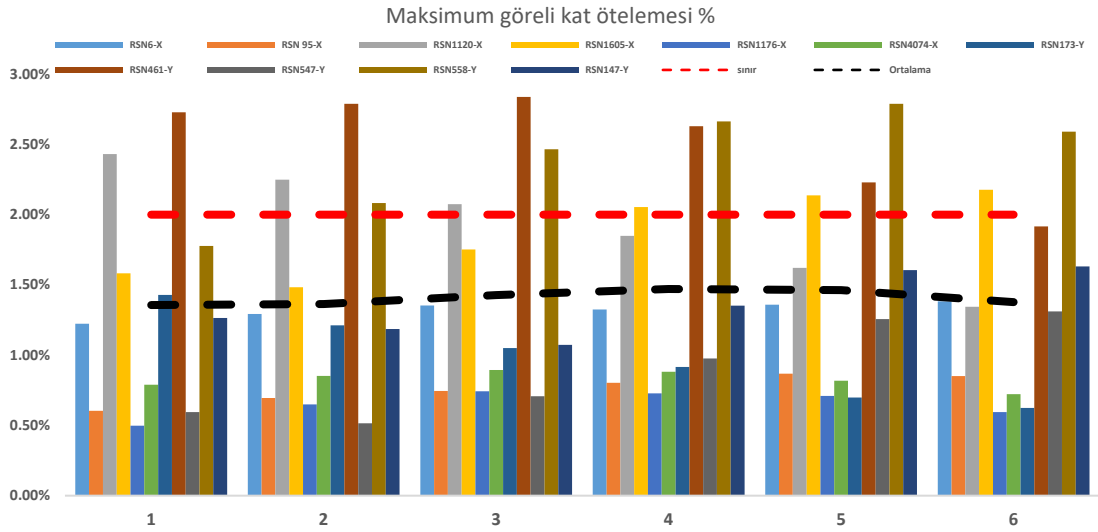


Şekil 4.12. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem görel kat ötelemeleri

Şekil 4.12’de her bir depreme ait görel kat ötelemelerinin maksimum değerleri, farklı renkli çizgilerle gösterilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi tasarımda kabul edilen sınır

değerini, siyah kesikli çizgi ise görel kat ötelemelerinin maksimum değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir.

Ortalama değer, kalın siyah kesikli çizgi ile, %2.00 sınır değeri ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Deprem sonucu oluşan görel kat ötelemeleri sürekli çizgilerle ifade edilmiştir. Şekil 4.13'te, bu çizgi grafiğinin sütun grafiği biçimindeki gösterimi de sunulmuştur.



Şekil 4.13. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem görel kat ötelemeleri sütun grafiği

Görel kat ötelemelerinin maksimumları Şekil 4.13'te farklı renkli sütunlarla verilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi, tasarımda kabul edilen sınır değeri, siyah kesikli çizgi ise görel kat ötelemelerin maksimumlarının ortalamasıdır.

Dinamik analiz sonucu elde edilen yeni deprem yükü azaltma katsayısı $R_a = 2.23$ için iterasyon yapılmıştır. Yeni iterasyonda hesaplanan deprem kuvveti Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.19. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ($R_a=2.23$)

KAT	w_i (KN)	m_i (t)	h_i (m)	$m_i * h_i$	F_{vi} (KN)	V_i (KN)
1	186	19	1.82	34.43	19	400
2	186	19	3.64	68.87	38	381
3	186	19	5.46	103.30	57	343
4	186	19	7.28	137.74	76	286
5	186	19	9.10	172.17	94	211
6	186	19	10.92	206.60	116	116
TOPLAM	1114	114		723.11	400	

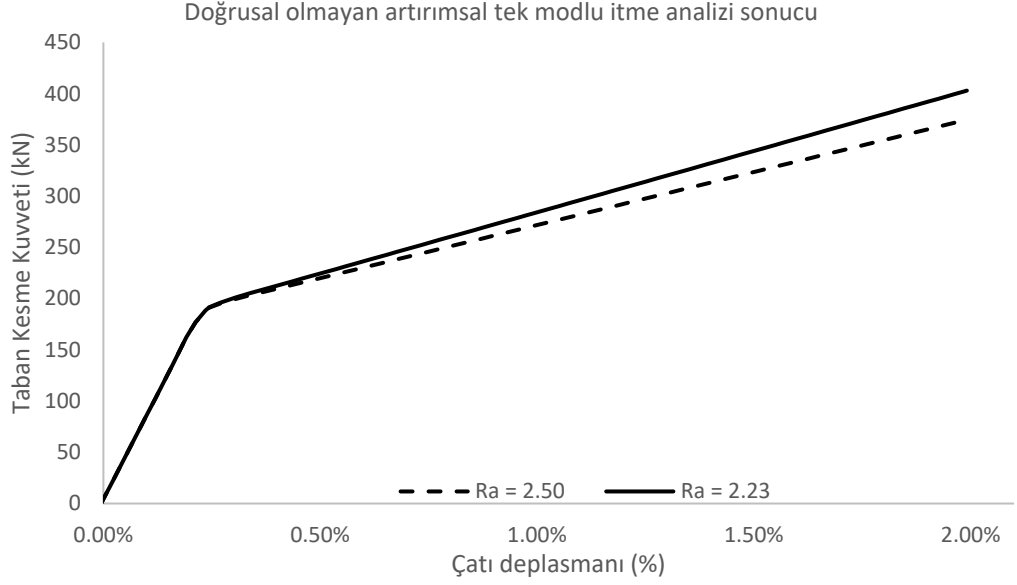
1.iterasyon sönümleyici parametreleri:

Çizelge 4.20. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon sönümleyici tanım parametreleri

FD	k_0 (kN/mm)	k_1 (kN/mm)	D_c (mm)	F_{slip}/F_{ult} t	F_{slip} (kN)	δ_{ult} (mm)	F_{ult} (kN)	k_2 (kN/mm)
FD6	34	1.94	8.52	0.23	17.50	30.18	75	0.78
FD5	52	3.59	7.46	0.21	28.75	30.18	135	1.43
FD4	66	4.40	8.49	0.24	40.00	30.18	170	1.76
FD3	73	5.50	7.98	0.23	47.50	30.18	210	2.20
FD2	81	5.97	8.34	0.23	53.75	30.18	230	2.39
FD1	98	6.76	8.26	0.23	60.00	30.18	260	2.71

SAP2000 programında sönümleyiciler (FD), "Friction-Damper Link" modeli ile tanımlanmıştır. Bu tanımlamada kullanılan gerekli parametreler Çizelge 4.8'de özetlenmiştir.

Pushover analiz sonucu:



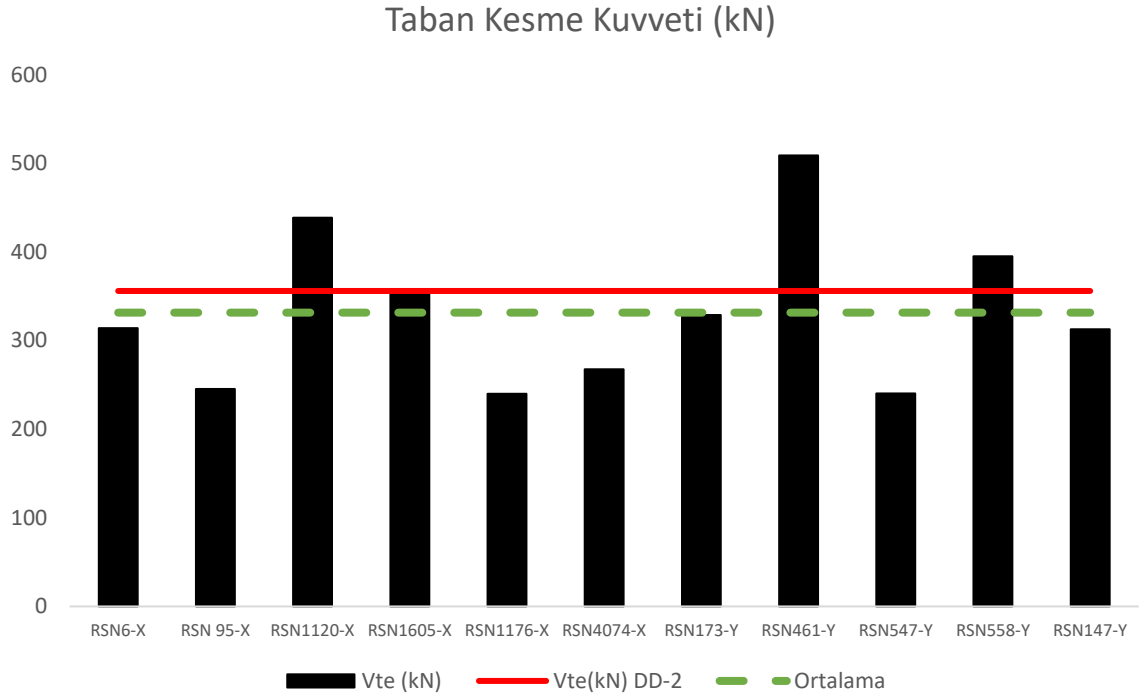
Şekil 4.14. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon Pushover sonucu

Şekil 4.14'te kesikli çizgi, $R_a=2.50$ (başlangıç iterasyonu) kapasite eğrisi, sürekli çizgi ise, $R_a=2.23$ (1.iterasyon) kapasite eğrisidir. F_{slip} değerinin sabit tutulduğu açıkça görülmektedir.

Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi:

Çizelge 4.21. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	227
RSN 95-X	187
RSN1120-X	470
RSN1605-X	281
RSN1176-X	160
RSN4074-X	194
RSN173-Y	413
RSN461-Y	444
RSN547-Y	176
RSN558-Y	350



Şekil 4.15. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Şekil 4.15'te sütunlar, her bir depremin maksimum taban kesme kuvvetlerini (kN), yeşil kesikli çizgi, bu değerlerin ortalamasını ve kırmızı çizgi ise $R_a=2.23$ için hesaplanmış taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Çizelge 4.22. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ 1.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar

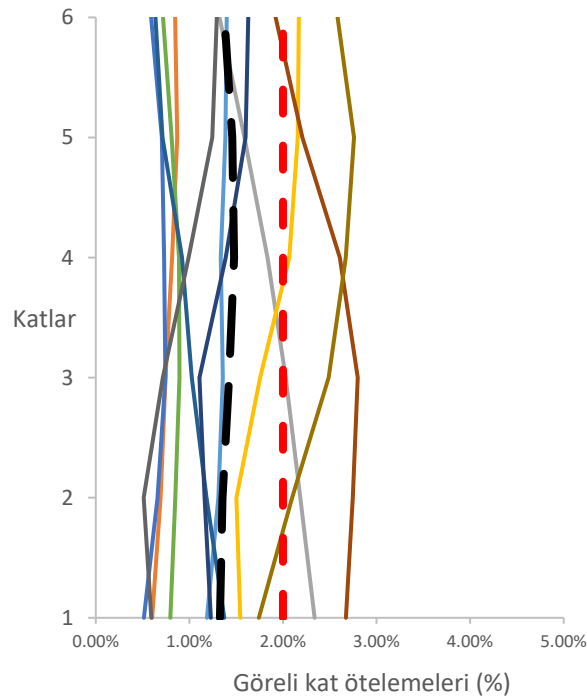
Depremler	Çaprazlı V_{te} (kN)	0.50 Sistem V_{te}	R_a
RSN6-X	680	314	2.16
RSN 95-X	524	245	2.14
RSN1120-X	421	439	0.96
RSN1605-X	741	355	2.09
RSN1176-X	934	240	3.90
RSN4074-X	458	268	1.71
RSN173-Y	475	329	1.44
RSN461-Y	1103	509	2.17
RSN547-Y	442	240	1.84
RSN558-Y	1464	395	3.71
RSN147-Y	606	313	1.94
ORTALAMA	713	332	2.19

Analiz sonucunda yeni $R_a = 2.19$ elde edilmiştir. Yeni R_a ile başlangıç R_a (%2 görelî fark) uyumlu bulunmuş ve görelî kat ötelemeleri değerlendirilmiştir.

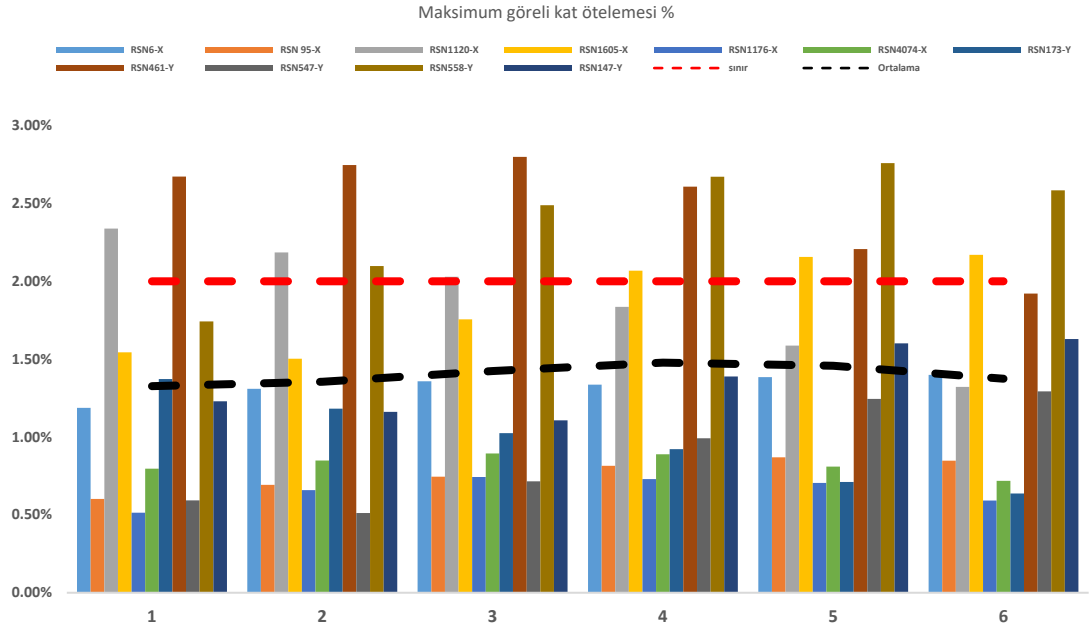
Görelî kat ötelemesi değerlendirmeleri:

Şekil 4.16’da her bir depreme ait görelî kat ötelemelerinin maksimum değerleri, farklı renkli çizgilerle gösterilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi tasarımda kabul edilen sınır değerini, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerinin maksimum değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir.

Ortalama değer, kalın siyah kesikli çizgi ile, %2.00 sınır değeri ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Deprem sonucu oluşan görelî kat ötelemeleri sürekli çizgilerle ifade edilmiştir. Şekil 4.17’de, bu çizgi grafiğinin sütun grafiği biçimindeki gösterimi de sunulmuştur.



Şekil 4.16. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon sonucu görelî kat ötelemeleri



Şekil 4.17. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem 1.iterasyon sonucu görel kat ötelemeleri

Görel kat ötelemelerinin maksimumları Şekil 4.17’de farklı renkli sütunlarla verilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi, tasarımda kabul edilen sınır değeri, siyah kesikli çizgi ise görel kat ötelemelerin maksimumların ortalamasıdır.

Görel kat ötelemelerinin ortalamalarının tasarım sınır değerinin altında olduğu ve yapıdaki ana taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirilen dinamik analizlerin hiçbirinde plastik mafsall oluşmadığı gözlemlenmiş, analiz bu şekilde tamamlanmıştır. Dinamik analiz sonuçlarına göre, sönümleyiciler maksimum 40 mm deplasman yapmıştır. Bu nedenle, sönümleyicilerin güvenlik açısından maksimum deplasman kapasitelerinin $43/30 = 1.15$ katından daha fazla olacak şekilde artırılması önerilmektedir.

4.2.3 $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ Sistemi

Ön tasarım süreci, Şekil 3.17’de verilen akış diyagramında ilk yedi adım sırasıyla uygulanarak 4.1 çaprazlı sistem tasarım ve analiz süreci gerçekleştirilmiştir.

Bayrak şeklinde histerik eğriye sahip sönümleyici cihazın hesap ve tanım süreci Şekil 3.17’de verilen akış diyagramında sekizinci adım uygulanmıştır. Yedinci adımda, eşdeğer deprem yükü modele uygulanmış ve çapraz elemanlardaki iç kuvvetlerden sönümleyicilerin tasarımı için gerekli parametreler, Şekil 3.18’de verilen akış diyagramı ile hesaplanmıştır.

Başlangıçta deprem yükü azalma katsayısı $R_a=2,5$ alınarak hesaplanan katlara gelen deprem yükü ve kat kesme kuvvetleri, Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.5’te verilen kat kesme kuvvetleri kullanılarak sönümleyicilerin F_{ult} değerleri hesaplanmıştır. Çaprazların boyutlandırması, önceki bölümde $R_a=1$ durumu için gerçekleştirilmiştir. Çaprazların boyutları dikkate alınarak k_0 değeri hesaplanmış ve Çizelge 4.23’te sunulmuştur.

Çizelge 4.23. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem k_0 başlangıç eğiminin belirlenmesi

FD	L (mm)	E (Gpa)	D (mm)	A (mm²)	k_0 (kN/mm)
FD6	3256	210	26	531	34
FD5	3256	210	32	804	52
FD4	3256	210	36	1018	66
FD3	3256	210	38	1134	73
FD2	3256	210	40	1257	81
FD1	3256	210	44	1521	98

Çizelge 4.23’te FD, sönümleyicilerin isimlerini; L, çapraz elemanların uzunluğunu (mm); E, elastisite modülünü (MPa); D, çapraz elemanın çapını (mm); A, çapraz elemanlar için seçilen kesitin alanını (mm²); k_0 , elemanların aksenal rijitliğini ifade etmektedir.

Çizelge 4.24. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem FD Cihazı tanım parametreleri

FD	k_0 (kN/mm)	k_1 (kN/mm)	D_c (mm)	F_{slip}/F_{ult} t	F_{slip} (kN)	δ_{ult} (mm)	F_{ult} (kN)	k_2 (kN/mm)
FD6	34	0.490	112.6	0.80	56	30	70	0.196
FD5	52	0.810	111.9	0.80	92	30	115	0.324
FD4	66	1.133	111.0	0.80	128	30	160	0.453
FD3	73	1.352	110.3	0.80	152	30	190	0.541
FD2	81	1.532	110.1	0.80	172	30	215	0.613
FD1	98	1.701	110.9	0.80	192	30	240	0.680

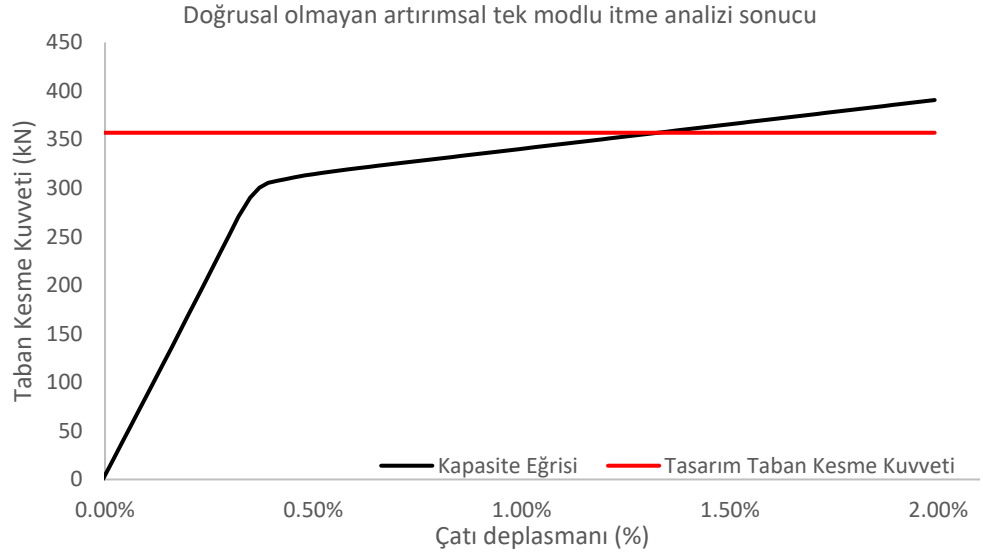
SAP2000 programında sönümleyiciler (FD), "Friction-Damper Link" modeli ile tanımlanmıştır. Bu tanımlamada kullanılan gerekli parametreler Çizelge 4.25'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.25. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Sap2000 Friction Damper Parametreleri

PARAMETRELER	FD6	FD5	FD4	FD3	FD2	FD1
Non-slipping stiffness (kN/mm)	34.24	51.87	65.65	73.15	81.05	98.07
Slipping stiffness (loading) (kN/mm)	0.49	0.81	1.13	1.35	1.53	1.70
Non-slipping stiffness (Unloading) (kN/mm)	0.20	0.32	0.45	0.54	0.61	0.68
Pre-compression displacement (mm)	-112.56	-111.86	-110.98	-110.34	-110.12	-110.94
Stop displacement (mm)	30.18	30.18	30.18	30.18	30.18	30.18
Active direction	Tension	Tension	Tension	Tension	Tension	Tension

Şekil 4.18'de doğrusal olmayan artırımsal tek modlu itme analiz (Pushover) sonucu verilmiştir. Siyah eğri, taban kesme kuvvetinin tepe noktası yerdeğiştirme oranına göre değişimini göstermektedir. Kırmızı doğru ise, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile elde edilen tasarım taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Şekil 3.26'deki akış diyagramında onuncu adım gereğince, %2.00 çatı kaymasında yapının kapasitesinin (siyah eğri), tasarım taban kesme kuvvetinden (kırmızı doğru) fazla olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekilde siyah renkli eğri kapasite eğrisini, kırmızı doğru ise tasarım taban kesme kuvvetini temsil etmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere, ilgili koşul sağlanmıştır.



Şekil 4.18. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Pushover analiz sonucu

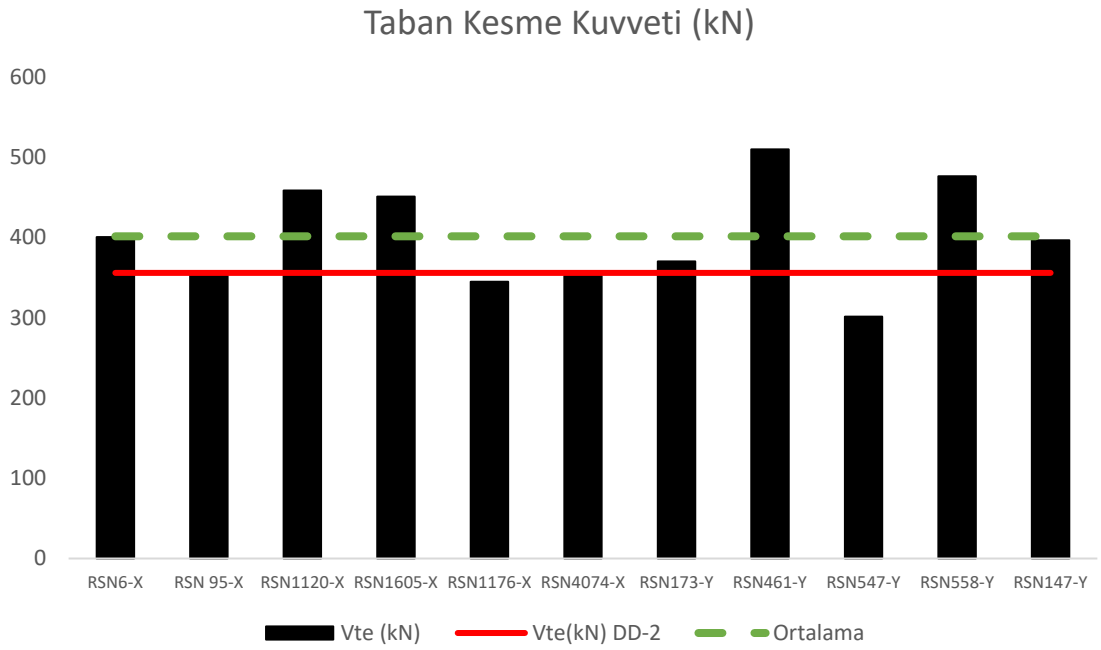
Şekil 3.17'deki akış diyagramında, on birinci adıma geçilmiştir. Bu adımda, sistemin zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarından elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri, çaprazlı sistemin taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, sistemin deprem yükü azaltma katsayısı (R_a) başlangıçta varsayılan $R_a=2.50$ değerinden farklı bir değer olarak $R_a=1.75$ bulunmuştur (Çizelge 4.27).

Dinamik analiz sonuçları, görelî kat ötelemelerinin ortalama değerlerinin %2.00 sınır değerinin altında olduğunu göstermektedir (Şekil 4.20 ve Şekil 4.21)

Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi:

Çizelge 4.26. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	401
RSN 95-X	355
RSN1120-X	459
RSN1605-X	451
RSN1176-X	345
RSN4074-X	352
RSN173-Y	370
RSN461-Y	510
RSN547-Y	301
RSN558-Y	476
RSN147-Y	396



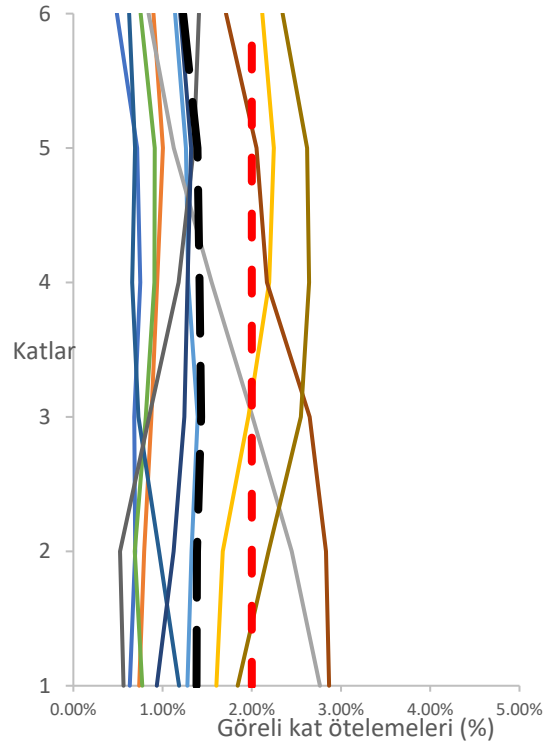
Şekil 4.19. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Burada sütunlar, her bir depremin maksimum taban kesme kuvvetlerini (kN), yeşil kesikli çizgi, bu değerlerin ortalamasını ve kırmızı çizgi ise $R_a = 2.50$ için hesaplanmış taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Çizelge 4.27. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar

Depremler	Çaprazlı V_{te} (kN)	0.80 Sistem V_{te}	R_a
RSN6-X	680	401	1.70
RSN 95-X	524	355	1.48
RSN1120-X	421	459	0.92
RSN1605-X	741	451	1.64
RSN1176-X	934	345	2.71
RSN4074-X	458	352	1.30
RSN173-Y	475	370	1.28
RSN461-Y	1103	510	2.16
RSN547-Y	442	301	1.47
RSN558-Y	1464	476	3.07
RSN147-Y	606	397	1.53
ORTALAMA	713	402	1.75

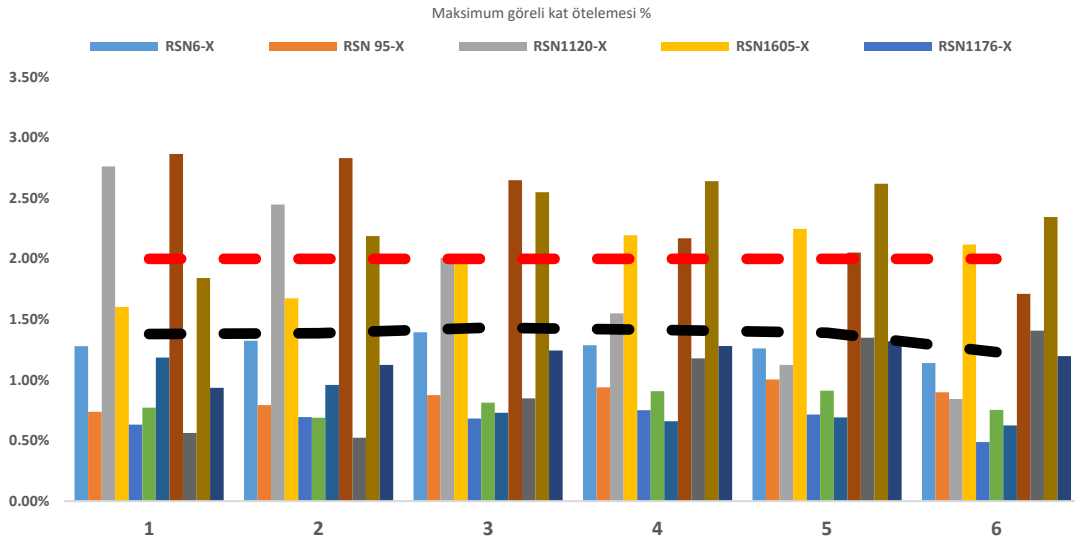
Görelî kat ötelemelerinin değerlendirilmesi:



Şekil 4.20. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem görelî kat ötelemeleri

Şekil 4.20’de, her bir depreme ait görelî kat ötelemelerinin maksimum değeri, farklı renkli çizgilerle gösterilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi tasarımda kabul edilen sınır değerini, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerinin maksimum değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir.

Ortalama değeri, kalın siyah kesikli çizgi ile, %2.00 sınır değeri ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Deprem sonucu oluşan görelî kat ötelemeleri sürekli çizgilerle ifade edilmiştir. Şekil 4.21’de, bu çizgi grafiğinin sütun grafiği biçimindeki gösterimi sunulmuştur.



Şekil 4.21. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem görelî kat ötelemeleri sütun grafiği

Görelî kat ötelemelerinin maksimumları Şekil 4.5’te farklı renkli sütunlarla verilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi, tasarımda kabul edilen sınır değeri, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerin maksimumlarının ortalamasıdır.

Dinamik analiz sonucu elde edilen yeni deprem yükü azaltma katsayısı $R_a=1.75$ için iterasyon yapılmıştır. Yeni iterasyonda hesaplanan deprem kuvveti aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.28. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ($R_a=1.75$)

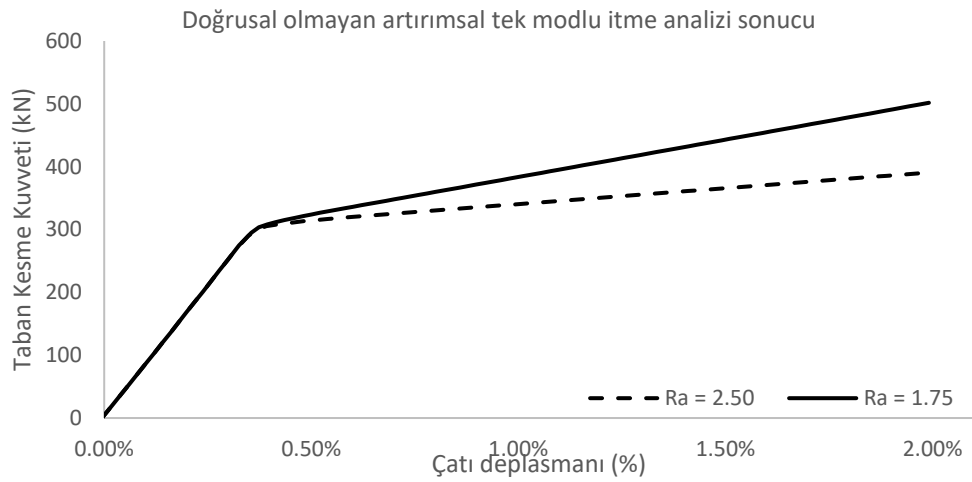
KAT	w_i (KN)	m_i (t)	h_i (m)	$m_i * h_i$	F_{vi} (KN)	V_i (KN)
1	186	19	1.82	34.43	24	509
2	186	19	3.64	68.87	48	485
3	186	19	5.46	103.30	72	437
4	186	19	7.28	137.74	96	365
5	186	19	9.10	172.17	120	269
6	186	19	10.92	206.60	148	148
TOPLAM	1114	114		723.11	509	

1.iterasyon sönümleyici parametreleri:

Çizelge 4.29. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon sönümleyici tanım parametreleri

FD	k_0 (kN/mm)	k_1 (kN/mm)	D_c (mm)	F_{slip}/F_{ult}	F_{slip} (kN)	δ_{ult} (mm)	F_{ult} (kN)	k_2 (kN/mm)
FD6	34	2.111	12.4	0.31	28	30	90	0.845
FD5	52	3.891	10.9	0.29	46	30	160	1.557
FD4	66	5.341	11.0	0.29	64	30	220	2.136
FD3	73	6.485	10.7	0.29	76	30	265	2.594
FD2	81	7.177	10.9	0.29	86	30	295	2.871
FD1	98	8.013	11.0	0.29	96	30	330	3.205

Pushover analiz sonucu:



Şekil 4.22. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon Pushover sonucu

Şekil 4.22’de kesikli çizgi, $R_a = 2.50$ (başlangıç iterasyonu) kapasite eğrisi, sürekli çizgi ise, $R_a = 1.75$ (1.iterasyon) kapasite eğrisidir. F_{slip} değerinin sabit tutulduğu buradan görülebilir.

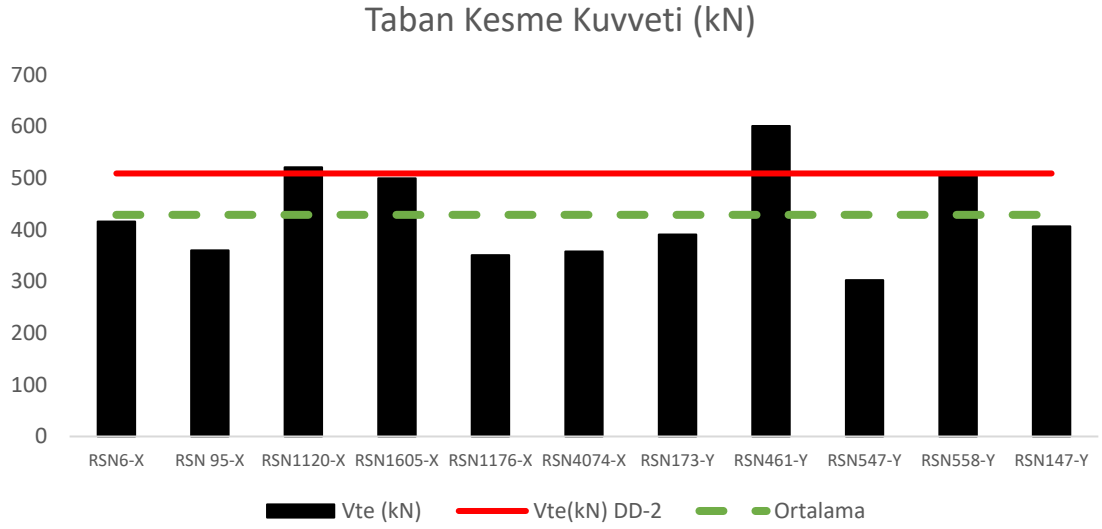
Şekil 3.17’deki akış diyagramında, on birinci adıma geçilmiştir. Bu adımda, sistemin zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarından elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri, çaprazlı sistemin taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, sistemin deprem yükü azaltma katsayısı (R_a) başlangıçta varsayılan $R_a=1.75$ değerinden farklı bir değer olarak $R_a=1.65$ bulunmuştur (Çizelge 4.31).

Dinamik analiz sonuçları, görelî kat ötelemelerinin ortalama değerlerinin %2.00 sınır değerinin altında olduğunu göstermektedir (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25).

Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi:

Çizelge 4.30. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	416
RSN 95-X	360
RSN1120-X	521
RSN1605-X	499
RSN1176-X	351
RSN4074-X	358
RSN173-Y	391
RSN461-Y	601
RSN547-Y	303
RSN558-Y	511



Şekil 4.23. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Şekil 4.23'te sütunlar, her bir depremin maksimum taban kesme kuvvetlerini (kN), yeşil kesikli çizgi, bu değerlerin ortalamasını ve kırmızı çizgi ise $R_a = 1.75$ için hesaplanmış taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

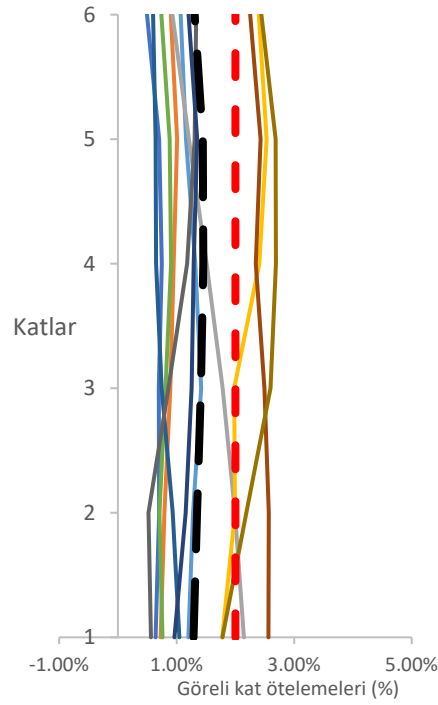
Çizelge 4.31. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ 1.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a 'lar

Depremler	Çaprazlı V_{te} (kN)	0.80 Sistem V_{te}	R_a
RSN6-X	680	416	1.63
RSN 95-X	524	360	1.46
RSN1120-X	421	521	0.81
RSN1605-X	741	499	1.48
RSN1176-X	934	351	2.66
RSN4074-X	458	358	1.28
RSN173-Y	475	391	1.21
RSN461-Y	1103	601	1.84
RSN547-Y	442	303	1.46
RSN558-Y	1464	511	2.86
RSN147-Y	606	407	1.49
ORTALAMA	713	429	1.65

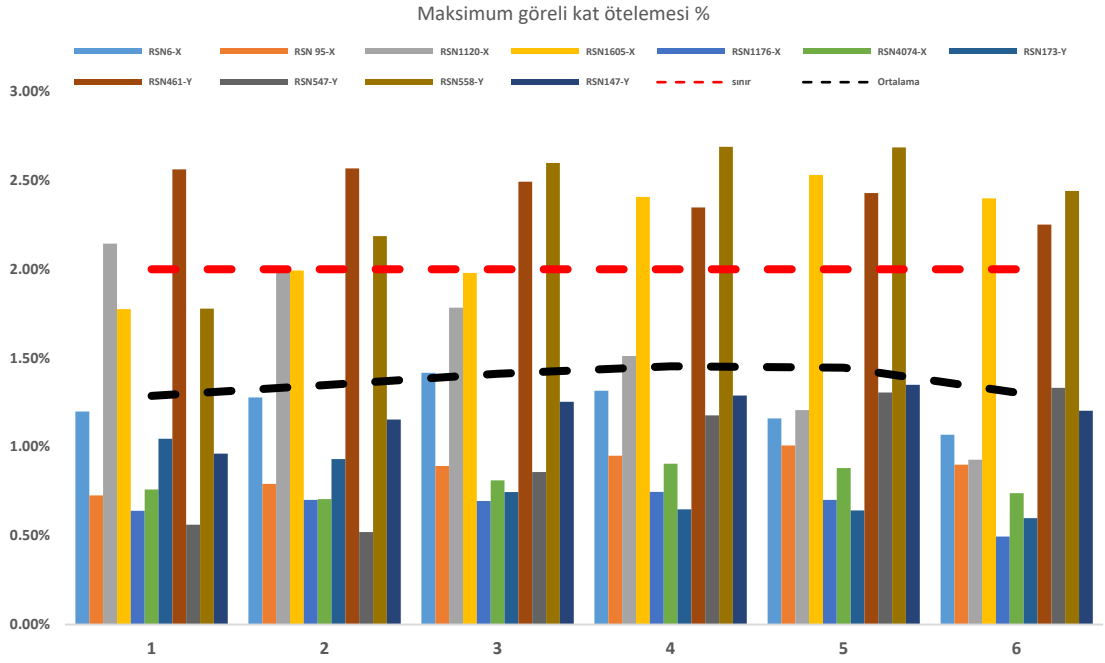
Görelî kat öteleme değerlendirmeleri:

Şekil 4.24'te, her bir depreme ait görelî kat ötelemelerinin maksimum değerleri, farklı renkli çizgilerle gösterilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi tasarımda kabul edilen sınır değerini, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerinin maksimum değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir.

Ortalama değer, kalın siyah kesikli çizgi ile, %2.00 sınır değeri ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Deprem sonucu oluşan görelî kat ötelemeleri sürekli çizgilerle ifade edilmiştir. Şekil 4.25'te, bu çizgi grafiğinin sütun grafiği biçimindeki gösterimi de sunulmuştur.



Şekil 4.24. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon sonucu görelî kat ötelemeleri



Şekil 4.25. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 1.iterasyon sonucu görelî kat ötelemeleri

Görelî kat ötelemelerinin maksimumları Şekil 4.25'te farklı renkli sütunlarla verilmiştir. Kırmızı renkli kesikli çizgi, tasarımda kabul edilen sınır değeri, siyah kesikli çizgi ise görelî kat ötelemelerin maksimumlarının ortalamasıdır.

Çizelge 4.31'de gözlemlendiği üzere, $R_a=1.75$ değeri ile tasarımı yapılan yapının dinamik analiz sonuçlarına göre, $R_a=1.65$ olarak hesaplanmıştır. Yeni R_a ile başlangıç R_a arasında %6 oranında bir görelî fark tespit edilmiş olup, bu uyumsuzluk ikinci bir iterasyonun gerekli olduğunu göstermiştir. Yeni iterasyonda hesaplanan deprem kuvveti aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 4.32. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ($R_a=1.65$)

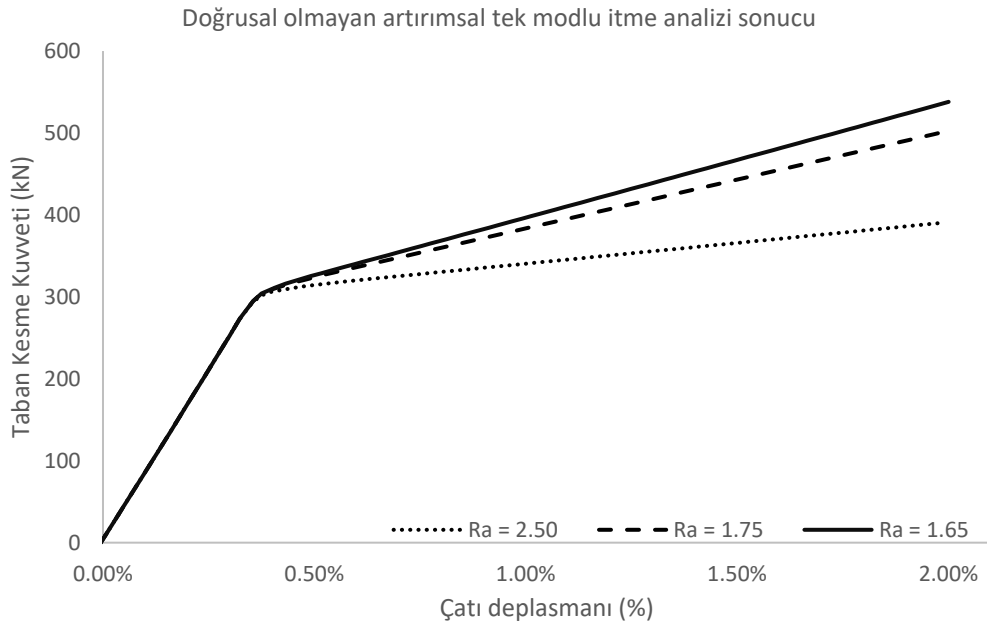
KAT	w_i (KN)	m_i (t)	h_i (m)	$m_i * h_i$	F_{vi} (KN)	V_i (KN)
1	186	19	1.82	34.43	26	540
2	186	19	3.64	68.87	51	515
3	186	19	5.46	103.30	77	464
4	186	19	7.28	137.74	102	387
5	186	19	9.10	172.17	128	285
6	186	19	10.92	206.60	157	157
TOPLAM	1114	114		723.11	540	

2.iterasyon sönümleyici parametreleri:

Çizelge 4.33. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon sönümleyici tanım parametreleri

FD	k_0 (kN/mm)	k_1 (kN/mm)	D_c (mm)	F_{slip}/F_{ult}	F_{slip} (kN)	δ_{ult} (mm)	F_{ult} (kN)	k_2 (kN/m)
FD6	34	2.554	10.15	0.27	28	30	103	1.022
FD5	52	4.506	9.32	0.26	46	30	178	1.802
FD4	66	5.991	9.71	0.27	64	30	239	2.397
FD3	73	7.206	9.51	0.27	76	30	286	2.882
FD2	81	7.966	9.73	0.27	86	30	318	3.187
FD1	98	8.937	9.76	0.27	96	30	357	3.575

Pushover analiz sonucu:



Şekil 4.26. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon Pushover sonucu

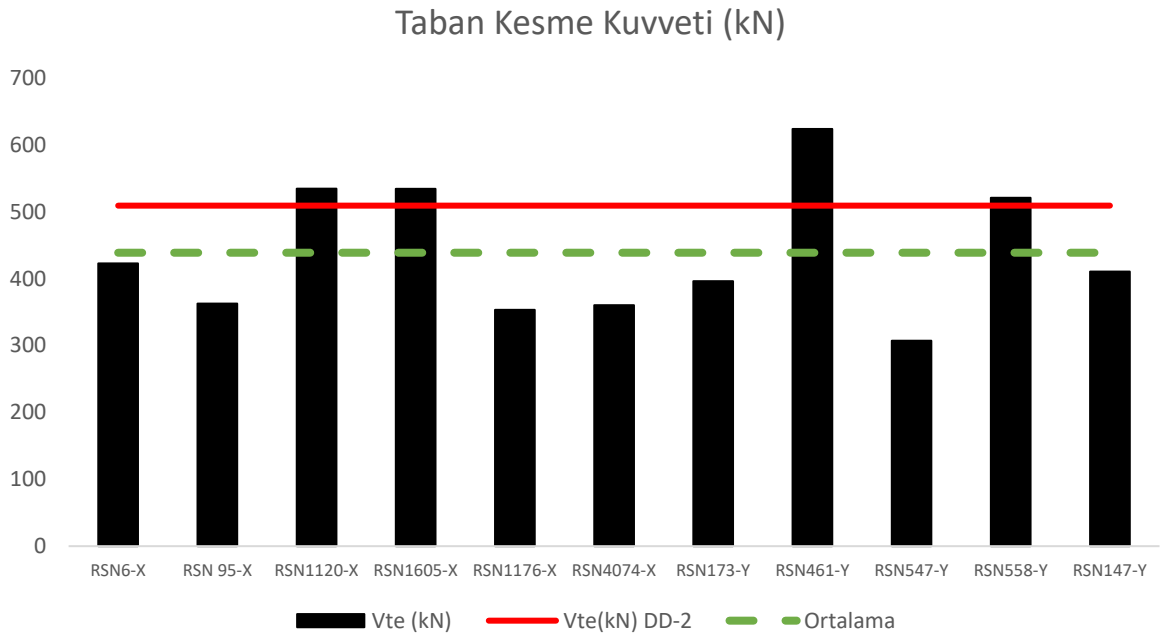
Şekil 3.17'deki akış diyagramında, on birinci adıma geçilmiştir. Bu adımda, sistemin zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarından elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri, çaprazlı sistemin taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, sistemin deprem yükü azaltma katsayısı (Ra) başlangıçta varsayılan $Ra=1.65$ değerinden farklı bir değer olarak $Ra=1.65$ bulunmuştur (Çizelge 4.35).

Dinamik analiz sonuçları, göreceli kat ötelemelerinin ortalama değerlerinin %2.00 sınır değerinin altında olduğunu göstermektedir (Şekil 4.28 ve Şekil 4.29).

Deprem kuvvetlerinin değerlendirilmesi:

Çizelge 4.34. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Depremler	V_{te} (kN)
RSN6-X	423
RSN 95-X	363
RSN1120-X	534
RSN1605-X	534
RSN1176-X	353
RSN4074-X	360
RSN173-Y	396
RSN461-Y	624
RSN547-Y	307
RSN558-Y	521



Şekil 4.27. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ sistem 2.iterasyon dinamik analiz sonucu V_{te} 'ler

Şekil 4.27’de sütunlar, her bir depremin maksimum taban kesme kuvvetlerini (kN), yeşil kesikli çizgi, bu değerlerin ortalamasını ve kırmızı çizgi ise $R_a = 1.65$ için hesaplanmış taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Çizelge 4.35. $F_{slip}/F_{ult} = 0.80$ 2.iterasyon sistem dinamik analiz sonucu R_a ’lar

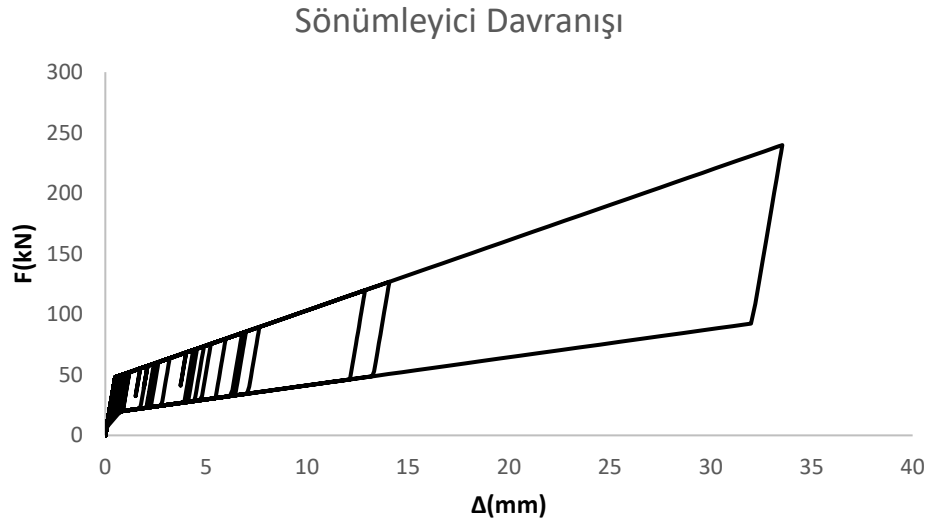
Depremler	Çaprazlı V_{te} (kN)	0.80 Sistem V_{te}	R_a
RSN6-X	680	423	1.61
RSN 95-X	524	363	1.45
RSN1120-X	421	534	0.79
RSN1605-X	741	534	1.39
RSN1176-X	934	353	2.65
RSN4074-X	458	360	1.27
RSN173-Y	475	396	1.20
RSN461-Y	1103	624	1.77
RSN547-Y	442	307	1.44
RSN558-Y	1464	521	2.81
RSN147-Y	606	411	1.47
ORTALAMA	713	439	1.62

Çizelge 4.34’te gözlemlendiği üzere, $R_a = 1.65$ değeriyle tasarımı yapılan yapının dinamik analiz sonucunda, $R_a = 1.62$ elde edilmiştir. Yeni R_a ile başlangıç R_a arasındaki %2 görelî fark yeterince uyumlu bulunmuş ve görelî kat ötelemeleri değerlendirilmiştir. Görelî kat ötelemelerinin ortalamalarının tasarım sınır değerinin altında olduğu, ayrıca yapıdaki ana taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirilen dinamik analizlerin hiçbirinde plastik mafsâl oluşmadığı gözlemlenmiş ve analiz bu şekilde tamamlanmıştır.

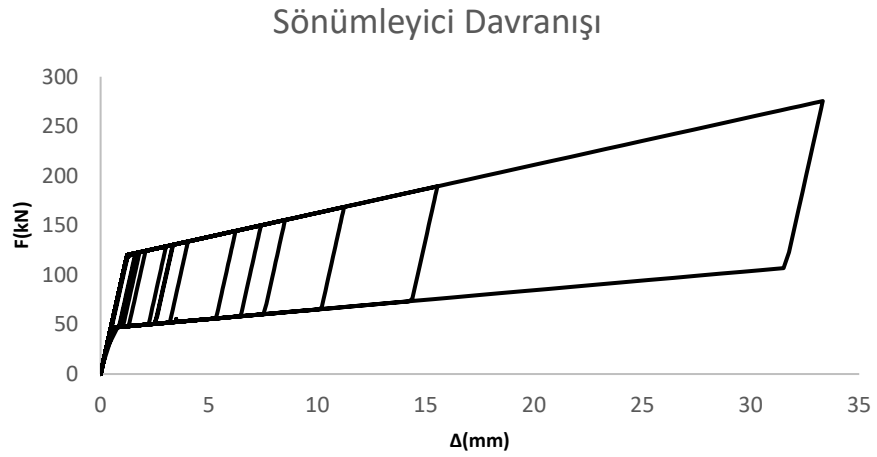
Dinamik analiz sonuçlarına göre, sönümleyiciler maksimum 29 mm deplasman yapmıştır. Bu durum, hiçbir sönümleyicinin maksimum kapasitesini aşmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, maksimum deplasmanın en az 1.5 kat artırılmasının güvenlik açısından uygun olduğu düşünülmektedir.

4.2.4 Sönümleyicili Raf Sisteminin Kendiliğinden Merkezleme Davranışı

Birinci kattaki sönümleyicilerin $F_{slip}/F_{ult}=0.2, 0.5$ ve 0.80 durumları için Mogan Hill depremi altındaki davranışları, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir.

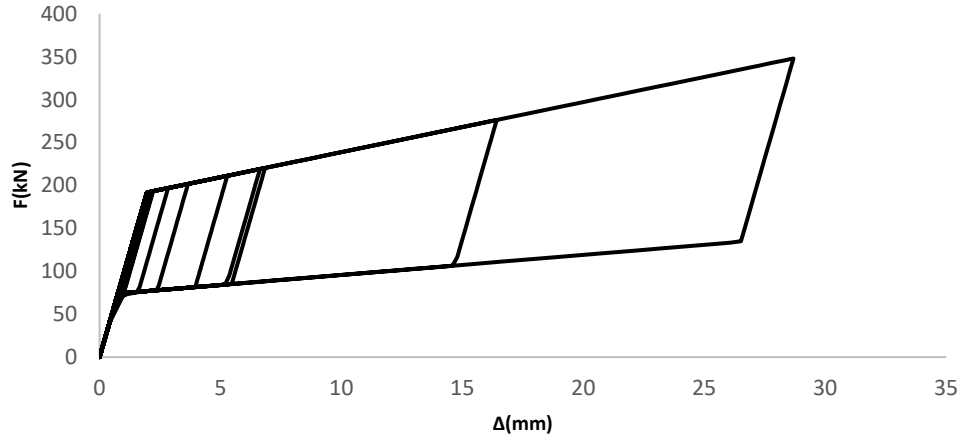


Şekil 4.28. Birinci kattaki sönümleyicinin $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ durumunda Mogan Hill depremi altındaki davranışı



Şekil 4.29. Birinci kattaki sönümleyicinin $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ durumunda Mogan Hill depremi altındaki davranışı

Sönümleyici Davranışı



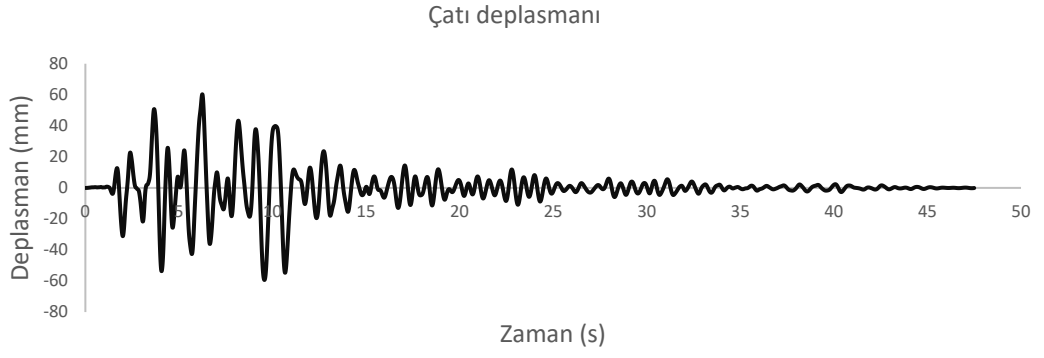
Şekil 4.30. Birinci kattaki sönümleyicinin $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ durumunda Mogan Hill depremi altındaki davranışı

Zaman tanım alanında dinamik analizlerin son saniyelerindeki deplasmanlar, üç sistem için de Çizelge 4.33'te verilmiştir. Buradan da görülebileceği üzere sönümleyiciler kendiliğinden merkezleme davranışını başarıyla sergilemiştir.

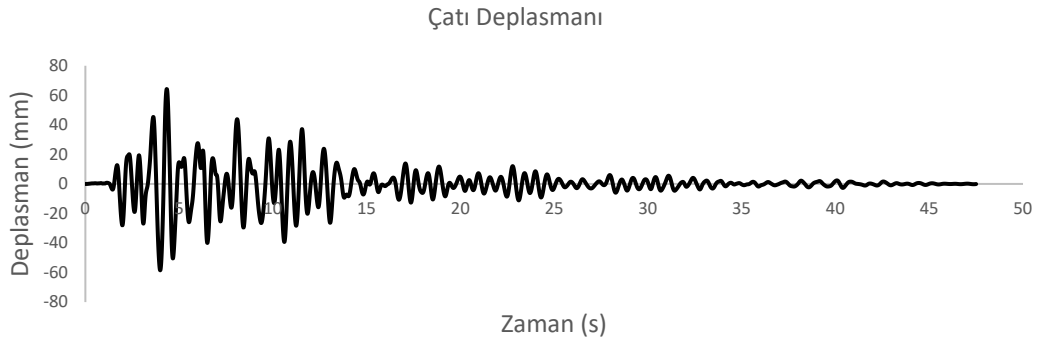
Çizelge 4.36. Sistemlerin depremlerin sonunda çatı deplasmanı

Depremler	$F_{slip} / F_{ult} = 0.20$	$F_{slip} / F_{ult} = 0.50$	$F_{slip} / F_{ult} = 0.80$
RSN6-X	-0.003 mm	-0.003 mm	-0.002 mm
RSN 95-X	-0.084 mm	-0.084 mm	-0.083 mm
RSN1120-X	3.177 mm	3.176 mm	3.320 mm
RSN1605-X	-3.428 mm	-3.640 mm	-3.717 mm
RSN1176-X	0.088 mm	0.081 mm	0.083 mm
RSN4074-X	-0.031 mm	-0.031 mm	-0.031 mm
RSN173-Y	-0.530 mm	-0.534 mm	-0.531 mm
RSN461-Y	0.114 mm	0.111 mm	0.112 mm
RSN547-Y	-0.027 mm	-0.027 mm	-0.027 mm
RSN558-Y	0.261 mm	0.261 mm	0.247 mm
RSN147-Y	0.160 mm	0.159 mm	0.158 mm

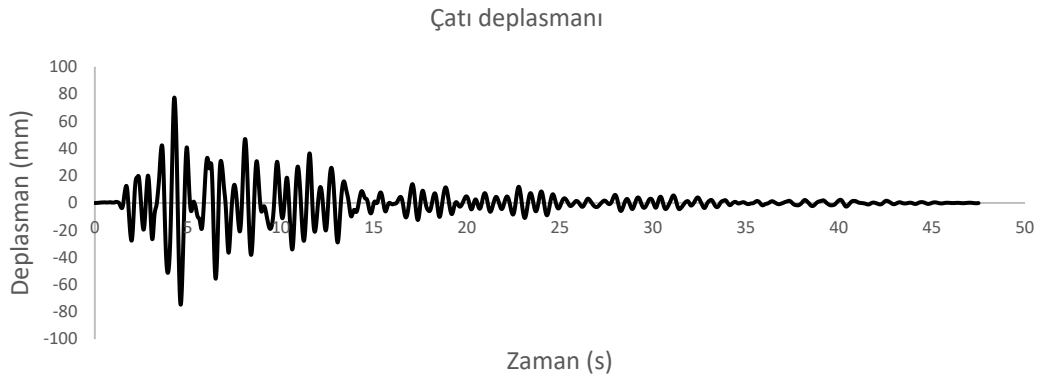
Managua_ Nicaragua-01 (RSN95) depremi altında çatı deplasmanının zamana göre değişimi üç sistem için aşağıda verilmiştir (Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33).



Şekil 4.31. $F_{slip}/F_{ult} = 0.20$ sistem Managua_ Nicaragua-01 depremi çatı deplasmanı



Şekil 4.32. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Managua_ Nicaragua-01 depremi çatı deplasmanı

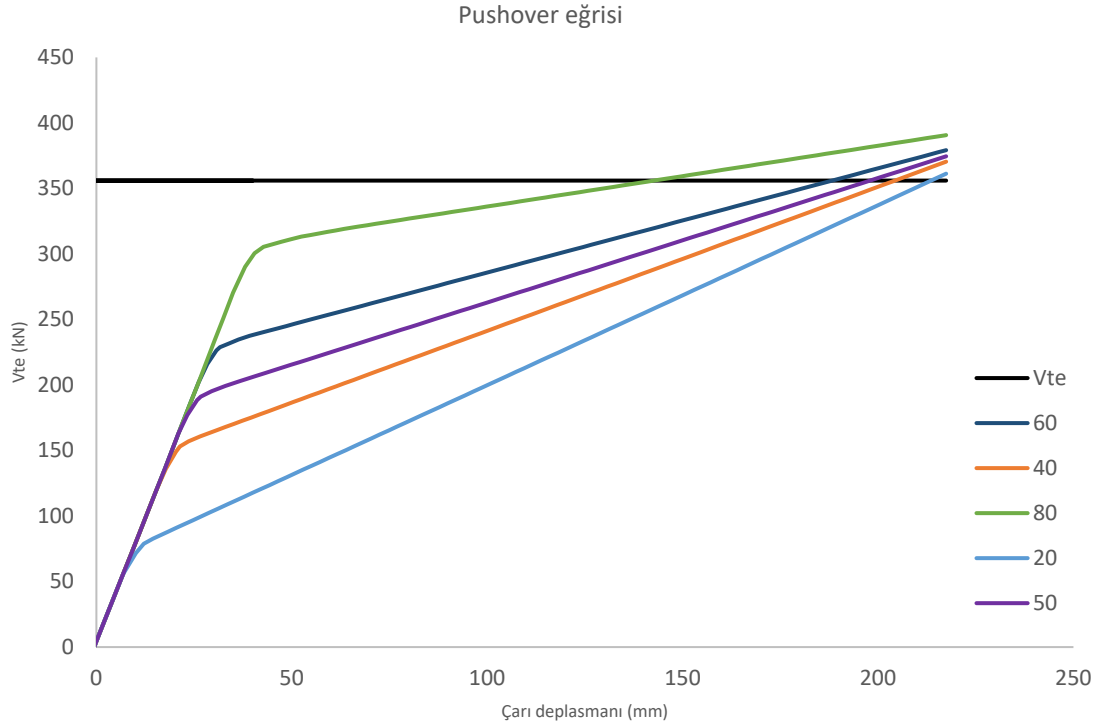


Şekil 4.33. $F_{slip}/F_{ult} = 0.50$ sistem Managua_ Nicaragua-01 depremi çatı deplasmanı

Sönümleyicilerin bayrak şekilli davranış sergilediği ve depremlerden sonra kalıcı deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.

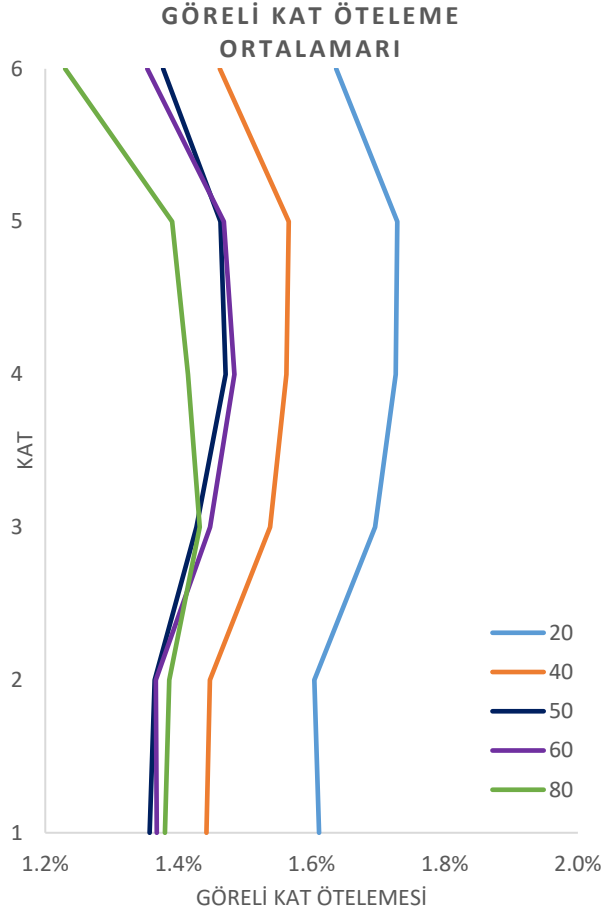
4.3 Parametrik Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Parametrik analizler, F_{slip}/F_{ult} oranı arttıkça sistemin rijitliğinin arttığını, görelî kat ötelemelerinin azaldığını, ancak taban kesme kuvvetlerinin (Deprem kuvvetlerinin) yükseldiğini göstermiştir. Buna karşılık, F_{slip}/F_{ult} oranı azaldıkça sistemin daha fazla sünek bir davranış sergileyerek daha düşük taban kesme kuvveti ürettiği, ancak görelî kat ötelemelerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.34. Farklı F_{slip}/F_{ult} sahip sistemlerin Pushover eğrileri

Şekil 4.34'te farklı F_{slip}/F_{ult} oranına sahip sistemlerin pushover analizi sonucu taban kesme kuvveti – çatı deplasmanı eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi F_{slip}/F_{ult} oranı azaldıkça sönümleyiciler daha düşük kuvvette kaymaya başlıyor.



Şekil 4.35. Farklı F_{slip}/F_{ult} sahip sistemlerin görelî kat ötelemeleri

Şekil 4.35'te, farklı F_{slip}/F_{ult} oranlarına sahip sistemlerin dinamik analiz sonuçlarına göre, görelî kat ötelemelerinin maksimum değerlerinin ortalamaları verilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere, F_{slip}/F_{ult} oranı arttıkça görelî kat öteleme oranları azalmakta ve sistem daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Çizelge 4.37. Farklı F_{slip}/F_{ult} sahip sistemlerin deprem yükü azaltma katsayısı

Fslip/Fult	R_a
0.20	2.64
0.40	2.39
0.50	2.23
0.60	2.05
0.80	1.75

Çizelge 4.34'te, dinamik analiz sonuçlarına göre deprem yükü azaltma katsayıları verilmiştir. Tabloya bakıldığında, oran azaldıkça deprem yükü azaltma katsayısının arttığı gözlemlenebilmektedir.

5 SONUÇLAR

Raf sistemleri, özellikle değerli ürünlerin depolandığı endüstriyel yapılarda büyük öneme sahiptir. Bu tür sistemlerin, tasarım depremi etkisi altında doğrusal elastik davranması ve görelî kat ötelemelerinin kontrol altında tutulması, depolanan ürünlerin hasar görmesini engellemek adına kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, aşağı koridor yönünde taşıyıcı sistemi merkezli sürtünme tipi sönümleyici eklenmiş çekme tipi çaprazlardan oluşan raf yapılarının, hedeflenen deprem düzeyinde hemen kullanım performans seviyesinde nasıl tasarlanacağı gösterilmiştir.

Bu tez kapsamında, aşağı koridor doğrultusunda yalnızca çekme çaprazı bulunan raf sistemlerinde, kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyici kullanılan raf sistemlerinin tasarımı ve deprem yükü altındaki performansı incelenmiştir. Sönümleyicilerin, çaprazların uçlarına takıldığı varsayılmıştır. Bu amaçla, dört model oluşturulmuştur. Modellerden biri, sönümleyici bulunmayan yalnızca çekme çaprazlı bir sistemden oluşurken, diğer üç model farklı F_{slip}/F_{ult} oranlarına sahip sönümleyicili sistemlerden oluşmaktadır.

Modellerin performansı, statik itme (pushover) analizi ve 11 adet ölçeklenmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, kendiliğinden merkezli sürtünme esaslı sönümleyicilerin kullanıldığı sistemlerde doğrusal olmayan davranışın yalnızca sönümleyicilerde oluştuğu, taşıyıcı elemanların doğrusal elastik içerisinde kaldığını ve sistemin görelî kat ötelemelerinin kontrol altında tutulduğu tespit edilmiştir.

Parametrik analizler, F_{slip}/F_{ult} oranı arttıkça sistemin rijitliğinin artarak görelî kat ötelemelerinin azaldığını, ancak taban kesme kuvvetlerinin arttığını göstermiştir. Buna karşılık, F_{slip}/F_{ult} oranı azaldıkça sistemin daha sünek davranış sergileyip daha düşük taban kesme kuvveti ürettiği, ancak görelî kat ötelemelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, F_{slip}/F_{ult} oranı azaldıkça sönümleyiciler daha düşük bir kuvvette kaymaya başlamaktadır.

Aşağı koridor yönünde, taşıyıcı sistemi merkezli sürtünme tipi sönümleyici eklenmiş çekme tipi çaprazlardan oluşan raf yapılarının deprem etkisi altında iyi performans sergilediği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Bagheri, H., Hashemi, A., Yousef-Beik, S. M. M., Zarnani, P., & Quenneville, P. (2020). New Self-Centering Tension-Only Brace Using Resilient Slip-Friction Joint: Experimental Tests and Numerical Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 146(10), 04020219. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002789](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002789)
- Bajoria, K. M., & Talikoti, R. S. (2006). Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems. *Thin-Walled Structures*, 44(3), 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.01.007>
- Baldassino, N., & Zandonini, R. (2008). PERFORMANCE OF BASE-PLATE CONNECTIONS OF STEEL STORAGE PALLET RACKS. *Proceedings of Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures (CIMS2008)*, 119-130.
- Bernuzzi, C., & Castiglioni, C. A. (2001). Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to-column joints in steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, 39(10), 841-859. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(01\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(01)00034-9)
- Bertocci, L., Comparini, D., Lavacchini, G., Orlando, M., Salvatori, L., & Spinelli, P. (2017). Experimental, numerical, and regulatory P-M-M domains for cold-formed perforated steel uprights of pallet-racks. *Thin-Walled Structures*, 119, 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.001>
- Bonada, J., Pastor, M. M., Roure, F., & Casafont, M. (2016). Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending. *Structures*, 8, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.007>
- Bora, C., Oliva, M. G., Nakaki, S. D., & Becker, R. (2007). Development of a Precast Concrete Shear-Wall System Requiring Special Code Acceptance. *PCI Journal*, 52(1), 122-135. <https://doi.org/10.15554/pcij.01012007.122.135>
- Castiglioni, C. A., Kanyilmaz, A., Bernuzzi, C., Drei, A., Degee, Hervè., Braham, C., Hoffmeister, B., Heinemeyer, C., Vayas, I., Konstantinos, A., Sesana, S., Orsatti, B., Hermanek, J., Frederiks, J. W., Cudini, T., Rovere, L., Jehin, D., Kraus, O., & Bakalbasis, D. (2014). Seismic behaviour of steel storage pallet racking systems (SEISRACKS2): Final report. Publications Office.
- Çelik, İ. D., Yildiz, İ., Arslan, K. Y., Öztürk, Y., Efe, M. E., & Kocaman, T. B. (2022). Effect of base-plate types on system behaviour in down-aisle pallet rack systems. *Journal of Constructional Steel Research*, 198, 107584. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107584>
- Dal Lago, B., Biondini, F., & Toniolo, G. (2017). Friction-based dissipative devices for precast concrete panels. *Engineering Structures*, 147, 356-371. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.050>
- Dumbrava, F., & Cerbu, C. (2020). Experimental Study on the Stiffness of Steel Beam-to-Upright Connections for Storage Racking Systems. *Materials*, 13(13), 2949. <https://doi.org/10.3390/ma13132949>
- Erochko, J., Christopoulos, C., Tremblay, R., & Kim, H. (2013). Shake table testing and numerical simulation of a self-centering energy dissipative braced frame. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(11), 1617-1635. <https://doi.org/10.1002/eqe.2290>

- European Commission. Directorate-General for Research. (2009). Storage racks in seismic areas. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/60886>
- Firouzianhajj, A., Gorji Azandariani, M., Usefi, N., & Samali, B. (2022). Performance of baseplate connections in CFS storage rack systems: An experimental, numerical and theoretical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107421. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107421>
- Garlock, M. M., Sause, R., & Ricles, J. M. (2007). Behavior and Design of Posttensioned Steel Frame Systems. *Journal of Structural Engineering*, 133(3), 389-399. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:3\(389\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:3(389))
- Gilbert, B. P., & Rasmussen, K. J. R. (2011). Determination of the base plate stiffness and strength of steel storage racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(6), 1031-1041. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.01.006>
- Gusella, F., Lavacchini, G., & Orlando, M. (2018). Monotonic and cyclic tests on beam-column joints of industrial pallet racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 140, 92-107. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.021>
- Gusella, F., Orlando, M., & Spinelli, P. (2019). Pinching in Steel Rack Joints: Numerical Modelling and Effects on Structural Response. *International Journal of Steel Structures*, 19(1), 131-146. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0095-x>
- Haberdar, M. E. (2023). DEPO RAF SİSTEMLERİNİN BİRLEŞİM BÖLGESİNİN SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ.
- Hashemi, A. (2023). Effect of serviceability limit state and over-strength mechanism on seismic performance of self-centring low damage structures with friction connections. *Structures*, 55, 231-244. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.017>
- Hashemi, A., Bagheri, H., Zarnani, P., & Quenneville, P. (2021). Seismic performance of friction-damped steel frames integrated with resilient tension-only braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106381. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106381>
- Hashemi, A., Clifton, G. C., Bagheri, H., Zarnani, P., & Quenneville, P. (2020). Proposed design procedure for steel self-centring tension-only braces with resilient connections. *Structures*, 25, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.024>
- Hashemi, A., Yousef-Beik, S. M. M., Mohammadi Darani, F., Clifton, G. C., Zarnani, P., & Quenneville, P. (2019). Seismic performance of a damage avoidance self-centring brace with collapse prevention mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*, 155, 273-285. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.12.019>
- Hashemi, A., Zarnani, P., Masoudnia, R., & Quenneville, P. (2017). Seismic resistant rocking coupled walls with innovative Resilient Slip Friction (RSF) joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 129, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.016>
- Iyama, J., Seo, C.-Y., Ricles, J. M., & Sause, R. (2009). Self-centering MRFs with bottom flange friction devices under earthquake loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 314-325. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.02.018>
- Kadi, B. E., Coşgun, C., Mangır, A., & Kıymaz, G. (2017). Strength upgrading of steel storage rack frames in the down-aisle direction. *Steel and Composite Structures*, 23(2), 143-152. <https://doi.org/10.12989/SCS.2017.23.2.143>
- Kanyılmaz, A., Castiglioni, C. A., Brambilla, G., & Chiarelli, G. P. (2016). Experimental assessment of the seismic behavior of unbraced steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, 108, 391-405. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.09.001>

- Kim, H.-J., & Christopoulos, C. (2008). Friction Damped Posttensioned Self-Centering Steel Moment-Resisting Frames. *Journal of Structural Engineering*, 134(11), 1768-1779. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:11\(1768\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:11(1768))
- Lin, Y.-C., Sause, R., & Ricles, J. M. (2013). Seismic Performance of Steel Self-Centering, Moment-Resisting Frame: Hybrid Simulations under Design Basis Earthquake. *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 1823-1832. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000745)
- Loo, W. Y., Kun, C., Quenneville, P., & Chouw, N. (2014). Experimental testing of a rocking timber shear wall with slip-friction connectors. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(11), 1621-1639. <https://doi.org/10.1002/eqe.2413>
- Markazi, F. D., Beale, R. G., & Godley, M. H. R. (1997). Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors. *Thin-Walled Structures*, 28(1), 57-87. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(97\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(97)00003-7)
- Mei, A., Orlando, M., Salvatori, L., & Spinelli, P. (2021). NONLINEAR STATIC AND INCREMENTAL DYNAMIC ANALYSES FOR SEISMIC DOWN-AISLE BEHAVIOR OF RACK STRUCTURES. *INGEGNERIA SISMICA – INTERNATIONAL JOURNAL OF EARTHQUAKE ENGINEERING*, 1-43.
- Núñez, E., Aguayo, C., & Mata, R. (2023). Incremental dynamic analysis of steel storage racks subjected to Chilean earthquakes. *Thin-Walled Structures*, 182, 110288. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110288>
- Popov, E. P., Grigorian, C. E., & Yang, T.-S. (1995). Developments in seismic structural analysis and design. *Engineering Structures*, 17(3), 187-197. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(94\)00006-F](https://doi.org/10.1016/0141-0296(94)00006-F)
- Rasmussen, K. J. R., Zhao, X., Yan, S., Dai, L., Zhu, C., & Jiang, L. (2019). Recent developments of the Component Method. *Ce/Papers*, 3(3-4), 313-323. <https://doi.org/10.1002/cepa.1060>
- Ricles, J. M., Sause, R., Garlock, M. M., & Zhao, C. (2001). Posttensioned Seismic-Resistant Connections for Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, 127(2), 113-121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:2(113))
- Romeo, R., Puntel, E., Pierobon, S., & Baldassino, N. (2023). Component method applied to base plate connections of steel racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 208, 107999. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107999>
- Savio, A. A. D. (t.y.). A Generalised Component-Based Model for Semi-Rigid Beam-to-Column Connections Including the Axial versus Bending Moment Interaction.
- Shahshenas, R. (2015). EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON THE CYCLIC BEHAVIOR OF CONNECTIONS IN STORAGE RACK STRUCTURES. Boğaziçi Üniversitesi.
- Talebian, N., Gilbert, B. P., Hung Pham, C., Chariere, R., & Karampour, H. (2020). Parametric Studies and Design Rules for Local and Distortional Biaxial-Bending Capacity of Cold-Formed Steel Storage-Rack Uprights. *Journal of Structural Engineering*, 146(3), 04020009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002548](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002548)
- Tsai, K., Chou, C., Lin, C., Chen, P., & Jhang, S. (2008). Seismic self-centering steel beam-to-column moment connections using bolted friction devices. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(4), 627-645. <https://doi.org/10.1002/eqe.779>

- Yin, L., Tang, G., Li, Z., Zhang, M., & Feng, B. (2018). Responses of cold-formed steel storage racks with spine bracings using speed-lock connections with bolts I: Static elastic-plastic pushover analysis. *Thin-Walled Structures*, 125, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.005>
- Yin, L., Tang, G., Zhang, M., Wang, B., & Feng, B. (2016). Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with bolts in storage racks. *Engineering Structures*, 116, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.032>
- Zhao, X., Dai, L., & Rasmussen, K. J. R. (2018). Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, 81-105. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.01.006>
- Zhao, X., Dai, L., Wang, T., Sivakumaran, K. S., & Chen, Y. (2017). A theoretical model for the rotational stiffness of storage rack beam-to-upright connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 269-281. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.014>
- Zhao, X., Ren, C., & Qin, R. (2017). An experimental investigation into perforated and non-perforated steel storage rack uprights. *Thin-Walled Structures*, 112, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.11.016>
- Zhao, X., Wang, T., Chen, Y., & Sivakumaran, K. S. (2014). Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 99, 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.007>
- Zhu, C., Rasmussen, K. J. R., & Yan, S. (2019). Generalised component model for structural steel joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 153, 330-342. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.026>
- Αδαμάκος, Κ., & Adamakos, Κ. (2018). Seismic actions and response of steel storage pallet racks—A numerical investigation [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών]. <https://doi.org/10.12681/eadd/44856>
- Τσαρπαλής, Δ., & Tsarpalis, D. (2022). Ductile seismic design, performance assessment and taxonomic characterization of steel racking systems [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών]. <https://doi.org/10.12681/eadd/51894>