

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI ÇERÇEVELERDE
ÇAPRAZ DÜZENİNİN SİSMİK DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ALPAY COŞKUN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

GEBZE

2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI
ÇERÇEVELERDE ÇAPRAZ DÜZENİNİN
SİSMİK DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ALPAY COŞKUN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. ONUR ŞEKER
II. DANIŞMANI
PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INFLUENCE OF BRACING
CONFIGURATION ON SEISMIC
BEHAVIOR OF MULTI-TIERED BRACED
FRAME**

ALPAY COŞKUN
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
**EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING
PROGRAM**

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. ONUR ŞEKER
II. THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ

GEBZE
2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/02/2023 tarih ve 2023/11 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14/02/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Alpay COŞKUN'un tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: DOÇ. DR. ONUR ŞEKER

ÜYE

: PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ

ÜYE

: PROF. DR. BİLGE DORAN

ÜYE

: DOÇ.DR. BARLAS ÖZDEN ÇAĞLAYAN

ÜYE

: PROF. DR. FERİT ÇAKIR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programı'na Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan bu çalışma kapsamında Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçevelerde çapraz düzeninin sismik davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeveler, uçak hangarları, endüstriyel binalar, spor ve eğlence merkezleri, alışveriş merkezi ve kongre binaları gibi yüksek tek katlı ve çok katlı yapılarda yatay yük taşıyıcı sistemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tür Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeveler, temelden kat seviyesine uzanan çapraz elemanların kullanımı pratik ve ekonomik olmadığı durumlarda tercih edilir.

Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçevelerin sismik davranışının değerlendirmesine odaklanan bu çalışmada, eşit kat ve katman yüksekliklerine ve farklı çapraz düzenlerine sahip iki katmanlı üç adet çerçeve 2016 Amerikan Sismik Hükümlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Oluşturulan sayısal modellerimizde çapraz düzenleri değiştirilerek (X, iki katta X, ters V) doğrusal olmayan statik itme analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen veriler, kolonlarda oluşacak eğilme talepleri, çapraz elemanlara etkiyen eksenel yükler, kat ve katman yer değiştirmeleri ve katman kesme kuvvetleri dikkate alınarak incelemeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeveler, Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi, Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz.

SUMMARY

Within the scope of this study, which was presented as a Master's Thesis to Gebze Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Civil Engineering Department Earthquake and Structural Engineering Program, the bracing configuration on seismic behavior of multi-tiered steel concentrically braced frames was influenced. Multi-tiered steel concentrically braced frames are widely used as a lateral load-resisting system in tall single-storey and multi-storey structures such as airplane hangars, industrial buildings, sports and entertainment centers, shopping malls and convention buildings. Such multi-tiered braced frames are preferred when the use of braces extending from foundation to floor level is not practical and economical.

In this study, which focuses on the evaluation of the seismic behavior multi-tiered concentrically braced frames, three two-layer frames with equal storey and tier heights and different bracing configuration are designed in accordance with the 2016 AISC Seismic Provisions. In our numerical models, nonlinear static pushover and nonlinear response history analysis were performed by changing the bracing configuration (X, X in two layers, inverse V). The data obtained from numerical analyses, bending demands to be formed in the columns, axial loads acting on the brace members, story and tier displacements and shear resistance of tiers were examined by taking into account.

Key Words: Multi-Tiered Braced Frame, Nonlinear Static (Pushover) Analysis, Nonlinear Response History Analysis.

TEŞEKKÜR

Bu bölümde heyecanını ve gururunu yaşadığım ciddi bir emek ve özveri ile hazırladığım yüksek lisans tezimin yazım sürecinde bana katkılarını esirgememiş ve teşvik etmiş olan değerli danışmanlarıma, aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunacağım.

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Doç. Dr. Onur ŞEKER ve eş danışmanım Prof. Dr. Bülent AKBAŞ'a,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, aileme, ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı özellikle sevgili abim Alper COŞKUN, kardeşim Aylin COŞKUN ve arkadaşım Mert HUTO'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Arka Planı	1
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Tezin Metodolojisi	4
1.4. Tezin İçeriği	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. Giriş	6
2.2. Çelik Çapraz Elemanların Doğrusal Olmayan Davranışı	6
2.2.1 Çapraz Eleman Kesitleri	9
2.3. Çelik Çaprazlı Çerçevelerin Sismik Davranışı	11
2.3.1. Yüksek Sünek Çelik Çaprazlı Çerçevelerin Birleşimleri	12
2.4. Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçevelerin Sismik Davranışı	14
2.5. Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçevelerin Tasarımı	24
3. PROTOTİP ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI ÇERÇEVELERİN TASARIMI	27
3.1. Giriş	27
3.2. Bina ve Çaprazlı Çerçevelerin Geometrik Özellikleri	27
3.3. Bina ve Çaprazlı Çerçevelere Etkiyen Düşey ve Sismik Yükler	28
3.4. Çaprazlı Çerçeve Elemanlarının Tasarımı	30
3.4.1. Çapraz Elemanların Tasarımı	30
3.4.2. Kolon Elemanların Tasarımı	31
3.4.3. Kiriş Elemanların Tasarımı	34

3.5. Kat ve Katman Yerdeğiştirmelerinin Kontrolü	35
3.6. Tasarım Özeti	37
4. ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI ÇERÇEVELERİN SAYISAL MODELLERİNİN OLUşTURULMASI	39
4.1. Giriş	39
4.2. Malzeme Modeli	39
4.3. Çaprazlı Çerçeve Sayısal Modeli	41
4.3.1. Çapraz Modeli	41
4.3.2. Çaprazlı Çerçeve Sayısal Modeli	45
4.4. Prototip Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeve Sayısal Modeli	49
4.4.1. Sınır Koşulları ve Birleşimler	49
4.4.2. Başlangıç Yerdeğiştirmeleri	50
4.4.3. Geometrik Düzensizlikler ve P-Delta Etkileri	51
4.5. Deprem Yer Hareketi Kayıtları	52
4.6. Rayleigh Sönüm Parametrelerinin Tanımlanması	54
5. ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI ÇERÇEVELERİN SİSMİK DAVRANIşI	57
5.1. Giriş	57
5.2. Doğrusal Olmayan Statik Artımsal İtme (Pushover) Analizi	57
Sonuçları	
5.2.1 Çerçevelerin Global Tepkisi	58
5.2.2 Çapraz Elemanların Tepkisi	63
5.2.3 Kolon Elemanların Tepkisi	65
5.2.4 Çapraz Guse Levhası Tepkisi	68
5.3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları	69
5.3.1 Çerçevelerin Global Tepkisi	69
5.3.2 Çapraz Elemanların Tepkisi	77
5.3.3 Kolon Elemanların Tepkisi	79
5.3.3.1. Düzlem İçi Eğilme Momenti Talepleri	79
5.3.3.2 Düzlem Dışı Eğilme Momenti Talepleri	85
5.3.3.3 Eksenel Kuvvet Talepleri	86
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	88
6.1. Özet	88

6.2. Sonuçlar	89
6.3. İleride Yapılacak Olan alışmalar İçin Öneriler	91
KAYNAKLAR	92
ÖZGEçMİş	96
EKLER	97



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
A, A_g	: Enkesit alanı
b	: Kesit başlık genişliği
C_{exp}	: Çapraz beklenen basınç dayanımı (AISC 341)
C'_{exp}	: Çapraz beklenen basınç sonrası dayanımı (AISC 341)
C_s	: Sismik tepki katsayısı (ASCE 7)
d	: Kesit yüksekliği
F_{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi
F_e	: Elastik burkulma gerilmesi
F_y	: Çelik akma gerilmesi
D	: Ölü yük
h	: Kolon veya çerçeve yüksekliği
h_i	: Katman yüksekliği
I_e	: Yapı Önem Katsayısı (ASCE 7)
K	: Burkulma boyu katsayısı
L	: Hareketli yük
KL	: Burkulma boyu
KL/r	: Narinlik oranı
M_n	: Karakteristik eğilme momenti dayanımı
M_p	: Plastik eğilme momenti
P	: Kolon eksenel kuvvet
P_n	: Karakteristik eksenel kuvvet dayanımı
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
r	: Atalet yarıçapı
S_{DS}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (ASCE 7)
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (ASCE 7)
T_{exp}	: Çapraz beklenen çekme dayanımı (AISC 341)
T_n	: Yapının doğal titreşim periyodu
t_f	: Başlık kalınlığı
t_w	: Gövde kalınlığı

V	: Tasarım taban kesme kuvveti
W	: Yapı toplam sismik ağırlığı
Z	: Plastik mukavemet momenti
λ	: Narinlik değeri
ϕ	: Dayanım katsayısı
AISC	: American Institute of Steel Construction
ASCE	: American Society of Civil Engineers
BRBFs	: Buckling-Restrained Braced Frames
CBFs	: Concentrically Braced Frames
HSS	: Hollow Square Shape
LHS	: Left-Hand-Side
MCE_R	: Maximum Considered Earthquake
MT-BFs	: Multi-Tiered Braced Frames
MT-BRBFs	: Multi-Tiered Buckling Restraint Braced Frames
MT-SCBFs	: Multi-tiered special concentrically braced frames
NLRH	: Nonlinear Response History
OpenSees	: Open System for Earthquake Engineering Simulation
RHS	: Right-Hand-Side
SCBF	: Special Concentrically Braced Frame
SFRS	: Seismic Force-Resisting System
SDOF	: Single-Degree-Of-Freedom

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: a) İki katmanlı ters v tipi çaprazlı endüstri binası; b) Üç katmanlı x tipi çaprazlı endüstri binası.	1
1.2: ÇK-ÇÇ'lerin çapraz düzenleri a) ters V, b) tek katta X, c) iki katta X, d) V, e) diyagonal.	2
1.3: a) Tek katlı çaprazlı çerçeve; b) tek katlı iki katmanlı çaprazlı çerçeve; c) iki katlı çaprazlı çerçeve; d) iki katlı iki katmanlı çaprazlı çerçeve.	3
2.1: Çapraz elemanın tekrarlı yükleme altındaki histeretik davranışı.	7
2.2: Çapraz elemanın narinlik oranının tekrarlı yükleme altındaki histeretik davranışa etkisi.	7
2.3: Çapraz elemanların düzlem dışı deformasyon şekilleri a) Tek çapraz; b) X çapraz.	8
2.4: Çapraz elemanların düzlem dışı yerdeğiştirmeleri a) Deney sonuçları; b) Deney sonuçları ve teorik değerler.	8
2.5: Farklı genişlik kalınlık oranına sahip çapraz elemanların kırılma noktaları.	9
2.6: a) Düzlem içi ve ; b) Düzlem dışı burkulan çapraz elemanlar.	10
2.7: Sünek detaylandırılmış birleşim levhası.	10
2.8: Çaprazlı çerçeve ve beklenen mekanizma durumları (J. Marshall 2015).	12
2.9: Çapraz bağlantı plakası gerilmenin 30 derecelik çizgisel dağılımı.	13
2.10: Çaprazın düzlem içi burkulması; b) Çaprazın düzlem dışı burkulması ve “ 2t “ mesafesi.	13
2.11: ÇK-ÇÇ'lerin çapraz düzenleri ve çok serbestlik dereceli sistemlerde uygulanışı.	14
2.12: Tasarlanan çerçeveler için seçilen kesitler ve olası senaryolar.	15
2.13: Katman yerdeğiştirme ve kolona etkiyen eğilme momenti hikaye geçmişi.	16

2.14:	Maksimum katman 1 yerdeğiştirmesinde eksenel kuvvet gerilme dağılıımı (1 ksi = 6.895 Mpa).	17
2.15:	Katman kiriş-kolon-çapraz birleşim detayı.	18
2.16:	Kolon burkulduğuında çerçeve deformasyon şekli.	19
2.17:	a) Çapraz eleman eksenel kuvvetleri; b) Katman 1 ve 2 yatay kesme kuvvetleri; c) Kolon düzlem içi ve düzlem dışı eğilme momenti ve kesme kuvveti; d) Eleman kesitleri.	21
2.18:	a) Düşey yük taşıyıcı sistem ile 4 katmanlı çaprazlı çerçeve; b) Düşey yük taşıyıcı sistem ile 4 katmanlı çaprazlı çerçevenin yatay tepkisi.	22
2.19:	Farklı tasarım yaklaşımlar ile gerekli olan çelik tonajları a) h = 15 m; b) h = 20 m; c) h = 30 m.	23
2.20:	Çaprazlı çerçevelerde kapasite tasarımı için gerekli olan iç kuvvet talep senaryoları.	25
2.21:	Çelik çok katmanlı çaprazlı çerçevelerde (ÇK-ÇÇ) çapraz akma ve burkulma aşamaları.	26
3.1:	İki katmanlı çelik çaprazlı çerçeveye sahip endüstriyel binanın 3 boyutlu modeli ve ölçüleri.	27
3.2:	Bu çalışmada kullanılan çapraz düzenleri ve geometrik özellikleri (çerçeveler özdeştir).	28
3.3:	Çaprazlı çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistem kolonlarının eksenel yük alanları ve etkiyen yükler.	29
3.4:	Deprem Tepki Spektrumu.	30
3.5:	Çapraz eksenel kuvvet senaryoları ve katman kirişleri ile kolonlara etkiyen maksimum yükler (kN).	32
3.6:	Çelik çok katmanlı çaprazlı çerçeveler için dengelenmemiş çapraz katman kesme dayanımları.	33
3.7:	a) Katman kirişi – kolon birleşimi a) tek katta X b) iki katta X ve ters V.	34
3.8:	a) Kat yerdeğiştirmesinden kaynaklanan katman yerdeğiştirmesi ,b) Düzlem içi eğilme momentinden kaynaklanan yerdeğiştirme.	36
4.1:	a) İzotropik pekleşme ; b) Kinematik pekleşme ; c) Kombine pekleşme modeli.	40
4.2:	a) Fabrikasyon çizimi ; b) ölçüler ; c) malzeme özellikleri.	41

4.3:	a) Çevrimsel yükleme protokolü; b) eksenel kuvvet – yerdeğiştirme grafiği (histeretik davranış).	42
4.4 :	Montajlanmış elemanların sonlu eleman modeli.	43
4.5:	İlk burkulma moduna karşılık gelen başlangıç yerdeğiştirmesi.	44
4.6:	Deneysel test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması.	44
4.7:	Simulasyon sonucunda elde edilen global ve lokal burkulma.	45
4.8:	Uriz ve Mahin’in ters V tipi çerçevesi ve malzeme özellikleri.	46
4.9:	Çerçeve çevrimsel yükleme protokolü.	46
4.10:	a) Taban kesme kuvveti – birinci kat yerdeğiştirme; b) Taban kesme kuvveti – çatı yerdeğiştirmesi; c) Birinci kat sağ çapraz histeretik davranışı.	47
4.11:	a) Çapraz elemanların lokal burkulması; b) kolon flanşlarındaki lokal burkulmalar.	48
4.12:	İki katta X çapraz düzenine sahip çerçeve ABAQUS modeli.	49
4.13:	Çerçeve mesnetlenme koşulları.	50
4.14:	Katman kirişi – kolon bağlantı detayı.	50
4.15:	Çapraz ve kolon eleman düzlem içi ve düzlem dışı başlangıç yerdeğiştirmeleri.	51
4.16:	Düşey yük taşıyıcı sistem dahil edilmiş iki katmanlı çaprazlı çerçeve.	52
4.17:	Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarına ait spektrum eğrileri ve tasarıma esas alınan hedef ivme spektrumu.	53
4.18:	Doğal frekans modal sönüm oranı değişim grafiği : a) kütle ve rijitlik orantılı sönüm; b) Rayleigh sönüm yaklaşımı.	54
4.19:	Prototip çerçevenin harmonik yük etkisinde serbest titreşim deneyi.	55
4.20:	Prototip çerçevenin harmonik yük etkisinde serbest titreşim tepkisi.	56
5.1:	Üç çapraz düzenine sahip çerçeve Abaqus sayısal modeli.	57
5.2:	İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi : a) Ters V; b) İki katta X; c) X; d) İtme eğrilerinin karşılaştırılması.	59
5.3:	İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi deformasyon şekli ve gerilme dağılımı karşılaştırılması: a) Ters V; b) İki katta X; c) X.	60
5.4:	İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi burkulma modları ve gerilme dağılımı karşılaştırılması: a) Ters V; b) İki katta X; c) X.	61

5.5:	İki katmanlı çaprazlı çerçeve kat ve katman ötelemeleri : a) Ters V; b) İki katta X; c) X.	63
5.6:	Karakteristik dayanımları ile normalize edilmiş çapraz eksenel kuvvetleri : a) Ters V; b) İki katta X; c) X.	65
5.7	İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi maksimum düzlem içi eğilme momenti talebi bölgesi ve gerilme dağılımı karşılaştırılması: a) Ters V; b) İki katta X; c) X.	66
5.8	Karakteristik dayanımları ile normalize edilmiş kolon moment talepleri : a) Ters V; b) İki katta X; c) X.	67
5.9:	Çapraz guse levhası plastik mafsallık bölgesi : a) Ters V; b) İki katta X; c) X.	69
5.10:	Maksimum kat ötelemelerinin karşılaştırılması.	74
5.11:	Maksimum katman 1 ötelemelerinin karşılaştırılması.	75
5.12:	Maksimum katman 2 ötelemelerinin karşılaştırılması.	75
5.13:	Japonya – Kobe depremi altında deformasyon şekilleri ve gerilme dağılımları $t = 8.30$ sn. (deformasyon ölçek faktörü = 4).	76
5.14:	Prototip çerçeve çaprazlarında oluşan maksimum eksenel çekme kuvveti talepleri.	77
5.15:	Prototip çerçeve çaprazlarının maksimum eksenel basınç kuvveti talepleri.	78
5.16:	Japonya – Kobe depremi altında katman 1 ve 2 çapraz elemanların histeretik davranışı.	79
5.17:	Japonya – Kobe depremi (RSN 1111) altında çerçeve kolonları düzlem içi moment talepleri.	80
5.18:	Çerçeve kolonları düzlem içi eğilme momenti talepleri.	81
5.19:	Japonya – Kobe depremi (RSN 1111) altında çerçeve kolonları düzlem dışı moment talepleri.	85
5.20:	Çerçeve kolonları düzlem dışı eğilme momenti talepleri.	86
5.21:	Çerçeve kolonları eksenel kuvvet talepleri.	87

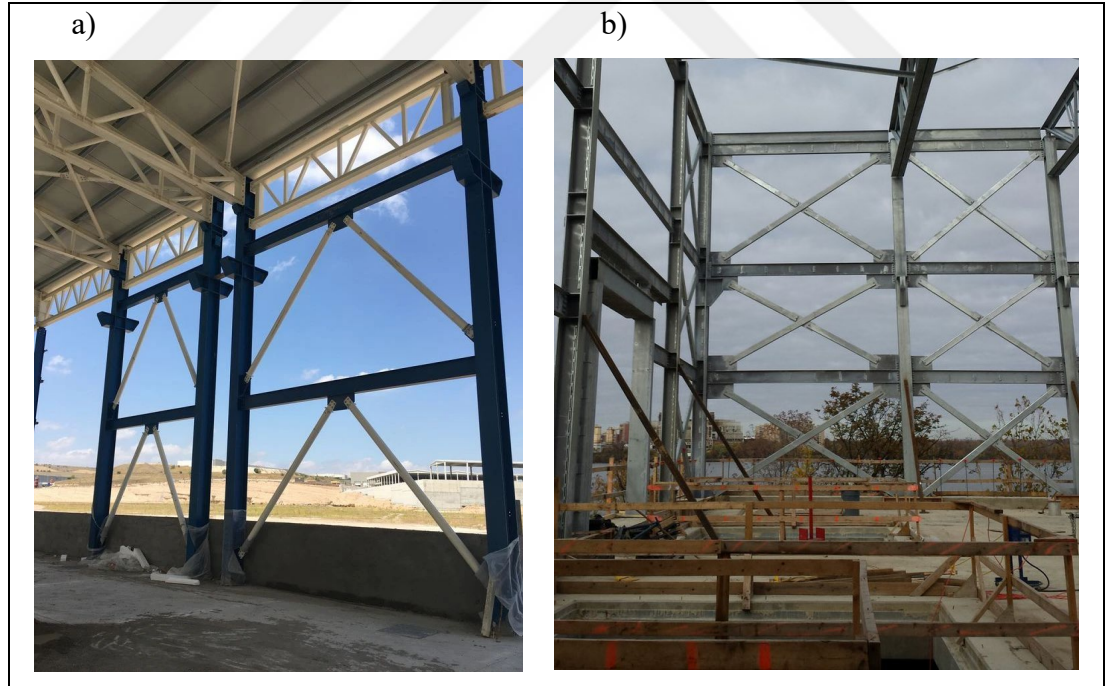
TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
5.1: Ters V çapraz düzenine sahip çerçevenin doğrusal olmayan tepkisi.	71
5.2: İki katta X çapraz düzenine sahip çerçevenin doğrusal olmayan tepkisi.	72
5.3: X çapraz düzenine sahip çerçevenin doğrusal olmayan tepkisi.	73
5.4: Ters V çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarının maksimum talepleri.	82
5.5: İki katta X çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarının maksimum talepleri.	83
5.6: X çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarının maksimum talepleri.	84

1. GİRİŞ

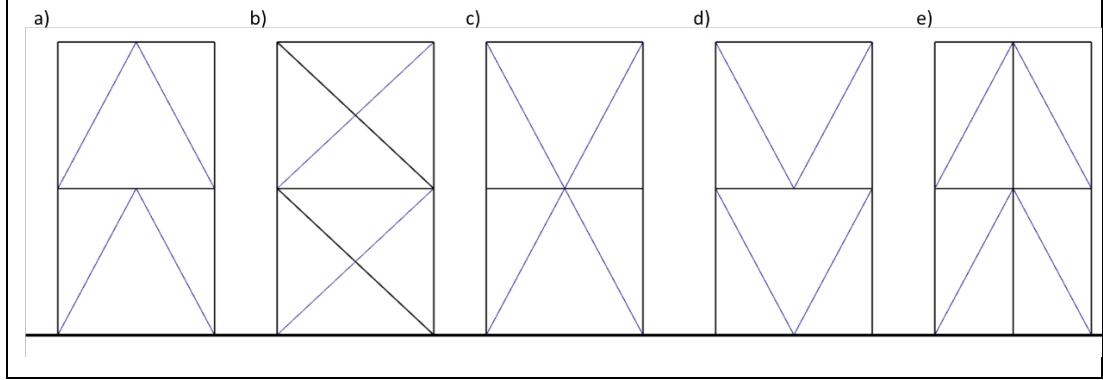
1.1. Tezin Arka Planı

Çok katmanlı çaprazlı çerçeveler (ÇK-ÇÇ) çoğunlukla Kuzey Amerika’da uçak hangarları, endüstriyel binalar, spor ve eğlence tesisleri, alışveriş merkezi ve kongre binaları gibi yüksek tek katlı ve çok katlı yapılarda yatay yük taşıyıcı sistemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 1.1). İki veya daha fazla katmana sahip olan ÇK-ÇÇ’ler, temelden çatı seviyesine uzanan çapraz elemanların pratik ve ekonomik olmadığı durumlarda, çerçeve yüksekliği boyunca kolonların düzlem içi yatay kirişler ve çaprazlarla bölünmesiyle oluşturulur. ÇK-ÇÇ’ler, ters V, V, tek katta X, iki katta X ve diyagonal çapraz düzenine sahip olabilir (Şekil 1.2). Üst üste oluşturulmuş katmanlar sayesinde, çapraz elemanların uzunlukları önemli ölçüde düşürülebilir. Bu da sismik uygulamalar için narinlik oranı sınırlarının karşılanması demektir.



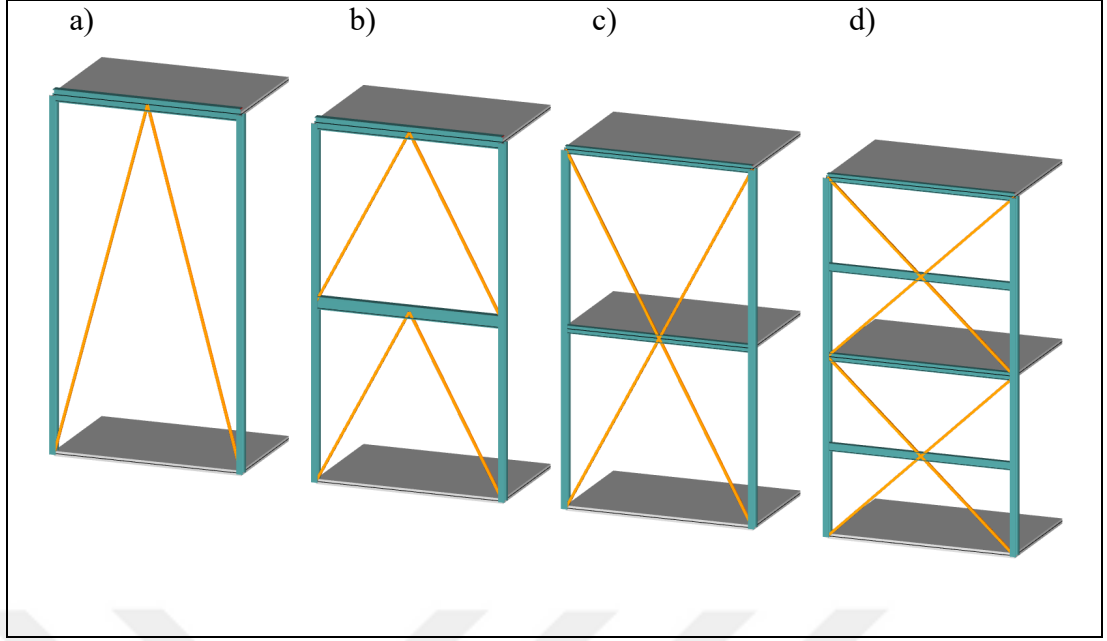
Şekil 1.1: a) İki katmanlı ters v tipi çaprazlı endüstri binası; b) Üç katmanlı x tipi çaprazlı endüstri binası.

Aynı zamanda kapasite tasarımına göre boyutlandırıldığında çok katmanlı çerçeveler içindeki uzunlukları düşürülen çapraz elemanlar kolonlar, katman kirişleri, kirişler ve birleşimlere daha küçük tasarım kuvvetleri aktarırlar.



Şekil 1.2: ÇK-ÇÇ'lerin çapraz düzenleri a) ters V, b) tek katta X, c) iki katta X, d) V, e) diyagonal.

Geleneksel tek katmanlı çaprazlı çerçeveler yapı yüksekliğinin fazla olduğu durumlarda uygulaması oldukça zor olan birleşim detaylarına ihtiyaç duyacağından tercih edilmemektedir. Çok katmanlı çapraz düzenine sahip çerçevelerde katmanlar arası teşkil edilen kirişler, kolonların düzlem içi burkulma boyunu azaltır. ÇK-ÇÇ'lerin kolonlarının düzlem dışında ise burkulma boyları çerçeve yüksekliğine eşit alınır. Şekil 1.3a ve Şekil 1.3b, sırasıyla ters V tipi çaprazlı tek katlı bir yapı ile çok katmanlı bir yapı arasındaki farkı şematik olarak göstermektedir. Şekil 1.3c ve Şekil 1.3d' de görüleceği üzere ÇK-ÇÇ'ler çok serbestlik dereceli sistemlerde de kullanılabilir. Katman seviyelerinde döşeme bulunmaması ÇK-ÇÇ'lerin geleneksel çaprazlı çerçevelerden ayrılan özelliklerindendir. ÇK-ÇÇ'lerin tasarımında çeşitli yapısal çelik enkesitlerinin kombinasyonları kullanılabilir. Çapraz elemanlarda tipik olarak kutu profiller, geniş başlıklı profiller ve T enkesitli elemanlar kullanılır. Kolonlarda kutu profiller veya geniş başlıklı profiller kullanılır. Enkesit seçimi yapının tipine, piyasada bulunmalarına, bağlantı detaylarına, süneklik ve depremsellik seviyesine bağlıdır.



Şekil 1.3: a) Tek katlı çaprazlı çerçeve; b) tek katlı iki katmanlı çaprazlı çerçeve; c) iki katlı çaprazlı çerçeve; d) iki katlı iki katmanlı çaprazlı çerçeve.

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, Amerikan Sismik Hükümlerine [AISC 341, 2016] uygun olarak tasarlanan çok katmanlı çaprazlı çerçevelerin (ÇK-ÇÇ) çapraz düzenlerinin sismik davranış üzerindeki etkisini incelemek ve değerlendirmektir. Temel amaçlar aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Çelik çaprazlı çerçevelerin sismik davranışları ve taşıyıcı sistem elemanlarının davranışına ışık tutmak
- Uluslararası yönetmeliklerde belirtilen tasarım yönergelerinin ÇK-ÇÇ'lerin deprem davranışına uyumunu incelemek.
- Kapsamlı bir arka plan araştırmasına ihtiyaç duyan Amerikan Sismik Hükümlerine [AISC 341, 2016] göre tasarlanmış ÇK-ÇÇ'lerin sismik davranışını doğusal olmayan statik ve dinamik analiz yöntemleri ile incelemek.
- ÇK-ÇÇ'lerin sismik yükler altında taşıyıcı sistem elemanlarının davranışlarını karakterize etmek.
- ÇK-ÇÇ'lerin tasarımını iyileştirmek için önerilerde bulunmak.

1.3. Yöntem

Yapılan incelemede kullanılan yöntem aşağıda adım adım listelenmiştir:

- Çalışmanın başlangıcında ve süresince çaprazlı çerçevelerin taşıyıcı sistem elemanlarının sismik yük etkisi altında doğrusal olmayan davranışlarının ve bu doğrusal olmayan davranışın çerçeve üzerindeki etkisini anlamak için mevcut literatürün kapsamlı bir şekilde taraması yapılacaktır.
- Sismik yük etkisi altında çaprazlı çerçevelerin global ve lokal davranışlarını değerlendirmek ve doğrulamak adına yüksek sünek prototip bir çerçeve tasarlanacaktır.
- Çok katmanlı çaprazlı çerçevelerin taşıyıcı sistem elemanlarının (kolon, kiriş, çapraz) davranışlarını incelemek için malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmama durumunu dikkate alarak gerçekçi modeller oluşturma imkanı sağlayan bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılacaktır.
- Oluşturulan sayısal modellerde çapraz düzenleri değiştirilerek (X , iki katta X, ters V vb.) doğrusal olmayan statik itme ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilecektir.
- Sayısal analizlerden elde edilen veriler, kolonlarda oluşacak eğilme talepleri, çapraz elemanlara etkiyen eksenel yükler, çatı ve katmanlar arası görelî yatay yer değiştirmeler dikkate alınarak incelemeler yapılacaktır.
- Çapraz düzenindeki değişimler göz önünde bulundurularak yukarıda elde edilen sonuçlar, çerçevelerin sismik tepkisi ve çok katmanlı çaprazlı çerçevelerin mevcut tasarım gereksinimleri ile karşılaştırılarak değerlendirmelerde bulunulacaktır.

1.4. Tezin İçeriği

Bu yüksek lisans tezinin takip eden bölümleri şöyledir:

- elik apraz elemanların doğrusal olmayan davranışı, geleneksel aprazlı çerçevelerin ve K-'lerin sismik davranışları, K-'lerin tasarım gereksinimleri ve sayısal modelleme teknikleri hakkında detaylı literatür araştırmasını içermektedir.
- Yapının ve çerçevelerin geometrik özelliklerini, yapıya ve çerçevelere etkiyen yükleri, prototip çerçevelerin tasarımını ve özetini içermektedir.
- Çerçevelerin sayısal modellerinin oluşturulması, doğrusal olmayan analiz adımları ve deprem yer hareketi kayıtlarını içermektedir.
- Doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz sonuçlarını içermektedir.
- Analiz sonuçlarını, değerlendirmesini ve gelecekte yapılacak araştırma çalışmaları için nerileri içermektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

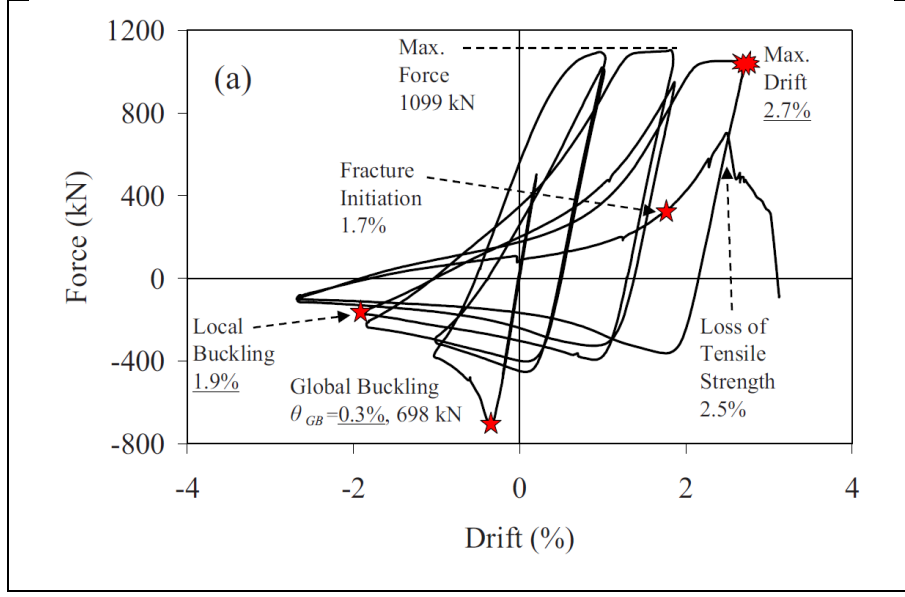
2.1. Giriş

Bu bölümün amacı, geleneksel çaprazlı çerçevelerin tasarımı ve sismik davranışı ile ilgili geçmiş çalışmaların incelenmesidir. Deprem yer hareketini temsil eden yükleme protokolleri altında çelik çaprazlı çerçevelerin, taşıyıcı sistem elemanlarının ve birleşimlerinin davranışı üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler, ÇK-ÇÇ'lerin sismik davranışını anlamak ve sayısal modeller için bir güvence olması açısından önemlidir. Geleneksel çaprazlı çerçevelerin davranışları ve tasarımı ile ilgili kapsamlı araştırmalar yapıldığından, ilk olarak en ilgili araştırma çalışmalarının incelemesi yapılmıştır. Çelik çapraz elemanların doğrusal olmayan davranışı ile başlayarak, ÇÇ ve ÇK-ÇÇ'lerin sismik davranışları incelenmiştir. Son olarak, Amerikan Sismik Hükümlerine [AISC 341, 2016] göre ÇK-ÇÇ'lerin tasarım adımları anlatılmıştır.

2.2. Çelik Çapraz Elemanların Doğrusal Olmayan Davranışı

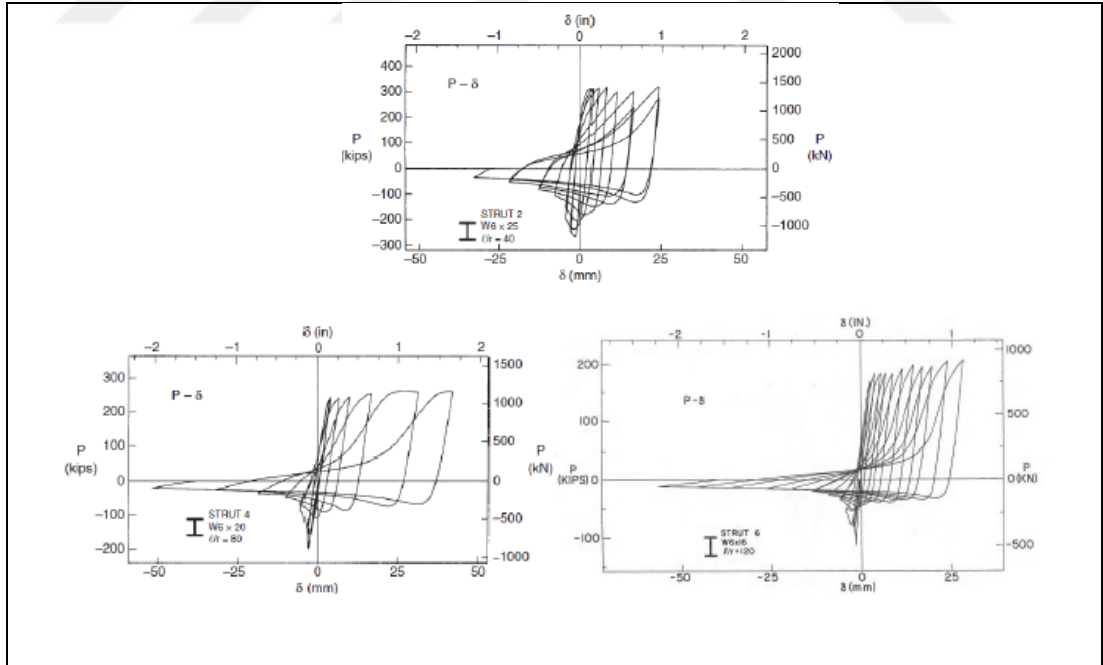
Tüm dünyada deprem riskinin oldukça yüksek olduğu bölgelerde çelik çaprazlı çerçeveler, geçmiş depremlerdeki yatay yük taşıma performansları ve yüksek sünek tasarlanabilmeleri açısından, bina türü ve bina türü olmayan yapıların en önemli bileşenleri haline gelmiştir. Bu çerçeveler, talep edilen rijitlik ve dayanım şartlarını oldukça ekonomik bir şekilde kolaylıkla sağlayabilmelerine rağmen deprem davranışları ile ilgili pek çok soru işareti mevcuttur. Bunlar arasında sınırlı enerji tüketim kapasiteleri, çoğunlukla izostatik olmaları, çaprazlar ve birleşimlerinde görülmesi olası gevrek kırılmalar sayılabilir.

Bu nedenle, çelik çapraz elemanların doğrusal olmayan davranışının araştırılması, son 50 yılda çok sayıda araştırmanın odak noktası haline gelmiştir [Jain et al., 1978], [Popov and Black, 1981], [Astaneh-Asl et al., 1986], [Tremblay, 2002], [Han et al., 2007], [Uriz and Mahin, 2008], [Fell et al., 2008]. Çapraz elemanın tekrarlı yüklemeler altında simetrik olmayan histeretik davranışı Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir [Fell et al., 2009].



Şekil 2.1: Çapraz elemanın tekrarlı yükleme altındaki histeretik davranışı.

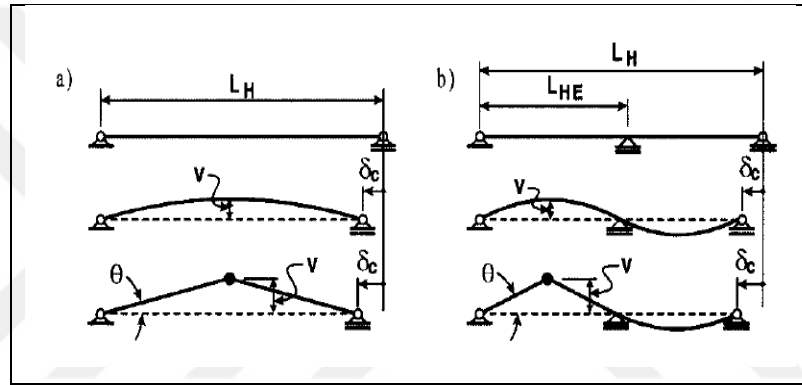
Çapraz elemanların tekrarlı yüklemeler altında histeretik davranışları genişlik kalınlık oranı, narinlik oranı, uygulanan yükleme protokolü ve bağlantı detayları gibi parametrelere bağlıdır.



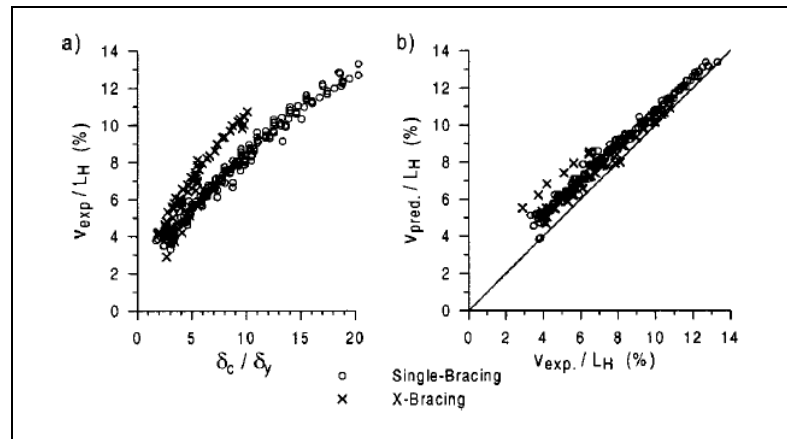
Şekil 2.2: Çapraz elemanın narinlik oranının tekrarlı yükleme altındaki histeretik davranışa etkisi.

Histeretik davranışın çevrelediği alan sönümlenen enerji ile doğrudan bağlantılıdır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi narinlik oranı bu alanı etkileyen en önemli etkidir [Black and Popov, 1980].

ÇÇ’lerde çapraz düzeninin çapraz elemanın histeretik davranışına ve dolayısıyla çerçevenin davranışına etkisi vardır. Ters V tipi çapraz düzenine sahip çerçeveler, dengelenmemiş kuvvete maruz kalan kat kirişlerinin deformasyonundan dolayı çekme ve basınç yükü etkisinde çapraz elemanların tipik histeretik davranışlarını sergileyebilir. Farklı çapraz düzenine sahip çerçevelerde çapraz elemanların deformasyon şekilleri ve davranışları Şekil 2.3 ve 2.4’de gösterildiği gibi bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir [Tremblay, 2003].



Şekil 2.3: Çapraz elemanların düzlem dışı deformasyon şekilleri: a) Tek çapraz; b) X çapraz.



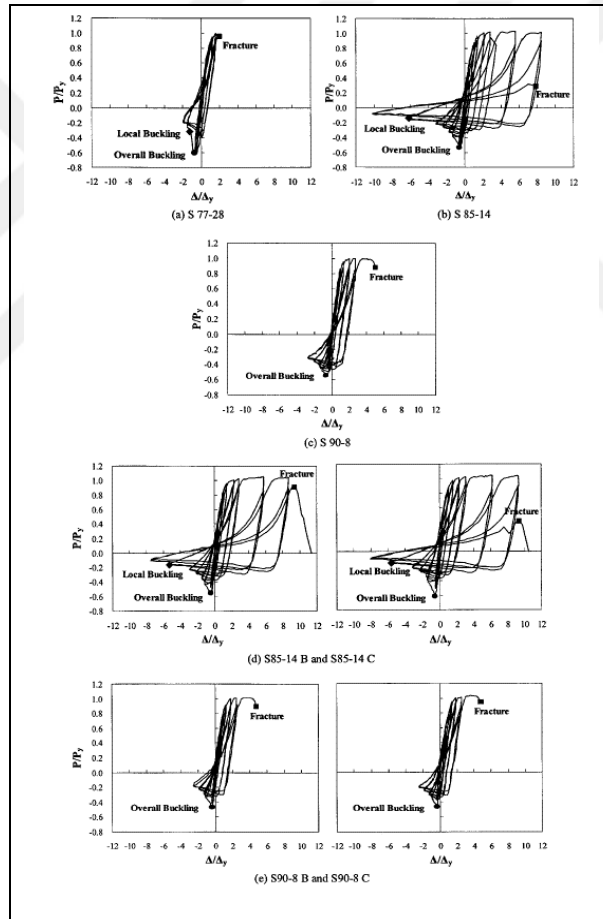
Şekil 2.4: Çapraz elemanların düzlem dışı yerdeğiştirmeleri: a) Deney sonuçları; b) Deney sonuçları ve teorik değerler.

X çapraz düzenine sahip çerçevelerde, çekmeye çalışan çapraz elemanın basınca çalışan elemanlara yeterli düzlem dışı mesnet sağlayabileceği söylenebilir. Yeterli

mesnet sağladığı varsayılararak belirlenen narinlik oranı, çapraz elemanın basınç dayanımının yanı sıra deprem de tüketilen enerji bakımından da yeterli bulunmuştur.

2.2.1. Çapraz Eleman Kesitleri

Çapraz elemanların sınır koşulları, burkulma modları, süneklik, burkulma ,burkulma sonrası ve kırılma davranışını incelemek ve değerlendirmek adına I, C, T, boru ve kutu kesitler ve bunların kombinasyonu dahil olmak üzere birçok kesit üzerinde deneysel testler yapılmıştır [Goggins et al., 2006], [Han et al., 2007], [Uriz and Mahin, 2008], [Tremblay et al., 2008], [Fell et al., 2009].

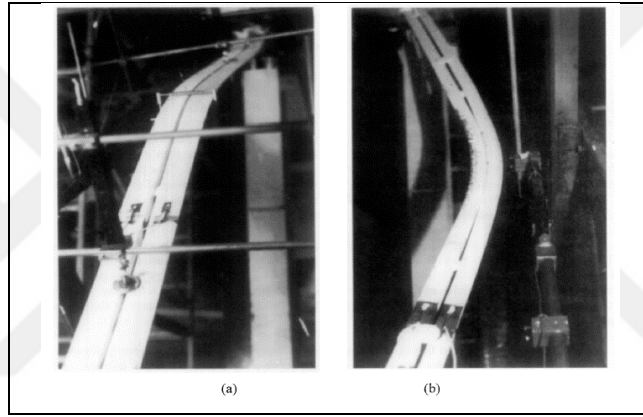


Şekil 2.5: Farklı genişlik kalınlık oranına sahip çapraz elemanların kırılma noktaları.

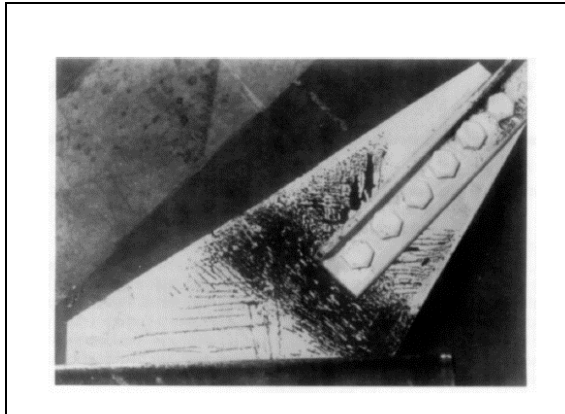
Günümüzde, maliyet ve uygulanabilirlik açısından birçok avantajı ile birlikte kare veya dairesel kesitler en çok tercih edilen çapraz elemanlardır. Çapraz elemanların kırılma ömrü üzerindeki etkili parametrelerin narinlik oranı, genişlik-

kalınlık oranı, kesit şekli ve yükleme protokolünün olduğunu yapılan çalışmalar göstermektedir. Bunlardan en önemlisi ise, genişlik-kalınlık oranıdır [Han et al., 2007], [Fell et al., 2009]. Şekil 2.5’de farklı genişlik kalınlık oranına sahip çapraz elemanların kırılma noktaları gösterilmiştir.

Çapraz elemanlar çerçevenin düzleminde (düzlem içi burkulma modu) veya çerçeve düzleminin dışına doğru (düzlem dışı burkulma modu) burkulacak şekilde detaylandırılabilir (Şekil 2.6) [Astaneh-Asl, 1998]. Burkulan çapraz elemanların orta kısımlarındaki düzlem içi veya düzlem dışı yerdeğiştirmelerden kaynaklı birleşimlerde gevrek kırılmalar gözlemlenebilir. Çapraz eleman birleşim levhaları gerekli düzlem dışı yerdeğiştirmelere izin verecek şekilde detaylandırılabilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: a) Düzlem içi ve ; b) Düzlem dışı burkulan çapraz elemanlar.



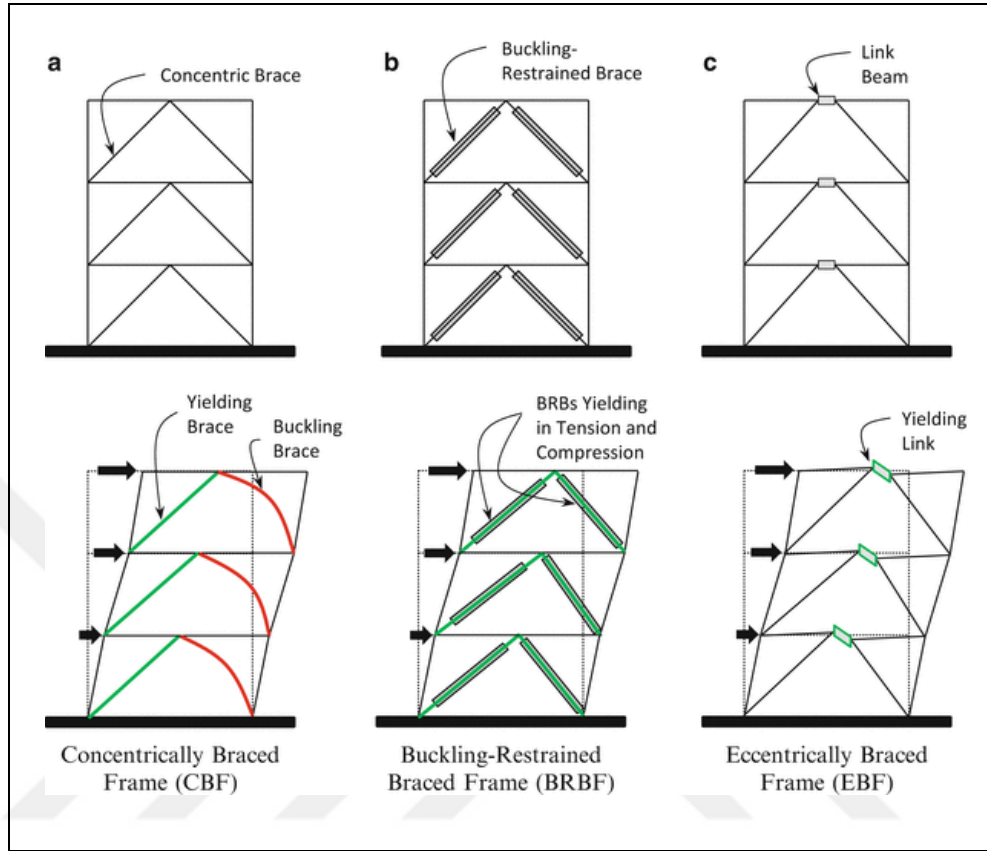
Şekil 2.7 : Sünek detaylandırılmış birleşim levhası.

2.3. Çelik Çaprazlı Çerçevelerin Sismik Davranışı

Çeliğin yapı malzemesi olarak kullanılması 18. yüzyıla kadar dayanmaktadır. Depreme dayanıklı yapı tasarımında, yapının deprem etkisi altındaki davranışının gerçeğe en uygun şekilde belirlenmesi gerekir. Deprem, güvenlik ve ekonomiyi göz önünde bulundurduğumuzda, yapının elastik ötesi davranışa geçmesi bir gereklilik haline gelmiştir. Çelik yapıların geçmiş depremlerdeki performanslarının incelenmesi ve araştırılması ek önlemlerin alınmasına neden olmuştur. Özellikle 1994 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde meydana gelen Northridge ve 1995 yılında Japonya'da meydana gelen Kobe depremlerinden sonra özel sismik detaylandırmalar ve tasarım ilkeleri getirilmiştir.

Tüm dünyada deprem riskinin oldukça yüksek olduğu bölgelerde çelik çaprazlı çerçeveler, geçmiş depremlerdeki yatay yük taşıma performansları ve yüksek sünek tasarlanabilmeleri açısından, bina türü ve bina türü olmayan yapıların en önemli bileşenleri haline gelmiştir. Bu çerçeveler, talep edilen rijitlik ve dayanım şartlarını oldukça ekonomik bir şekilde kolaylıkla sağlayabilmelerine rağmen deprem davranışları ile ilgili pek çok soru işareti mevcuttur. Bunlar arasında sınırlı enerji tüketim kapasiteleri, çoğunlukla izostatik olmaları, çaprazlar ve birleşimlerinde görülmesi olası gevrek kırılmalar sayılabilir. ÇÇ'lerde deprem yer hareketi sırasında açığa çıkan enerji , ilk olarak boyutlandırılan çapraz elemanların doğrusal olmayan davranışı ile tüketilir. Diğer tüm taşıyıcı sistem elemanları ve birleşimleri, çapraz elemanlardan aktarılacak maksimum kuvvetlere göre boyutlandırılarak elastik bölgede kalması sağlanır. Böylece, mekanizma durumunu düşündüğümüzde hasarın sadece çapraz elemanlarla sınırlı kalması sağlanır. 1970'lerin başında Yeni Zelanda'da deprem mühendisi olan Tom Paulay tarafından ortaya atılan ve tüm Avrupa'da yayılması sağlanan bu tasarım yaklaşımı “ Kapasite Tasarımı “ adını almıştır. Bu tür taşıyıcı sistem ve mekanizma durumları Şekil 2.7'de gösterilmiştir [J. Marshall, 2015]. Ülkemiz ve uluslararası yönetmeliklerde, çaprazlı çerçevelerin doğrusal olmayan davranışını ve depremde tüketilen enerjiyi temsil eden sünekliğe göre sınıflandırılır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde süneklik, taşıyıcı sistem davranış katsayısı “ R “ ile ifade edilir ve süneklik düzeyi yüksek, karma, ve sınırlı olarak üçe ayrılır. Basitçe çerçevenin davranışı, yatayda etkiyen kuvvetin artmasıyla basınç etkisi altındaki çapraz eleman basınç kapasitesine ulaşır ve burkulur. Dayanımı yavaş yavaş

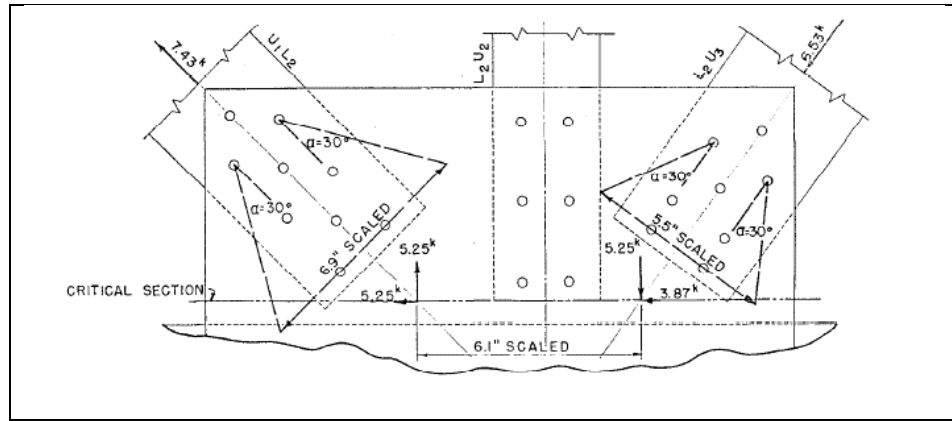
azalmaya başlar ve çekme etkisindeki eleman kapasitesine ulaşır ve akar. Burkulan eleman burkulma sonrası dayanımına ulaşana kadar devam eder.



Şekil 2.8: Çaprazlı çerçeve ve beklenen mekanizma durumları.

2.3.1. Yüksek Sünek Çelik Çaprazlı Çerçevelerin Birleşimleri

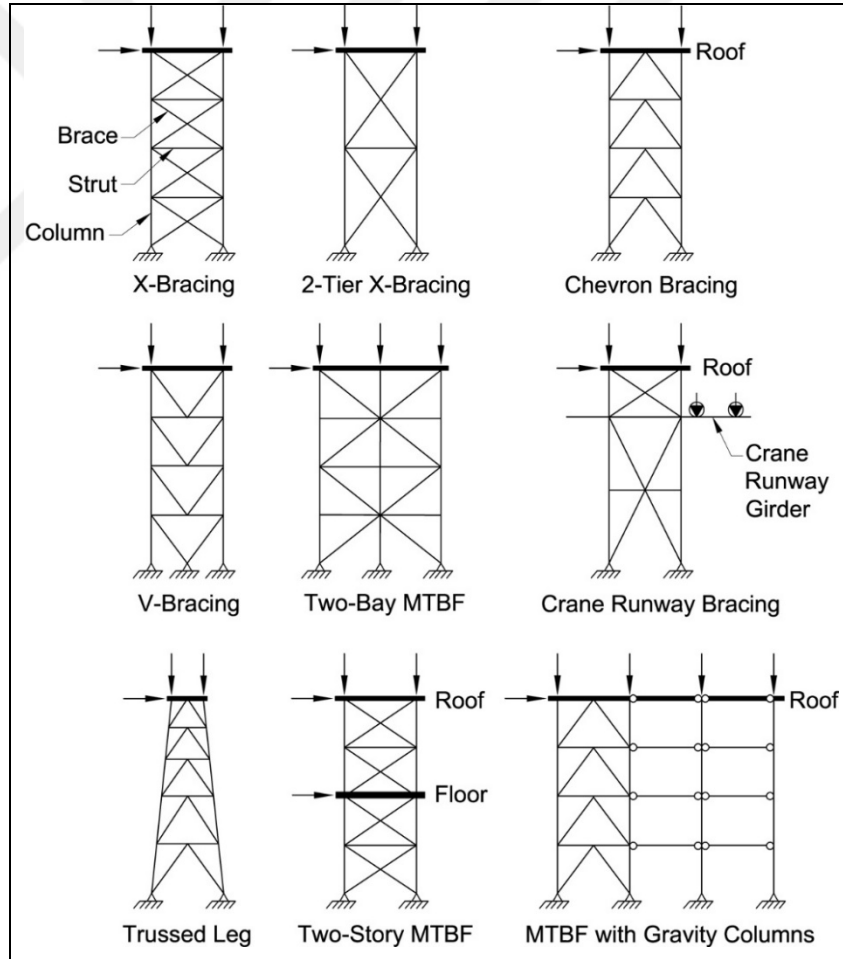
1952’de Tennessee Üniversitesi’nden R.E Whitmore, çapraz birleşim levhasının deneysel test sonuçlarını yayımladı. Whitmore, birleşim levhası üzerinde yerleştirdiği cihazlarla gerilme dağılım grafiklerini elde etti. Elde edilen grafikler, gerilim dağılımının birleşim levhası ile çapraz elemanın bağlandığı noktadan 30 derecelik açı ile gerçekleştiğini doğruladı (Şekil 2.8) [Whitmore, 1952]. 1981-1986 yılları arasında Michigan Üniversitesinden Astaneh-Asl, Goel ve Hanson, çapraz birleşim levhası üzerinde ilk gerçekçi ve tam ölçekli çevrimsel yükleme deneyini gerçekleştirdi ve raporladı.



Araştırma sonuçları, çaprazlı çerçevelerdeki birleşim levhalarının çevrimsel yüklemdeki davranışının elemanın burkulma yönüne bağlı olduğunu göstermiştir. Çapraz eleman, çerçeve düzleminde burkulduğunda, elemanın orta noktasında ve iki uçta birleşim levhasının hemen dışında olmak üzere üç tane plastik mafsal oluşur. Bu durumda birleşim levhası neredeyse tamamen elastik kalmıştır. Çapraz eleman çerçeve düzlemi dışına doğru burkulduğunda ise yine üç adet plastik mafsal oluşur. Ancak bu durumda iki plastik mafsal birleşim levhasındadır. Bu durum da çapraz elemanın düzlem dışı burkulduğunda, birleşim levhasının dönme taleplerini karşılayabilecek şekilde tasarlanması gerektiği anlamına gelir. Birleşim levhasının bu dönme hareketine izin verebilmesi için “2t-4t” aralığında katlanma çizgisinin bırakılması gerekmektedir [Astaneh-Asl, 1986] (Şekil 2.9).

2.4. Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçevelerin Sismik Davranışı

Çok katmanlı çaprazlı çerçeveler uçak hangarları, alışveriş merkezleri, eğlence merkezleri, konutlar, oteller ve birçok endüstriyel yapılar gibi yüksek katlı binalarda kullanılır. Çok katmanlı çaprazlı çerçeveler bir katın yüksekliği boyunca üst üste eklenmiş çok sayıda çaprazlı çerçeveden oluşur. Çok katmanlı çaprazlı çerçeveler geleneksel çaprazlı çerçevelere benzese de, zemin ve çatı seviyeleri arasında diyafram olmaması (tek serbestlik dereceli sistem) ve çerçeve yüksekliği boyunca düzlem dışı destek olmaması ayrıldığı özelliklerdendir. ÇK-ÇÇ'lerin çapraz düzenleri ve çok serbestlik dereceli sistemlerde uygulanışı Şekil 2.10' de gösterilmiştir [AISC 341, 2016].

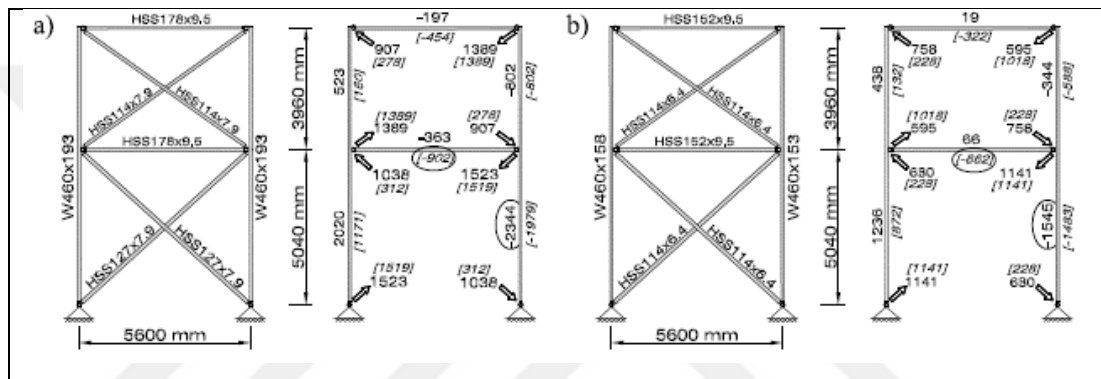


Şekil 2.11: ÇK-ÇÇ'lerin çapraz düzenleri ve çok serbestlik dereceli sistemlerde uygulanışı.

ÇK-ÇÇ'lerin sismik davranışları ile ilgili son 10 yılda yapılan çalışmalar ve değerlendirmeler aşağıda kronolojik sıralama ile özetlenmiştir.

- A. Imanpour ve R. Tremblay (2012)

Imanpour ve Tremblay 2012'de Kanada Sismik Hükümlerine (CSA 2009) göre iki katmanlı çerçeveler tasarladı. Bu çerçeveler doğrusal olmayan davranışı büyük ölçüde etkileyen, deprem enerjisini inelastik davranışı ile dağıtmayı sağlayan farklı kuvvet modifikasyon faktörleri (R) ile tasarlandı (Şekil 2.11).

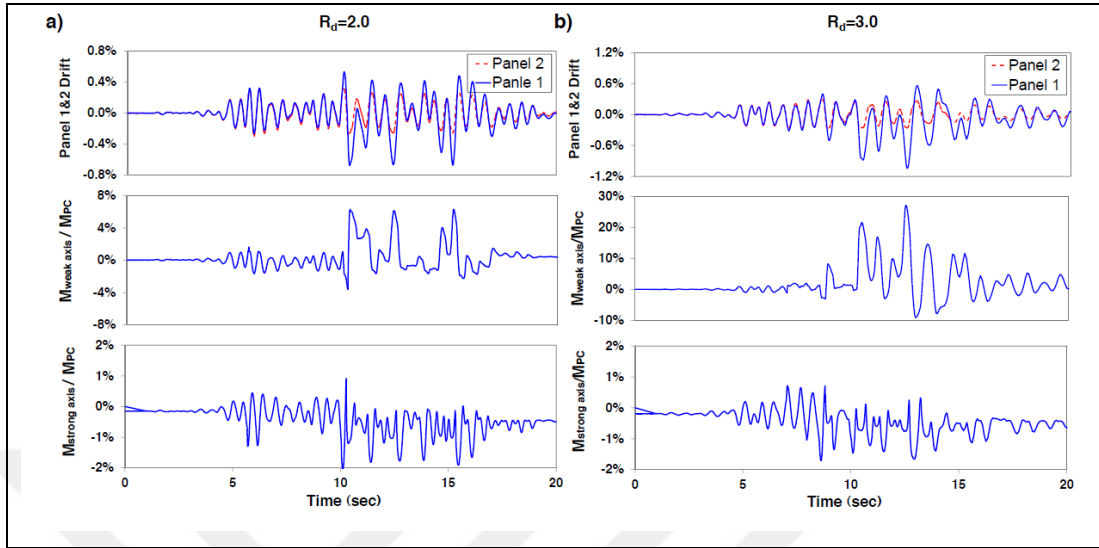


Şekil 2.12: Tasarlanan çerçeveler için seçilen kesitler ve olası senaryolar.

Tasarlanan çerçevelerin sismik tepkisini incelemek adına, doğrusal olmayan statik itme ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirildi ve sonuçlar değerlendirildi (Şekil 2.12). Çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Çerçeve yerdeğştirmeleri ve inelastik davranış, çerçeve yüksekliği boyunca üniform bir şekilde dağılmanın aksine kritik tek bir katmanda toplanma eğilimindedir.
- Çerçeve yüksekliği boyunca üniform olmayan olmayan yerdeğştirmeler, kolonlarda düzlem içi eğilme momentlerine neden olmuştur ve bu değerler tasarımda göz önüne alınan değerden küçüktür.
- Kolonlardaki düzlem dışı eğilme momentleri, Kanada Sismik Hükümlerinde belirtilen fiktif yükün neden olduğu eğilme momentlerinden daha düşüktür.
- Doğrusal olmayan davranışın hangi katmanda birikeceği, çapraz elemanların beklenen dayanımlarına bağlıdır. Bundan dolayı olası kritik katman

senaryolarının dikkate alınması için, çapraz elemanların doğrusal olmayan davranışının gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi gerekir.

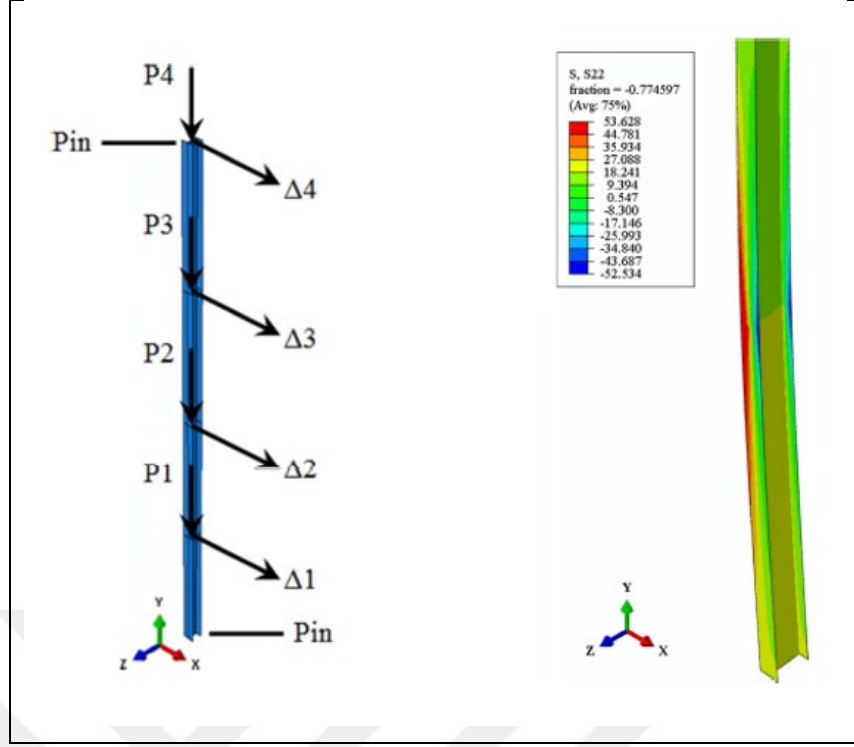


Şekil 2.13: Katman yerdeğiştirme ve kolona etkiyen eğilme momenti hikaye geçmişi.

- A. Imanpour, C. Stoakes ve R. Tremblay (2013)

Imanpour, 2010 Amerikan Sismik Hükümlerine [AISC 341, 2010] uygun 4 katmandan oluşan bir prototip çerçeve tasarladı ve çerçeve kolonlarının stabilitesini inceledi (Şekil 2.13). Çerçevenin sismik davranışını, kolonlar üzerindeki deformasyon şekillerini ve eğilme momenti taleplerini incelemek için 22 deprem yer hareketi kaydı ile OpenSees [McKenna and Fenves, 2004] programında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirdi. OpenSees programından elde edilen sonuçlar aynı zamanda eşdeğer sonlu eleman modeli ile ABAQUS [Hibbit et al., 2012] programında da incelendi. Çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Doğrusal olmayan davranış çerçeve yüksekliği boyunca eşit olarak dağılmamış ve tek bir katmanda toplanmıştır. Kritik olan katmanda gerçekleşen doğrusal olmayan davranış, çapraz elemanlarda yüksek süneklik taleplerine neden olabilir.



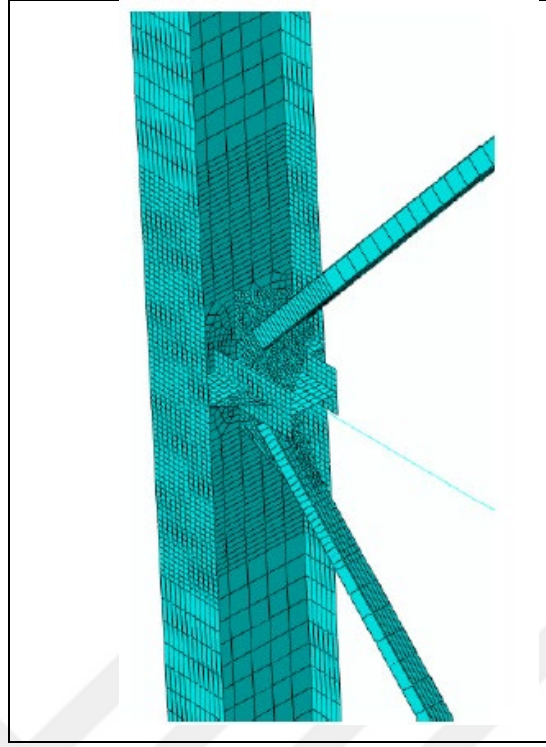
Şekil 2.14: Maksimum katman 1 yerdeğiştirmesinde eksenel kuvvet gerilme dağılımı (1 ksi = 6.895 Mpa).

- Üniform olmayan yerdeğiştirmeler, kolonlarda ciddi düzlem içi eğilme momenti taleplerine yol açabilir.
- Bu bulgular, çerçeve kolonlarında eğilme taleplerinden dolayı akmanın gerçekleşip kolonun stabilitesinin bozulabileceği tehlikesini ortaya koydu.

- C. D. Stoakes ve L. A. Fahnestock (2014)

Stoakes ve Fahnestock, 2014 yılında 4 katmanlı çaprazlı çerçevinin sismik davranışını 3 boyutlu sonlu elemanlar programı ile incelemiştir.

- Katman seviyelerinde katman kirişleri, kolon ve çapraz eleman bağlantı plakaları ile oluşturulan birleşim detayı (Şekil 2.14) , kolonlardaki üniform olmayan yerdeğiştirmeleri önlemede ve yerdeğiştirmelerin çerçeve yüksekliği boyunca tekrardan dağıtılmasında olumlu katkısı vardır.
- Burulmaya karşı detaylandırılan birleşim tipi, şiddetli deprem yer hareketi sırasında kat ve katman yerdeğiştirme oranlarını önemli ölçüde azaltabilir.



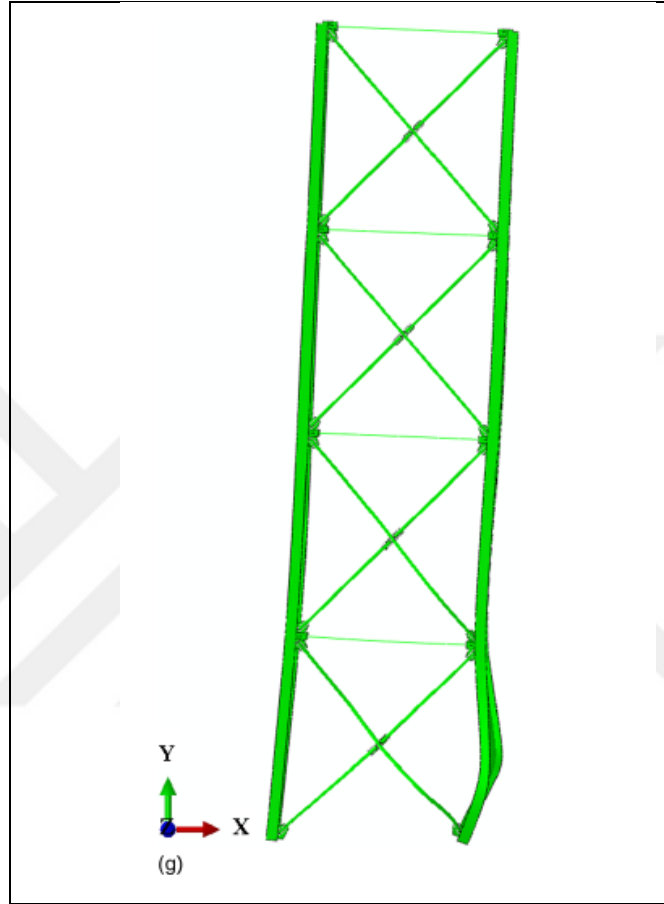
Şekil 2.15: Katman kiriş-kolon-çapraz birleşim detayı.

- Doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler sonucunda, katman kaymaları çapraz elemanlarda aşırı düşük döngü yorgunluğuna neden olabilir.
- Ali Imanpour vd. (2016a)

2016'da yayımlanan bu makale 2010 Amerikan Sismik Hükümleri'ne [AISC 341, 2010] göre tasarlanmış kat ve katman yükseklikleri farklı olan çaprazlı çerçevelerin sismik davranışları doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler ile incelenmiştir. Aynı zamanda eşdeğer ABAQUS [Hibbit et al., 2012] ve OpenSees [McKenna and Fenves, 2004] modellerinin analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın odak noktası, mevcut tasarım gereksinimlerinin yanı sıra alternatif tasarım tasarım yöntemleri ile düzlem içi katman yerdeğiştirmeleri ve kolonların stabilitesi incelenmiştir.

2010 Amerikan Sismik Hükümleri'ne [AISC 341, 2010] göre tasarlanan ÇK-ÇÇ'ler için inceleme sonuçları şunlardır:

- Yerdeşiştirmelerin kritik olan katmanda yoğunlaşması kolonlar üzerine yüksek düzlem içi eğilme momenti taleplerine neden oldu. Bu talep, bazı durumlarda kritik katmandaki kolon eksenel kuvvetleri ile birleştiğinde kolon burkulmasına neden oldu (Şekil 2.15).



Şekil 2.16: Kolon burkulduğunda çerçeve deformasyon şekli.

- Düzlem içi bileşik etkilerden kaynaklanan kolonun burkulması, düzlem dışı tüm kat yüksekliği boyunca düzlem dışı desteğin yoksunluğundan dolayı düzlem dışı yerdeşiştirmeler ile birlikte eğilmeli burulmalı burkulma davranışı gözlemlendi.
- Kritik katmandaki çapraz elemanlar inelastik davranışa geçmiş olsalar bile, katman kirişleri ve çapraz elemanların birleşimleri sayesinde kolonlara yeterli düzlem içi destek sağlar.
- Katman kaymaları, taşıyıcı sistem elemanları ve birleşimleri üzerinde yüksek süneklik taleplerine neden olabilir. Kutu kesitlik çapraz elemanlarda düşük döngü yorgunluğuna neden olabilir.

- Çıkarılan sonuçlar, 2010 Amerikan Sismik Hükümleri'ne [AISC 341, 2010] göre tasarlanan çerçevelerin sismik davranış sırasında yeterli dayanım ve rijitliği sahip olmadığı ihtimalini ortaya koymuştur. Elde edilen kararsızlığa yol açabilecek sınır durumların dikkate alınıp gerekirse ek tasarım kriterlerinin getirilmesinin gerekli olduğu ortaya çıkmıştır.

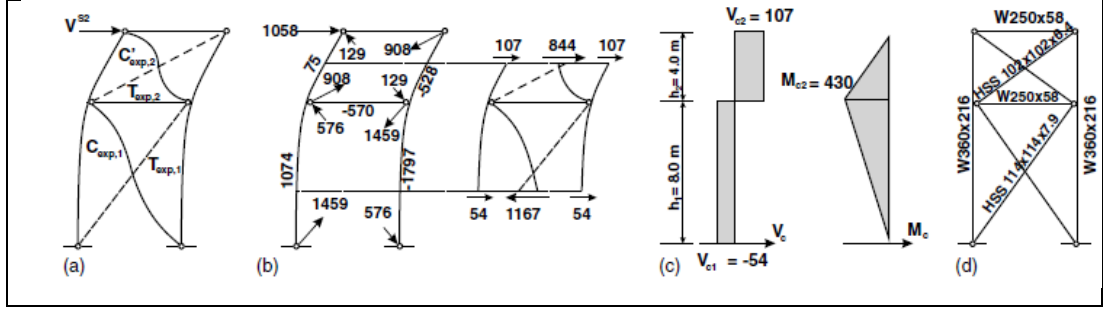
Alternatif ÇK-ÇÇ tasarımları düşünülmüş ve incelenmiştir. Daha düşük bir taşıyıcı sistem davranış katsayısı kullanılarak yüksek tasarım kuvvetlerinin kullanılması, kolonlardaki eğilme talepleri ve stabilite problemleri üzerinde bir etkiye sahip değildir. Yeni nesil çalışmalara ile kombine edildiğinde, burkulması önlenmiş çapraz elemanlar veya burkulması kontrol edilmiş elemanlar ile daha düzgün katman yerdeğiştirmeleri ve eğilme momenti talepleri elde edilebilir.

Elde edilen veriler, incelenen tüm ÇK-ÇÇ'ler için, gözönüne alınan en büyük depremde (MCER) kat yerdeğiştirme talebi, Amerikan yönetmeliklerine [ASCE 7, 2010] göre belirlenen tasarım yerdeğiştirmesi ile tahmin edilemez.

- Ali Imanpour vd. (2016b)

Bu çalışma, bir önceki çalışmanın devamı niteliğindedir. 2010 Amerikan Sismik Hükümlerine [AISC 341, 2010] göre iki katmanlı çaprazlı çerçeve tasarlanmış ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Bir önceki çalışmada karşılaşılan kolon stabilite problemleri ve çapraz süneklik talepleri ile ilgili değerlendirmelerde bulunmak için ek tasarım kriterleri ile çerçeveler yeniden tasarlanıp analizler tekrarlanmıştır. Ana sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- 2010 Amerikan Sismik Hükümleri'ne [AISC 341, 2010] göre tasarlanan çerçeve, yerdeğiştirmelerin kritik olan tek bir katmanda birikmesiyle sonuçlandı ve bu da kolonun stabilitesinin, çapraz elemanlarının ve birleşimlerinin beklenenden erken burkulmasına, kopmasına ve kırılmasına yol açabilir.
- Kolonlardan talep edilen düzlem içi eğilme momenti talebi, çarpaz elemanlardan kaynaklanan dengelenmemiş kuvvetlerin katmanlar arasındaki farkından kaynaklanmaktadır. Daha düzgün katman yerdeğiştirme dağılımı için kolonlar bu talebe karşı tasarlanabilir (Şekil 2.16).

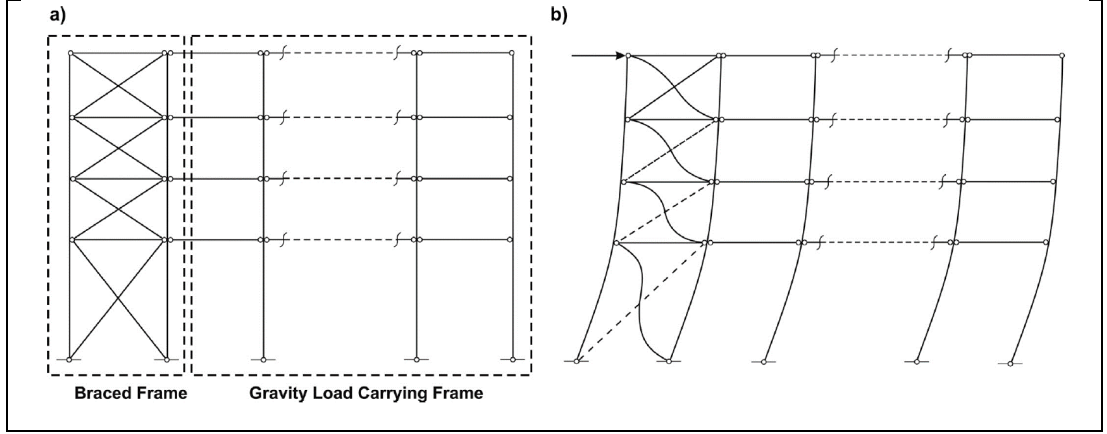


Şekil 2.17: a) Çapraz eleman eksenel kuvvetleri; b) Katman 1 ve 2 yatay kesme kuvvetleri; c) Kolon düzlem içi ve düzlem dışı eğilme momenti ve kesme kuvveti; d) Eleman kesitleri.

- Kolonlar burkulmasını engellemek için minimum düzlem içi eğilme momenti dayanımı gereksinimleri tanımlanmıştır.
- Ek tasarım kriterleri ile yeniden tasarlanan çerçeveler üzerinde yapılan analizler , beklenen hedef davranışı gerçekleştiren ve bir önceki çalışmada istenmeyen sınır durumların oluşmadığını göstermiştir.
- Önerilen yöntem, hem kolona etkiyen eğilme momenti hem de katman yerdeğiştirme taleplerinin, katmanlar arası yatay kuvvet farkı ile doğru orantılı olduğu ve bu nedenle bu değerin en aza indirilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle, eşit katman yüksekliklerine sahip çerçevelerin tasarlanması tercih edilmelidir. Çapraz elemanlarda daha tok kesitlerin kullanılmasında yatay kuvvet farkını azaltmada etkili olabilir.

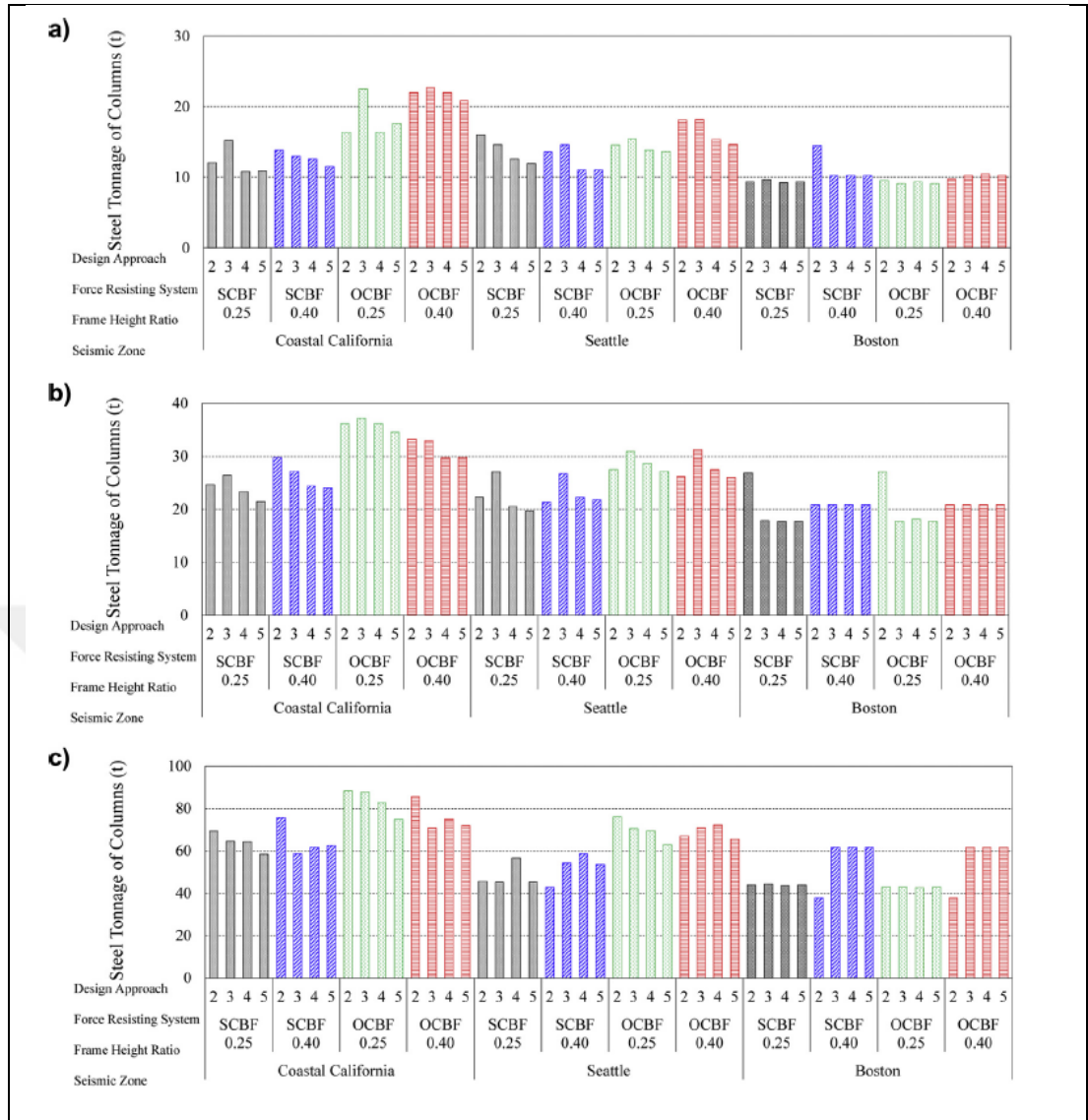
- Ali Imanpour vd. (2016c)

Bu çalışmada ÇK-ÇÇ'lerin her bir katman seviyesinde yatayda teşkil edilen kiriş elemanlar ile düşey yük taşıyıcı sistem elemanlarının birlikte sismik tepkisi incelenmiştir (Şekil 2.17). Tasarlanan çerçeveler farklı kat yüksekliklerine ve eşit veya eşit olmayan katman yüksekliklerine sahiptir. Orta sünek ve yüksek sünek olarak tasarlanmışlardır. Kolonlar bir önceki çalışmada belirtilen tasarım kriterlerine göre katmanlar arası yatay kuvvet farkından kaynaklanan düzlem içi eğilme momenti dikkate alınarak tasarlanmıştır.



Şekil 2.18: a) Düşey yük taşıyıcı sistem ile 4 katmanlı çaprazlı çerçeve; b) Düşey yük taşıyıcı sistem ile 4 katmanlı çaprazlı çerçevenin yatay tepkisi.

- Çerçeve yüksekliği boyunca üniform olmayan çapraz kuvvetleri, düşey yük taşıyıcı sistemin tasarımda gözönüne alınmadığı durumlarda eğilme momentleri kolonların burkulmasına neden olabilir.
- Beklenen sünek çerçeve davranışı, ÇK-ÇÇ kolonlarının düzlem içi eğilme momentleri dikkate alınarak tasarlandığında, çerçeve yüksekliği boyunca her katmanda çapraz elemanların akması sağlandığında ve katman yerdeğiştirmelerinin sınırlandırılması için gerekli eğilme rijitliğine sahip olduğunda gerçekleşir.
- Yatay yük taşıyıcı çerçeve elemanları ile düşey yük taşıyan elemanların eğilme momentlerini birlikte karşıladığı duruma karşılık gelen tasarım yaklaşımı “5” ile eğilme momentlerini sadece yatay yük taşıyıcı sistem elemanlarının karşıladığı tasarım yaklaşımı “4” arasındaki çelik tonaj miktarı hemen hemen birbirine benzerdir (Şekil 2.18).

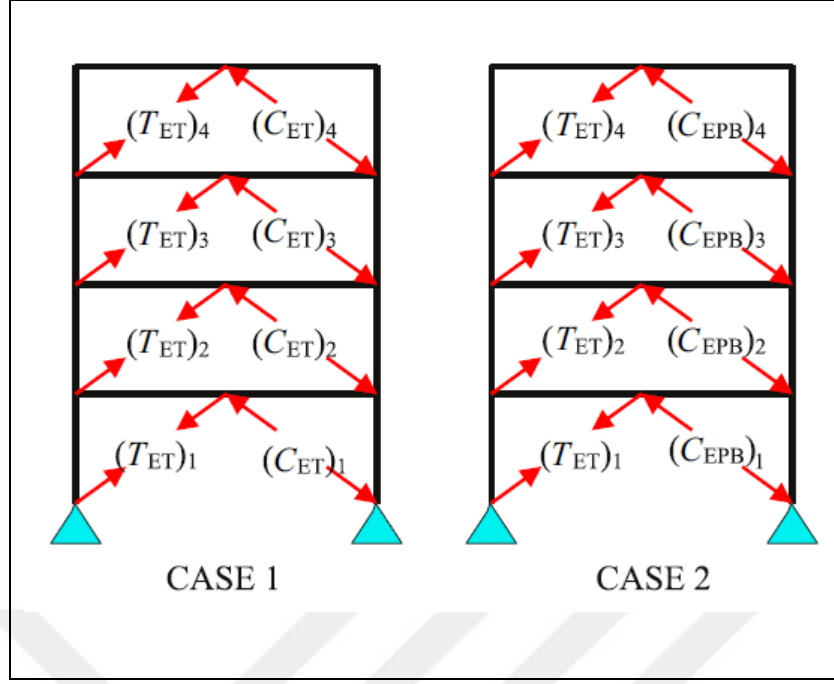


Şekil 2.19: Farklı tasarım yaklaşımları ile gerekli olan çelik tonajları a) $h = 15$ m; b) $h = 20$ m; c) $h = 30$ m.

2.5. Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçevelerin Tasarımı

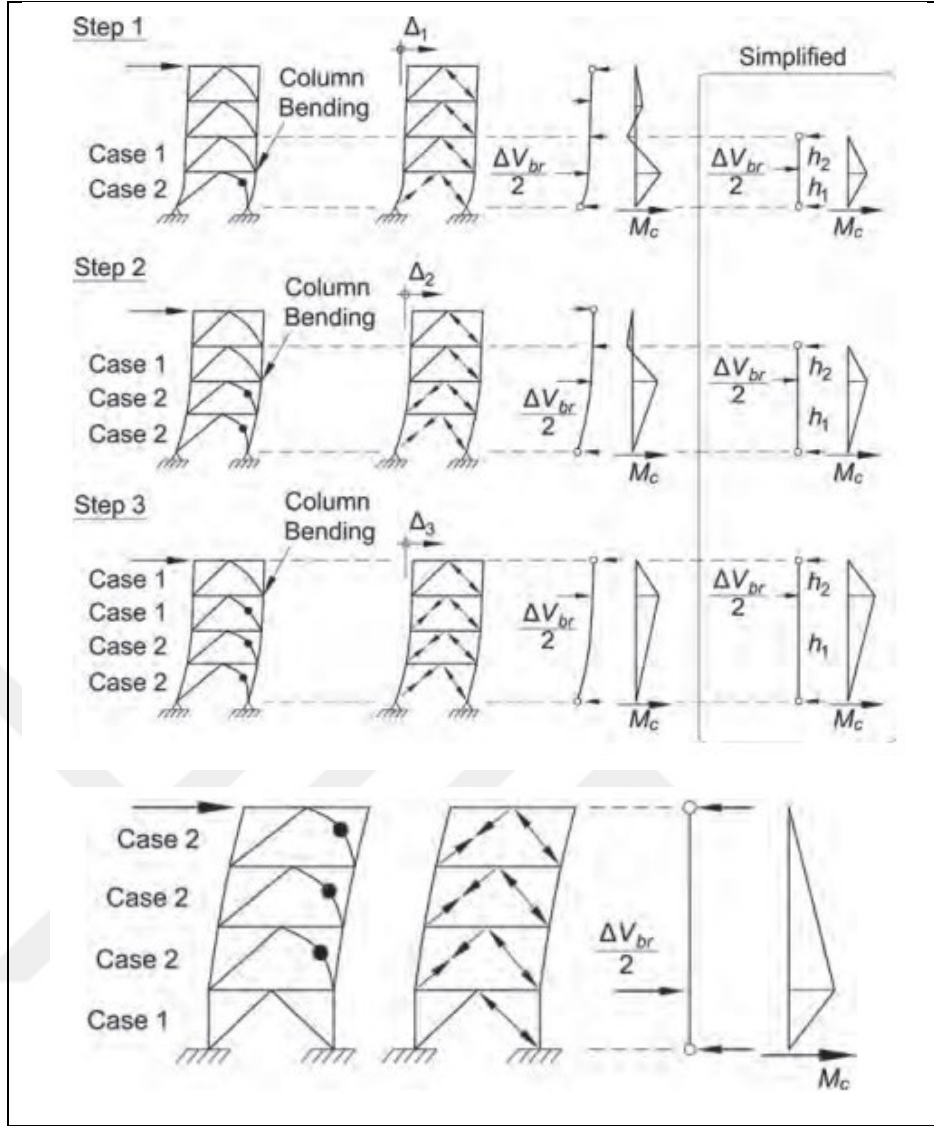
2009 ve 2014 Kanada Çelik Tasarım Standart'larında (CSA 2009 ve 2014) süneklik düzeyi orta olarak tasarlanan çelik çok katmanlı çaprazlı çerçevelerin (ÇK-ÇÇ) tasarım gereksinimleri 2016 Amerikan Sismik Hükümleri'nde [AISC 341, 2016] süneklik düzeyi orta ve yüksek olarak yerini aldı. En güncel Kanada Çelik Tasarım Standart'ında orta sünek çok katmanlı çaprazlı çerçevelerde katman sayısını 3 ile sınırlandırılırken, düşük sünek de ise 5 ile sınırlandırdı. Ayrıca kolonlarda görülebilecek olası eğilmeli burulmalı burkulma davranışına önlem olarak her bir katman kirişi seviyesinde katman kirişlerinin eğilme kapasiteleri kullanılarak kolonlara düzlem içi mesnet sağlanarak burkulma boylarının düşürülmesi de önerilmektedir. Çapraz elemanların düşük tekrarlı yorulmaya maruz kalmaması için katman kaymalarının %2 ile sınırlandırılması bir diğer öneridir. Imanpour ve Tremblay 2014'de Kanada Çelik Tasarım Standart'ına göre prototip çerçeve tasarladılar ve katman kaymalarının sınırlı kaldığını ve kolonlarda indüklenen momentlerin tahmin edilebilir düzeyde olduğunu gösterdiler.

2010 Amerikan Sismik Hükümleri'nde [AISC 341, 2010] ise çelik çok katmanlı çaprazlı çerçeveler için herhangi bir tasarım kriterleri bulunmamaktadır. Bu çerçeveler için tasarım kriterlerinin bulunmaması, mühendisleri geleneksel çaprazlı çerçevelerin tasarımına uygun olarak tasarlmaya itmiştir. Çarpaz elemanlar yönetmeliklerde belirtildiği gibi uygun süneklik düzeyine bağlı olarak belirlenen taban kesme kuvvetine göre boyutlandırılmıştır. Kesit seçilirken gerekli olan narinlik oranı $KL/i \leq 200$ olacak şekilde ayarlanarak enerji dağıtma kapasitesinin istenilen düzeyde tutulması ve genişlik/kalınlık oranı ile de kırılma ve yorulma ömrünü uzatacak şekilde boyutlandırılmıştır. Diğer tüm taşıyıcı sistem elemanları, seçilen çapraz elemanlardan aktarılabacak olan beklenen kuvvetlere dayanacak şekilde (kapasite tasarımı) boyutlandırılmıştır. Bu yönetmelikte elastik kalması beklenen elemanların tasarımı için iki analiz durumu söz konusudur (Şekil 2.19) (R.Wen et al., 2016). Durum 1 çapraz elemanların beklenen çekme ve basınç dayanımlarına eşit olduğu kuvvet dağılımını temsil ederken (Şekil 2.19a), Durum 2 çapraz elemanların beklenen çekme ve burkulma sonrası dayanımlarına eşit olduğu dağılımı temsil eder (Şekil 2.19b).



Şekil 2.20: Çaprazlı çerçevelerde kapasite tasarımı için gerekli olan iç kuvvet talep senaryoları.

Yüksek sünek ve orta sünek olarak 2016 Amerikan Sismik Hükümleri'nde [AISC 341, 2016] yerini alan çelik çok katmanlı çaprazlı çerçeveler (ÇK-ÇÇ) için özel tasarım prosedürleri getirilmiştir. Yapılan son araştırmalara dayanarak (Imanpour vd. 2013) yerdeğiştirmelerin katmanlar arasında eşit olarak dağılmadığı ve kolonların yüksek düzlem içi eğilme momentlerine maruz kaldığı durumun dikkate alındığı ayrı bir analiz durumu oluşturulmuştur. Dolayısıyla çelik çok katmanlı çaprazlı çerçeveler (ÇK-ÇÇ) üç durum altında analiz edilmesi gerekmektedir. Geleneksel çaprazlı çerçeveler için gerekli olan analiz durumlarının (Şekil 2.19) yanı sıra çapraz elemanların aşamalı akma ve burkulmalarını temsil eden üçüncü bir durum Şekil 2.20'da gösterilmiştir. Bu durum, kritik olan katmandaki basınç elemanının burkulma sonrası dayanımına ulaştığı ve bir üst katmandaki basınç elemanının henüz burkulma dayanımına eşit olduğunu varsayar. Aynı zamanda çekme elemanlarının da beklenen çekme dayanımlarına eşit olduğunu varsayar. Katmanlar arası yatay kesme kuvveti farkları bahsedilen çapraz eleman dayanımları ile analiz edilerek belirlenir. Elde edilen katman kesme kuvveti farkı ile ise kolon düzlem içi eğilme momenti talepleri belirlenebilir (Şekil 2.20).



Şekil 2.21: Çelik çok katmanlı çaprazlı çerçevelerde (ÇK-ÇÇ) çapraz akma ve burkulma aşamaları.

Çapraz elemanların düzlem dışı burkulmaları, çapraz birleşim levhasında plastik mafsall oluşumuna neden olur ve kolonlarda birleşim bölgesinde düzlem dışı moment oluşumu ile geometrik yerdeğiştirmelere neden olur. Bu durumu dikkate almak için katman kirişleri seviyesinde fiktif yük uygulanmalıdır veya geometrik düzensizliklerin hesabı katıldığı bir program kullanılmalıdır.

Aynı zamanda 2016 Amerikan Sismik Hükümleri'nde [AISC 341, 2016] kolonların katman kirişi seviyelerinde burulmaya karşı desteklenmesi gerekir. Bu gereklilik katman yerdeğiştirmelerinin üniform olmayan dağılımını azaltmaya ve olası düzlem içi akmanın gerçekleşmesi halinde kolonun stabilitesinin bozulmamasına yardımcı olur [A.Imanpour and R. Tremblay, 2016].

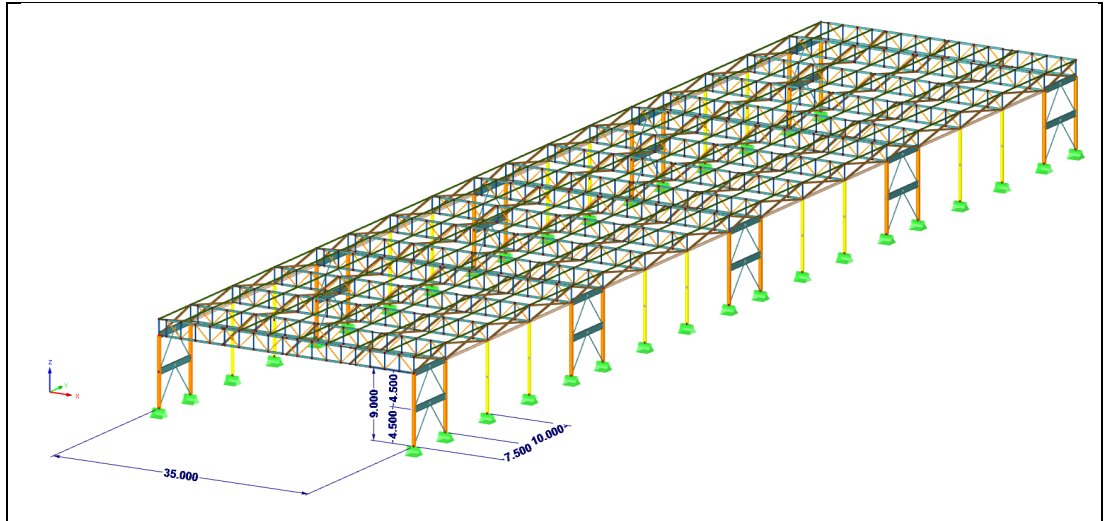
3. PROTOTİP ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI ÇERÇEVELERİN TASARIMI

3.1. Giriş

Bu bölümde, ilk olarak çalışmaya konu olan çerçevelerin tasarımı için seçilen binanın konumu ve geometrik özellikleri tanıtılacaktır. Ardından seçilen konuma göre çerçevelere etkiyen yükler belirlenecektir. Seçilen paratmelerden sonra çerçeve çarpaz düzenleri değiştirilerek 2016 Amerikan Sismik Hükümleri'ne [AISC 341, 2016] uygun olarak prototip çerçevelerin tasarımı yapılacaktır.

3.2. Bina ve Çaprazlı Çerçevelerin Geometrik Özellikleri

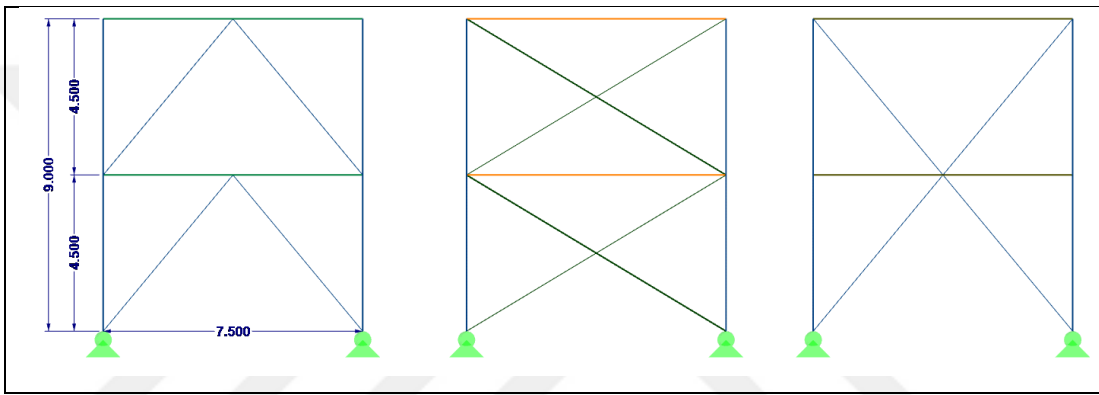
ASCE 7, 2016 ve AISC 341, 2016 Amerikan yönetmeliklerinde belirtilen sismik tasarım prosedürlerine göre tek katlı aynı yüksekliğe ve üç farklı çapraz düzenine sahip bir endüstriyel bina tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan analizler ile tepkileri incelenecek olan yapının 3 boyutlu modeli Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Seçilen sanayi yapısına ait plan boyutları 35 m x 157.5 m ve 9 m yüksekliğindedir.



Şekil 3.1: İki katmanlı çelik çaprazlı çerçeveye sahip endüstriyel binanın 3 boyutlu modeli ve ölçüleri.

Binanın kısa doğrultusunda 35 m uzunluğundaki çatı makasları dış duvarlara yerleştirilen kolonlara oturmaktadır. Kolon aralıkları oluşturulan yatay yük taşıyıcı

çerçevelerde 7.5 m, düşey yük taşıyıcı kolonlarda ise 10 m'dir. Yatay yük taşıyıcı sistem Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, binanın uzun doğrultusunda 10 adet olacak şekilde (her iki dış duvarda 5 adet) yerleştirilmiştir. Çerçeve yüksekliği boyunca, tek katta X , iki katta X ve ters V çapraz düzeni ile iki katmana ayrılmıştır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi katman yükseklikleri eşit olarak ayarlanmıştır. Katman yükseklikleri eşit olarak seçilsede aks çizgileri düşünüldüğünde çapraz eleman uzunluklarındaki farklılıktan dolayı katman kesme kuvvetleri arasında fark oluşacaktır. Kolonlar ve katman kirişlerinde geniş başlıklı W profiller kullanılmıştır. Kolon oryantasyonu düzlem içinde zayıf eksen olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2: Bu çalışmada kullanılan çapraz düzenleri ve geometrik özellikleri (çerçeveler özdeştir).

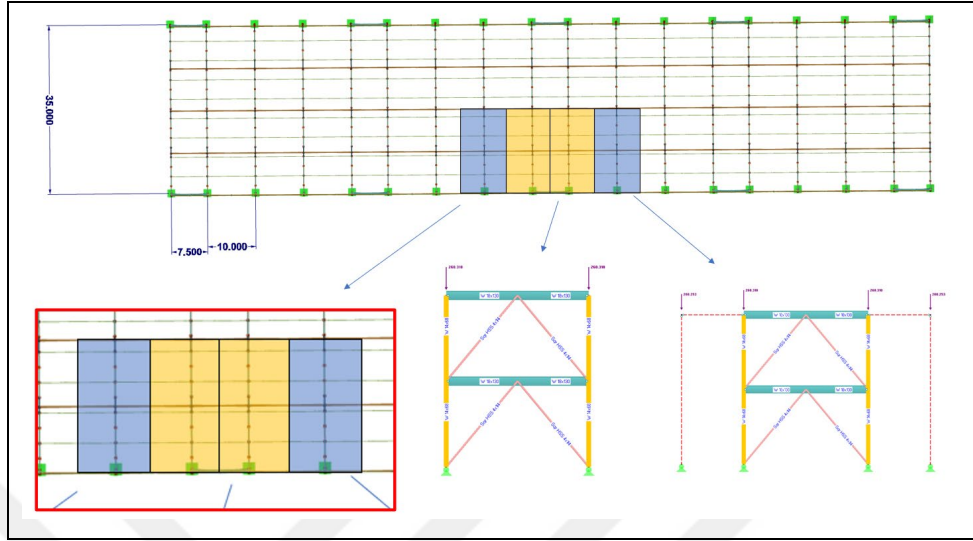
3.3. Bina ve Çaprazlı Çerçevelere Etkiyen Düşey ve Sismik Yükler

Tasarımı yapılacak olan endüstriyel binanın tasarım yükleri ASCE 7, 2016 Amerikan yönetmeliğine uygun olarak belirlenmiştir. Çatıya etki ettirilen arttırılmamış kuvvetler aşağıdaki gibidir:

- Sabit çatı yükleri, D , 1.2 kN/m² alınmıştır, çatı katı ağırlığı dahildir.
- Dış duvar sabit yükü, 0.5 kN/m² alınmıştır.
- Hareketli yük, 1 kN/m² alınmıştır.

Sismik tasarım parametrelerine göre :

Yatay yük taşıyıcı çerçeve kolonlarına etkiyen eksenel yük alanı Şekil 3.3’de gösterildiği gibidir ve 262 kN olarak hesaplanmıştır.

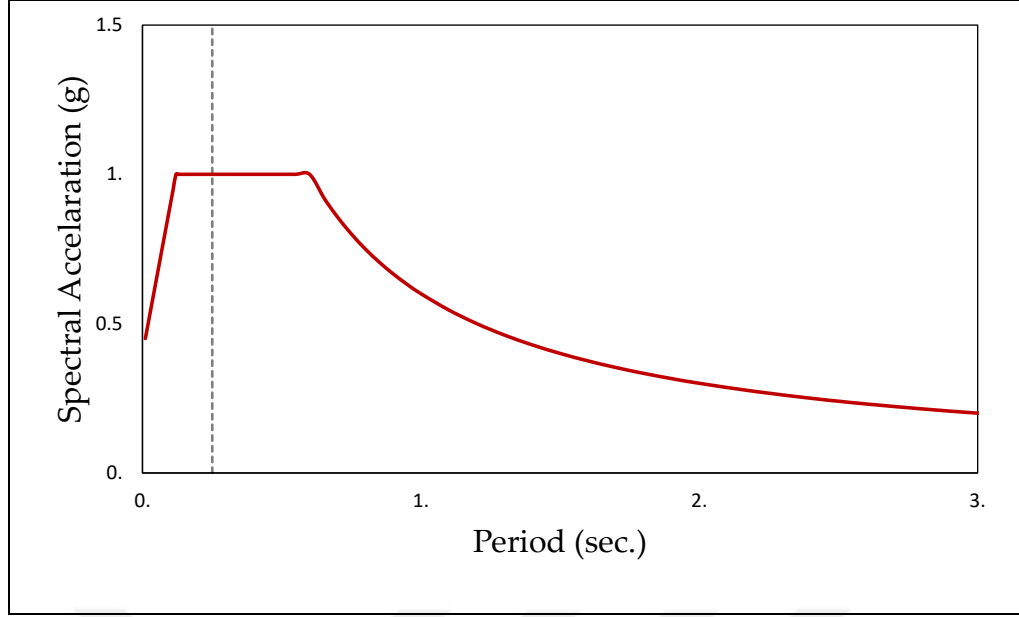


Şekil 3.3: Çaprazlı çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistem kolonlarının eksenel yük alanları ve etkiyen yükler.

ASCE 7, 2016’da belirtildiği üzere, tasarımı yapılacak olan binaya etkiyecek deprem kuvvetleri için eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılabilir. Deprem yükü ve tasarım parametreleri aşağıda listelendiği gibidir:

- Yatay yük taşıyıcı sistem : Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeve (MT-SCBF)
- Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, $R = 6$ (Response Modification Coefficient)
- Dayanım fazlalığı katsayısı, $D = 2$ (Overstrenght Factor)
- Deplasman büyütme katsayısı, $C_d = 5$ (Deflection Amplification Factor)
- Periyot parametreleri, $C_t = 0.0488$ ve $x = 0.75$
- $S_s = 1.5$ g, $S_1 = 0.6$ g, $S_{DS} = 1.0$ g, $S_{D1} = 0.6$ g
- Risk Kategorisi : II
- Sismik Tasarım Kategorisi : D

Tasarım ve deprem yükü parametreleri yukarıda özetlenmiştir. Bu yönetmelikte belirtilen ampirik temel periyot formülleri kullanılarak $T_a = 0.25$ sn hesaplanmıştır. Tasarım spektrumu ve periyot Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Deprem Tepki Spektrumu.

İlgili parametreler kullanılarak sismik tasarım katsayısı, $C_s = 0.167$ olarak hesaplanmıştır. Toplam bina ağırlığı W , çatı ve dış duvar sabit yüklerine göre 9372 kN'dur. Elde edilen sismik tasarım katsayısı ile bina toplam ağırlığının çarpımı bina toplam taban kesme kuvvetine eşittir ve bu yöntem eşdeğer deprem yükü yöntemi olarak adlandırılır. Son olarak elde edilen kuvvet bina ilgili yöndeki çerçeve sayısına bölünerek çerçeve taban kesme kuvveti elde edilir.

3.4. Çaprazlı Çerçeve Elemanlarının Tasarımı

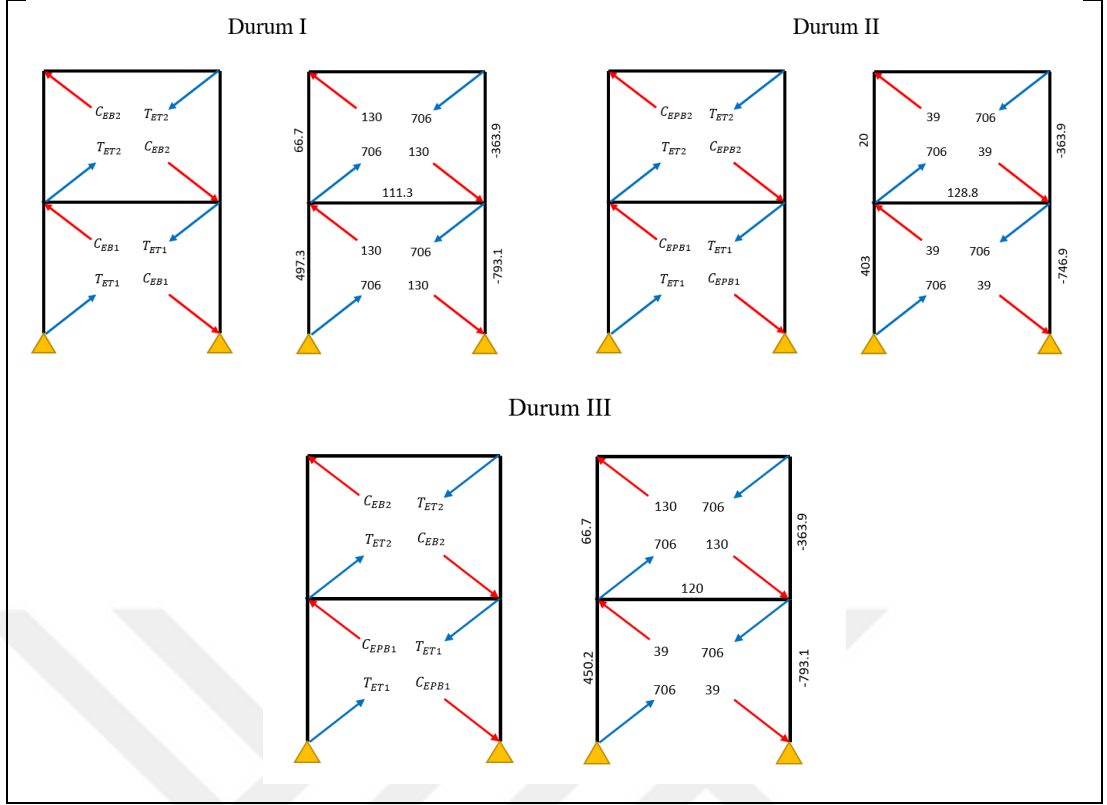
3.4.1. Çapraz Elemanların Tasarımı

Çapraz elemanlar Amerikan deprem yönetmeliklerinde belirtildiği gibi tasarlanmışlardır. Çelik çok katmanlı çaprazlı çerçeve (ÇK-ÇÇ) katmanlarındaki çekme ve basınç etkisindeki çapraz elemanlar deprem yükü alacak şekilde tasarlanır. Birbirlerine, kolonlara ve katman kirişlerine kaynaklı bağlantı kullanılarak birleşim levhası ile bağlanan HSS çapraz elemanlar, 345 MPa (50 ksi) akma gerilmesi ile ASTM A500 Grade C çeliğinden yapılmıştır. Bu çapraz elemanları basınç yükü etkisinde tasarlarken, birleşim levhalarını hesaba katarak burkulma boyu katsayısını tek katta X çapraz düzenine sahip olan çerçevede 0.45, iki katta X ve ters V çapraz

düzenine sahip çerçevelerde ise 0.85 olarak alınmıştır. Seçilen çapraz elemanlar, AISC 341, 2016 Bölüm D ve F’de belirtildiği gibi çapraz narinlik oranı KL/i , ve genişlik/kalınlık oranı b/t limitlerini karşılamalıdır. Çapraz eleman narinlik oranı 200 ile sınırlandırılmalıdır. Yüksek sünek elemanlar için belirlenen b/t oranının yine belirtilen yönetmelikte Tablo D1.1’de HSS elemanlar için $b/t < 14$ değerini aşmamalıdır. Katman 1’deki çapraz elemana etkiyen eksenel basınç tasarım kuvveti ters V ve iki katta X çapraz düzenine sahip çerçevelerde 145 kN’dur. Tek katta X çapraz düzenine sahip çerçevede ise 109 kN’dur. AISC 341-16 yönetmeliği kullanılarak seçilen ters V ve iki katta X çapraz düzenine sahip çerçeveler için HSS 4x4x1/4 çapraz elemanın basınç dayanımı 148 kN olarak hesaplanmıştır. Tek katta X çapraz düzenine sahip çerçeve için ise 3x3x1/4 kesiti seçilmiştir ve basınç dayanımı 109 kN’dur. Her iki katmandada çapraz eleman uzunluklarının benzer olmasından dolayı kesitler aynı seçilmiştir. Kapasite tasarımı ilkerine uygun olarak tasarlanacak çerçeve elemanları kolon , katman kirişleri ve birleşimler için çapraz beklenen dayanımı olan $R_y F_y = 450 \text{ Mpa}$ kullanılacaktır.

3.4.2. Kolon Elemanların Tasarımı

Şekil 3.2’de gösterilen üç farklı çapraz düzenine sahip olan çerçeve kolonlarının tasarımı 2016 Amerikan yönetmeliğine [AISC 341, 2016] göre tasarlanmıştır. Kolon tasarımında kapasite tasarımı gereği çapraz elemanların beklenen çekme ve basınç dayanımları ile üç farklı analiz durumundan elde edilen maksimum kolon eksenel kuvvetler kullanılmıştır. İlk iki analiz durumu Bölüm 2.5 Şekil 2.19’da gösterildiği gibidir. Üçüncü analiz durumu çapraz elemanların kritik olan katmanda beklenen çekme dayanımı T_{ET} ve basınç sonrası dayanımı C_{EPB} eşit olduğu, kritik olmayan katmanda ise beklenen çekme dayanımı T_{ET} ve basınç dayanımı C_{EB} ’ye eşit olduğu durumu dikkate alır. Bu analiz durumu farklı katman çapraz elemanlarının aşamalı olarak burkulduğu ve katman yatay kesme kuvvetleri farkının maksimum olduğu durumu temsil eder. Çapraz elemanların burkulma davranışları oldukça karmaşıktır ve birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler malzeme, geometri, sınır koşulları bakımından doğrusal olmama durumu ve narinlik oranıdır. Bu nedenle ne zaman hangi katmandaki çapraz elemanın burkulacağının bilinmemesi kolonlar üzerine etkiyen momentler üzerinde büyük etkiye sahiptir.



Şekil 3.5: Çapraz eksenel kuvvet senaryoları ve katman kirişleri ile kolonlara etkiyen maksimum yükler (kN).

Geçmiş çalışmalarda kolonların stabilitesini tehlikeye atabilecek yüksek düzlem içi momentler görülmüştür [Imanpour et al., 2016] bu yüzden ilgili yönetmelikte bu analiz durumuna yer verilmiştir. Bitişik katmanlar arası yatay kesme kuvveti farkından kaynaklanan kolon düzlem içi eğilme momenti Şekil 2.16’da gösterildiği gibidir. Ayrıca düzlem dışına burkulacak şekilde tasarlanan çapraz elemanlar burkulduklarında birleşim levhasında oluşan plastikleşmeyle birlikte katman kirişi seviyelerinde kolonlarda düzlem dışı moment talebi oluşturur. Analiz durumu 1 ve 3’de görüleceği üzere kolon maksimum eksenel basınç kuvveti sağ tarafta katman 1 seviyesinde 1058 kN’dur ve çapraz beklenen dayanımlarından 793 kN, sabit yükden 262 kN etkir. Üç analiz durumuna ait çapraz eksenel yük senaryoları Şekil 3.5’de detaylı olarak gösterilmiştir.

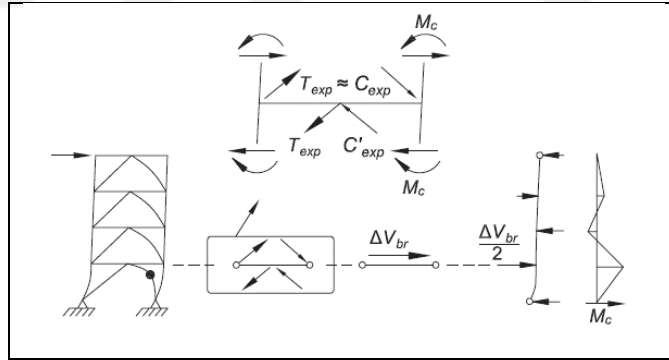
Analiz durumu 3 kolonlara etkiyen düzlem içi momentlerin maksimum olduğu durumdur. Kolon düzlem içi momentler hesaplanırken katmanlar arası yatay kuvvet farkının maksimum olması gerekir. Bu kritik olan katman belirlenerek mümkündür. Kritik katman belirlenirken katman yükseklikleri farklı alınabilir. Bu çalışmada katman yükseklikleri eşit olarak alınmış olsa dahi aks çizgileri düşünüldüğünde kritik

olan katmanın 1 olduğu söylenebilir. Katman yatay kesme kuvveti dayanımı, çekme ve basınca çalışan çapraz eleman dayanımlarının yatay bileşenlerinin toplamından elde edilir. Kolondaki maksimum düzlem içi eğilme momenti talebi ise aşağıda belirtilen Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanır. Bu denklem katman yüksekliklerinin farkına ve katman yatay kesme kuvveti farkına bağlıdır. Katman kesme kuvveti dayanımları farkı ise AISC 341, 2016'da Bölüm F de belirtilen F2-1 denklemi kullanılarak hesaplanır (Denklem 3.2).

$$M_{ry} = \frac{\Delta V_{br}}{2} \frac{h_1 h_2}{h} \quad (3.1)$$

$$\Delta V_{br} = (T_{ET} + C_{EB})_2 \cos \theta_2 - (T_{ET} + C_{EPB})_1 \cos \theta_1 \quad (3.2)$$

Şekil 3.6 analiz durumu 3'de gösterilen çapraz eleman kuvvetleri kullanılarak $\Delta V_{br} = 78$ kN olarak hesaplanmıştır. ΔV_{br} 'ye karşılık gelen düzlem içi eğilme momenti talebi ise $M_{ry} = 88$ kNm olarak hesaplanmıştır. Analiz durumu 3 için eğilme momenti talebinin nasıl bulunacağı Şekil 3.7'de temsili olarak gösterilmiştir.



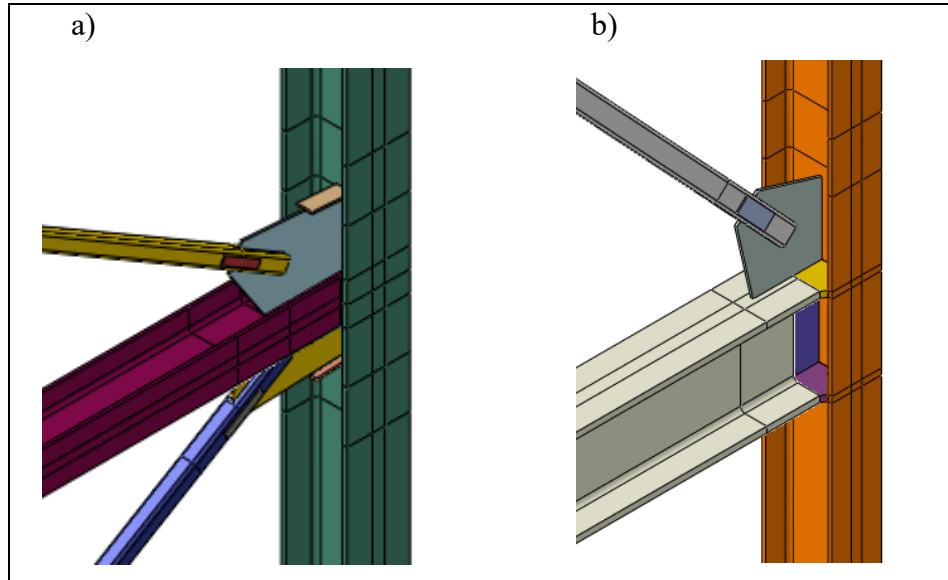
Şekil 3.6: Çelik çok katmanlı çaprazlı çerçeveler için dengelenmemiş çapraz katman kesme dayanımları.

Kolonlar AISC 360-16 Bölüm H H1-1a ve H H1-1b denklemleri kullanılarak bileşik etkiler altında talepleri karşılayacak şekilde seçilmiştir. Bu etkileşim denklemine giren iç kuvvet talepleri sabit yük ve deprem etkilerini içermektedir. HSS çapraz elemanlarda olduğu gibi ilgili yönetmelikte yer alan W kesitler için başlık ve gövde kalınlık oranları kontrol edilmiştir. Ters V ve iki katta X çapraz düzenine sahip çerçeveler için kolon kesitleri W14x68, tek katta X çapraz düzenine sahip çerçeve için

ise W12x96 kolon kesiti seçilmiştir ve 345 MPa (50 ksi) akma gerilmesine sahip ASTM A992 Grade 50 çeliği kullanılmıştır.

3.4.3. Kiriş Elemanların Tasarımı

Katman kirişleri inelastik davranışta dengelenmemiş kuvvetlerin çerçeve yüksekliği boyunca dağılmasında ek bir yük yolu teşkil eden önemli elemanlardır. Katman kirişlerine etkiyen maksimum eksenel kuvvet Şekil 3.6'da gösterildiği gibi Durum 2'de her iki katmanda çekmeye çalışan çapraz elemanların T_{ET} ve basınca çalışan çapraz elemanların ise C_{EB} 'ye ulaştığı durumda gerçekleşir. Katman kirişlerine etki eden düzlem içi momentler kendi ağırlığından kaynaklanan moment ile sınırlıdır. Katman kirişlerine etkiyen düzlem dışı momentler ise çapraz elemanın düzlem dışı burkulacak şekilde ayarlandığında gerçekleşir. İn elastik bölgede ek bir yük yolu teşkil eden bu kirişler tek katta X çapraz düzenine sahip çerçevelerde düzlem içinde zayıf ekseninde , iki katta X ve ters V tipi çapraz düzenine sahip çerçevelerde ise yüksek düzlem içi moment taleplerinden dolayı tam tersi şekilde teşkil edilir (Şekil 3.7). Katman kirişleri için, 345 MPa (50 ksi) akma gerilmesi ile ASTM A992 Grade 50 çeliği kullanılmıştır.



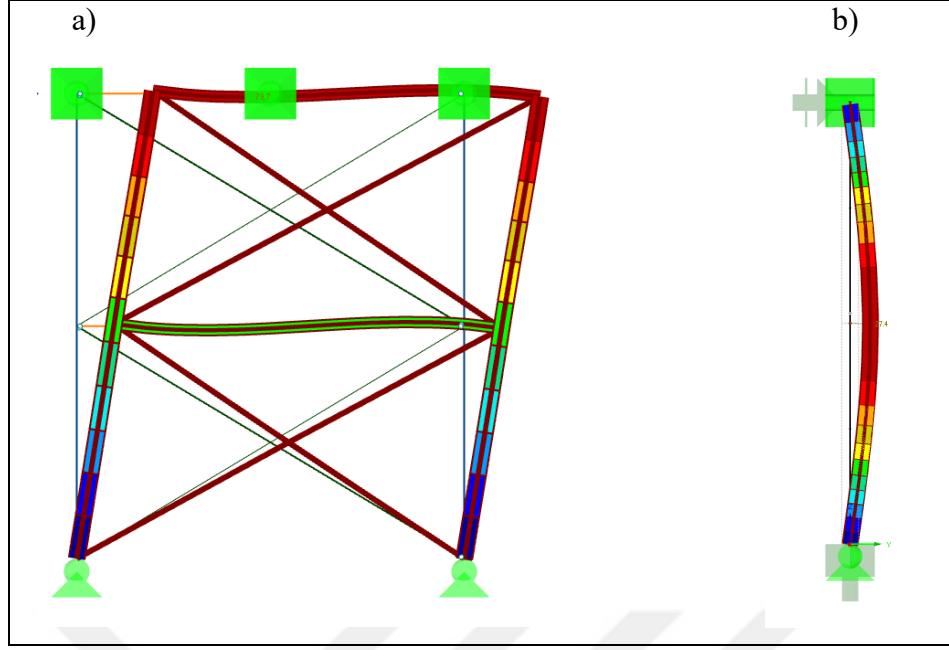
Şekil 3.7: Katman kiriş – kolon birleşimi a) tek katta X b) iki katta X ve ters V.

3.5. Kat ve Katman Yerdeğiştirmelerinin Kontrolü

Tasarlanan çerçevelerin belirlenen taban kesme kuvveti altında yerdeğiştirmelerin sınır değerleri ASCE 7-16 Tablo 12-12.1’de belirtilmiştir. Azaltılmış deprem etkileri altında bu sınır değerin aşılmaması gerekir. Bu değer herhangi bir yapısal analiz programı ile çerçevenin modellenerek çatı katı hizasında belirlenen taban kesme kuvveti altında analiz edilerek elde edilebilir. Çerçeveser RFEM 6.02, Dlubal programında analiz edilerek yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen elastik yerdeğiştirmeler, δ_{xe} , ASCE 7-16 Denklem 12.8-15’de yerine konur (Denklem 3.3). Sırasıyla tasarım kat ötelenmeleri ters V, iki katta X ve tek katta X için řu şekildedir: %0.4, %0.45, %0.4. Dolayısıyla kat öteleme limitleri üç çerçeve içinde aşılmamıştır.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (3.3)$$

Geçmiş deneysel çalışmalar çapraz elemanların %2 kat öteleme sınırlarını dahi ulaşmadan kırılabilceği sonucunu doğurmuştur. Çapraz elemanlarda erken kırılmaların görülmemesi için çelik çok katmanlı çerçevelerde katman yerdeğiştirmelerinin %2 sınırlandırılması gerekmektedir [Fell et al., 2009]. Imanpour vd. 2016’da çok katmanlı çaprazlı çerçeveler üzerinde yaptığı zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre elde edilen beklenen maksimum kat yerdeğiştirmelerinin $2.0C_d \delta_{xe}$ seviyesinde katman yerdeğiştirmelerinin istenilen sınırın altında kaldığı doğrulanmıştır. Imanpour vd.’ne göre kritik katmandaki katman yerdeğiştirmesinin hesaplanabilmesi için kat yerdeğiştirmesi ile birlikte lineer bir şekilde artan katman yerdeğiştirmesine, katman yatay kesme kuvveti farkından kaynaklanan kolon düzlem içi eğilme momentinden kaynaklanan yerdeğiştirmenin toplanmasıyla elde edilir. Elastik yerdeğiştirmelerin elde edildiği yapısal analiz programında oluşturulan çerçeveler $2.0C_d \delta_{xe}$ seviyesine ulaşacak bir yük etki ettirildiğinde katman yerdeğiştirmesinin elde edilmesi için gereken ilk bileşen elde edilebilir. Eğilme momentinden kaynaklanan yer değiştirme yine yukarıda belirtildiği şekilde elde edilebilir (şekil 3.8) [RFEM 6.02 Dlubal Software].



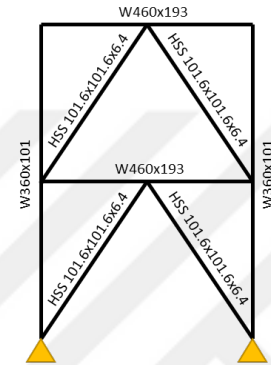
Şekil 3.8: a) Kat yerdeğiştirmesinden kaynaklanan katman yerdeğiştirmesi ,b) Düzlem içi eğilme momentinden kaynaklanan yerdeğiştirme.

Elde edilen iki bileşinin toplanması ile katman 1 yerdeğiştirmesi 2.8 inch değerine eşittir. Buda %1.6 katman kaymasına karşılık gelmektedir ve AISC 341, 2016 yönetmeliğı tarafından önerilen %2 limit değerini karşılamaktadır.

3.6. Tasarım Özeti

AISC 341-16 Amerikan yönetmeliğine uygun olarak tasarlanan çok katmanlı çaprazlı çerçeve elemanlarının özet tablosu aşağıda Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3’de yer almaktadır. Tek katta X çapraz düzenine sahip çerçevenin diğer çapraz düzenlerine sahip çerçevelerden farkı katman kirişlerinin düzlem içindeki yönüdür.

Tablo 3.1: Ters V çapraz düzenine sahip çerçeve tasarım özeti.

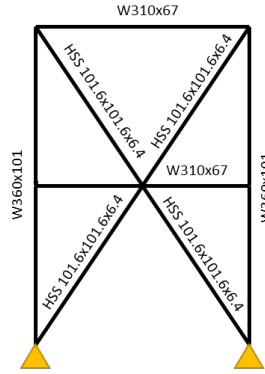


Çapraz Tasarımı								
Katman	Kesit	L (mm)	b/t	KL/i	Pr/Pc	$T_{ET}(kN)$	$C_{EB}(kN)$	$C_{EPB}(kN)$
Katman 1 & 2	HSS 101.6x101.6x6.4	5858	12	151.75	1.00	975	186	56

Kolon Tasarımı						
Kesit	$K_x L/i_x$	$K_y L/i_y$	$Pr(kN)$	$M_{rx}(kNm)$	$M_{ry}(kNm)$	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right)$
W360x101	72	59	1083	38	95	0.93

Kiriş Tasarımı						
Kesit	$K_x L/i_x$	$K_y L/i_y$	$Pr(kN)$	$M_{rx}(kNm)$	$M_{ry}(kNm)$	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right)$
W460x193	109	37	330	38	1325	0.96

Tablo 3.2: İki katta X çapraz düzenine sahip çerçeve tasarım özeti.



Çapraz Tasarımı

Katman	Kesit	L (mm)	b/t	KL/i	Pr/Pc	$T_{ET}(kN)$	$C_{EB}(kN)$	$C_{EPB}(kN)$
Katman 1 & 2	HSS 101.6x101.6x6.4	5858	12	151.75	1.00	975	186	56

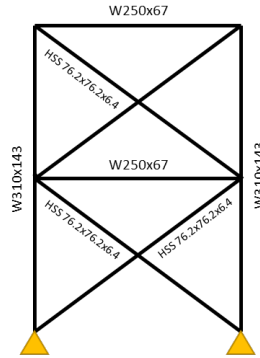
Kolon Tasarımı

Kesit	$K_x L/i_x$	$K_y L/i_y$	$Pr(kN)$	$M_{rx}(kNm)$	$M_{ry}(kNm)$	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right)$
W360x101	72	59	690	38	95	0.78

Kiriş Tasarımı

Kesit	$K_x L/i_x$	$K_y L/i_y$	$Pr(kN)$	$M_{rx}(kNm)$	$M_{ry}(kNm)$	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right)$
W310x67	153	57	42	38	190	0.80

Tablo 3.3: X çapraz düzenine sahip çerçeve tasarım özeti.



Çapraz Tasarımı

Katman	Kesit	L (mm)	b/t	KL/i	Pr/Pc	$T_{ET}(kN)$	$C_{EB}(kN)$	$C_{EPB}(kN)$
Katman 1 & 2	HSS 76.2x76.2x6.4	4373	8	155	1.00	706	130	39

Kolon Tasarımı

Kesit	$K_x L/i_x$	$K_y L/i_y$	$Pr(kN)$	$M_{rx}(kNm)$	$M_{ry}(kNm)$	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right)$
W310x143	65	60	1130	20	95	0.60

Kiriş Tasarımı

Kesit	$K_x L/i_x$	$K_y L/i_y$	$Pr(kN)$	$M_{rx}(kNm)$	$M_{ry}(kNm)$	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right)$
W250x67	147	68.4	575	20	0	0.93

4. ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI ÇERÇEVELERİN SAYISAL MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

4.1. Giriş

Bu bölüm, Şekil 3.2'deki çelik çok katmanlı çarpazlı çerçevelerin deprem davranışlarını simüle etmek ve incelemek için üç boyutlu sonlu eleman tabanlı sayısal modelin oluşturulmasını anlatmaktadır. Modeller, malzeme, geometri, ve sınır koşulları bakımından doğrusal olmama durumunu dikkate alarak gerçekçi modeller oluşturma imkanı sağlayan ABAQUS [Hibbit et al., 2012] sonlu eleman programında oluşturulmuştur. Ayrıca bu bölüm, modeller üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizi (pushover) ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için yapılan kabulleri ile modelleme ve analiz tekniklerini içerir.

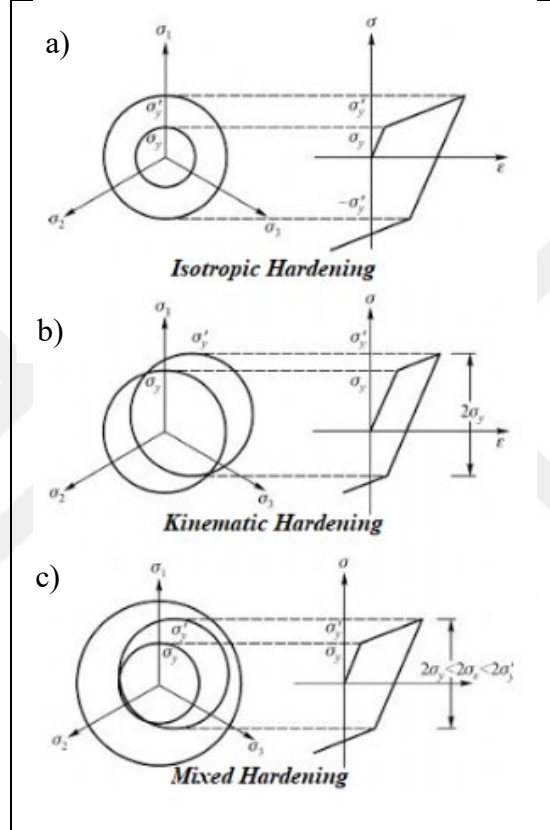
4.2. Malzeme Modeli

Deprem ve yapı mühendisliğinde, yapıların deprem etkisi altındaki davranışının ve taşıyıcı sistem elemanlarından talep edilen iç kuvvetlerin gerçeğe en uygun şekilde belirlenmesi gerekir ve bunun için birçok akademik çalışmayla birlikte birçok yapısal analiz programı da geliştirilmiştir. Güvenlik ve ekonomi göz önünde bulundurulduğunda yapıların deprem anında elastik ötesi davranışa geçmesi bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu doğrusal olmayan veya elastik ötesi davranışı etkileyen en önemli faktörlerden biri malzemenin modellenmesidir. Gerçek plastik davranışları oldukça karmaşık olan bu malzemeler için birçok malzeme modeli geliştirilmiştir.

Malzemenin elastik davranışı, elastisite modülü $E = 200000 \text{ MPa}$ (29000 ksi) ve Poisson oranı $\nu = 0.3$ olacak şekilde modellendi. Bu yüklemeden kaynaklı tüm yerdeğiştirmelerin başlangıç konumuna geri geldiği ve kalıcı bir hasarın meydana gelmediği durumu temsil eder. Elastik ötesi davranış ise yüklemenin akma noktasının ötesinde gerilmelere neden oluyorsa, plastikleşme davranışının yakalanması için uygun pekleşme modelinin seçilmesi gerekir. Gerinim sertleşmesi olarak da adlandırılan pekleşme izotropik ve kinematik olarak veya bunların kombinasyonu

şeklinde tanımlanabilir (Şekil 4.1). İzotropik pekleşme akma yüzeyinin genişlediği uygulanan yükün yönden bağımsız olarak davranışın simetrik olduğunu varsayar, kinematik pekleşme ise akma yüzeyinin yer değiştirdiği başlangıçta uygulanan gerilme değerinden daha küçük bir gerilme değerinde akmanın meydana geleceğini varsayar. Malzemenin dislokasyon etkisiyle yumuşaması ve daha düşük bir gerilme değerinde akması aynı zamanda “Bauschinger etkisi” olarak adlandırılır.



Şekil 4.1: a) İzotropik pekleşme ; b) Kinematik pekleşme ; c) Karma pekleşme modeli.

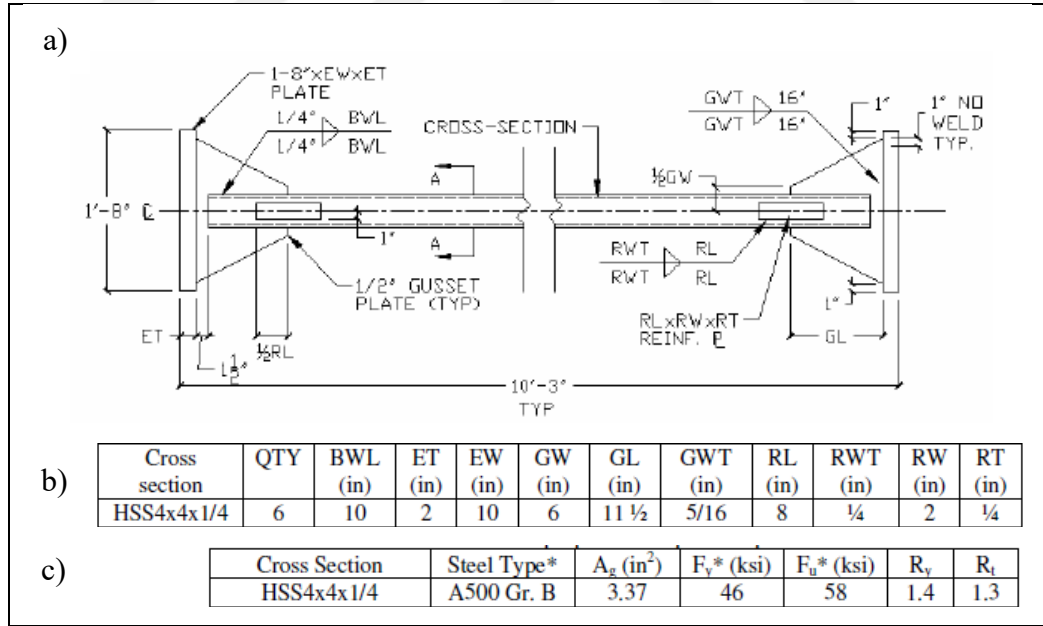
Bu çalışmada çevrimsel yükleme durumunu oldukça iyi bir şekilde temsil eden kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. W kesitler için ASTM A992 Grade 50 ve HSS kesitler için ASTM A500 Grade C çelik malzemesi kullanılmıştır.

4.3. Çaprazlı Çerçeve Sayısal Modeli

ABAQUS programında tasarlanan prototip çerçevelerin modelleri oluşturulmadan önce taşıyıcı sistem elemanlarının ve çerçevenin mevcut deneysel çalışmalarla elde edilen verilerin gerçellenmesi ve davranışın kalibre edilmesi gerekir [Hibbit et al., 2012]. Deneysel testleri yapılan çerçeve elemanlarının ve çerçevenin modellenmesinde ve analizinde kullanılan teknikler daha sonra tasarlanan prototip çerçevelerde kullanılır.

4.3.1. Çapraz Modeli

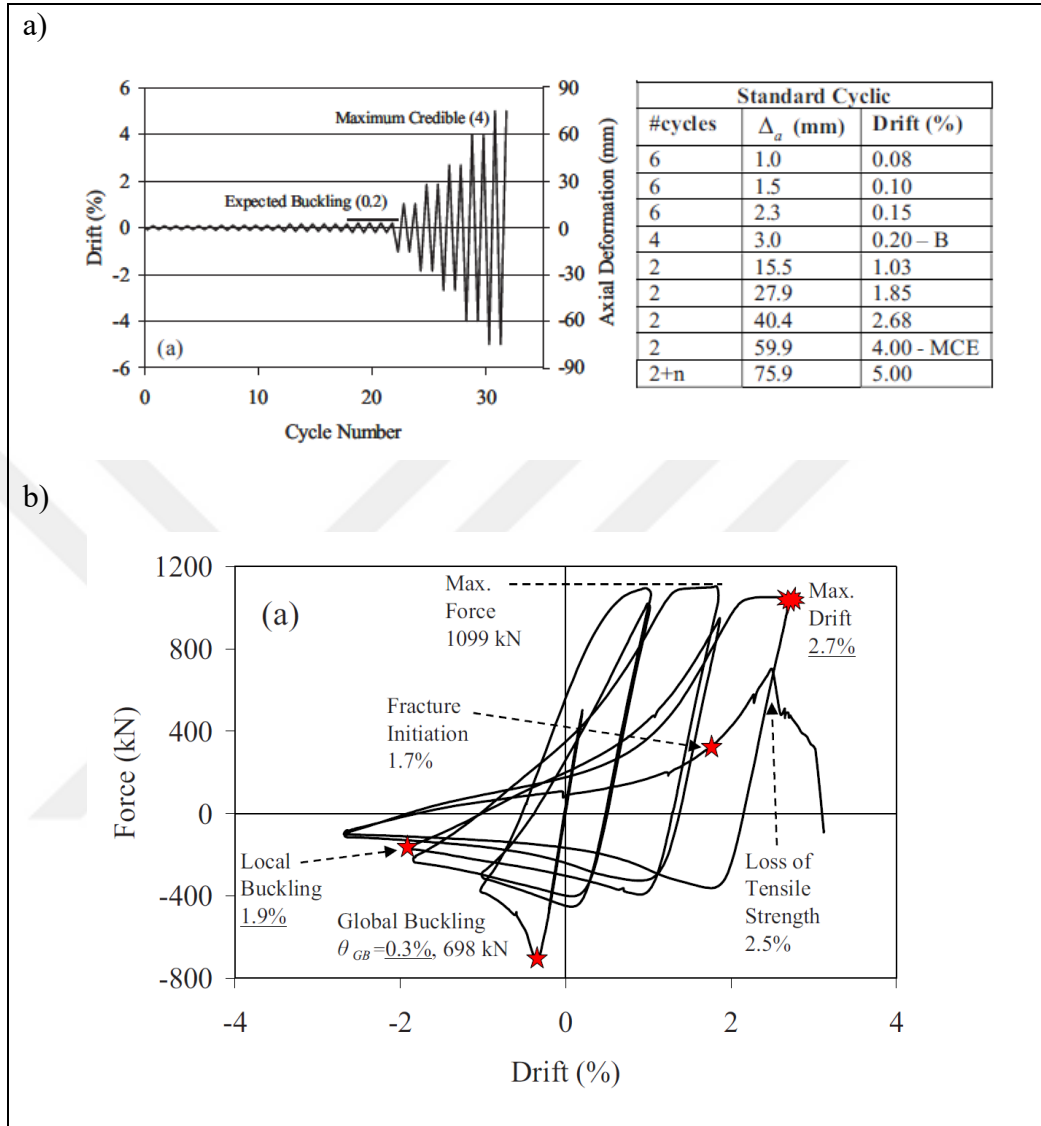
Bu çalışmada, çapraz eleman davranışının gerçellenmesi için Fell vd. tarafından 2009’da gerçekleştirilen deney seçilmiştir. Testi yapılacak olan çapraz elemana ait malzeme özellikleri, fabrikasyon çizimi ve ölçülendirmeye ait bilgiler Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: a) Fabrikasyon çizimi ; b) ölçüler ; c) malzeme özellikleri.

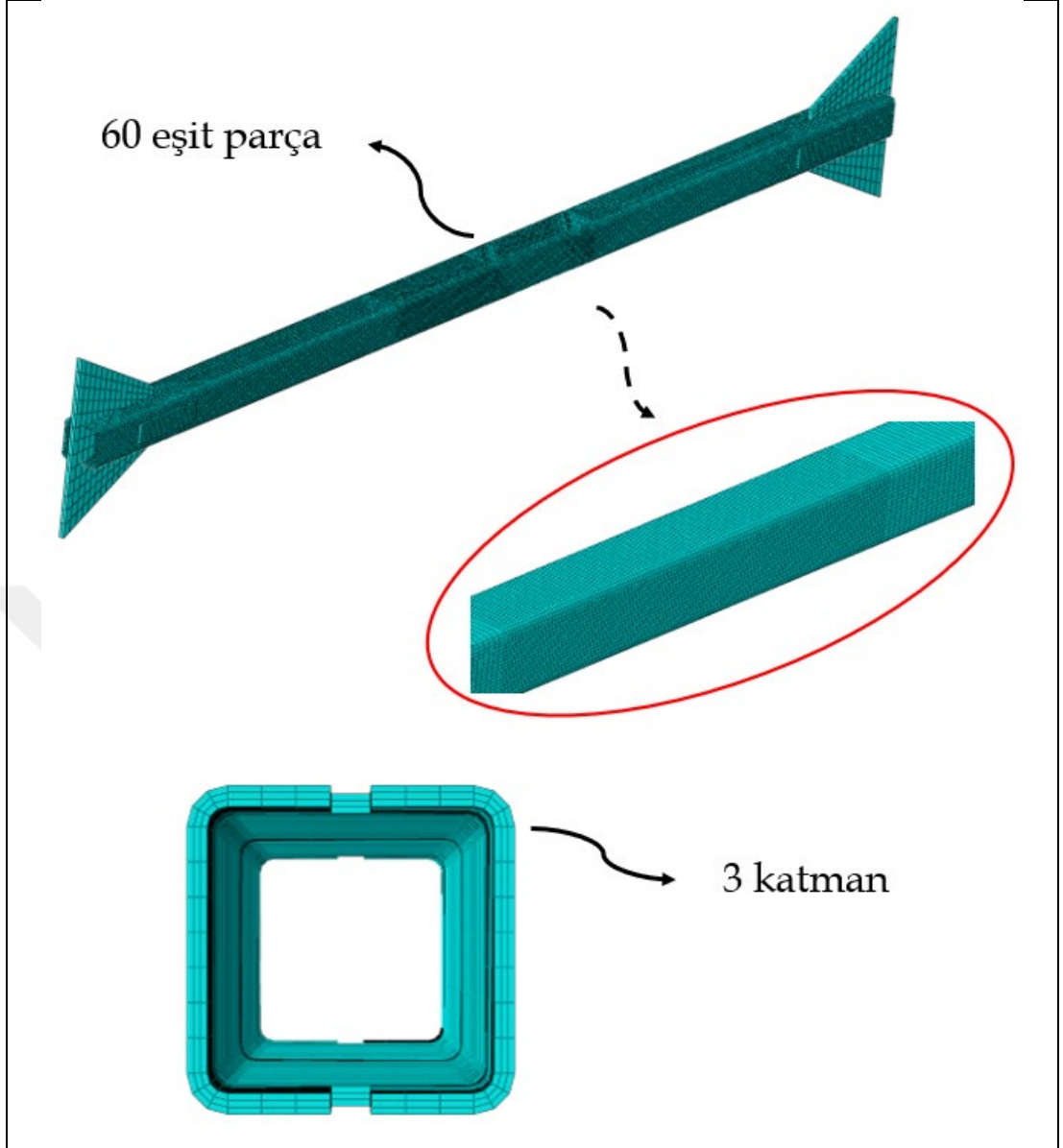
Test numarası HSS1-1 olarak adlandırılan, 118 inch uzunluğunda HSS 4 x 4 x 1/4 kutu profil üzerinde Şekil 4.3’de gösterilen çevrimsel yükleme protokolü uygulanmıştır. Test sonuçları çelik çapraz elemanın 698 kN değerinde elemanın orta

noktasından burkulduğunu göstermiştir. Test sonucundan elde edilen çapraz Eksenel Kuvvet (kips) – Yerdeğiştirme (inch) grafiği Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: a) Çevrimsel yükleme protokolü; b) eksenel kuvvet – yerdeğiştirme grafiği (histeretik davranış).

ABAQUS programında yukarıda belirtilen HSS 4 x 4 x 1/4 kutu profil, guse birleşim levhası ve güçlendirme plakaları 3 boyutlu ve 8 düğüm noktalı (C3D8R) solid eleman olarak modellenmiş ve birbirine montajlanmıştır. Çapraz elemanın burkulma davranışının gerçeğe yakın simüle edilmesi için burkulduğu orta kısımdaki mesh aralığı diğer kısımlara göre düşük tutulmuştur. Her bir çelik eleman için kinematik doğrusal olmayan malzeme tanımlanmıştır.

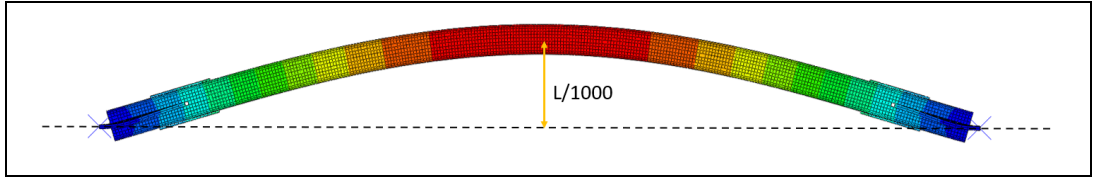


Şekil 4.4: Montajlanmış elemanların sonlu eleman modeli.

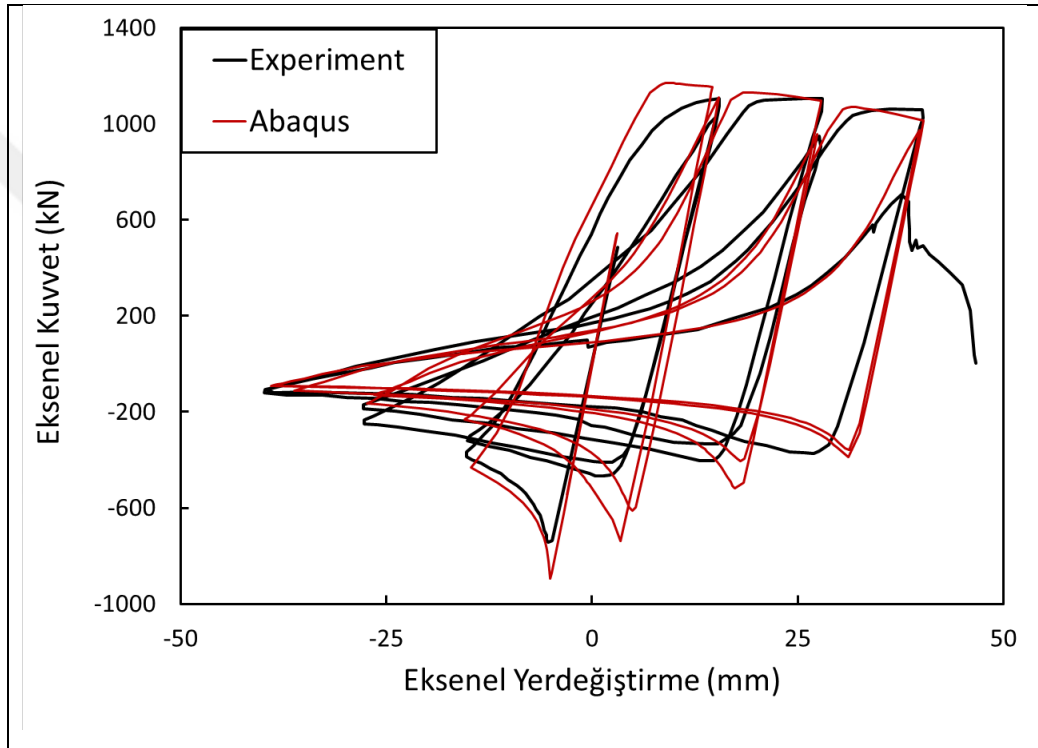
Şekil 4.4’de görüldüğü üzere çapraz elemanın orta bölgesinde yaklaşık çözüm aralığı diğer bölgelere göre düşük tutulmuştur ve 5-7 mm civarındadır. 30 cm uzunluğundaki orta bölge 60 eşit parçaya bölünmüştür. Bu sayede plastik mafsall oluşumunun meydana geldiği bu bölgede yerel burkulmanın detaylı bir şekilde görülmesi amaçlanmıştır. Elemanların en/boy oranı $1 \approx 2$ arasında tutulmuştur. Tüm model toplamda 28,760 eleman ve 57,964 düğüm noktasından oluşmaktadır.

Çapraz elemanın genel burkulma davranışının elde edilebilmesi için başlangıç yerdeğiştirmesi tanımlanması gerekir. Geometrik düzensizliğin elde edilebilmesi için

çapraz elemanın orta noktasına çapraz elemanın uzunluğunun binde biri ($L/1000$) kadar düzlem dışı burkulma modundan yerdeğiştirme tanımlanmıştır (Şekil 4.4).

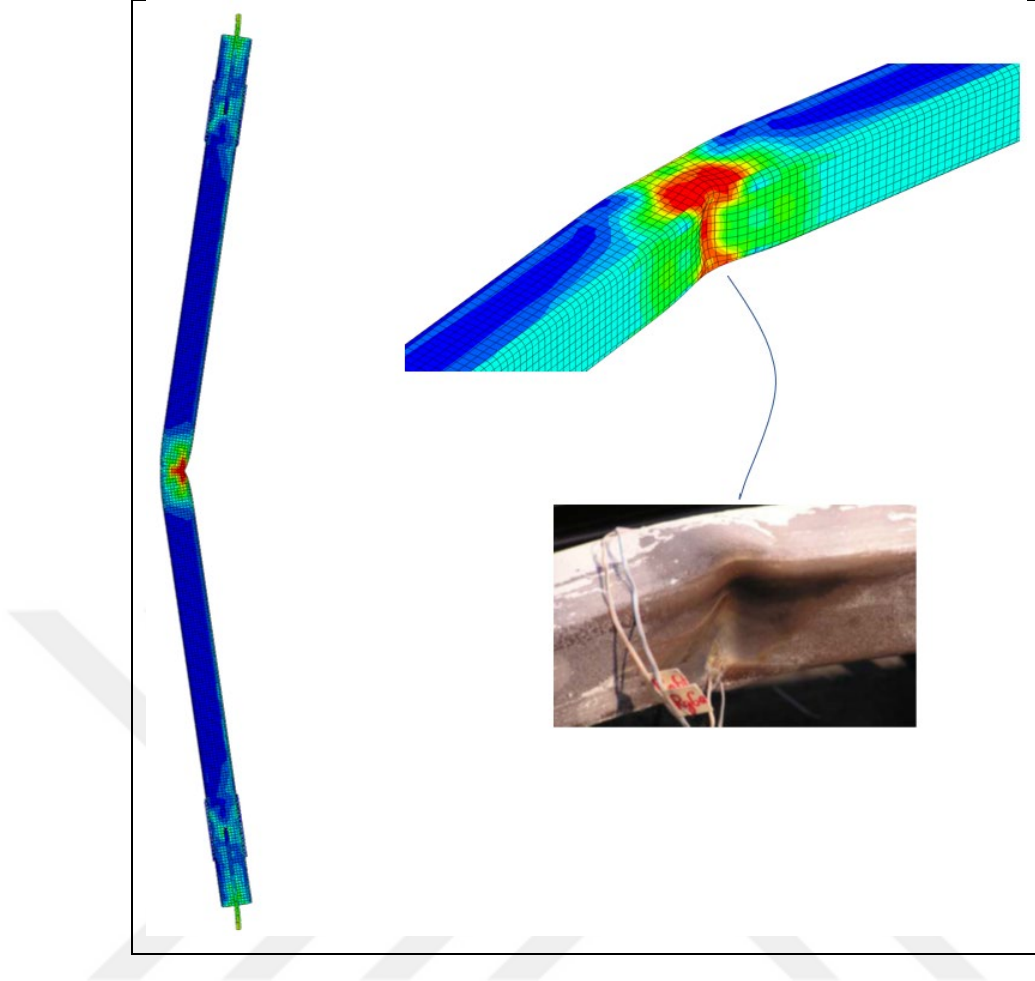


Şekil 4.5: İlk burkulma moduna karşılık gelen başlangıç yerdeğiştirmesi.



Şekil 4.6: Deneysel test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması.

Modellemede kullanılan teknikler doğrultusunda çapraz elemana ait elde edilen histeretik davranış kırmızı çizgi ile çizdirilip yukarıda Şekil 4.3’de gösterilen deneysel test sonucu grafiği ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5). Şekil 4.5 ve 4.6’daki çapraz elemanın histeretik davranışı, global ve lokal burkulmaları incelendiğinde simülasyon deneysel test verilerini oldukça iyi yakalamıştır. Dolayısıyla kalibrasyonu yapılan çapraz eleman oluşturulan prototip çerçevelerin analizlerine altyapı niteliğindedir.



Şekil 4.7: Simulasyon sonucunda elde edilen global ve lokal burkulma.

4.3.2. Çaprazlı Çerçeve Sayısal Modeli

Uriz ve Mahin 2008’de yüksek sünek detaylandırılmış iki katlı ters V tipi çapraz düzenine sahip bir çerçeve üzerinde tam ölçekli deneysel bir test gerçekleştirdi. Şekil 4.7’de gösterilen test edilen çerçeve kat hizalarında herhangi bir döşeme bulunmamaktadır ve yatayda düzlemsel olarak test edilmiştir. Şekil 4.7’de de görüleceği üzere kirişler orta açıklıklarda ve kolonlar birinci kat kirişlerinin hemen altında düzlem dışı mesnetlenmiştir. Şekil 4.8, Şekil 4.7’de gösterilen çerçeveye çatı kat hizasındaki hidrolik aktüatör aracılığı ile uygulanan çevrimsel yükleme protokolünü göstermektedir.

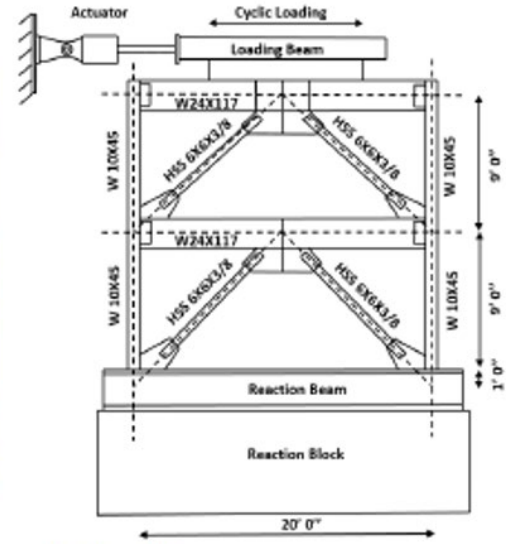
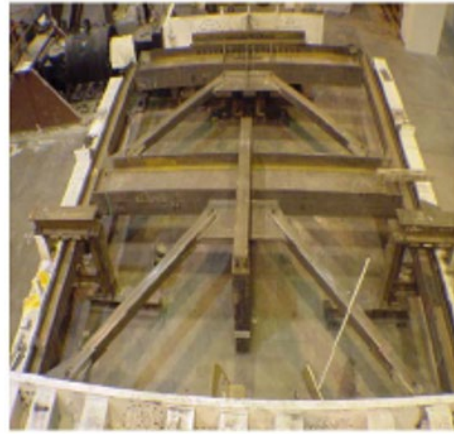
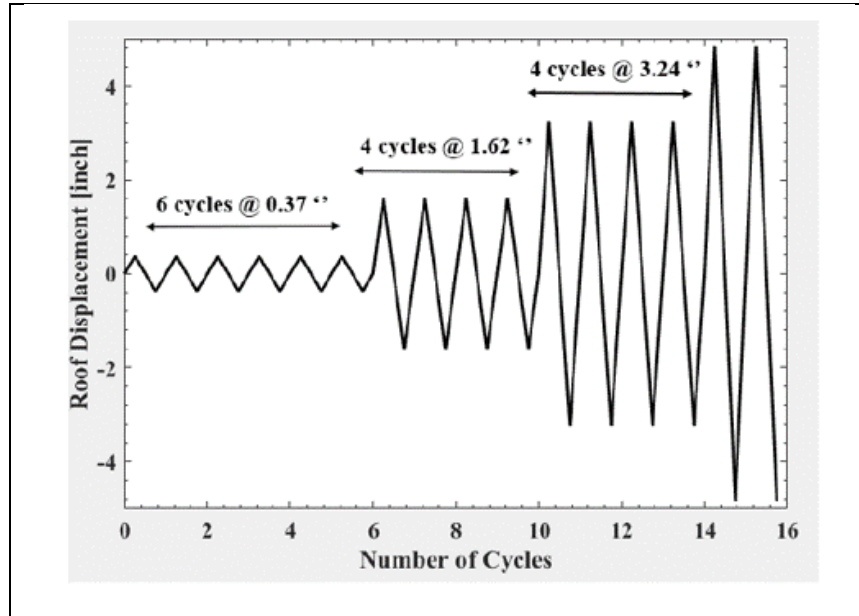


Figure 1 : Experimentally Tested Frame.

Table 1 : Tested Members Materials Properties.

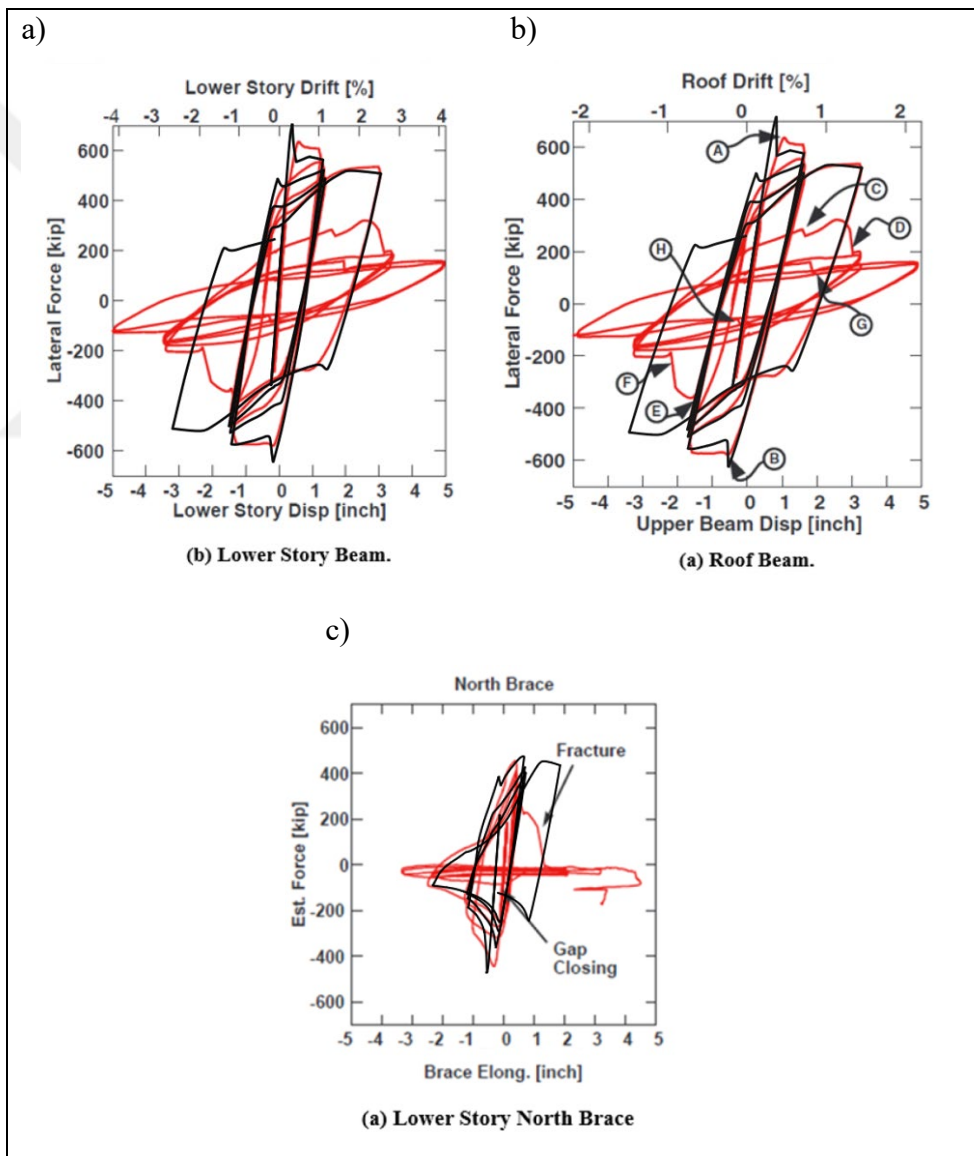
Members	ASTM Designation	Coupon Test Strength		
		F _y (ksi)	F _u (ksi)	% Plastic Elongation
Columns	A992/A572 (Gr. 50)	55.8	73.7	23.9
Beams	A992/A572 (Gr. 50)	58	74.5	26
Braces	A500 (Gr. B)	60.6	65.9	36
Gusset Plates and Plate Stiffeners	A36	56	78	20

Şekil 4.8: Uriz ve Mahin'in ters V tipi çerçevesi ve malzeme özellikleri.



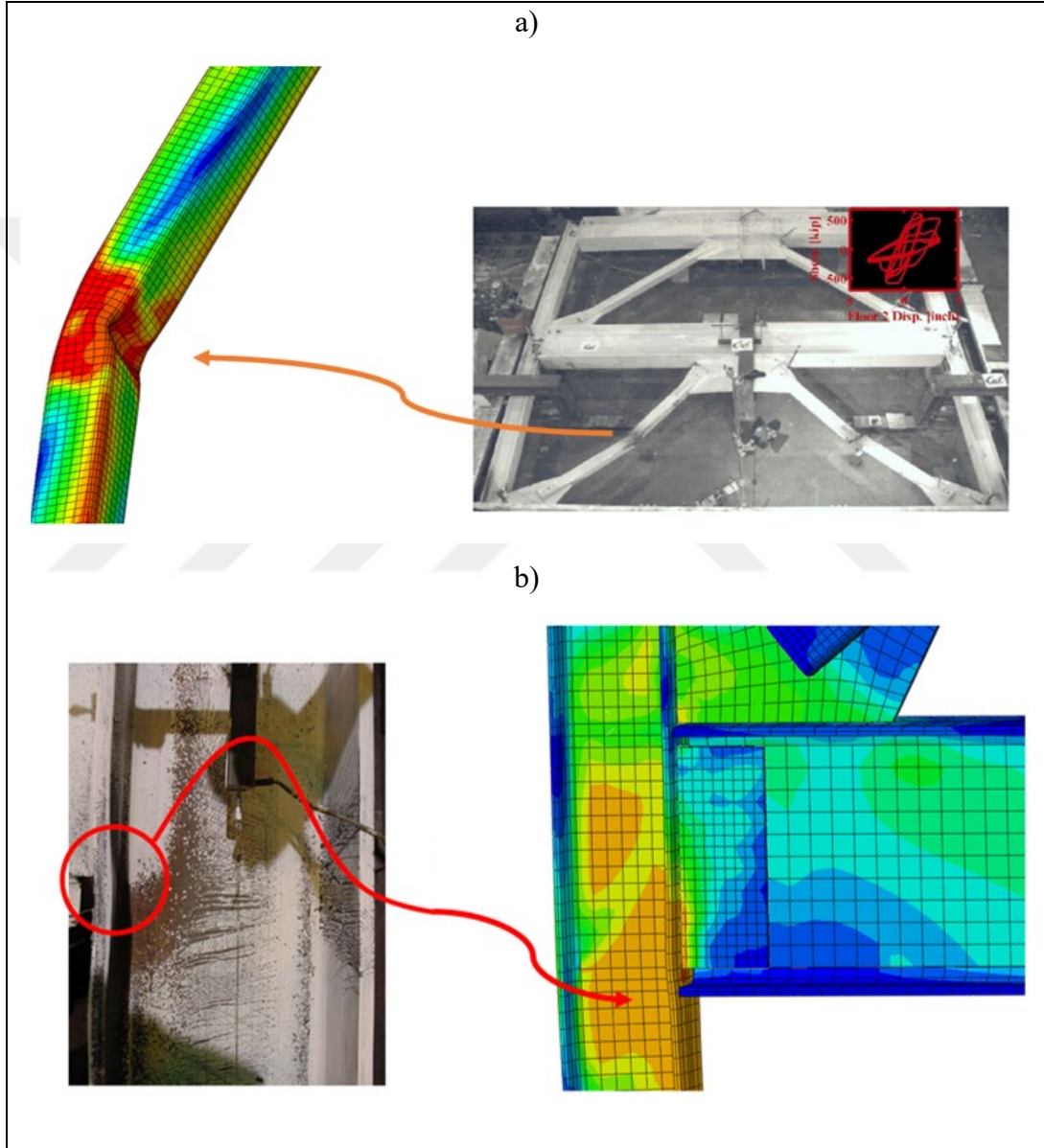
Şekil 4.9: Çerçeve çevrimsel yükleme protokolü.

Deneysel olarak test edilen çerçeve üzerindeki çevrimsel yükleme altında çerçeveye ait histeretik davranışları elde etmek için ABAQUS [Hibbit et al., 2012] programı kullanıldı. Tüm çerçeve elemanları 3 boyutlu ve 8 düğüm noktalı (C3D8R) solid eleman olarak modellenmiştir. Tüm çelik elemanlar için kinematik pekleşmeli malzeme modeli kullanılmıştır. Uygulanan yükleme protokolü için hassas gerilme çözümlerinde statik ve düşük hızlı dinamik yükler için ideal olan geometrik düzensizliklerin dikkate alındığı Abaqus/Static yöntemi kullanılmıştır. ABAQUS modelinin sonuçları deneysel test sonuçları oldukça iyi bir şekilde eşleşti. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.10: a) Taban kesme kuvveti – birinci kat yerdeğiştirme; b) Taban kesme kuvveti – çatı yerdeğiştirmesi; c) Birinci kat sağ çapraz histeretik davranışı.

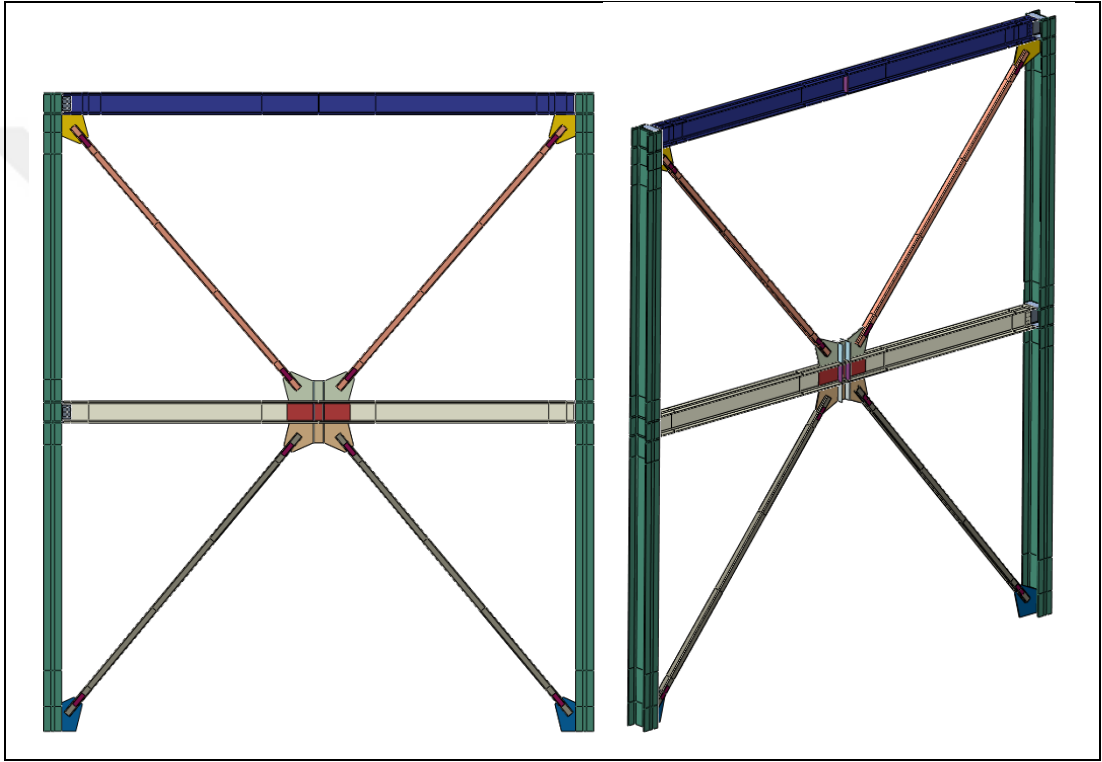
ABAQUS modelinde deney sonuçlarında olduğu gibi çapraz elemanlar düzlem dışı burkulmuştur. Ek olarak kolon iç başlıklarındaki burkulmalar ve çapraz elemandaki lokal burkulmalar Şekil 4.10'da gösterildiği gibi oldukça iyi bir şekilde yakalanmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar gösteriyor ki ABAQUS [Hibbit et al., 2012] programında analiz edilmiş çerçeve modelinin neredeyse kusursuz bir şekilde deneysel test sonuçları ile eşleşmektedir.



Şekil 4.11: a) Çapraz elemanların lokal burkulması; b) kolon flanşlarındaki lokal burkulmalar.

4.4. Prototip Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeve Sayısal Modeli

Şekil 4.10’da gösterildiği gibi ABAQUS [Hibbit et al., 2012] programında modellenen çaprazlı çerçeve ve elde edilen sonuçlar, prototip çerçevelerin sayısal modellerinin oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Tasarlanan prototip çerçevelerin deprem etkisi altındaki davranışlarını analiz etmek ve değerlendirmek için detaylı sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur (Şekil 4.11).

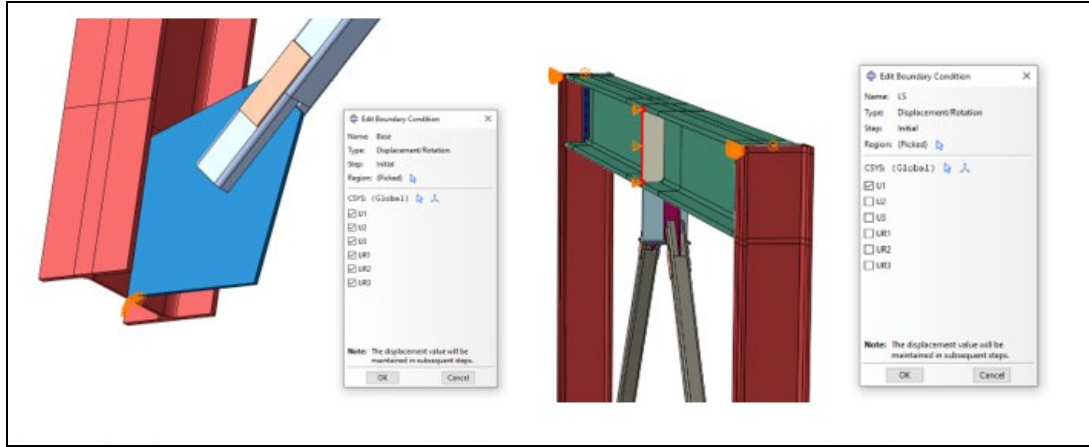


Şekil 4.12: İki katta X çapraz düzenine sahip çerçeve ABAQUS modeli.

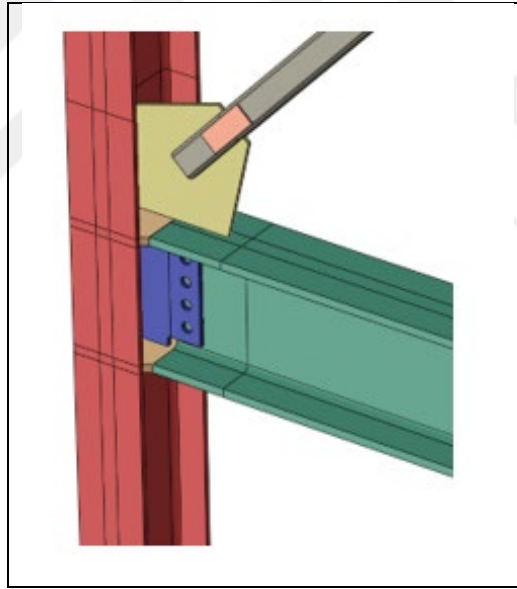
4.4.1. Sınır Koşulları ve Birleşimler

Modelleri oluşturulan çaprazlı çerçevelerin kolon tabanları ile çapraz guse levhaları kolon kesitinin orta nokta noktasında bir referans noktası oluşturularak bu noktaya bağlanır. Bu referans noktasına altı serbestlik derecesinde tutularak ankastre mesnet atandı. Çerçeve aynı zamanda çatı katı seviyesinde kolon üst uçları ve çatı kirişinin orta açıklığında düzlem dışına hareket etmeyecek şekilde mesnetlenmiştir, bu çatı makasları tarafından sağlanan desteği temsil eder (Şekil 4.12). Çatı kirişi ve

katman kirişi kolon bağlantıları kolon burulma davranışını sınırlandırmak için kolon başlıklarını tutacak şekilde teşkil edilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: Çerçeve mesnetlenme koşulları.



Şekil 4.14: Katman kirişi – kolon bağlantı detayı.

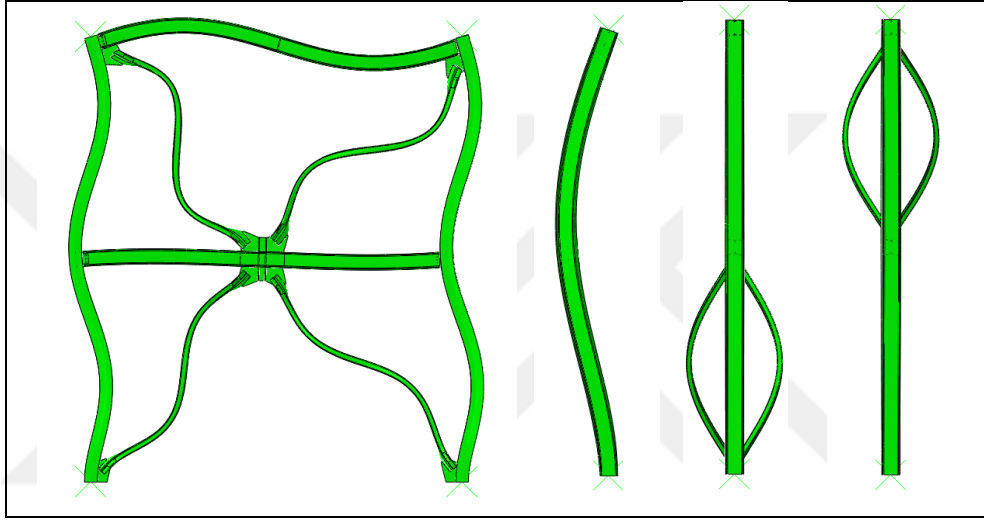
4.4.2. Başlangıç Yerdeğiştirmeleri

Kolon ve çapraz elemanların global burkulmalarını sağlamak için analiz başlangıcında yerdeğiştirmeler verilmelidir. İki katmanlı çaprazlı çerçeve için düzlem içi ve düzlem dışı burkulma modlarına karşılık gelen yerdeğiştirmeler temsili olarak Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Bununla birlikte çapraz başlangıç yerdeğiştirmeleri tek

katta X çapraz düzenine sahip çerçeve için tam bir sinüs dalgası şeklinde, diğer çapraz düzenine sahip çerçeveler için ise yarım sinüs dalgası şeklindedir.

Çapraz elemanlar için başlangıç yerdeğiştirmesinin maksimum genliği, mevcut deneysel test verileri veya uluslararası yönetmeliklerle hesaplanan burkulma yükünü yakalayacak şekilde iki katta X ve ters V tipi çapraz düzenine sahip çerçevelerde $L/1000$, tek katta X çapraz düzenine sahip çerçevelerde ise $L/500$ olarak verilmiştir.

Kolon elemanlar içinde düzlem dışında tam boy burkulacak şekilde $L/1000$, düzlem içinde katman kirişinin mesnetlenmesinden dolayı $L/500$ olarak verilmiştir.

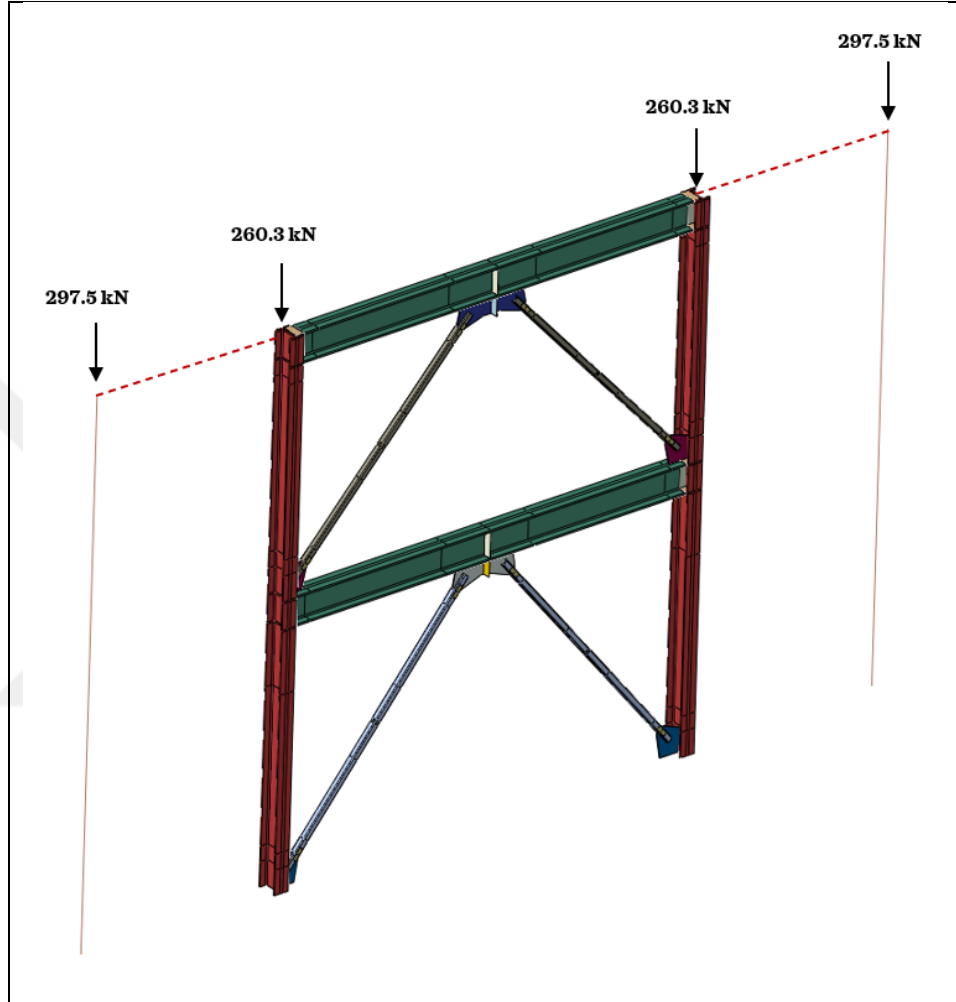


Şekil 4.15: Çapraz ve kolon eleman düzlem içi ve düzlem dışı başlangıç yerdeğiştirmeleri.

4.4.3. Geometrik Düzensizlikler ve P-Delta Etkileri

Yapının yerdeğiştirmesi ile birlikte düşey yük taşıyıcı sistem yatay yük taşıyıcı sistemde ek etkiler ortaya çıkartabilir. Bu nedenle doğrusal olmayan analizlerde sadece yatay yük taşıyıcı çerçeveye etkiyen düşey yükler değil yapıya etkiyen tüm düşey yüklerin hesaba katılması gerekir. P- Δ etkilerini hesaba katmak için yatay yük taşıyıcı sisteme düşey yük taşıyıcı sistemi temsil eden kolonlar dahil edilmiştir (Şekil 4.15). Düşey yük taşıyıcı sistemin yatay rijitliğe katkısı olduğu ile ilgili birçok çalışma yapılmış olsa da bu çalışmada modele dahil edilen kolonların yatay rijitliğe katkısı bulunmamaktadır. Eklenen kolonlar büyük eksenel ve eğilme rijitliğine sahip elastik kalacak kafes eleman olarak düşünülebilir. Yatay rijitliğe katkısının olmaması için taban bağlantı mesnetleri sabit mesnet olarak atanmıştır. Üst ucu ise çerçeveye

sabitlenerek çerçeve düzleminde ve çerçeve düzleminin dışında çerçeve ile hareket etmesi düşey yönde ise serbest bırakılmıştır. Çaprazlı çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistem kolonları yük alanları hesap edilerek, elde edilen kuvvetler kolonların üzerine uygulanmıştır.



Şekil 4.16: Düşey yük taşıyıcı sistem dahil edilmiş iki katmanlı çaprazlı çerçeve.

4.5. Deprem Yer Hareketi Kayıtları

Bu çalışmada zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde kullanılmak üzere FEMA P-695'in faya uzak yer hareketi setinden sekiz çift deprem yer hareketi kaydı seçilmiştir. Seçilen 16 deprem yer hareketi kaydının büyüklükleri 6.53 ile 7.51 arasında değişmektedir. Her bir deprem kaydının faya normal ve paralel iki bileşeni vardır. Deprem yer hareketi kayıtlarının ölçeklendirmesinde ASCE 7, 2016'nın önerisi

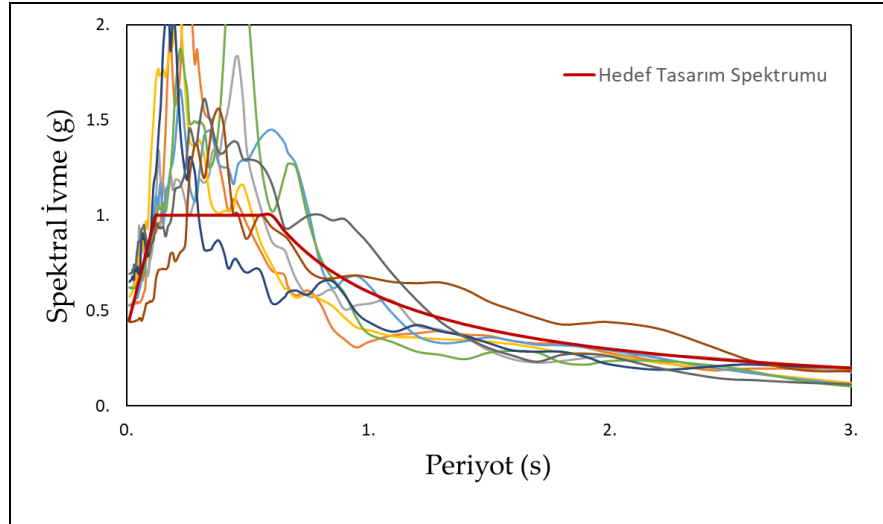
göz önünde bulundurularak frekans içeriği değiştirilmemiştir. İvme genliklerinin ortalaması 0.2T ile 1.5T aralığında tasarım ivme spektrumu ivme değerlerinden büyük olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. 16 deprem yer hareketi kaydına ait ölçeklendirme katsayıları 0.25 ile 4.5 arasında tutulmuştur. Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının özeti ve deprem yer hareketi kayıtlarına ait çizdirilen spektrum eğrileri ile tasarıma esas alınan hedef spektrum eğrisi karşılaştırılması sırasıyla Tablo 4.1 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.1: Seçilen deprem yer hareketi kayıtları ve ölçeklendirme katsayıları.

RSN ^a	Büyüklik (M_w)	Ölçek	Yıl	Kayıt ^b	İstasyon	PGA _{max} (g)
960	6.7	0.8506	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	0.343 0.401
1602	7.1	0.6249	1999	Duzce, Turkey	Bolu	0.462 0.503
174	6.5	0.9979	1979	Imperial Valley	El Centro Array #11	0.366 0.379
1111	6.9	0.9153	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	0.442 0.425
1158	7.5	0.9167	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	0.286 0.334
1148	7.5	2.612	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	0.549 0.351
767	6.9	0.8551	1989	Loma Prieta	Gilroy Array #3 Poe	0.478 0.315
725	6.5	1.1051	1987	Superstition Hills	Road (temp) Rio	0.525 0.316

^a PEER deprem kaydı veritabanı kayıt numarası

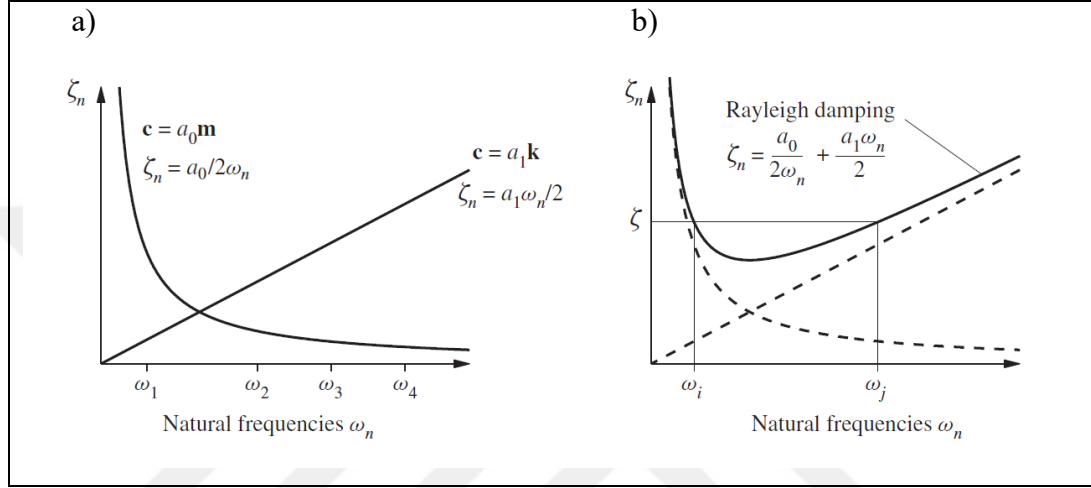
^b Her kayıt faya normal ve paralel iki bileşen içerir.



Şekil 4.17: Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarına ait spektrum eğrileri ve tasarıma esas alınan hedef ivme spektrumu.

4.6. Rayleigh Sönüm Parametrelerinin Tanımlanması

Çaprazlı çerçevede kütleler kolon üst uçlarında toplandığı varsayılarak kolon üst uçlarına atanmıştır. Dinamik yük altında yapının hareket genliklerinin azalmasına neden olan iç sönüm kuvvetlerinin hesaba katılmasında Rayleigh sönüm yöntemi kullanılmıştır.



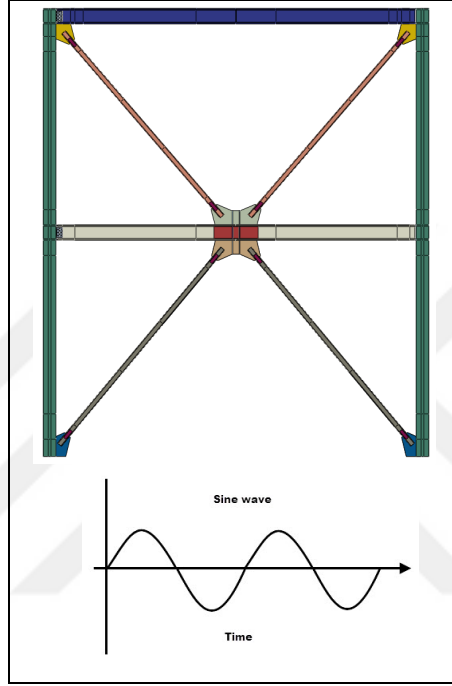
Şekil 4.18: Doğal frekans modal sönüm oranı değişim grafiği : a) kütle ve rijitlik orantılı sönüm; b) Rayleigh sönüm yaklaşımı.

Rayleigh sönüm formülü kütle ve rijitliğe bağlı katsayılar ile sönümü tanımlamak için kütle ve rijitlik matrisinin doğrusal bir kombinasyonunu içerir. Denklem 4.1’de görüleceği üzere sönüm matrisi “c” iki terimden oluşur: kütleyle bağlı sönüm “ $a_0 m$ ”, rijitliğe bağlı sönüm “ $a_1 k$ ” [Chopra, 2011].

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (4.1)$$

Tek serbestlik dereceli bir sistem için Denklem 4.1’de gösterilen a_0 ve a_1 ; yapının doğal titreşim frekansına “ ω ” ve kritik sönüm oranına “ ζ ” bağlıdır. Kritik sönüm oranı, ζ , %3 alınmıştır. Hesaplanan bu katsayılar ABAQUS [Hibbit et al., 2012] programına girilmiştir. Şekil 4.18 kütle ve rijitlik orantılı sönümün süperpoze edildiği durumdaki doğal açısal frekansa göre değişimini göstermektedir [Chopra, 2011]. Rayleigh sönümü üzerine detaylı literatür araştırmaları ve çalışmaları yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde Rayleigh sönümü kullanılması, özellikle

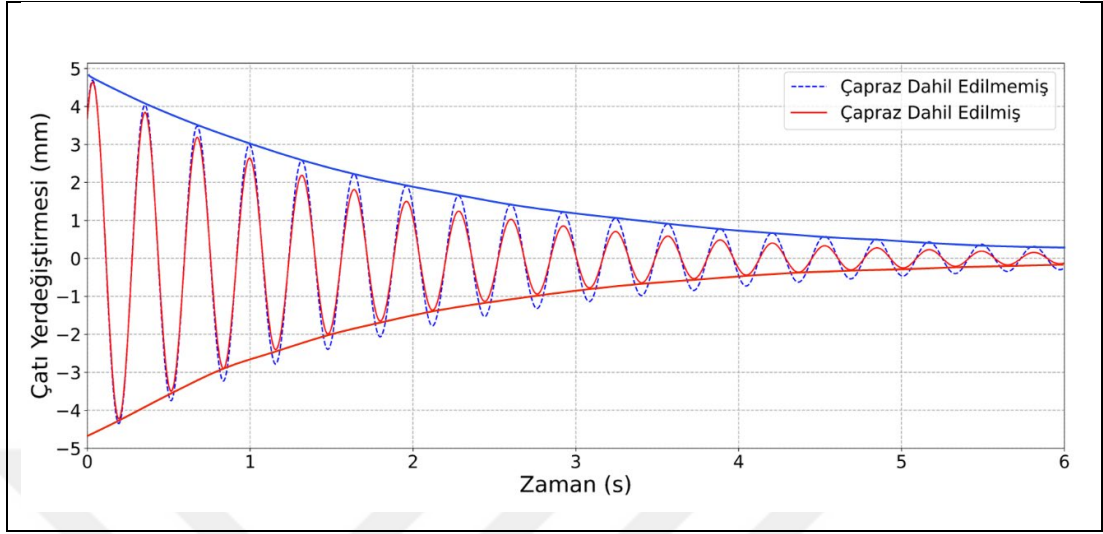
deprem yükü altında taşıyıcı sistem elemanlarında belirsiz iç kuvvetler ve beklenmeyen davranışlara yol açabileceği ortaya koyulmuştur [Bernal, 1994]. Bu yüzden başlangıçtaki rijitlik matrisi kullanılarak hesaplanan Rayleigh sönüm katsayıları, bu çalışmada ani rijitlik değişikliklerine uğrayacak olan çapraz elemanlarda gerçekçi olmayan sönüm kuvvetlerine neden olacağından çapraz elemanlar için girilmemiştir.



Şekil 4.19: Prototip çerçevenin harmonik yük etkisinde serbest titreşim deneyi.

Günümüzde oldukça kompleks derece olan yapıların sönüm oranlarının belirlenmesi teorik olarak mümkün olmamaktadır ve deneysel yollarla tanımlanması gerekir. Şekil 4.18’de gösterildiği gibi ABAQUS [Hibbit et al., 2012] programında tasarlanan çerçeve üzerinde basit harmonik yük etkisinde serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Serbest titreşim deneyi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme - zaman grafiği Şekil 4.19’da verilmiştir. Serbest titreşim sırasında hareket genliklerinin azalması sönüm oranı ile doğrudan ilişkilidir. Çünkü bu iki tepe değer arasında yapının periyodu kadar zaman vardır. Logaritmik azalmanın elde edilmesi sonucu yapının sönüm oranı rahatlıkla belirlenebilir (Denklem 4.2). Serbest titreşim deneyi sonucunda elde edilen sönüm oranları : Çapraz elemanın dahil edilmediği modelde %2.35, çapraz elemanın dahil edildiği modelde ise %3’dür. Dolayısıyla başlangıçtaki %3 kabulü doğrulanmıştır.

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (4.2)$$

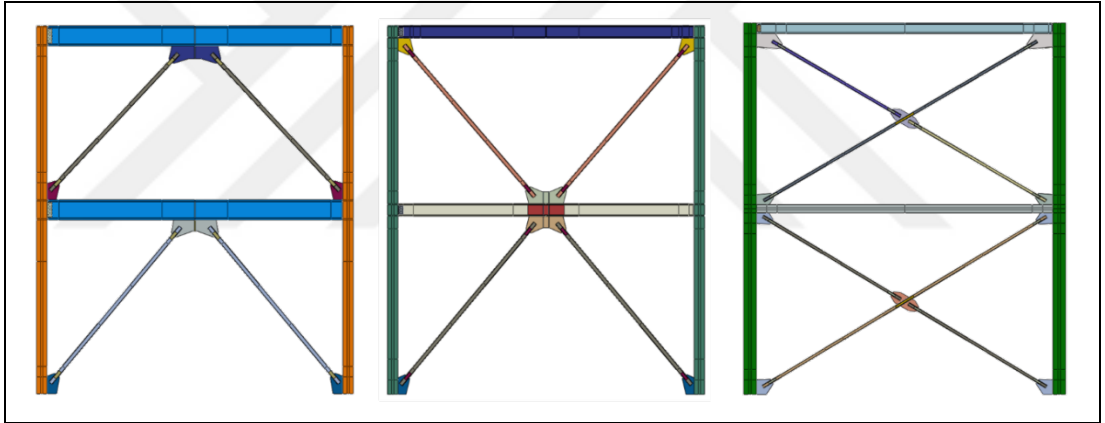


Şekil 4.20: Prototip çerçevenin harmonik yük etkisinde serbest titreşim tepkisi.

5. ÇELİK ÇOK KATMANLI ÇAPRAZLI ÇERÇEVELERİN SİSMİK DAVRANIŞI

5.1. Giriş

Bu bölüm ilk olarak tasarlanan farklı çapraz düzenlerine ait çerçevelerin (Şekil 5.1) üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizi (pushover) sonuçlarını içerir. Daha sonra ise zaman tanım alanında doğrusal analiz sonuçları takip eder. Çerçevelerin global davranışı yatay kuvvet dayanımı, kat ve katman yerdeğiştirmeleri göz önünde bulundurularak karşılaştırmalı olarak verilir. Daha sonra ise depremin taşıyıcı sistem elemanlarından iç kuvvet ve yerdeğiştirme talepleri değerlendirilir.



Şekil 5.1: Üç çapraz düzenine sahip çerçeve Abaqus sayısal modeli.

5.2. Doğrusal Olmayan Statik Artımsal İtme (Pushover) Analizi Sonuçları

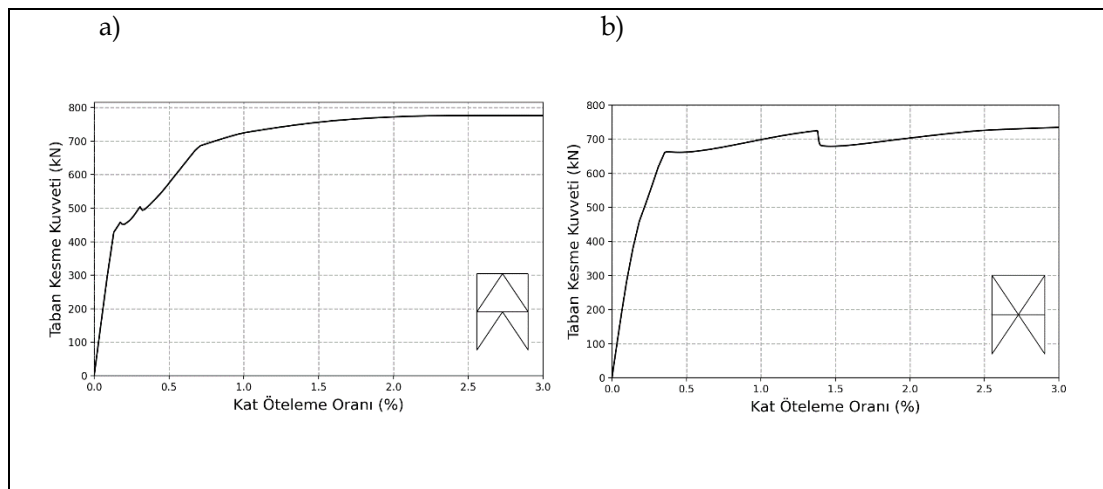
Doğrusal olmayan statik itme analizi yapılara etkiyen yatay yük etkisinde davranış parametrelerinin belirlenmesi ve performans hedeflerinin tespit edilmesine olanak sağlar. Taşıyıcı sistem elemanlarının inelastik davranışları dikkate alınarak , adım adım arttırılan yatay kuvvet etkisindeki yapının dayanım ve rijitlikliğindeki değişimler incelenir. Pushover analizinden elde edilen sonuçlar taban kesme kuvveti dayanımı, kat ve katman yerdeğiştirmeleri , çapraz elemanlara etkiyen eksenel

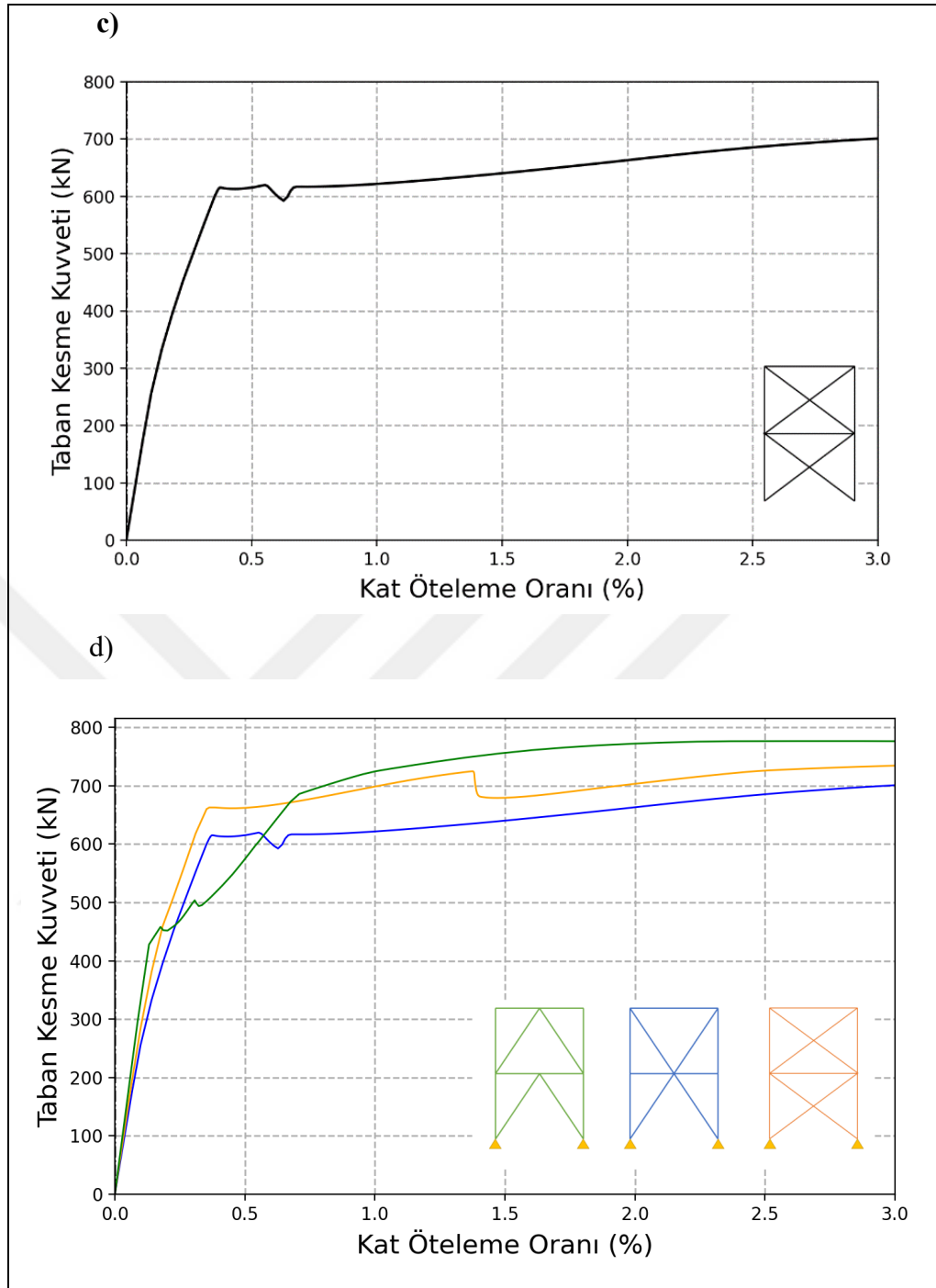
kuvvetler ve kolon talepleri olmak üzere çerçeve genel davranışı bu bölümde incelenecektir.

Doğrusal olmayan statik itme analizi (pushover) tasarlanan üç çerçeve üzerinde, çatı katı seviyesinde yatay yerdeğiştirme arttırılarak gerçekleştirildi. Katman 2 seviyesinde uygulanan yerdeğiştirme çerçeve yüksekliğinin %3 seviyesine (0.03h) kadar arttırıldı. Bu analiz yönteminin amacı tasarlanan çerçevelerin genel deprem davranışlarını incelemek ve değerlendirmektir. Geleneksel çok katlı çaprazlı çerçevelere benzeselerde çok katmanlı çaprazlı çerçeveler çatı seviyesine toplanmış kat kütleleri ile tek serbestlik derece sistem gibi davranır. Bu yüzden doğrusal olmayan statik itme analizi bu tür yapılarda sismik davranış için önemli bilgiler verir. Aynı zamanda çerçevenin global davranışı ve çerçeve elemanlarının inelastik davranışları ile ilgili bir tahminde bulunulmasına yardımcı olur.

5.2.1. Çerçevelerin Global Tepkisi

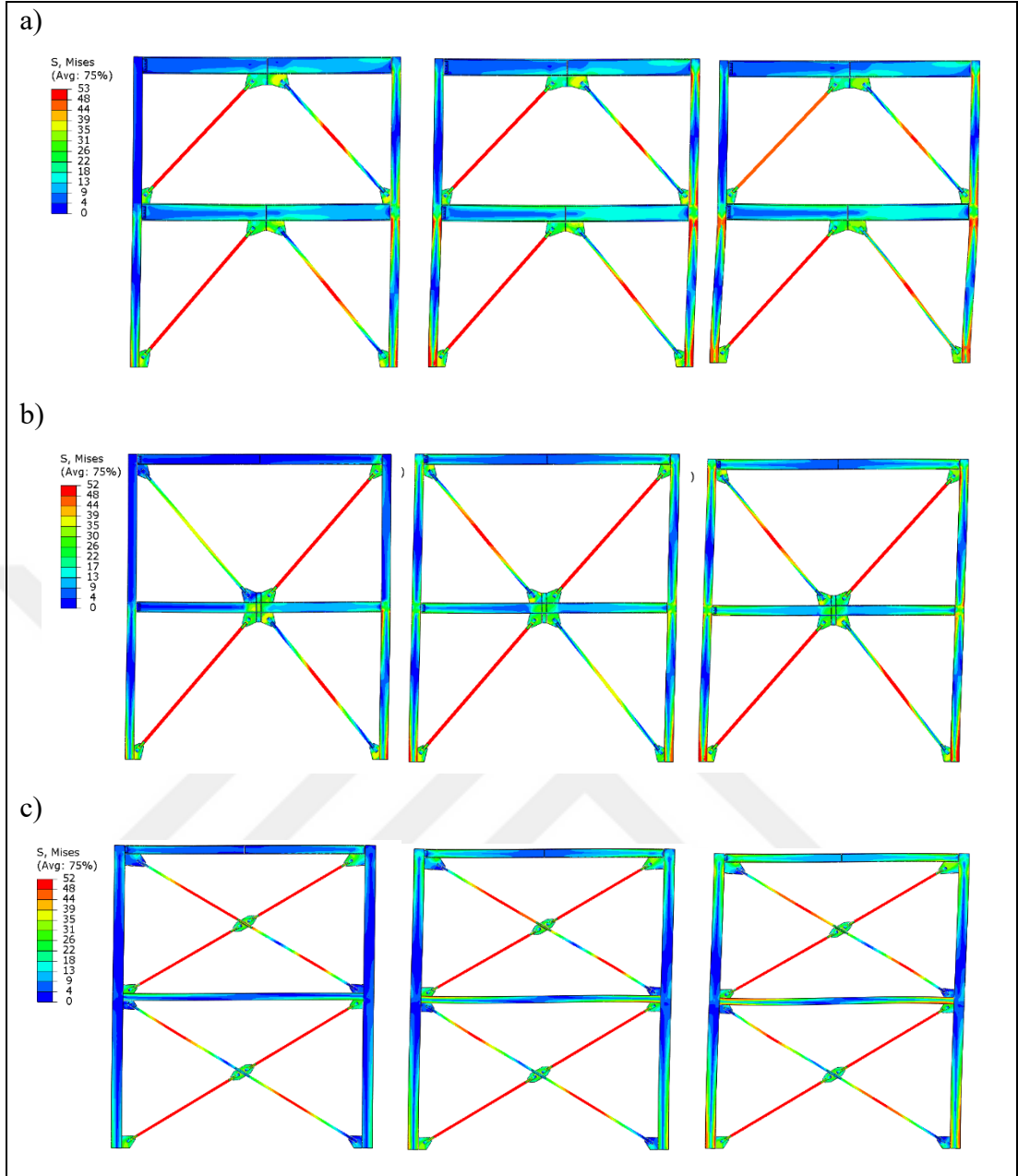
Üç farklı çapraz düzenine sahip çerçevelerin doğrusal olmayan statik itme analizinden elde edilen global tepkileri Şekil 5.2' de gösterilmiştir. Çerçeveler çatı yerdeğiştirmesi %3 kat ötelenmesine eşit olana kadar arttırıldı. Her üç çerçevede' de Şekil 5.2'de görüldüğü gibi kolon burkulması ve çerçeve stabilite kaybı görülmeden davranışını kararlı bir şekilde sürdürdü. Şekil 5.2 çerçeveye ait elde edilen statik itme eğrilerini ve bunların karşılaştırmasını göstermektedir.



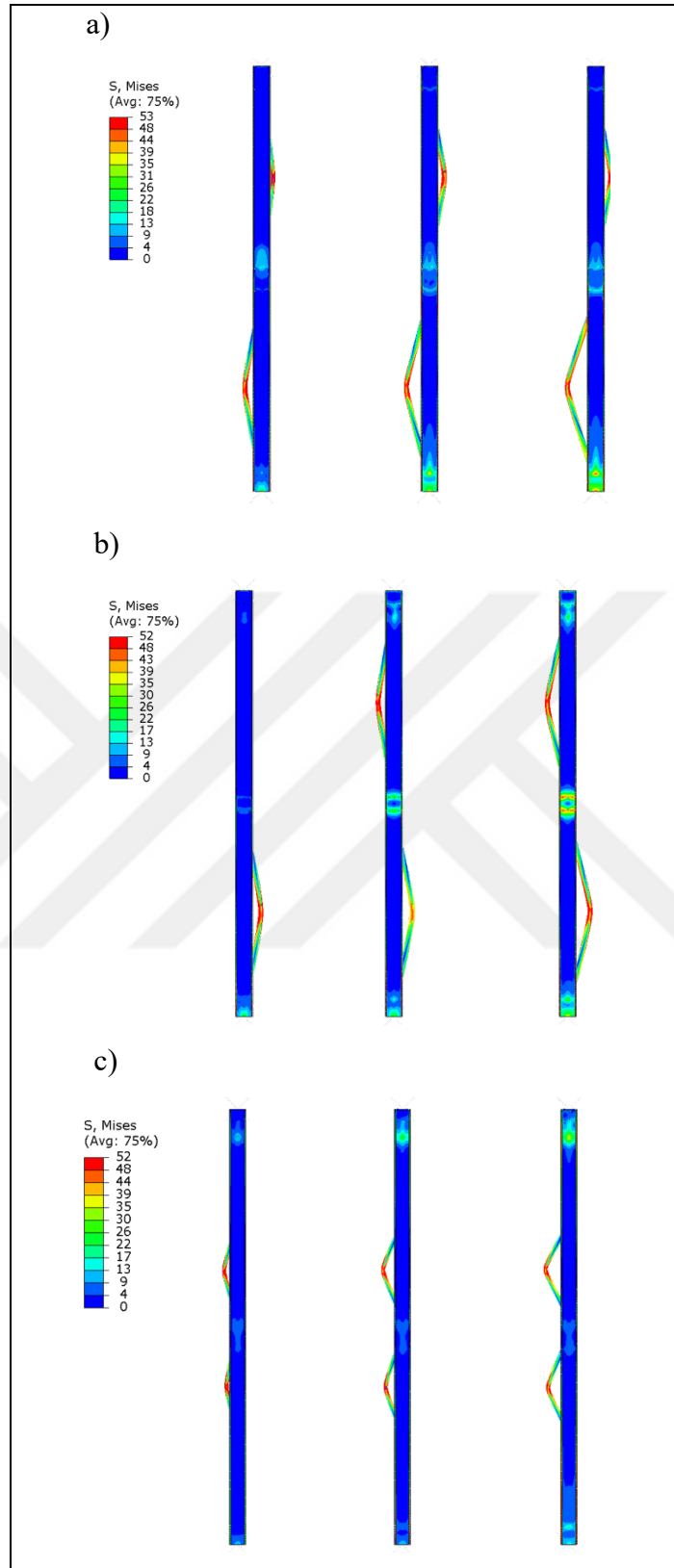


Şekil 5.2: İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi : a) Ters V; b) İki katta X; c) X; d) İtme eğrilerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.3 ise %1 , %2 ve %3 seviyelerinde çerçeve deformasyon şekilleri ve gerilme dağılımlarını göstermektedir.

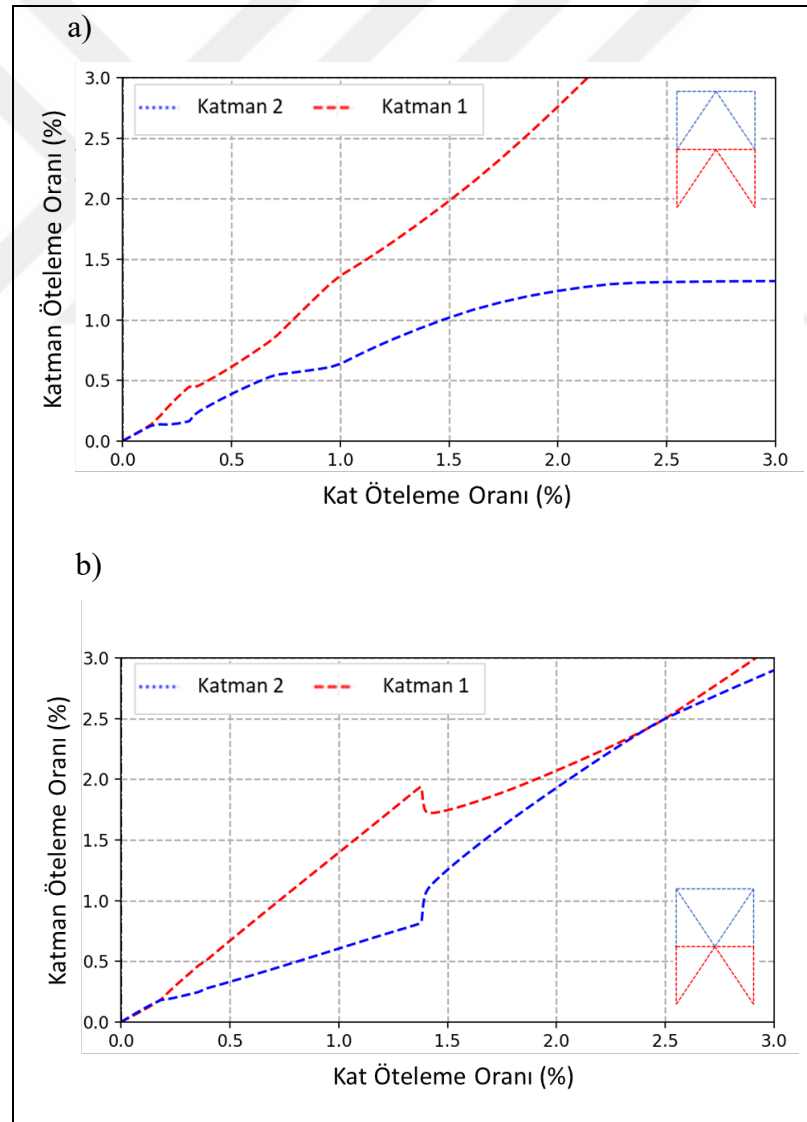


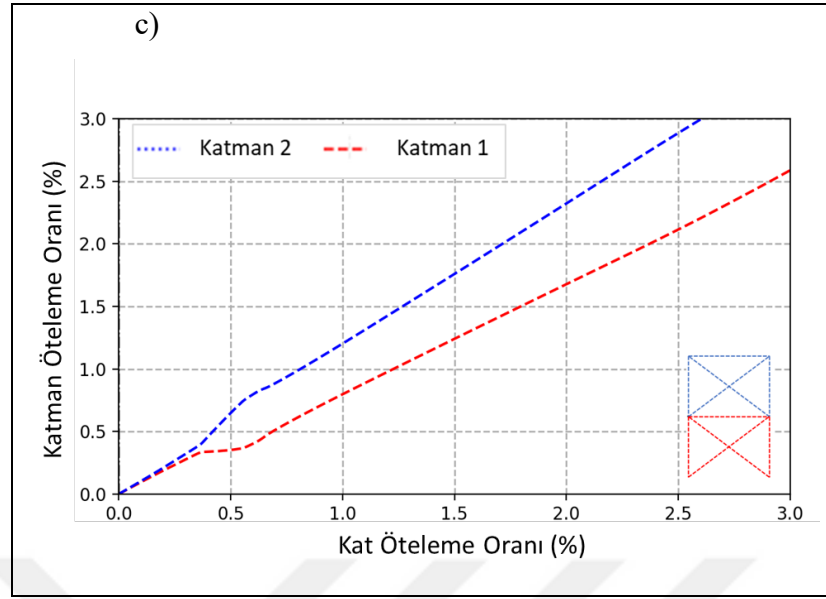
Şekil 5.3: İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi deformasyon şekli ve gerilme dağılımı karşılaştırılması: a) Ters V; b) İki katta X; c) X.



Şekil 5.4: İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi burkulma modları ve gerilme dağılımı karşılaştırılması: a) Ters V; b) İki katta X; c) X.

Şekil 5.4’de görüleceği üzere burkulma modları incelendiğinde düzlem dışına burkulacak şekilde detaylandırılan çapraz elemanlar beklenen burkulma davranışlarını gerçekleştirmiştir. Diyagonal çaprazlı çerçevelere kıyasla X çapraz düzenine sahip çerçevede süreksiz çapraz elemanların orta bağlantı detayının Whitmore ve “4t” kuralına göre detaylandırılması süreksiz çaprazların her bir katmanda bir tanesinin burkulması ile sonuçlandı. K. D. Palmer, C. W. Roeder, D. E. Lehman vd. 2012’de X çapraz düzenine sahip çerçevelerde farklı çapraz bağlantıları kullanarak deneysel testler gerçekleştirdiler. Test sonuçlarına göre X çapraz düzenine sahip çerçevelerde çapraz orta bağlantı detayının çapraz elemanın davranışı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Deneysel test sonuçları bu çalışmada kullanılan bağlantı detayının süreksiz çaprazların bir tanesinin burkulmasını doğrulamaktadır.





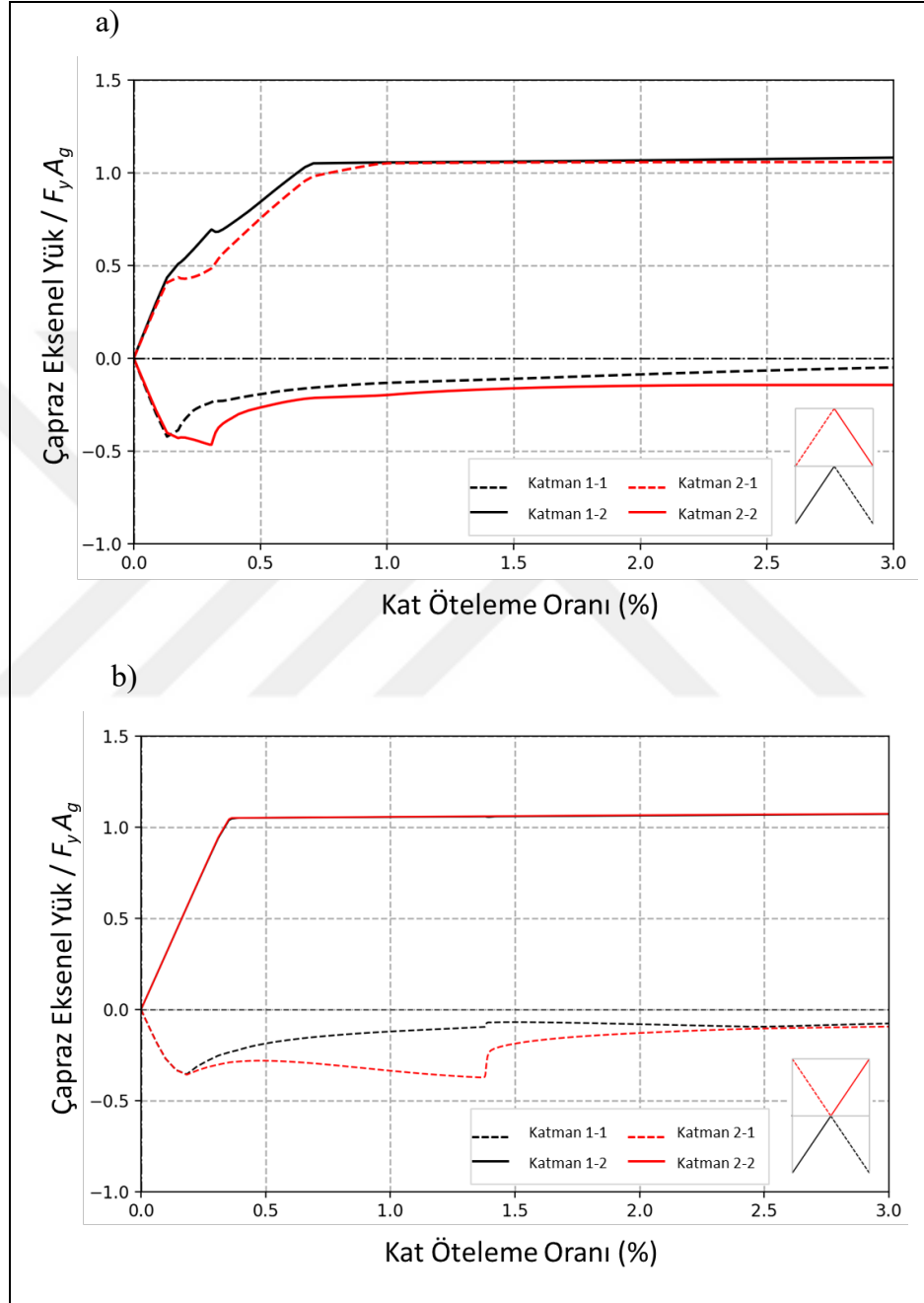
Şekil 5.5: İki katmanlı çaprazlı çerçeve kat ve katman ötelemeleri : a) Ters V; b) İki katta X; c) X.

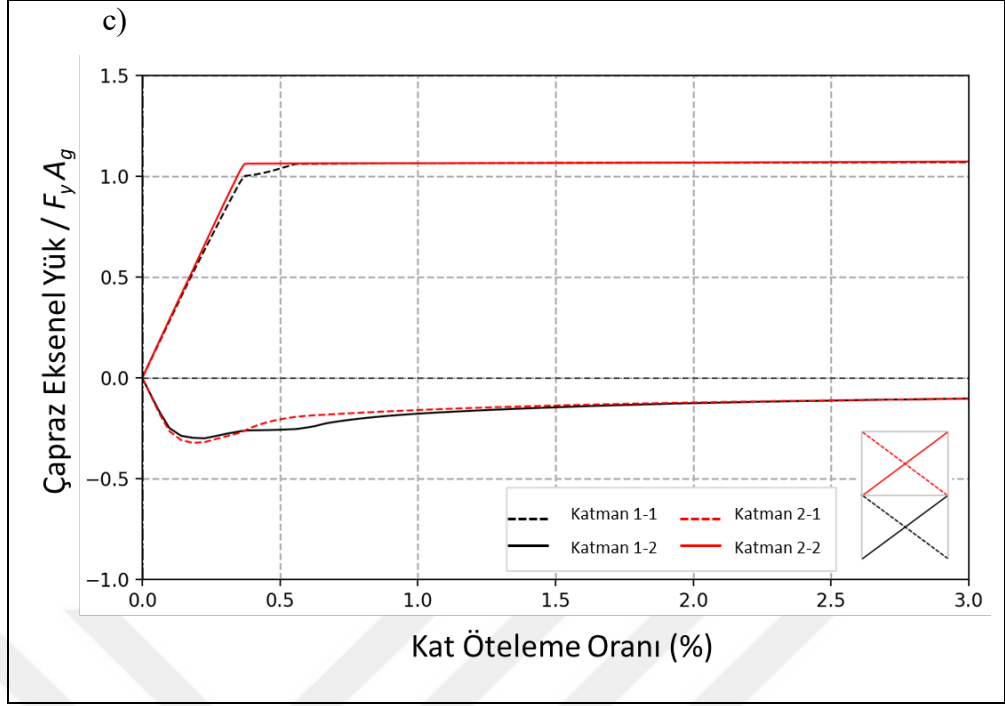
Şekil 5.5 kat ve katman ötelenme karşılaştırmalarını içermektedir. Her üç çapraz düzenine sahip çerçeve katman ötelenmeleri % 0.25 seviyelerine kadar (elastik bölge) aynı kaldı. Katman ötelenme talepleri karşılaştırıldığında ters V çapraz düzenine sahip çerçevede yerdeğıştirmelerin katman 1’de yoğunlaşma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Katman çapraz elemanların eş zamanlı olarak burkulduğu ve aktığı gözlemlenmiştir, bu iki katman arasında ötelenmelerin birbiri ardına tetiklendiği ve kolon elemanların katmanlar arası ötelenme farkını minimize ettiği anlamına gelmektedir. İki katta X ve X çapraz düzenine sahip çerçevelerin katman ötelemeleri ters V çapraz düzenine sahip çerçeveye kıyasla daha düzgün dağılıma sahiptir. Ters V’de yerdeğıştirmeler kritik olan tek bir katmanda toplanma eğiliminde olmuştur.

5.2.2. Çapraz Elemanların Tepkisi

Doğrusal olmayan statik itme analizi sonucu çapraz elemanlara etkiyen eksenel kuvvet karakteristik dayanımları ile normalize edilmiştir. Çapraz elemanlara etkiyen bu eksenel kuvvet talepleri kat öteleme değerleri ile grafikleştirilmiştir. Ters V ve iki katta X çapraz düzenine sahip çerçeveler Bölüm 4.3.1’de deneysel test sonuçları ile validasyonu yapılmış kesite sahiptir. Çerçevelere yerleştirilen bu kesitin etkin uzunluğu dikkate alındığında benzer uzunluklara sahip deney sonuçlarındaki

burkulma dayanımı ile eşleştği görülmüştür. Şekil 5.6’da gösterildiği gibi üç çapraz düzenine sahip çerçevede de her iki katman çapraz elemanlarında akma ve burkulma gerçekleşmiştir. Çapraz elemanlar tüm çerçevelerde detaylandırıldığı gibi düzlem dışı burkulmuştur.





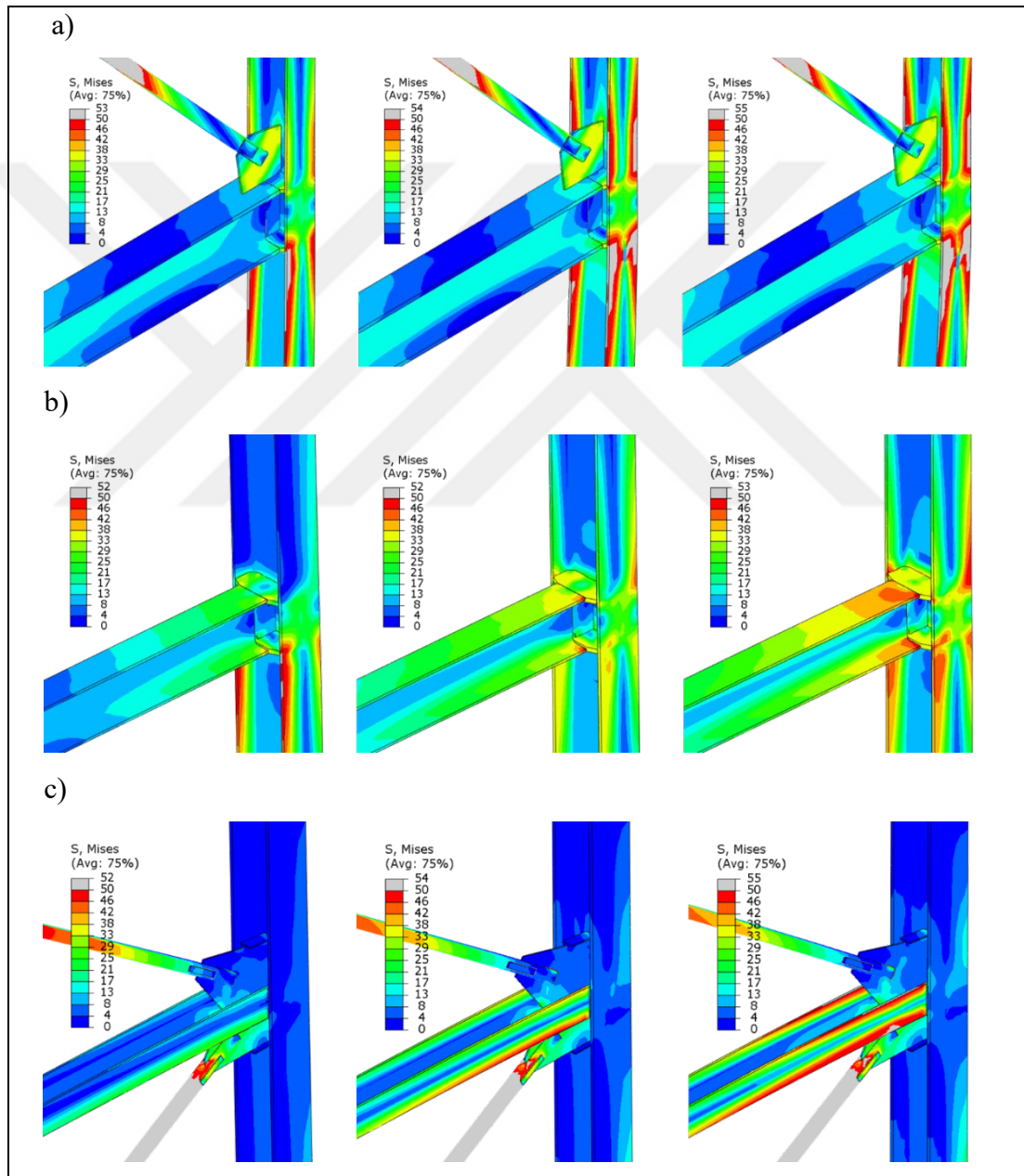
Şekil 5.6: Karakteristik dayanımları ile normalize edilmiş çapraz eksenel kuvvetleri :
a) Ters V; b) İki katta X; c) X.

5.2.3. Kolon Elemanlarının Tepkisi

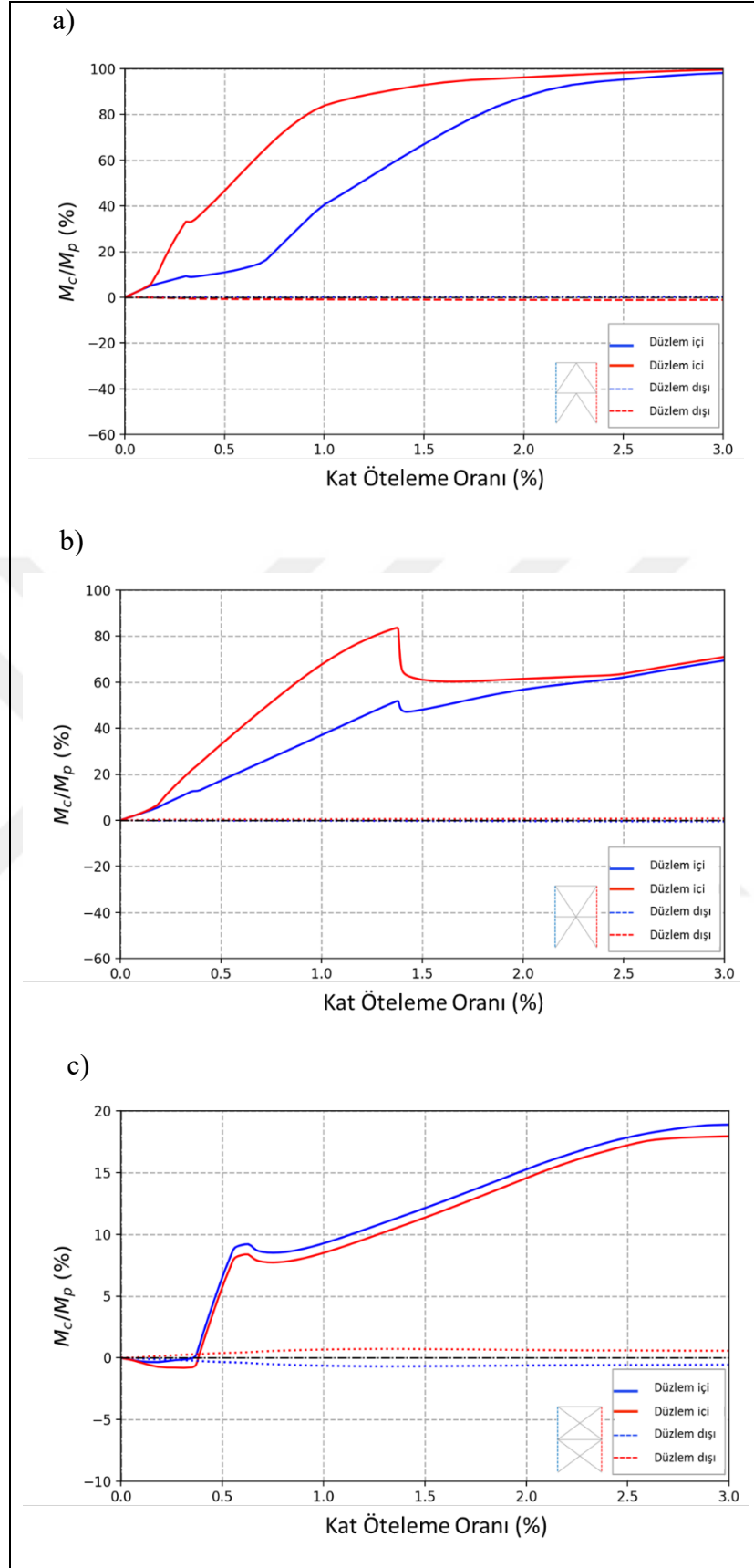
Tasarlanan çerçevelerin kolon elemanlarından talep edilen iç kuvvetler düzlem içi ve düzlem dışı eğilme momenti baz alınarak incelendi. Bu eğilme momenti talebi katman kesme kuvveti farkından ortaya çıkmasından dolayı, maksimum düzlem içi eğilme momenti talebi katman seviyelerinde oluşur. Bu çalışma iki katmanlı çerçeveler içerdiğinden maksimum talepler katman 1 seviyesinde ortaya çıkmıştır. Bu düzlem içi eğilme momenti talebinin okunduğu yer hemen katman kirişlerinin üst veya alt kısmında olup Şekil 5.7’de detaylı olarak gösterilmiştir. Okunan moment talepleri karakteristik düzlem içi ve düzlem dışı plastik moment dayanımları normalleştirilmiştir (Şekil 5.8). Ters V çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarında, yerdeğiştirmelerin tek bir katmanda yoğunlaşma eğiliminde olduğundan dolayı, katmanlar arası yatay kesme kuvveti farkı oldukça yüksektir ve talep edilen eğilme momenti %3 kat öteleme seviyelerinde plastik moment dayanımına ulaşmıştır.

İki katta X çapraz düzenine sahip çerçevede katman kesme kuvveti dayanımı farkının maksimum olduğu %1.3 kat öteleme seviyelerinde talep edilen düzlem içi moment maksimum seviyesine ulaşmıştır ve plastik moment dayanımının %80’i kadardır. X çapraz düzenine sahip çerçevede ise katman ötelemeleri düzgün bir

dağılım sergilemiştir ve katmanlar arası yatay kesme kuvveti dayanımı farkı oldukça düşük kalmıştır. Bu da X çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarının maksimum düzlem içi eğilme momenti talebinin diğer çapraz düzenine sahip çerçeveler ile kıyasla oldukça düşük kalması demektir ve maksimum % 20 seviyelerine çıkmıştır. Düzlem dışı eğilme momenti talepleri ise üç çapraz düzenine sahip çerçeve kolonları içinde oldukça düşük kalmıştır. Oldukça düşük etkiyen düzlem dışı eğilme momenti talepleri çapraz elemanların düzlem dışı burkulmasıyla tetiklenen momentlerdir.



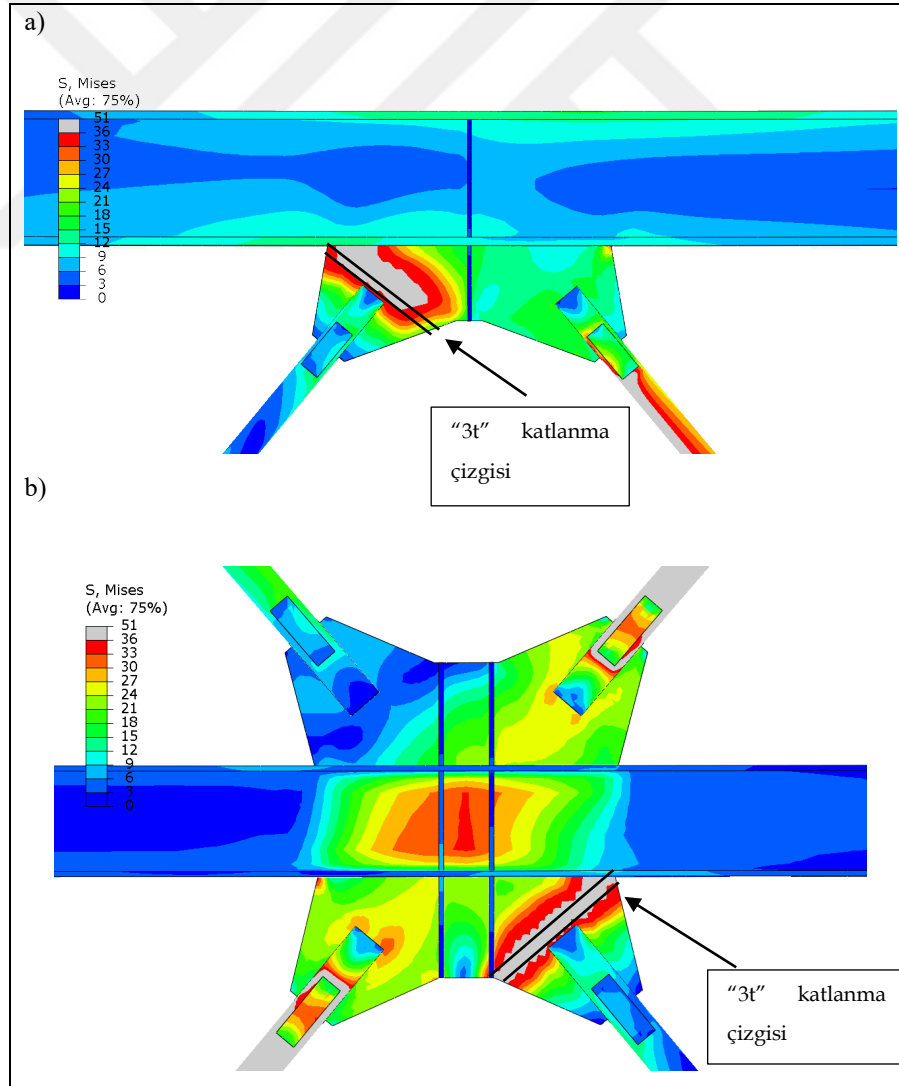
Şekil 5.7: İki katmanlı çaprazlı çerçeve statik itme analizi maksimum düzlem içi eğilme momenti talebi bölgesi ve gerilme dağılımı karşılaştırılması: a) Ters V; b) İki katta X; c) X.

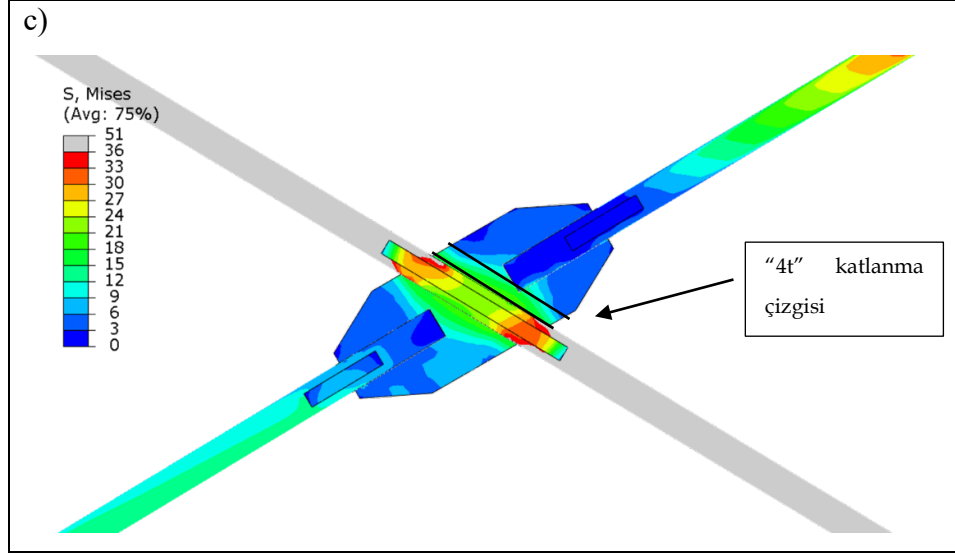


Şekil 5.8: Karakteristik dayanımları ile normalize edilmiş kolon moment talepleri : a) Ters V; b) İki katta X; c) X.

5.2.4. Çapraz Guse Levhası Tepkisi

Çapraz elemanlar her üç çapraz düzenine sahip çerçeve için düzlem dışı burkulacak şekilde detaylandırılmıştır. Guse levhalarının tasarımı, R. E. Whitmore tarafından 1952 de gerçekleştirilen deneysel sonuçlara dayanır. Çapraz elemanın guse levhası için kesilen kısmın sonundan itibaren 30 derecelik çizgiler çizilerek tasarlanır. Guse levhası çapraz eleman düzlem dışına burkulduğunda guse levhasında plastik mafsall oluşur ve bu plastik mafsallın dönmeye izin vermesi gerekir. Bunun sağlanması için 2t-4t genişliğinde katlanma bölgesi oluşturulması gerekir [Astaneh-Asl et al., 1986]. Şekil 5.9, prototip çerçevelerin detaylandırılan birleşimlerinin statik itme analizi sonucunda gerilme dağılımlarının göstermektedir. Yine aynı şekilde guse levhasının dönmesi için bırakılan 3t mesafesinde oluşan plastik mafsall gösterilmiştir.





Şekil 5.9: Çapraz guse levhası plastik mafsalsal bölgesi : a) Ters V; b) İki katta X; c) X.

5.3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Tasarlanan prototip çerçeveler üzerinde, deprem davranışlarını değerlendirmek için zaman tanım alanında doğrusal olmayan (dinamik) analizler gerçekleştirildi. Deprem mühendisliğinde yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemek ve değerlendirmek için en etkili analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemi yapıya etkiyen yükün zamana bağlı bir fonksiyonun çözümü ile elde edilir. Sonlu eleman uygulamalarında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için genelde direct integration metodlarından birisi olan Newmark metodu kullanılır. Deprem kayıtları çerçevelerin tabanına ivme kayıtları etki ettirilerek gerçekleştirilir. Seçilen deprem kayıtları ve ölçeklendirme parametreleri Bölüm 4.6’da ayrıntılı olarak verilmiştir. Dinamik analiz her bir çerçeve için yatay doğrultuda 8 çift deprem kaydı etkitilerek gerçekleştirildi.

5.3.1. Çerçevelerin Global Tepkisi

Üç farklı çapraz düzenine sahip çerçeve 48 farklı deprem kaydı altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi başarıyla tamamladı. Bu deprem kayıtları altında çerçeve kolonlarında ve kirişlerinde elastik ötesi davranış ve çerçeve stabilitesini etkileyecek problem gözlemlenmemiştir. Tüm deprem yer hareketi

kayıtlarına ait kat ve katman ötelemeleri her bir çapraz düzenine sahip çerçeve için ayrı ayrı olarak Tablo 5.1, 5.2 ve 5.3’de özetlenmiştir.

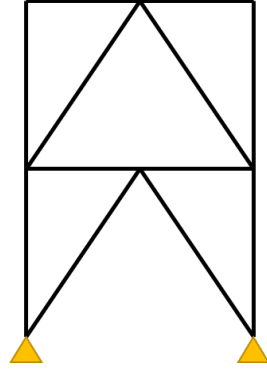
Tablolarda belirtilen kat öteleme oranı, en büyük kat yerdeğiştirmesinin kat yüksekliğine bölünmesiyle elde edilir. Katman öteleme oranları yine katmanların en büyük yerdeğiştirmelerinin katman yüksekliklerine bölünmesiyle elde edilir. En büyük katman yatay yerdeğiştirmeleri her bir katmanın alt kısmında ölçülen yatay yerdeğiştirmenin üst kısmında ölçülen yerdeğiştirmelerden çıkarılmasıyla elde edilir.

Δ_1/Δ ve Δ_2/Δ oranları çerçeve yüksekliği boyunca yatay yerdeğiştirmelerin dağılımını değerlendirmek için bir parametredir. Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum katman kaymasının kat kaymasına bölünmesiyle elde edilir.

Söz konusu tablolarda özetlenen ortalama, medyan ve standart sapma değerlerine bakıldığında řu çıkarımlar yapılabilir:

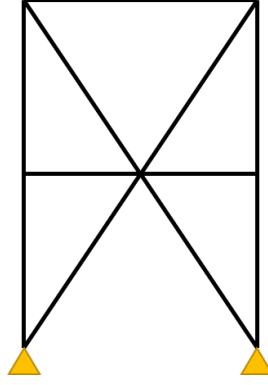
- i) Tablo 5.1’de verildiği gibi ters V, iki katta X ve X çapraz düzenine sahip çerçeveler için maksimum kat ötelemeleri sırasıyla 0.73, 0.69 ve 0.75’dir. Ortalama ve ortanca değerleri ise sırasıyla 0.38, 0.38, 0.47 ve 0.35, 0.36, 0.46’dır.
- ii) Kat ve katman öteleme talepleri karşılaştırıldığında eşit katman yüksekliklerine sahip olan iki katmanlı çaprazlı çerçevelerde çapraz düzeninin talep dağılımları üzerinde etkisinin oldukça az olduğu söylenebilir.
- iii) En düşük kat ve katman öteleme talepleri tek katta X çapraz düzenine kıyasla daha yüksek tonaja sahip olan ters V ve iki katta X çapraz düzenine sahip çerçevelerden elde edilmiştir.
- iv) Her bir çapraz düzenine sahip çerçeve için en büyük kat öteleme oranı tasarım kat ötelemesinin yaklaşık 1.8 katına çıkmıştır.
- v) Δ_1/Δ değerlerinin Δ_2/Δ değerlerine kıyasla büyük olması yerdeğiştirmelerin katman 1 de toplanma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır.
- vi) Δ_1/Δ ve Δ_2/Δ değerlerinin arasındaki farkın oldukça düşük olması çerçeve yüksekliği boyunca doğrusal olmayan davranışın dağılımını sağlayacak yeterli dayanım ve rijitliğe sahip kolon seçiminin sonucudur.
- vii) Taleplerin büyüklükleri ve dağılımı çapraz düzeninden bağımsız olarak iyi bir uyum içinde ve benzerdir.

Tablo 5.1: Ters V çapraz düzenine sahip çerçevenin doğrusal olmayan tepkisi.



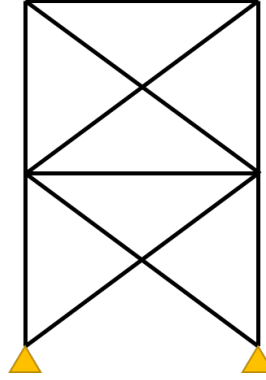
Yer Hareketi	Kat Öteleme Oranı (%), Δ	Katman 1 Öteleme Oranı, Δ_1	Katman 2 Öteleme Oranı, Δ_2	Δ_1/Δ	Δ_2/Δ
Medyan	0.35	0.44	0.32	1.19	0.90
Ortalama	0.38	0.45	0.36	1.18	0.94
Mak.	0.73	0.88	0.65	1.36	1.13
Min.	0.19	0.19	0.19	0.94	0.81
RSN174	0.29	0.35	0.24	1.22	0.85
	0.32	0.44	0.30	1.36	0.93
RSN725	0.63	0.74	0.57	1.17	0.91
	0.33	0.40	0.29	1.22	0.88
RSN767	0.39	0.44	0.33	1.14	0.86
	0.21	0.20	0.23	0.94	1.06
RSN960	0.39	0.47	0.38	1.21	0.97
	0.34	0.40	0.37	1.19	1.10
RSN1111	0.73	0.88	0.65	1.19	0.89
	0.50	0.61	0.44	1.22	0.88
RSN1148	0.19	0.19	0.19	1.00	1.01
	0.30	0.34	0.26	1.14	0.89
RSN1158	0.28	0.33	0.28	1.16	0.99
	0.48	0.58	0.43	1.20	0.90
RSN1602	0.37	0.43	0.42	1.17	1.13
	0.37	0.48	0.30	1.30	0.81

Tablo 5.2: İki katta X çapraz düzenine sahip çerçevenin doğrusal olmayan tepkisi.



Yer Hareketi	Kat Öteleme Oranı (%), Δ	Katman 1 Öteleme Oranı, Δ_1	Katman 2 Öteleme Oranı, Δ_2	Δ_1/Δ	Δ_2/Δ
Medyan	0.36	0.50	0.35	1.39	1.04
Ortalama	0.38	0.54	0.37	1.36	0.99
Mak.	0.69	1.17	0.80	1.70	1.43
Min.	0.16	0.16	0.17	0.70	0.52
RSN174	0.31	0.43	0.30	1.39	0.95
	0.36	0.50	0.40	1.40	1.11
RSN725	0.67	1.06	0.35	1.57	0.52
	0.33	0.46	0.22	1.42	0.68
RSN767	0.37	0.26	0.53	0.70	1.43
	0.16	0.16	0.17	1.02	1.06
RSN960	0.41	0.57	0.33	1.38	0.80
	0.35	0.49	0.45	1.38	1.28
RSN1111	0.69	1.17	0.80	1.70	1.16
	0.44	0.64	0.39	1.46	0.89
RSN1148	0.18	0.23	0.18	1.25	1.01
	0.26	0.36	0.36	1.35	1.35
RSN1158	0.36	0.51	0.42	1.42	1.16
	0.48	0.75	0.28	1.55	0.59
RSN1602	0.35	0.49	0.43	1.40	1.24
	0.37	0.51	0.23	1.38	0.63

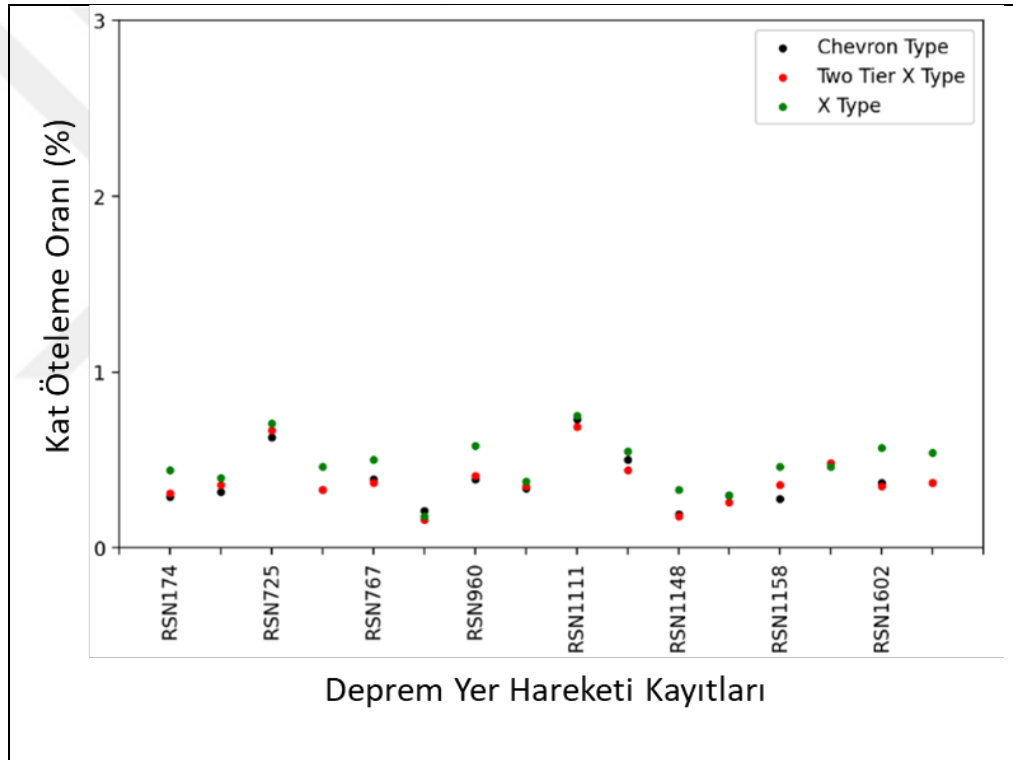
Tablo 5.3: X çapraz düzenine sahip çerçevenin doğrusal olmayan tepkisi.



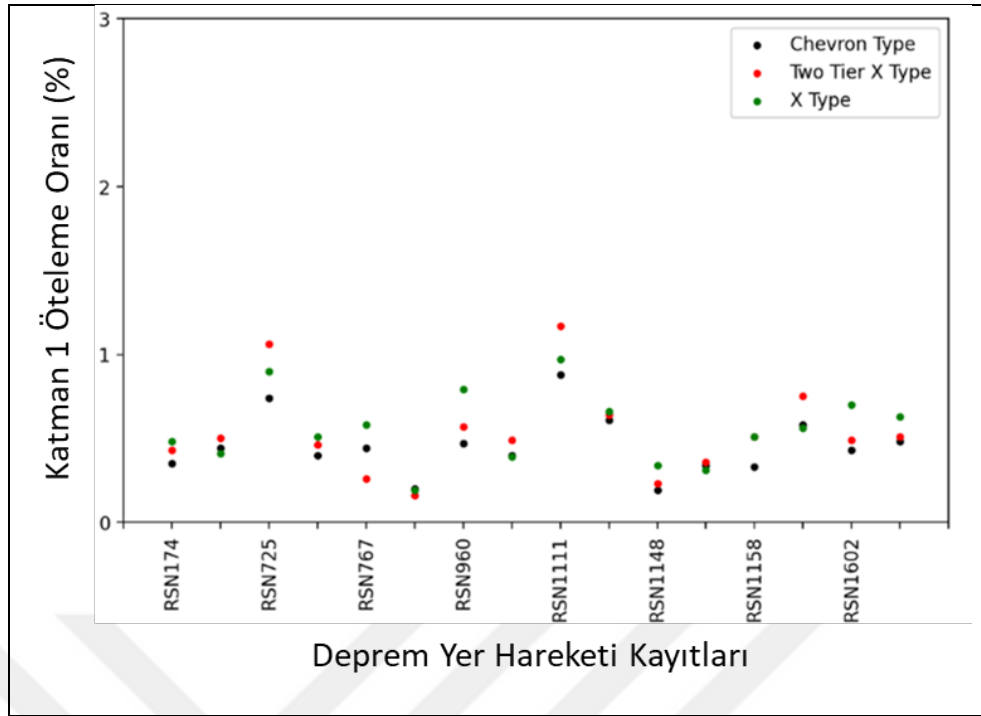
Yer Hareketi	Kat Öteleme Oranı (%), Δ	Katman 1 Öteleme Oranı, Δ_1	Katman 2 Öteleme Oranı, Δ_2	Δ_1/Δ	Δ_2/Δ
Medyan	0.46	0.54	0.42	1.14	0.88
Ortalama	0.47	0.56	0.41	1.15	0.88
Mak.	0.75	0.97	0.54	1.36	1.03
Min.	0.18	0.19	0.18	1.03	0.72
RSN174	0.44	0.48	0.41	1.10	0.94
	0.40	0.41	0.38	1.03	0.97
RSN725	0.71	0.90	0.54	1.28	0.77
	0.46	0.51	0.42	1.11	0.92
RSN767	0.50	0.58	0.43	1.17	0.86
	0.18	0.19	0.18	1.07	1.03
RSN960	0.58	0.79	0.45	1.36	0.78
	0.38	0.39	0.37	1.03	0.98
RSN1111	0.75	0.97	0.54	1.29	0.72
	0.55	0.66	0.45	1.19	0.83
RSN1148	0.33	0.34	0.33	1.04	0.98
	0.30	0.31	0.29	1.05	0.97
RSN1158	0.46	0.51	0.42	1.11	0.91
	0.46	0.56	0.36	1.22	0.78
RSN1602	0.57	0.70	0.45	1.23	0.79
	0.54	0.63	0.45	1.17	0.84

Şekil 5.10 seçilen deprem kayıtları altında çaprazlı çerçevelerin maksimum kat, Şekil 5.11 ve 5.12 ise katman öteleme taleplerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

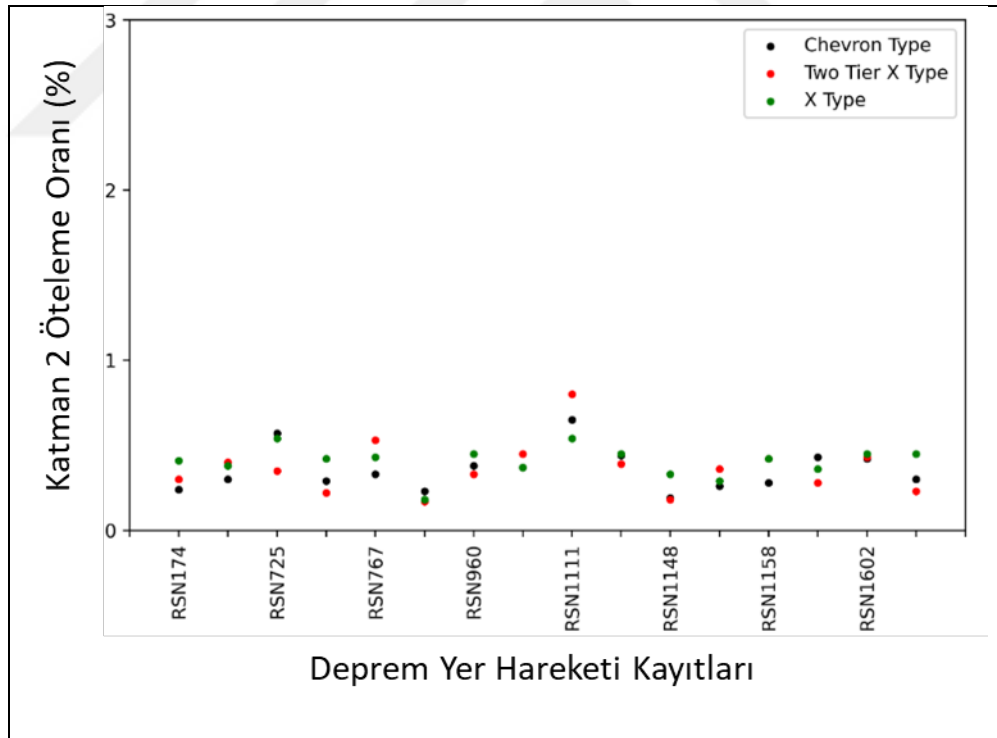
- i) Ters V, iki katta X ve X çapraz düzenine sahip çerçeveler için maksimum katman 1 ve 2 ötelemeleri sırasıyla 0.88, 1.17, 0.97 ve 0.65, 0.80, 0.54'dir.
- ii) Katman ötelenmeleri, çapraz elemanların akmaya başladığı ilk katmanda yoğunlaşma eğiliminde olmasına rağmen kat boyunca dağılmıştır.
- iii) Her üç çapraz düzenine sahip çerçevede maksimum katman ötelenmeleri oldukça düşük kalmıştır ve buda çapraz elemanlarda düşük döngü yorgunluğu (kırılma) meydana geldiği seviyenin oldukça altındadır.



Şekil 5.10: Maksimum kat ötelemelerinin karşılaştırılması.

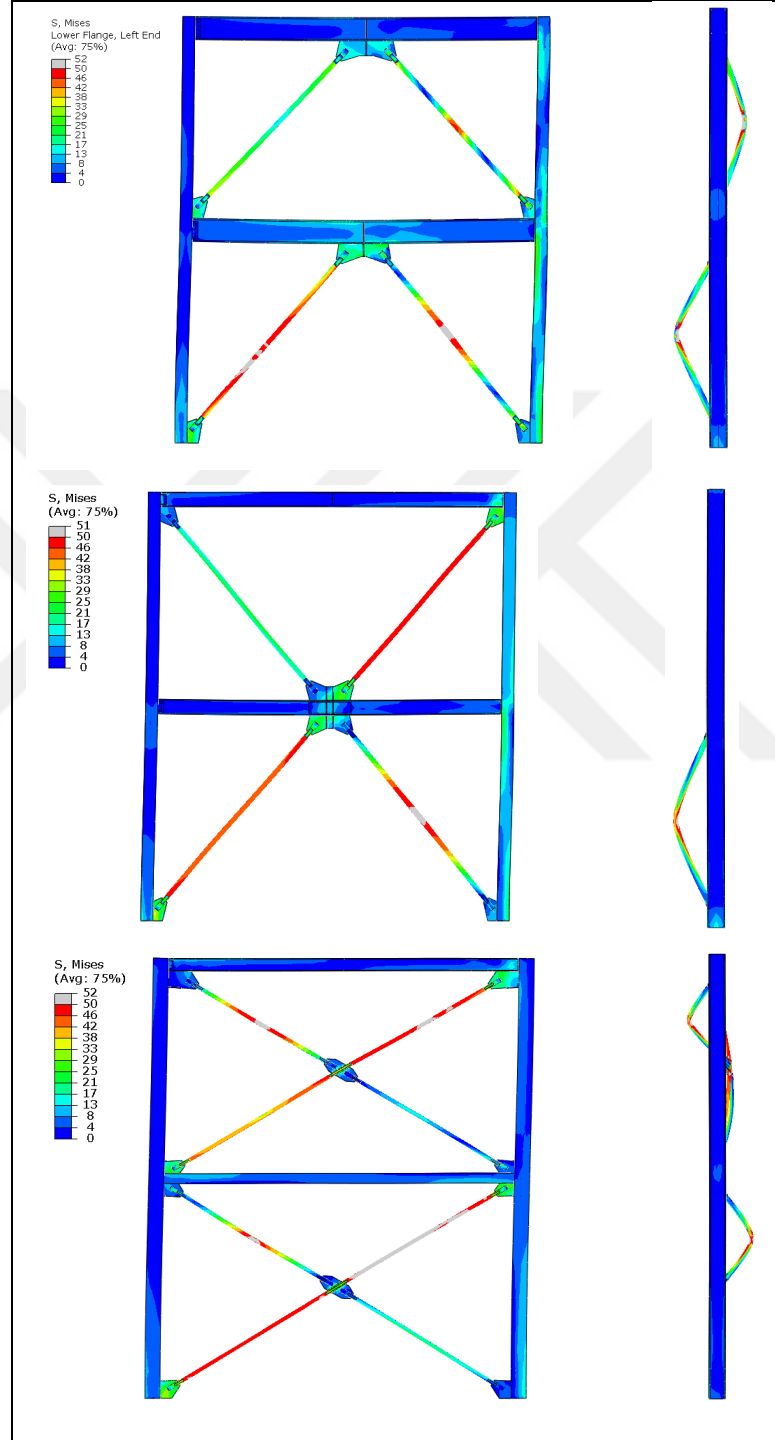


Şekil 5.11: Maksimum katman 1 ötelemelerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.12: Maksimum katman 2 ötelemelerinin karşılaştırılması.

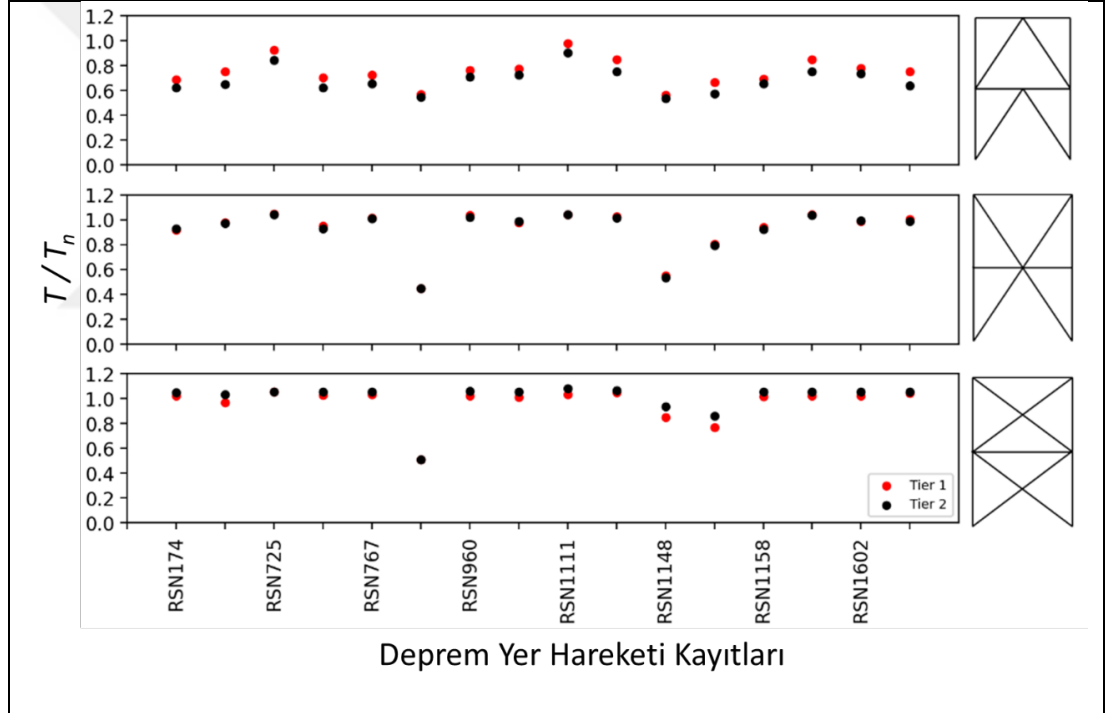
Şekil 5.13, ortalama kat öteleme değerine yakın olan Nishi-Akashi istasyonunda kaydedilen Japonya – Kobe depremi altında üç çapraz düzenine sahip çerçevenin deforme olmuş şekillerini göstermektedir.



Şekil 5.13: Japonya – Kobe depremi altında deformasyon şekilleri ve gerilme dağılımları $t = 8.30$ sn. (deformasyon ölçek faktörü = 4).

5.3.2. Çapraz Elemanların Tepkisi

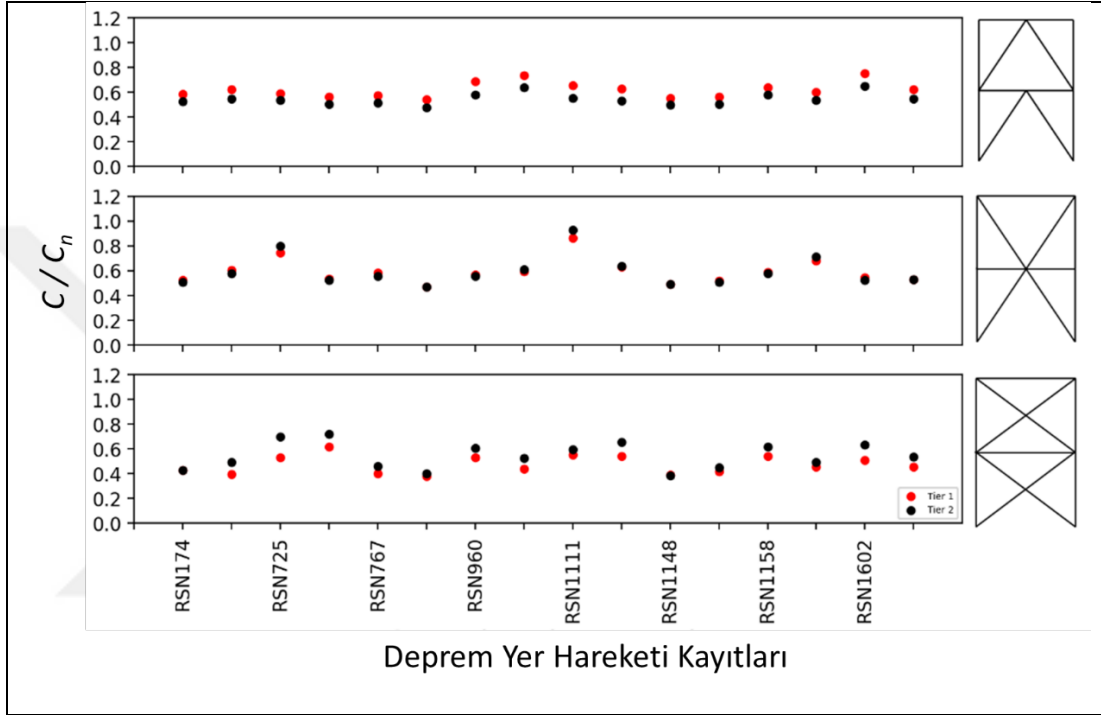
Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen ve ilgili çapraz elemanların karakteristik çekme kuvveti dayanımları " T_n " ile normalize edilen çapraz eksenel kuvvet talepleri Şekil 5.14'de istatistiksel olarak özetlenmiştir. Üç çapraz düzenine sahip çerçevede her iki katman çapraz elemanlarında % 0.5 kat öteleme seviyelerinde çoğunlukla burkulma ve akma gerçekleşmiştir. Her iki katman çapraz elemanlarının akma ve burkulmalarının tetiklenmesi tasarımda gözetilen düzlem içi momentlerin sonucunda katman ötelenme farkının minimize edilmeye çalışılmasından kaynaklanmaktadır. Bu üniform katman öteleme talepleri tasarım kriterleri ile beklenen üniform öteleme taleplerini doğrulamaktadır.



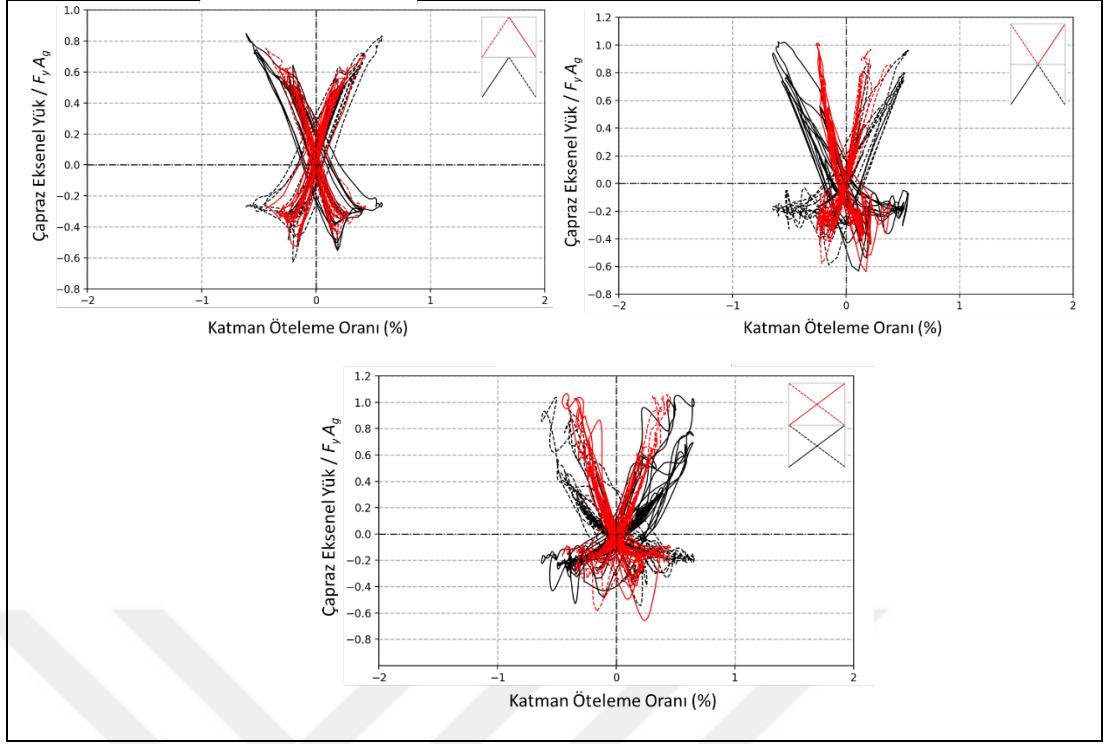
Şekil 5.14: Prototip çerçeve çaprazlarında oluşan maksimum eksenel çekme kuvveti talepleri.

Şekil 5.15 ise çapraz elemanların karakteristik basınç kuvveti dayanımları " C_n " ile normalize edilen çapraz eksenel basınç kuvveti taleplerini özetlemektedir. Bölüm 2.2.1'de de bahsedildiği üzere çapraz elemanların kırılmalarını etkileyecek birçok parametre vardır. Geçmiş deneysel çalışmalar çapraz elemanlarda kırılmanın meydana geldiği kat ötelelerinin %2 seviyelerinde olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmaya

konu olan çerçevelerin, katman öteleme taleplerinin deneysel çalışmalarla elde edilen kırılma seviyelerinin oldukça altında kalmıştır. 48 deprem yer hareketi altında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda çapraz elemanlarda lokal burkulma meydana gelmemiştir. Şekil 5.16, Nishi-Akashi istasyonunda kaydedilen Japonya–Kobe depremi altında katman 1 ve 2 çapraz elemanların histeretik davranışını göstermektedir.



Şekil 5.15: Prototip çerçeve çaprazlarının maksimum eksenel basınç kuvveti talepleri.



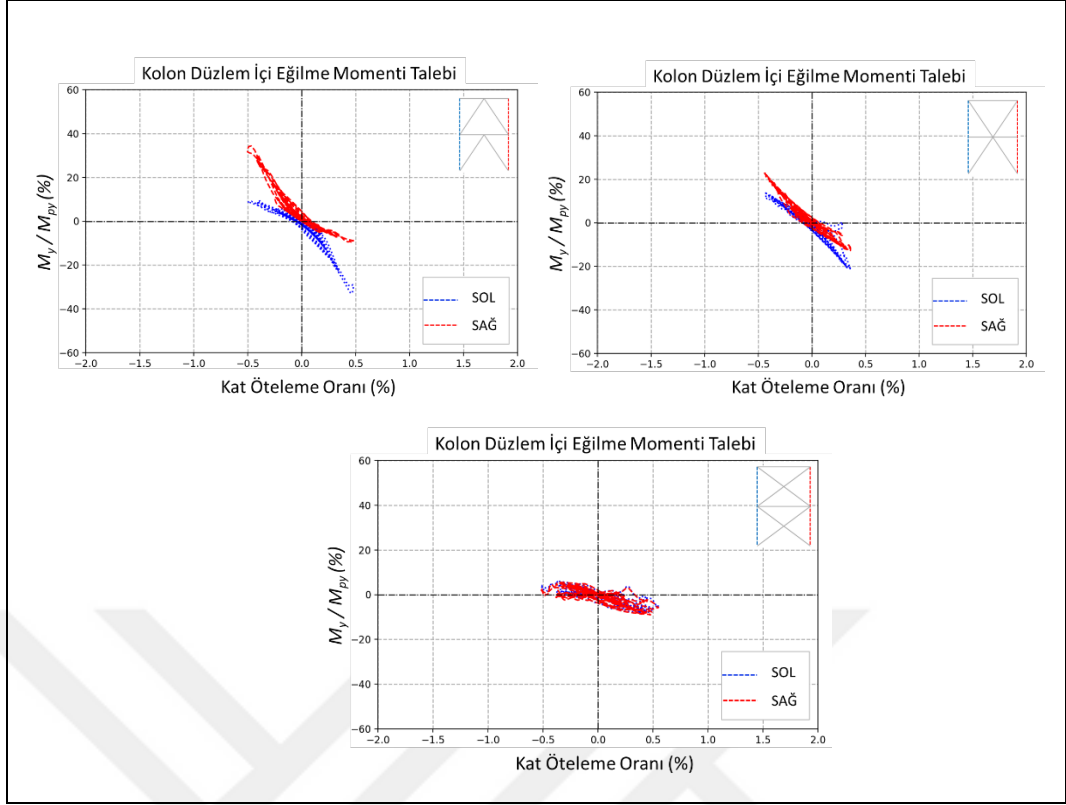
Şekil 5.16: Japonya – Kobe depremi altında katman 1 ve 2 çapraz elemanların histeretik davranışı.

5.3.3. Kolon Elemanların Tepkisi

48 deprem yer hareketi kaydı altında gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen kolon eksenel kuvvet, düzlem içi ve düzlem dışı moment talepleri ters V, iki katta X ve X çapraz düzenine sahip çerçeveler için sırasıyla Tablo 5.4, 5.5 ve 5.6’da gösterilmiştir. Tablolar, karakteristik eksenel basınç kuvveti ile normalize edilmiş eksenel kuvvet talepleri ile Şekil 5.7’de gösterilen eğilme momentinin maksimum olduğu bölgedeki düzlem içi ve düzlem dışı eğilme momenti taleplerinin plastik moment kapasitesi ile normalize edilmiş değerlerini içerir. Talepler çerçeve sağ veya sol kolonunda meydana gelen maksimum değeri ifade eder.

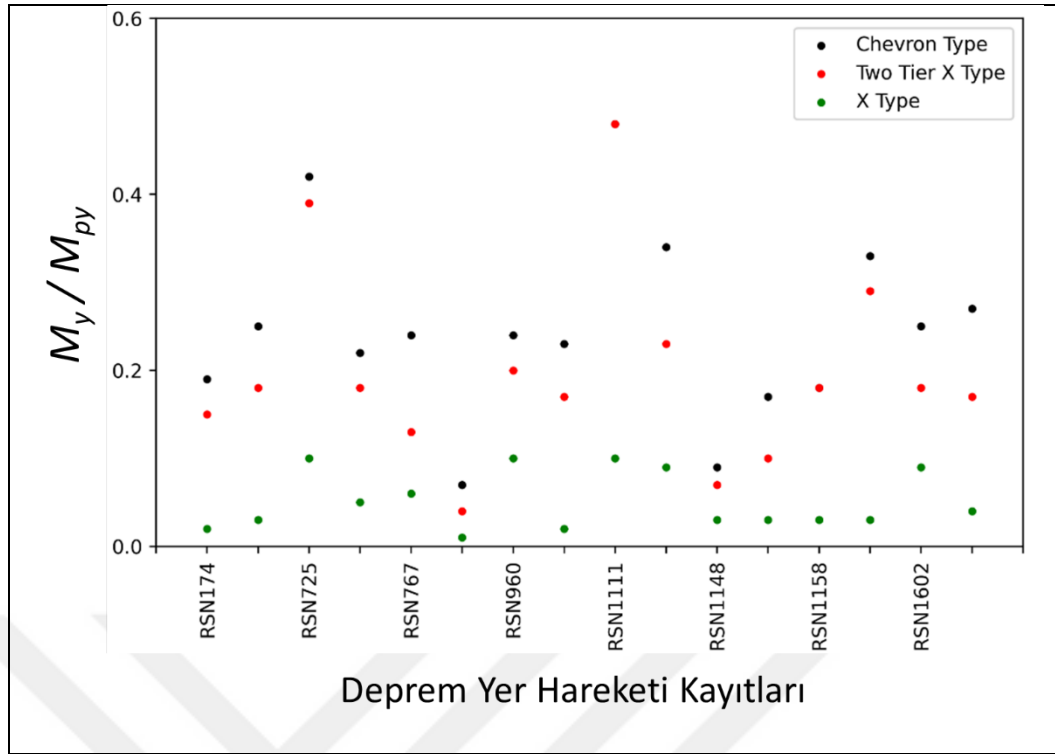
5.3.3.1. Düzlem İçi Eğilme Momenti Talepleri

Maksimum düzlem içi moment talepleri katman kirişlerinin alt başlık veya üst başlığın yakınında meydana gelmiştir. Tablo 5.4 -5.6’da gösterildiği gibi moment talepleri plastik moment kapasiteleri ile normalize edilmiştir.



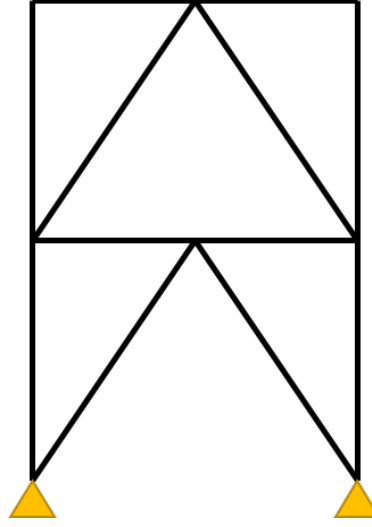
Şekil 5.17: Japonya–Kobe depremi (RSN 1111) altında çerçeve kolonları düzlem içi moment talepleri.

Görüleceği üzere maksimum düzlem içi talepler , ilgili kesitin plastik moment kapasitelerinden önemli ölçüde düşüktür. İki katta X ve ters V çapraz düzenine sahip çerçevelere kıyasla X çapraz düzenine sahip çerçevede düzlem içi moment talepleri oldukça düşüktür. Her bir deprem kaydı için düzlem içi eğilme momenti kat öteleme talebi ile grafikleştirildi. Şekil 5.17 Japonya – Kobe depremi (RSN 1111) altında çerçeve kolonları düzlem içi moment taleplerini göstermektedir. %0.25 kat öteleme seviyelerinde kadar çapraz elemanların global burkulmaları öncesi kolon düzlem içi momentleri oldukça düşük seviyededir. Global burkulmanın gerçekleşmesi ve katmanlar arası çapraz eleman eksenel kuvvet talepleri farkı kolon elemanlarda indüklenen moment ile minimize edilmiştir. Dinamik analizler sonucunda elde edilen kolon düzlem içi eğilme momenti talepleri Statik itme analizleri ile karşılaştırıldığında benzerdir. Şekil 5.18, 48 deprem yer hareketi altında talep edilen maksimum düzlem içi eğilme momentlerinin özetini içerir.



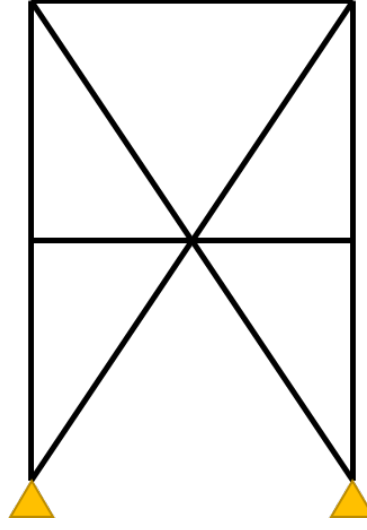
Şekil 5.18: Çerçeve kolonları düzlem içi eğilme momenti talepleri.

Tablo 5.4: Ters V çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarının maksimum talepleri.



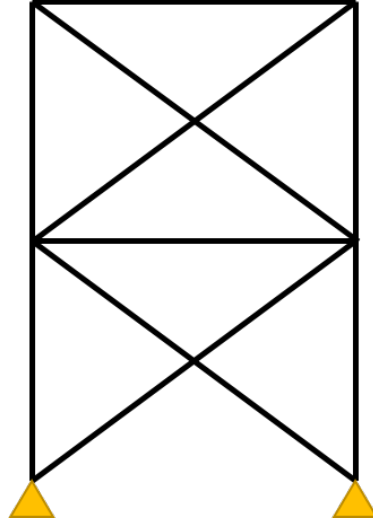
Yer Hareketi	P/Pc	My/Mpy	Mx/Mpx
Medyan	0.24	0.24	0.03
Ortalama	0.23	0.25	0.03
Mak.	0.30	0.48	0.07
Min.	0.16	0.07	0.01
RSN174	0.23	0.19	0.03
	0.24	0.25	0.02
RSN725	0.28	0.42	0.05
	0.24	0.22	0.02
RSN767	0.25	0.24	0.04
	0.20	0.07	0.01
RSN960	0.19	0.24	0.04
	0.19	0.23	0.05
RSN1111	0.30	0.48	0.07
	0.28	0.34	0.03
RSN1148	0.16	0.09	0.01
	0.18	0.17	0.02
RSN1158	0.24	0.18	0.02
	0.28	0.33	0.05
RSN1602	0.18	0.25	0.05
	0.24	0.27	0.03

Tablo 5.5: İki katta X çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarının maksimum talepleri.



Yer Hareketi	P/Pc	My/Mpy	Mx/Mpx
Medyan	0.30	0.18	0.03
Ortalama	0.28	0.20	0.03
Mak.	0.35	0.48	0.05
Min.	0.18	0.04	0.01
RSN174	0.29	0.15	0.03
	0.28	0.18	0.03
RSN725	0.31	0.39	0.05
	0.29	0.18	0.03
RSN767	0.30	0.13	0.02
	0.18	0.04	0.01
RSN960	0.30	0.20	0.04
	0.31	0.17	0.03
RSN1111	0.35	0.48	0.04
	0.30	0.23	0.03
RSN1148	0.20	0.07	0.02
	0.24	0.10	0.02
RSN1158	0.30	0.18	0.03
	0.31	0.29	0.02
RSN1602	0.29	0.18	0.02
	0.31	0.17	0.03

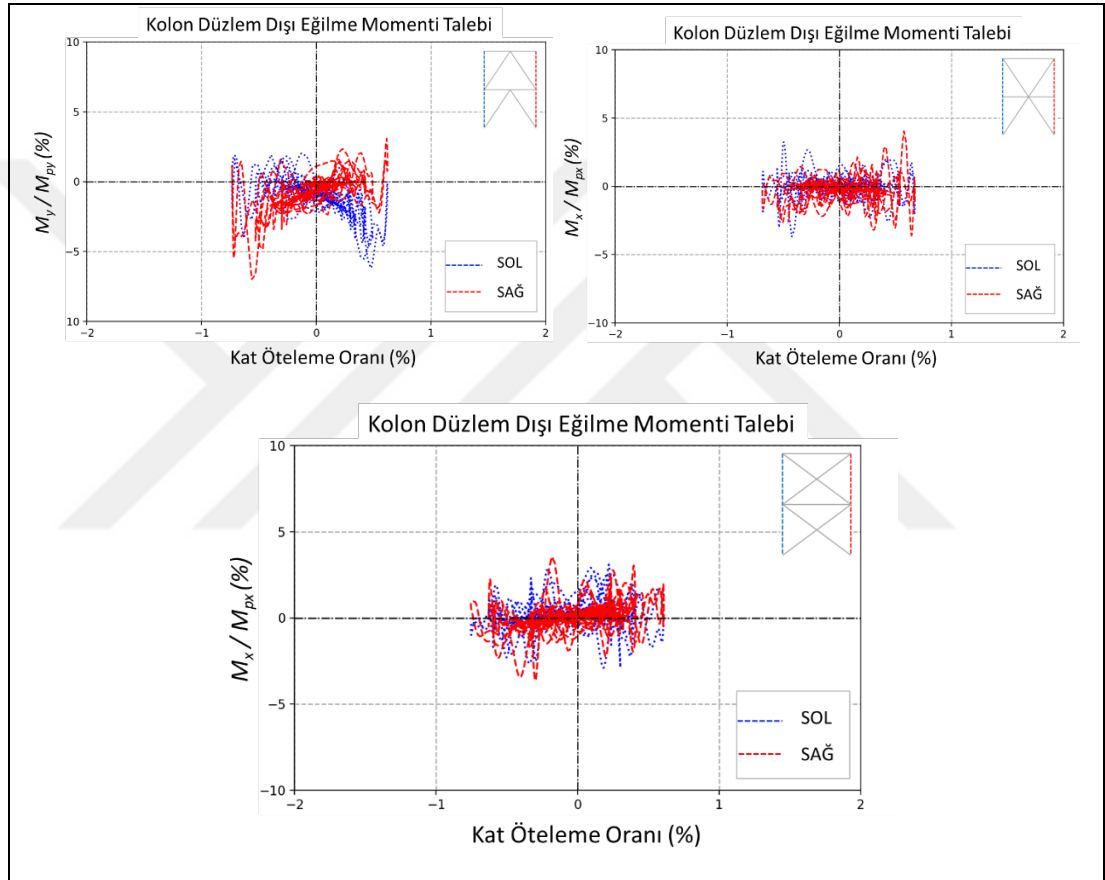
Tablo 5.6: X çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarının maksimum talepleri.



Yer Hareketi	P/Pc	My/Mpy	Mx/Mpx
Medyan	0.14	0.03	0.02
Ortalama	0.14	0.05	0.02
Mak.	0.18	0.10	0.03
Min.	0.10	0.01	0.01
RSN174	0.13	0.02	0.01
	0.13	0.03	0.01
RSN725	0.13	0.10	0.03
	0.13	0.05	0.03
RSN767	0.14	0.06	0.02
	0.10	0.01	0.01
RSN960	0.14	0.10	0.03
	0.13	0.02	0.01
RSN1111	0.14	0.10	0.03
	0.14	0.09	0.03
RSN1148	0.16	0.03	0.01
	0.16	0.03	0.01
RSN1158	0.18	0.03	0.02
	0.18	0.03	0.01
RSN1602	0.14	0.09	0.02
	0.18	0.04	0.01

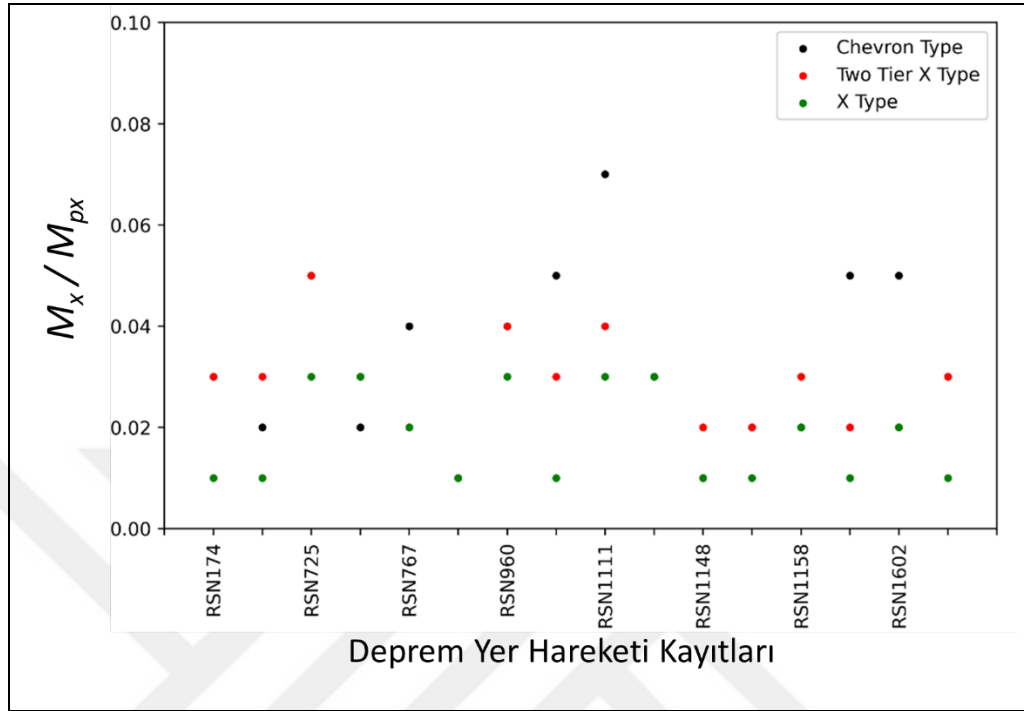
5.3.3.2. Düzlem Dışı Eğilme Momenti Talepleri

Tablo 5.4 -5.6’da gösterildiği gibi düzlem dışı moment talepleri plastik moment kapasiteleri ile normalize edilmiştir (M_x/M_{px}). Şekil 5.19 Japonya – Kobe depremi (RSN 1111) altında çerçeve kolonları düzlem dışı moment taleplerini göstermektedir. Kolon elemanlara etkiyen düzlem dışı momentler çapraz elemanların düzlem dışı burkulmasıyla tetiklenir.



Şekil 5.19: Japonya – Kobe depremi (RSN 1111) altında çerçeve kolonları düzlem dışı moment talepleri.

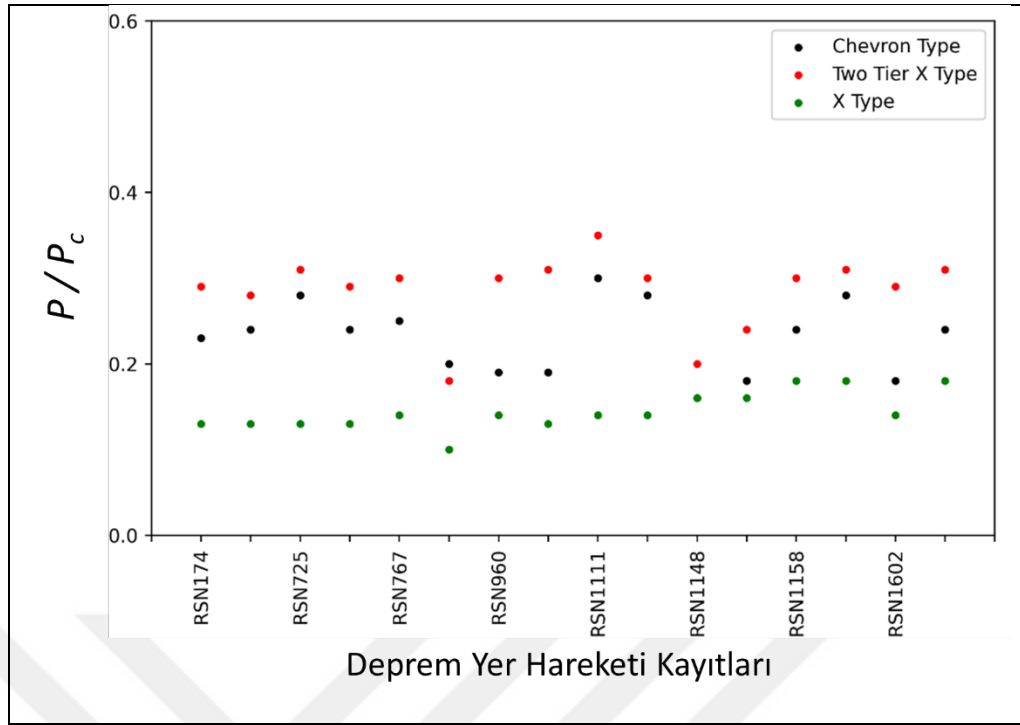
Şekil 5.20, 48 deprem yer hareketi altında talep edilen maksimum düzlem dışı eğilme momentlerinin özetini içerir.



Şekil 5.20: Çerçeve kolonları düzlem dışı eğilme momenti talepleri.

5.3.3.3. Eksenel Kuvvet Talepleri

48 deprem yer hareketi kaydı altında doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen maksimum eksenel kuvvet talepleri Şekil 5.21’de özetlenmiştir. Her üç çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarında da eksenel kuvvet talebi karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımının % 40’ını geçmemiştir. Tablo 5.4 -5.6’da görüldüğü üzere ters V, iki katta X ve X çapraz düzenine sahip çerçevelerde ortalama eksenel kuvvet talebi sırasıyla 0.23, 0.28 ve 0.14’dür. X çapraz düzenine sahip çerçeve ortalama değeri diğerlerine kıyasla düşük olması kolon kesitinin gereğinden büyük kullanılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.21: Çerçeve kolonları aksenal kuvvet talepleri.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Özet

Çelik çok katmanlı çapraz çerçeveler (ÇK-ÇÇ), geleneksel çaprazlı çerçevelerden farklı olarak yüksekliği fazla olan tek katlı yapılarda ve bitişik iki kat arasında konumlandırılmış çok katlı yapılarda iki veya daha fazla katmana sahip olacak şekilde oluşturulur. ÇK-ÇÇ'ler özellikle Kuzey Amerika'da uçak hangarları, alışveriş merkezleri, havaalanları ve birçok endüstriyel yapıda yatay yük taşıyıcı sistemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İlgili kata iki veya daha fazla katman yerleştirmenin en büyük avantajı, çapraz uzunluklarını ve boyutlarını düşürmesi, kolonlara her bir katman kirişi seviyesinde düzlem içi mesnet sağlaması ve birleşim boyutlarını düşürmesidir. Bu çapraz elemanlar deprem etkisi altında histeretik davranışları ile enerji sönümlemek için kullanıldığında yönetmeliğin narinlik oranı ve genişlik/kalınlık oranı gibi katı şartları iki veya daha fazla katman yerleştirilerek kısalan çapraz uzunlukları ile kolayca sağlanabilir. Ayrıca tasarım, kapasite tasarımı ilkelerine göre yapıldığında daha düşük çapraz boyutlarının kullanılması elastik kalması beklenen taşıyıcı sistem elemanları ve birleşimlerine daha düşük kuvvetlerin aktarılması da diğer bir avantajdır.

Bölüm 2.4'de detaylı olarak anlatılan ÇK-ÇÇ'ler için yapılan geçmiş çalışmalar kolon tasarımda ek bir durumun dikkate alınmasını gerektirmiştir. Kolonun düzlem içi moment dikkate alınmadan tasarlandığı durumda, çerçeve stabilitesinin bozulabileceği ve katmanlar arası yerdeğiştirmelerin üniform bir şekilde dağılmadığı ortaya çıkmıştır. Katman ötelemelerinin tek bir katmanda yoğunlaşma eğiliminde olması çapraz elemanların erken kırılma riskinin yüksek olduğu endişesini arttırmıştır. Bu nedenle kolon düzlem içi momentleri dikkate alan ek bir analiz durumu 2016 Amerikan yönetmeliklerinde [AISC 341, 2016] yerini almıştır. Bu analiz durumu katmanlar arasındaki maksimum katman kesme kuvveti farkından kaynaklanan düzlem içi momenti dikkate alır. Katman öteleme sınır değerlerinin karşılanması kolonun düzlem içi eğilme rijitliğine bağlıdır. Katman öteleme talebi çerçeve taban kesme kuvveti altındaki yerdeğiştirmesi ile katman kesme kuvveti farkından kaynaklanan yerdeğiştirmenin süperpoze edilmesi ile elde edilebilir.

2016 Amerikan yönetmeliklerine [AISC 341, 2016] uygun olarak üç çapraz düzenine sahip prototip çerçeve tasarlanmıştır. ÇK-ÇÇ'lerin tasarım kriterleri için bir çok çalışma ve öneri bulunmasına rağmen bu çerçevelerin taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan iç kuvvet talepleri karakterize edilememiştir. Ayrıca bu çerçeveler için deneysel test verileri mevcut değildir. Bu yüzden tasarlanan prototip çerçeveler üzerinde çerçeve genel davranışını ve taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan iç kuvvet taleplerini incelemek, değerlendirmek ve iyileştirmek için ABAQUS [Hibbit et al., 2012] programında doğrusal olmayan statik itme analizi ve 48 deprem yer hareketi kaydı altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında elde edilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz verileri gelecekte ÇK-ÇÇ'ler için yapılacak olan araştırmalar için veritabanı oluşturur.

6.2. Sonuçlar

Bu çalışmada, çapraz düzeninin sismik davranış üzerindeki etkisini incelemek, değerlendirmek ve önerilerde bulunmak için ters V, iki katta X ve X çapraz düzenine sahip üç adet prototip ÇK-ÇÇ tasarlanmıştır. ÇK-ÇÇ'lerin taşıyıcı sistem elemanlarının (kolon, kiriş, çapraz) davranışlarını incelemek için malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmama durumunu dikkate alarak gerçekçi modeller oluşturma imkanı sağlayan bir sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS [Hibbit et al., 2012] kullanılmıştır. Elastik ötesi davranış gösteren taşıyıcı sistem elemanları mevcut deneysel test sonuçları kullanılarak validasyonu yapıldı ve çerçeveler doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlere tabi tutuldu.

Mevcut incelemeye konu olan ÇK-ÇÇ'ler için elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Her üç çapraz düzenine sahip çerçeve üzerinde gerçekleştirilen statik analizlerde her iki katmanda çapraz elemanlarda akma gerçekleşirken, dinamik analizlerde deprem yer hareketi kayıtlarının bazılarında akma seviyesine ulaşmış bazılarında ise elastik kalmıştır.

- Her üç çapraz düzenine sahip çerçeve için maksimum kat ötelemesi % 1 seviyesinin altında kaldı. Çerçeve yerdeğiştirmeleri deprem yer hareketi etkisi altında çerçeve yüksekliği boyunca üniform bir dağılım gösterdi.
- Katman 1 ve 2 öteleme talepleri her üç çapraz düzenine sahip çerçeve için maksimum %1.17 seviyesine ulaşmıştır. Çapraz eleman kırılma davranışı sonlu eleman modeline dahil edilmemiş olsa da katman maksimum öteleme talepleri çapraz elemanlarda düşük tekrarlı yorulma görölmeyeceğini gösterdi.
- Katmanlar arası yerdeğiştirme farkı katman çapraz elemanlarında farklı iç kuvvet taleplerine neden olduğundan kolon düzlem içi momentlerine neden oldu.
- Kolon düzlem içi dayanım ve rijitliği katmanlar arası yerdeğiştirme farkını minimize etmek ve çapraz elemanlarda akma gerçekteşmesini tetiklemek için yeterli olmuştur.
- Dinamik analizler sonucunda düzlem içi eğilme momenti maksimum %50 seviyelerine çıkmıştır. X çapraz düzenine sahip çerçeve kolonlarında, ters V ve iki katta X çapraz düzenine sahip çerçevelere kıyasla daha düşük düzlem içi eğilme momenti talebi gözlemlenmiştir.
- Her üç çapraz düzenine sahip çerçeve için maksimum kat ötelemesi % 1 seviyesinin altında kaldı. Çerçeve yerdeğiştirmeleri deprem yer hareketi etkisi altında çerçeve yüksekliği boyunca üniform bir dağılım gösterdi.
- Doğrusal olmayan statik itme analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları çerçeve genel davranışı ve taşıyıcı sistem elemanları iç kuvvet talepleri bakımından karşılaştırıldığında uyum içinde olduğu söylenebilir.
- Kolon ve çerçevelerde stabilite kaynaklı problem gözlemlenmedi.

6.3. İleride Yapılacak Olan Çalışmalar İçin Öneriler

Çalışmamız iki katmanlı üç farklı çapraz düzenine sahip çerçeve ile sınırlandırılmıştır. Çerçevelerin ve taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan tepkilerini simüle eden detaylı sonlu eleman modelleri ile çerçeve genel davranışı ve taşıyıcı sistem elemanlarının iç kuvvet taleplerinin anlaşılmasına katkı sunulmuştur. Elde edilen veriler, ÇK-ÇÇ'lerin limit durumlarının belirlenmesi ve tasarım yönteminde iyileştirmeler yapılabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulacağını göstermiştir. İleride yapılacak olan çalışmalar için öneriler aşağıda listelenmiştir.

- Statik ve dinamik analizlerden elde edilen çerçeve ve taşıyıcı sistem elemanlarının genel davranışını ve önerilen tasarım yöntemlerini doğrulamak ve değerlendirmek için iki katmanlı yüksek sünek çaprazlı çerçevenin tam ölçekli deneysel test verilerine ihtiyaç vardır.
- Tek açıklıklı ÇK-ÇÇ'lerin yanı sıra iki veya daha fazla açıklıklı çerçeveler incelenmelidir.
- Kolon ve kiriş elemanlarda geniş başlıklı profillerin yanı sıra kutu kesitli profillere sahip çaprazlı çerçeveler ile , çapraz elemanları I ve T kesitli olan çerçeveler incelenmelidir.
- Kat sayısı, çerçeve yüksekliği, katman sayısı, katman yükseklikleri oranı gibi parametrelerin çerçeve davranışına etkisinin anlaşılabilmesi için parametrik çalışmalara ihtiyaç vardır.
- Yüksek sismik bölgelerde yer almayan ÇK-ÇÇ'ler için benzer araştırma çalışmasının yapılması gerekmektedir.
- Bu çalışmada dikkate alınmayan fakat endüstriyel binaların çoğunda bulunan kren kirişi yüklerinin ÇK-ÇÇ'lerin davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi gerekmektedir.
- Güncel tasarım yöntemlerinin uygulanmadığı mevcut ÇK-ÇÇ'lerin sismik performansları araştırılmalı ve gerekirse güçlendirme çözümleri için çalışmalar yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Abaqus. 2012, Dassault Systèmes, Waltham, MA.

AISC, (2016b), ANSI/AISC 360-16, Specifications for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

AISC, (2016), ANSI/AISC 341-16, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

ASCE, (2016), SEI/ASCE 7-16, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers.

Astaneh-Asl A., Goel S.C., (1984), “Cyclic in-plane buckling of double angle bracing.”, Journal of Structural Engineering, 110(9): 2036–2055.

Astaneh-Asl A., Goel S.C., Hanson R.D., (1985), Cyclic out-of-plane buckling of double-angle bracing. Journal of structural Engineering, 111(5): 1135–1153.

ASTM, (2015a), ASTM A500/A500M Standard Specification For Cold-Formed Welded And Seamless Carbon Steel Structural Tubing In Rounds And Shapes. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM, (2015b), A992/A992M-11 Standard Specification for Structural Steel Shapes. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Black R. Gary, W. A. Wenger, E. P. Popov., (1980), “Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversals.”, Berkeley, Calif: Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Bruneau, M., Uang C.-M., Sabelli R., (2011), Ductile design of steel structures, 2nd Ed., McGraw-Hill Professional, New York, 928.

Cano P.A., Imanpour A., (2018), “Evaluation of seismic design methods for steel multi-tiered special concentrically braced frames.”, Proc. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2018 (April 10-13, 2018). Baltimore, MD.

Chopra A.K., (2017), Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 5th Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2017.

Davaran A., (2001), “Effective length factor for discontinuous X-bracing systems.”, J. Eng. Mech., 10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:2(106), 106–112.

Davaran A., Gélinas A., Tremblay R., (2014), “Inelastic buckling analysis of steel X-bracing with bolted single shear lap connections.”, J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001141, 04014204.

Dlubal Software Gmbh, (2001), Tiefenbach, Germany.

Fell B. V., Kanvinde A. M., Deierlein G.G., Myers A.T., (2009), "Experimental Investigation of Inelastic Cyclic Buckling and Fracture of Steel Braces.", J. Struct. Eng., ASCE, 135(1), 19-32.

Goel S.C., El-Tayem A.A. (1986), "Cyclic load behavior of angle X-bracing.", Journal of Structural Engineering, 112(11): 2528–2539. American Society of Civil Engineers.

Gugerli H. (1982), "Inelastic cyclic behavior of steel bracing members.", PhD thesis, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich.

Haddad M., Brown T., Shrive N., (2011), "Experimental cyclic loading of concentric HSS braces.", Canadian Journal of Civil Engineering, 38(1), 110-123.

Hsiao P.-C., Lehman D. E., Roeder C. W., (2013), "A model to simulate special concentrically braced frames beyond brace fracture.", Earthquake Eng. Struct. Dyn., 42(2), 183–200.

Imanpour A., Tremblay R., (2012), "Analytical Assessment of Stability of Unbraced Column in Two Panel Concentrically Braced Frames.", 3rd International Structural Specialty Conference, Edmonton, Alberta, Canada, Paper No. 1218.

Imanpour A., Tremblay R., (2014), "Seismic design of steel multitiered braced frames: Application of incremental static analysis for design of steel multi tiered braced frames.", Proc., Int. European Conf. On Steel and Composite Structures, Eurosteel 2014, Dept. of Structures for Engineering and Architecture, Univ. of Naples Federico II, Naples, Italy.

Imanpour A., Tremblay R., (2014a), "Seismic performance evaluation and design of multi-tiered steel concentrically braced frames.", In 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 10NCEE. Anchorage, AK, 21–25 July. Paper No. 1347.

Imanpour A., Stoakes C., Tremblay R., Fahnestock L., Davaran A., (2013), "Seismic Stability Response of Columns in Multi-Tiered Braced Steel Frames for Industrial Applications.", ASCE Structures Congress, Pittsburgh, PA, 2-4 May, 2650 2661.

Imanpour A., Tremblay R., Davaran A., (2012), "Seismic Evaluation of Multi Panel Steel Concentrically Braced Frames.", Proc. 15WCEE, Lisbon, Portugal, 24-28 September, Paper No.2996.

Imanpour A., Tremblay R., Davaran A., (2014), "A new seismic design method for steel multi-tiered braced frames.", Structures Congress 2014, G. Bell and M. Card, eds., ASCE, Reston, VA, 2707–2720.

Imanpour A., Tremblay R., Davaran A., (2012), "Seismic performance of steel concentrically braced frames with bracing members intersecting columns between floors.", Proc. 7th STESSA 2012, Santiago.

Imanpour A., Tremblay R., Davaran A., Stoakes C., Fahnestock L., (2016a), "Seismic performance assessment of multi-tiered steel concentrically braced frames designed in accordance with 2010 AISC seismic provisions.", J. Struct. Eng.

Imanpour A., Tremblay R., Fahnestock L., Stoakes C., (2016b), "Analysis and design of two-tiered steel braced frames under in-plane seismic demand.", J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001568, 04016115.

Kazemzadeh Azad S., Topkaya C., Bybordi M., (2018), "Dynamic buckling of braces in concentrically braced frames.", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 47(3): 613–633. Wiley Online Library.

Newmark N. M., Hall W. J., (1982), "Earthquake spectra and design.", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA.

Okazaki T., Lignos D., Hikino T., Kajiwar K., (2013), "Dynamic response of a chevron concentrically braced frame.", J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000679, 515–525.

Palmer K. D., Roeder C. W., Lehman D. E., Okazaki T., Shield C. K., Powell J. (2012), "Concentric X-braced frames with HSS bracing.", Int. J. Steel Struct., 12(3), 443–459.

Popov E.P., Mahin S.A., Zayas V.A., (1979), "Cyclic inelastic buckling of thin tubular columns.", Journal of the Structural Division, 105(11): 2261–2277. ASCE.

Roeder C. W., (2011), "Influence of Gusset plate connection and braces on the seismic performance of X-braced frames.", Earthquake Eng. Struct. Dyn., 40(4), 355–374.

Roeder C.W., Lehman D.E., Clark K., Powell J., Yoo J., Tsai K., Lin C., Wei C., (2011a), "Influence of gusset plate connections and braces on the seismic performance of X-braced frames.", Earthquake engineering & structural dynamics, 40(4): 355–374. Wiley Online Library.

Roeder C.W., Lehman D.E., Clark K., Powell J., Yoo J-H., Tsai K-C., Lin C-H., Wei C-Y., (2011), "Influence of Gusset Plate Connection and Braces on the Seismic Performance of X braced Frames.", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40(4), 355-374.

Roeder C.W., Lumpkin E.J., Lehman D.E., (2011b), "A balanced design procedure for special concentrically braced frame connections." Journal of Constructional Steel Research, 67(11): 1760–1772. Elsevier.

Sabelli R., and Hobbach D., (1999), "Design of cross-braced frames for predictable buckling behavior.", J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:2(163), 163-168.

Stoakes C. D., Fahnestock L.A., (2012), "Cyclic flexural analysis and behavior of beam-column connections with gusset plates.", J. Const. St. Res., 72, 227–239.

Stoakes C. D., Fahnestock L.A., (2015), "Strong-axis stability of wide flange steel columns in the presence of weak-axis flexure.", J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001448, 04016004.

Stoakes C., Fahnestock L., (2012), "Influence of weak-axis flexural yielding on strong-axis buckling strength of wide flange columns.", Proc., Annual Stability Conf., Structural Stability Research Council, Grapevine, TX.

Stoakes C., Fahnestock L. (2016)., "Strong-axis stability of wide flange steel columns in the presence of weak-axis flexure.", J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001448, 04016004.

Stoakes C.D., Fahnestock L.A., (2012a), "Cyclic flexural analysis and behavior of beam-column connections with gusset plates.", J. Const. St. Res., 72(2012), 227-239.

Stoakes C.D., Fahnestock L.A. (2012b), "Influence of weak-axis flexural yielding on strong-axis buckling strength of wide flange columns.", Proceedings, Annual Stability Conference, SSRC, Grapevine, Texas, April 17-20.

Tremblay R., (2002), "Inelastic seismic response of steel bracing Members.", J. Constr. Steel Res., (58), 665-701.

Tremblay R., (2002), "Inelastic seismic response of steel bracing members.", J. Constr. Steel Res., 58(5–8), 665–701.

Tremblay R., Archambault M. H., Filiatrault A., (2003), "Seismic performance of concentrically braced steel frames made with rectangular hollow bracing members.", J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9445 (2003)129:12(1626), 1626–1636.

Tremblay R., Haddad M., Martinez G., Richard J., Moffatt K., (2008), "Inelastic cyclic testing of large size steel bracing members.", Proc., 14th World Conf. On Earthquake Engineering, Beijing.

Uriz P., Mahin S., (2008), "Toward earthquake-resistant design of concentrically braced steel-frame structures.", Rep. No. PEER 2008/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA.

Uriz P., Mahin S.A., (2004), "Seismic vulnerability assessment of concentrically braced steel frames.", International Journal of Steel Structures, 4(4): 239–248.

Uriz P., Filippou F.C., Mahin S.A., (2008), "Model for Cyclic Inelastic Buckling of Steel Braces.", J. Struct. Eng., ASCE, 134(4): 619-628.

Ziemian R. D. (Ed.), (2010), "Guide to stability design criteria for metal structures.", John Wiley & Sons.

ÖZGEÇMİŞ

Alpay COŞKUN, 2014 yılında başladığı Beykent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2019 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Deprem ve Yapı Mühendisliği programına başladı.



EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

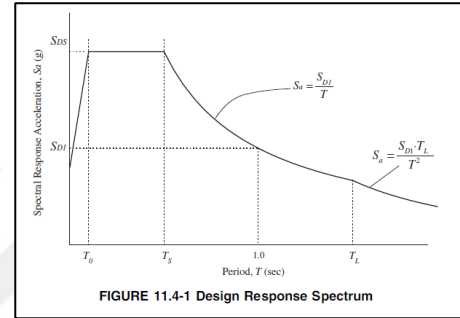
Coşkun A., Şeker O., Akbaş B., (2022), “Tipik Ters V Tipi İki Katmanlı Çelik Çaprazlı Bir Çerçevenin Değerlendirilmesi”, 4. Uluslararası Afet & Dirençlilik Kongresi, Eskişehir, Türkiye, 21 Ekim.



Ek B : Çelik Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçevelerin Tasarım Adımları

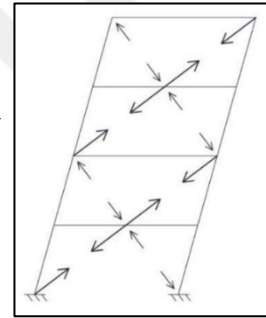
AISC 341, Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeve'ler için önemli sünük detaylandırmalar içerir. Mevcut tasarım yöntemi, ASCE 7'de tanımlanan tasarım spektrumundan elde edilen azaltılmış deprem yükleri etkisinde, sünük davranış göstermesi beklenen çapraz elemanların kesitlerini belirlemek için AISC 360'da belirtilen Yük ve Dayanım Katsayıları ile tasarım yöntemini kullanır.

1-ASCE 7'de tanımlanan tasarım spektrumu kullanılarak azaltılmış yatay deprem kuvvetleri belirlenir.



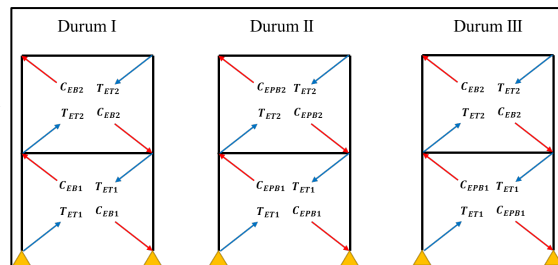
Şekil B1.1: Tasarım spektrumu.

2-Elde edilen taban kesme kuvveti çaprazlı çerçevelere dağıtılır ve bu kuvvet altında çapraz eleman kesitleri seçilir.

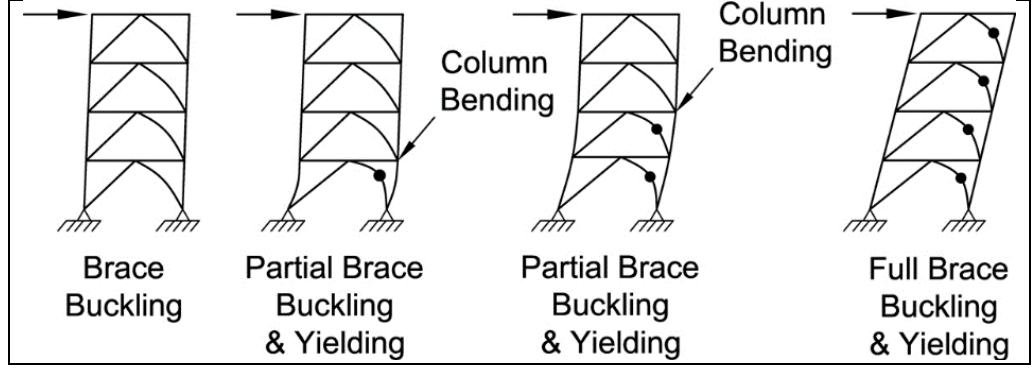


Şekil B1.2: Mekanizma durumu.

3-Çapraz eleman kesitleri belirlendikten sonra diğer taşıyıcı sistem elemanları için, AISC 341 Bölüm F2'de Çok Katmanlı Çaprazlı Çerçeveler için belirtilen en elverişsiz yükleme durumları belirlenir.



Şekil B1.3: Çapraz eksenel kuvvet senaryoları.



Şekil B1.6: Çelik çok katmanlı çaprazlı çerçevelerde (ÇK-ÇÇ) çapraz akma ve burkulma aşamaları (AISC 341, 2016).

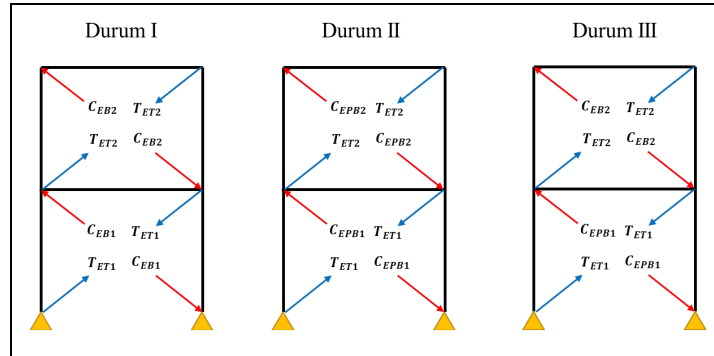
Çapraz beklenen çekme dayanımı, T_{ET} , beklenen burkulma dayanımı, C_{EB} , and beklenen burkulma sonrası dayanımı C_{EPB} ,

$$T_{ET} = R_y F_y A_g \quad (B1.1)$$

$$C_{EB} = \{R_y F_y A_g; F_{cre} A_g / 0.877\}_{\min} \quad (B1.2)$$

$$C_{EPB} = 0.3 C_{EB} \quad (B1.3)$$

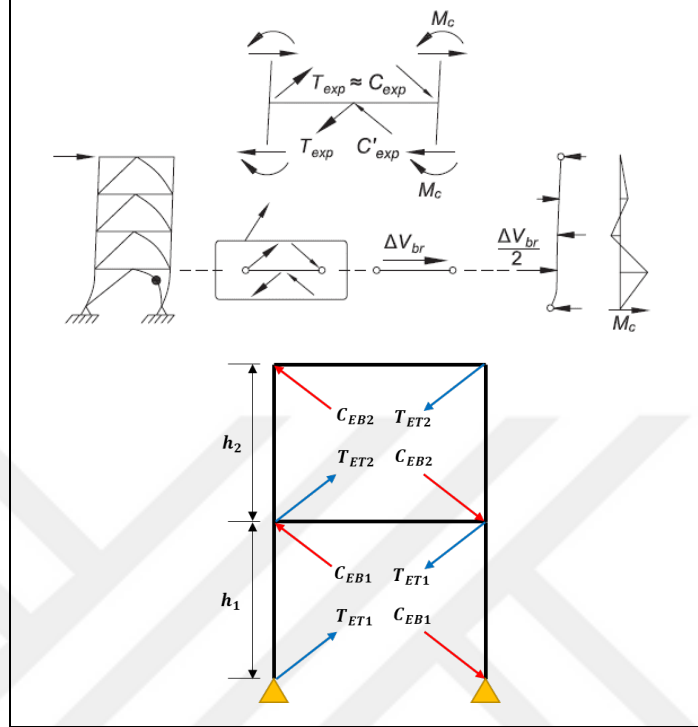
“Kapasiteyle sınırlı yatay deprem yükleri”



Şekil B1.7: Çapraz eksenel kuvvet senaryoları.

Geleneksel çok katlı çaprazlı çerçevelerin tasarımında ilk deformasyon modu göz önünde bulundurulur ve tasarım kat ötelemelerinden kaynaklanan eğilme kuvvetlerinin ihmal edilmesine izin verilir ve kolonlar eksenel yük etkisi altında

boyutlandırılır. Çelik çok katmanlı çaprazlı çerçevelerde ise eğilme modları da dikkate alınır ve bileşik etkiler altında boyutlandırılır.



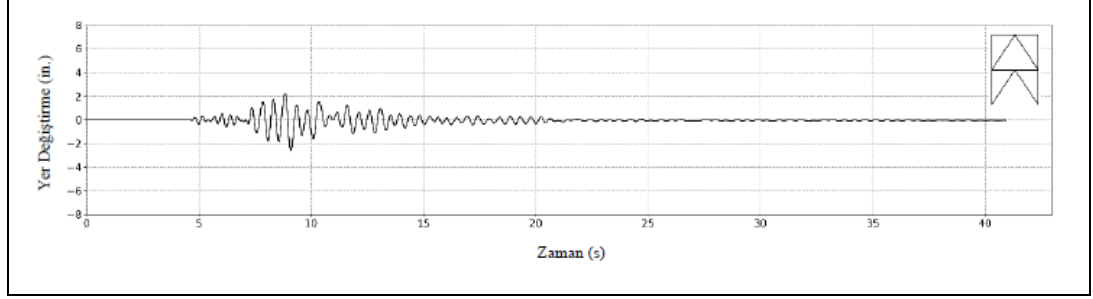
Şekil B1.8: ÇK-ÇÇ ek analiz durumu.

$$\Delta V_{br} = (T_{ET} + C_{EB})_2 \cos \theta_2 - (T_{ET} + C_{EB})_1 \cos \theta_1 \quad (B1.4)$$

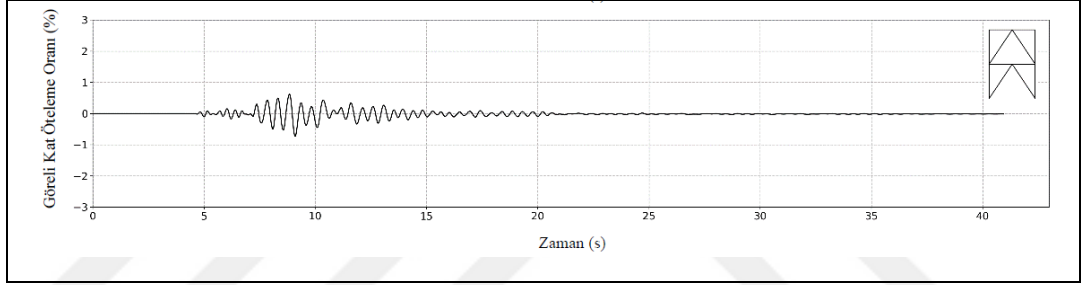
$$M_{ry} = \frac{\Delta V_{br}}{2} \frac{h_1 h_2}{h} \quad (B1.5)$$

Analiz durumu 3 kolonlara etkiyen düzlem içi momentlerin maksimum olduğu durumdur. Kolon düzlem içi momentler hesaplanırken katmanlar arası yatay kuvvet farkının maksimum olması gerekir. Katman yatay kesme kuvveti dayanımı, çekme ve basınca çalışan çapraz eleman dayanımlarının yatay bileşenlerinin toplamından elde edilir. Kolondaki maksimum düzlem içi eğilme momenti talebi ise yukarıda belirtilen ikinci denklem kullanılarak hesaplanır. Bu denklem katman yüksekliklerinin farkına ve katman yatay kesme kuvveti farkına bağlıdır. Katman kesme kuvveti dayanımları farkı ise AISC 341, 2016'da Bölüm F de belirtilen F2-1 denklemi kullanılarak hesaplanır .

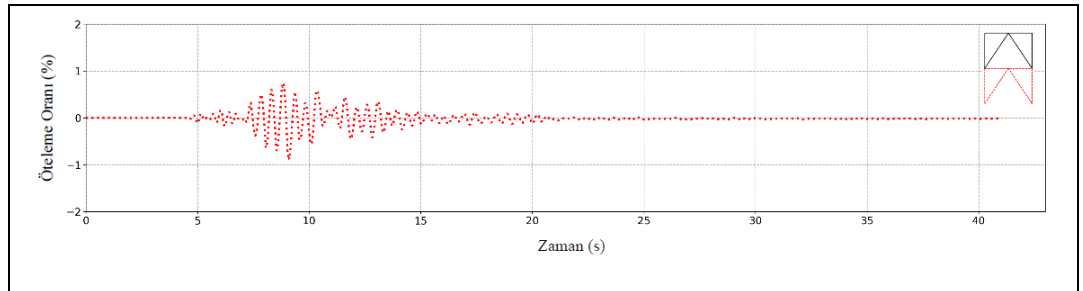
Ek C: Ters V Çapraz Düzenine Sahip İki Katmanlı Çaprazlı Çerçevenin RSN1111 FP Deprem Yer Hareketi Etkisinde Tepkileri



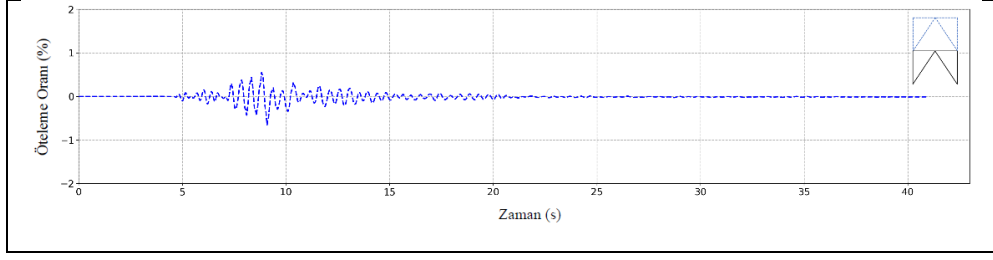
Şekil C1.1: Çatı yer değiştirme - zaman grafiği.



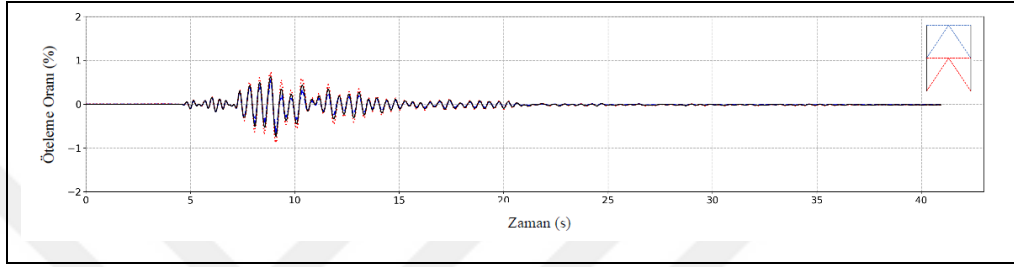
Şekil C1.2: Görelî kat öteleme oranı - zaman grafiği.



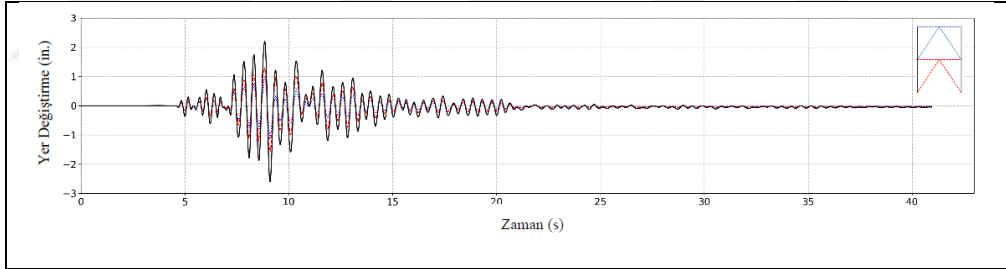
Şekil C1.3: Katman 1 öteleme oranı - zaman grafiği.



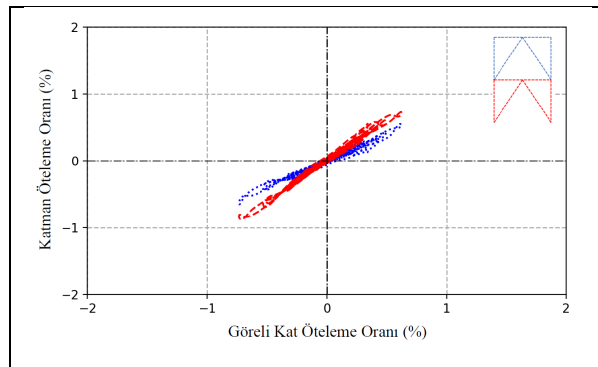
Şekil C1.4: Katman 2 öteleme oranı - zaman grafiği.



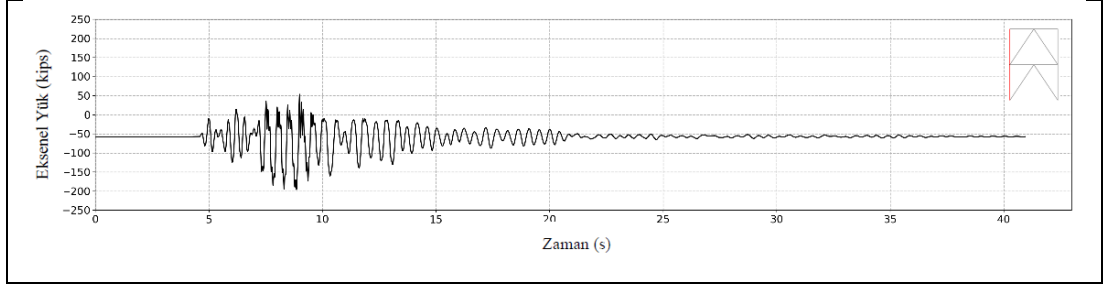
Şekil C1.5: Öteleme oranları karşılaştırma grafiği.



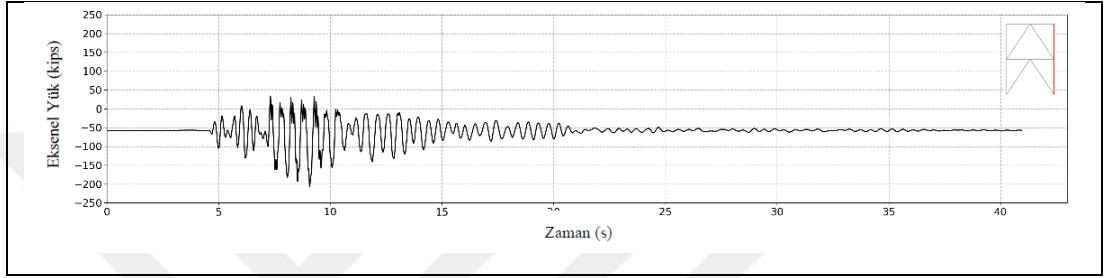
Şekil C1.6: Yer değiştirme karşılaştırma grafiği.



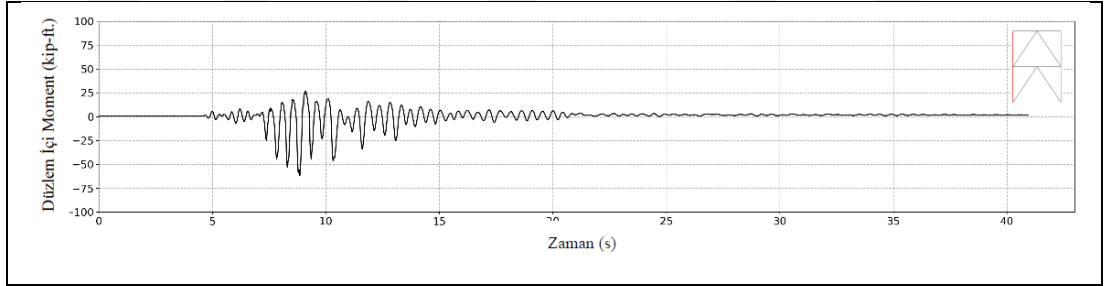
Şekil C1.7: Görelî kat ve katman öteleme karşılaştırma grafiği.



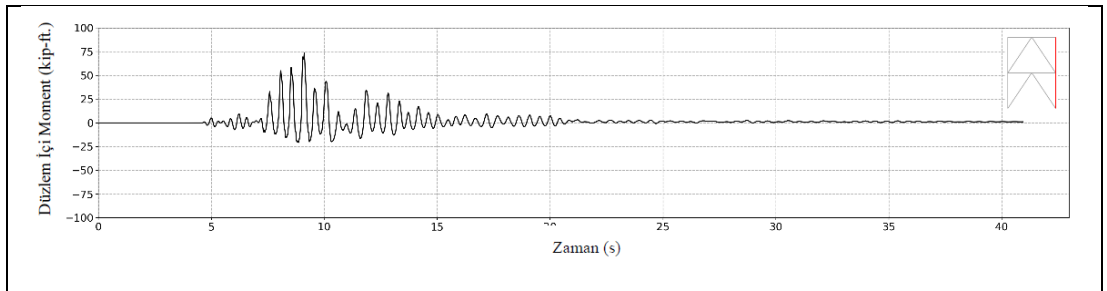
Şekil C1.8: Sol kolon eksenel yük – zaman grafiği.



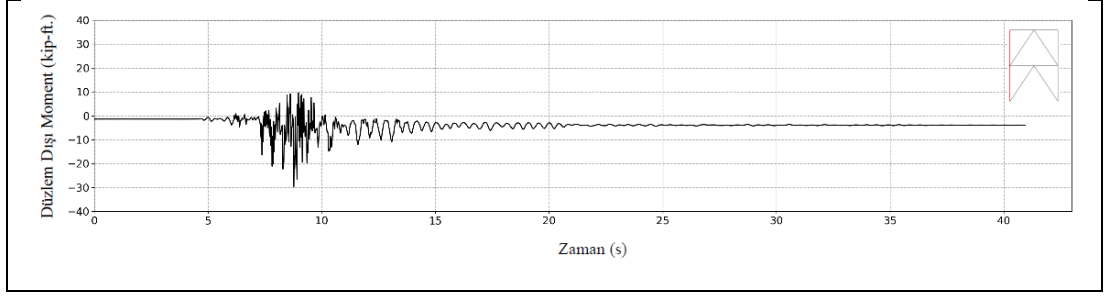
Şekil C1.9: Sağ kolon eksenel yük – zaman grafiği.



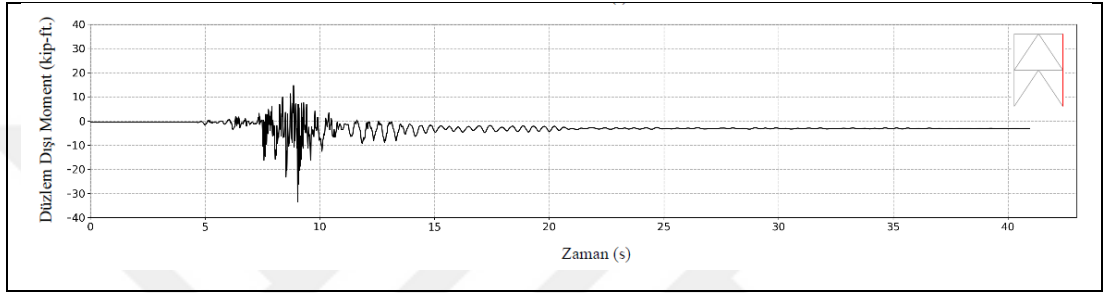
Şekil C1.10: Sol kolon düzlem içi eğilme momenti – zaman grafiği.



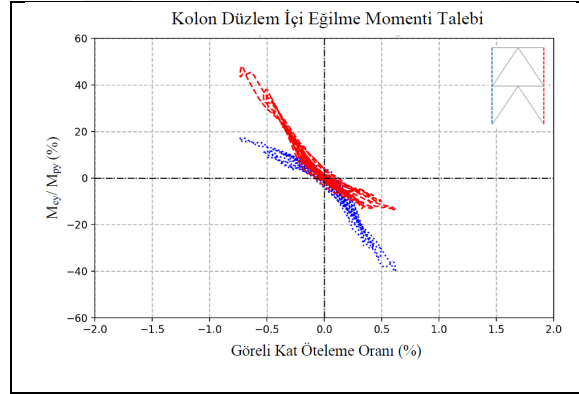
Şekil C1.11: Sağ kolon düzlem içi eğilme momenti – zaman grafiği.



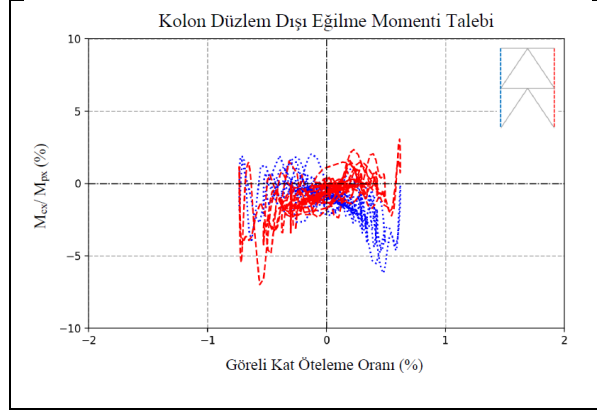
Şekil C1.12: Sol kolon düzlem dışı eğilme momenti – zaman grafiği.



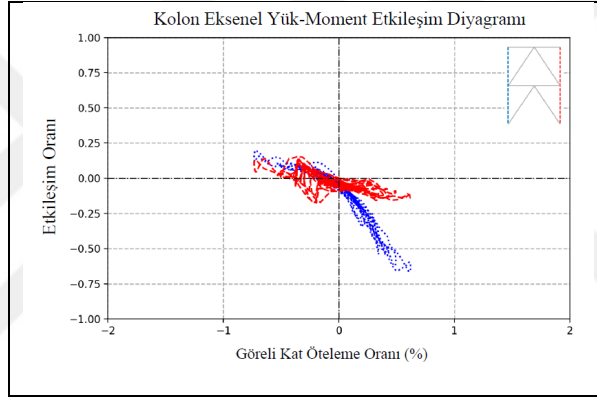
Şekil C1.13: Sağ kolon düzlem dışı eğilme momenti – zaman grafiği.



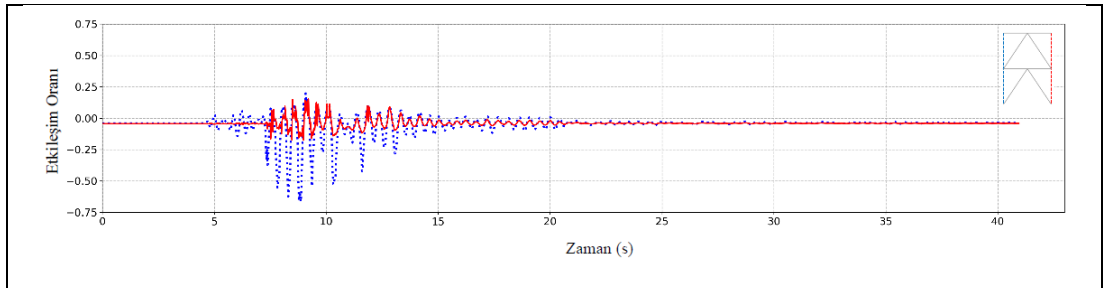
Şekil C1.14: Kolon düzlem içi eğilme momenti – görel kat öteleme oranı karşılaştırma grafiği.



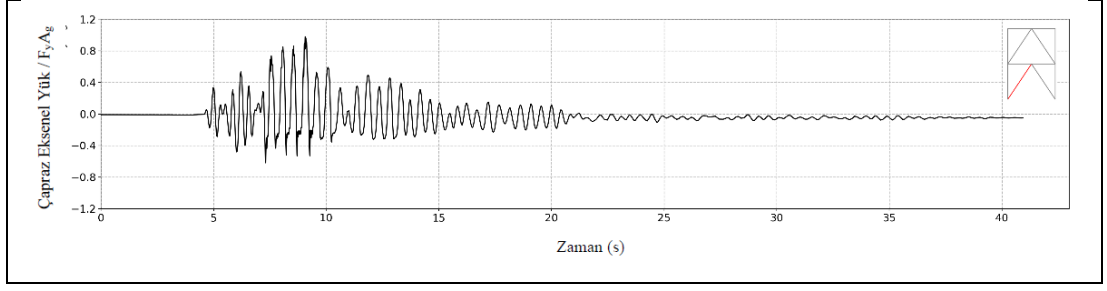
Şekil C1.15: Kolon düzlem dışı eğilme momenti – görel kat öteleme oranı karşılaştırma grafiği.



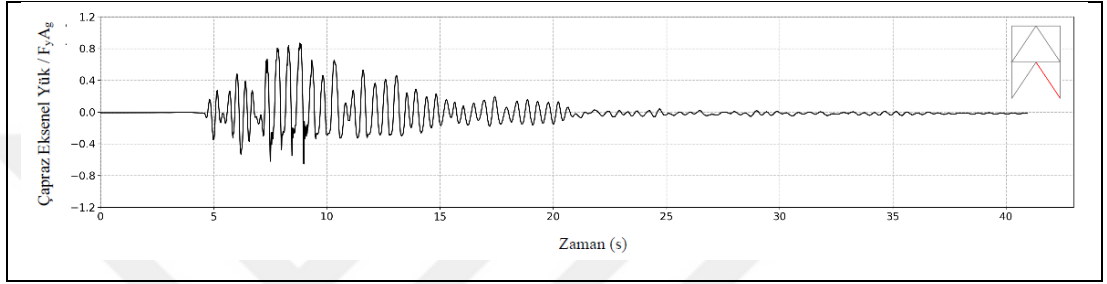
Şekil C1.16: Kolon eksenel yük – Moment etkileşim grafiği.



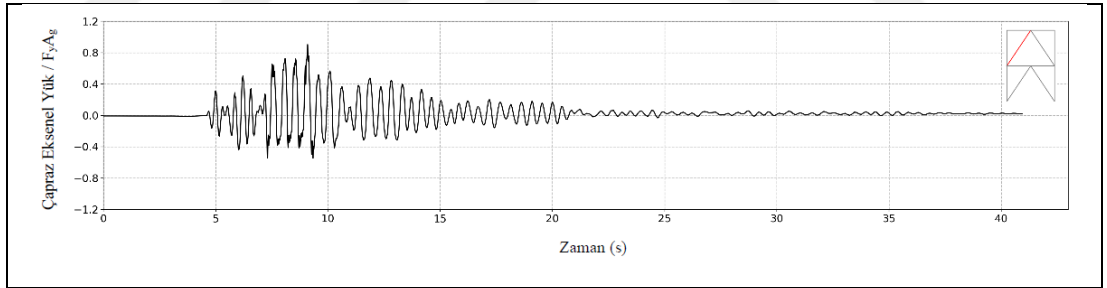
Şekil C1.17: Etkileşim oranı - zaman grafiği.



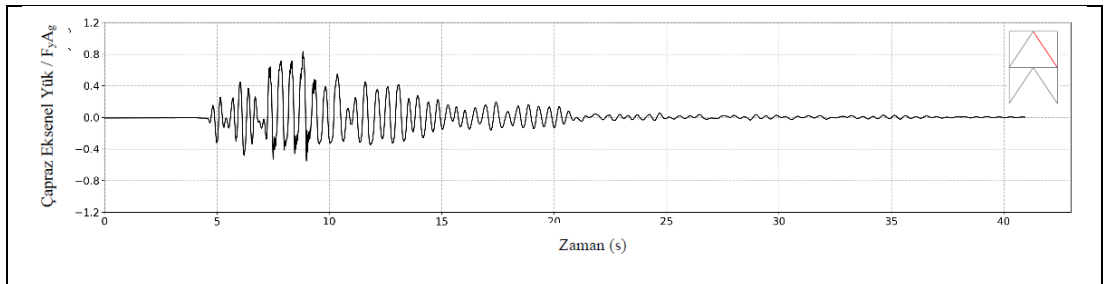
Şekil C1.18: Katman 1-1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



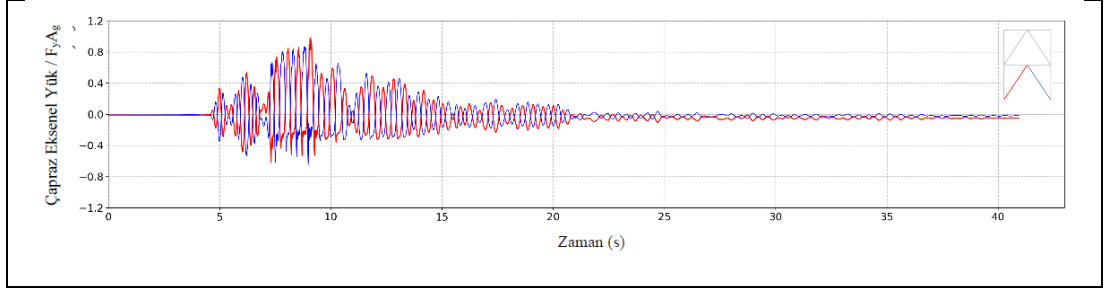
Şekil C1.19: Katman 1-2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



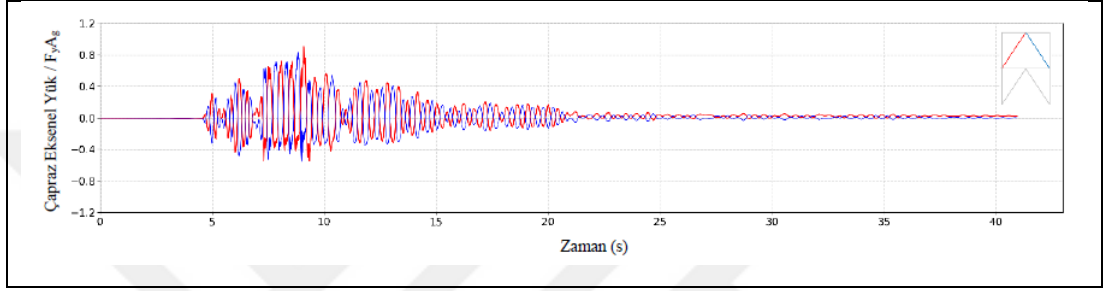
Şekil C1.20: Katman 2-1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



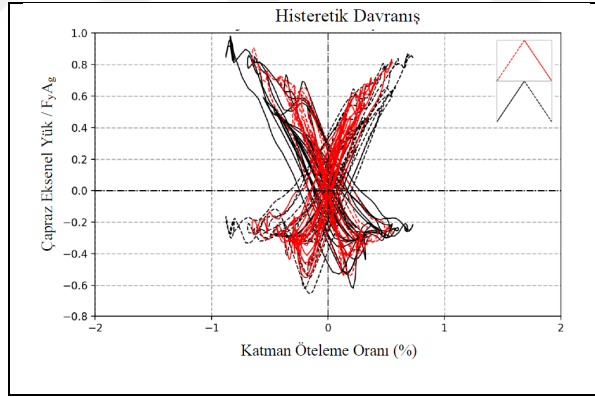
Şekil C1.21: Katman 2-2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



Şekil C1.22: Katman 1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.

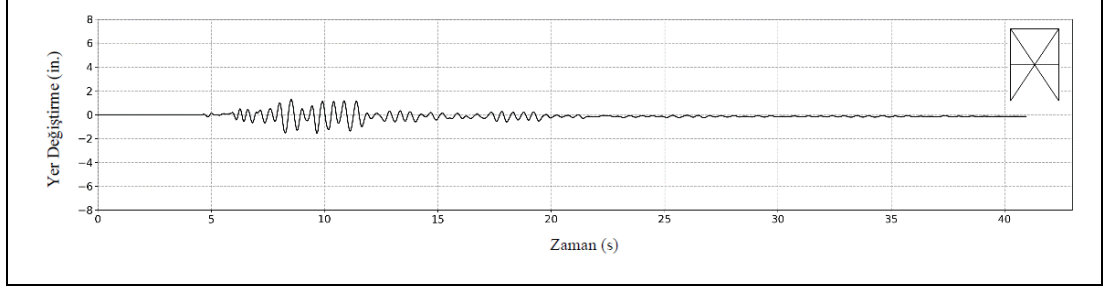


Şekil C1.23: Katman 2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.

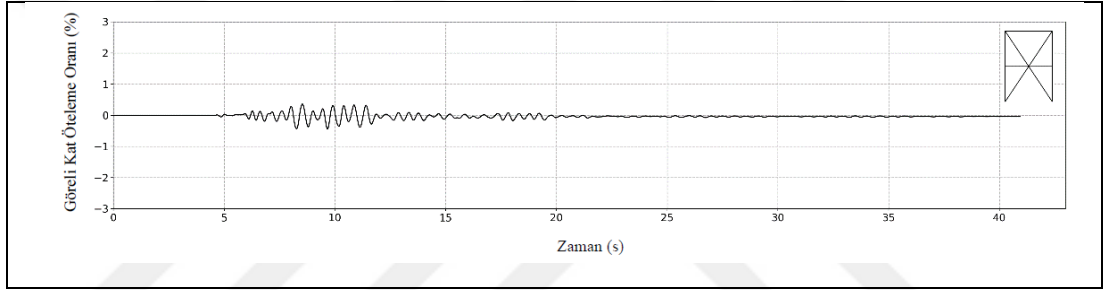


Şekil C1.24: Çapraz eleman eksenel yük – görel kat öteleme oranı grafiği.

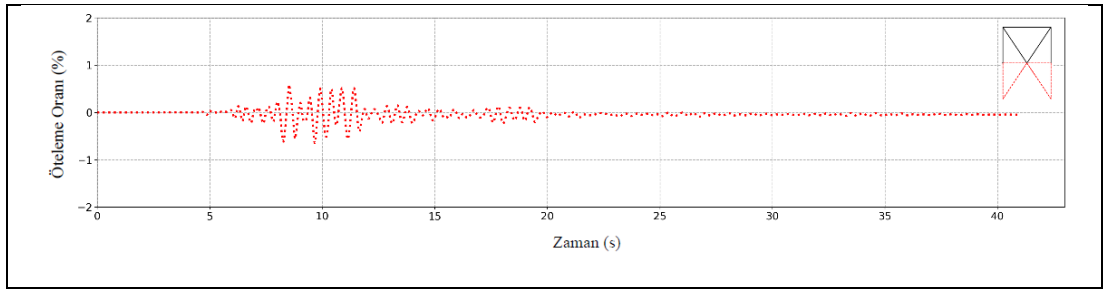
Ek Ç: İki Katta X Çapraz Düzenine Sahip İki Katmanlı Çaprazlı Çerçevenin RSN1111 FP Deprem Yer Hareketi Etkisinde Tepkileri



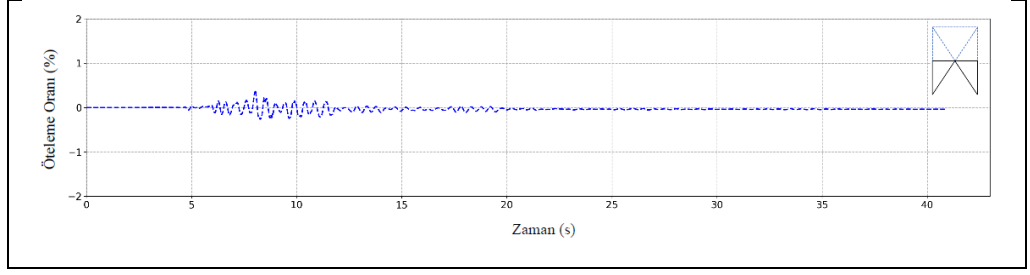
Şekil Ç1.1: Çatı yer değiştirme - zaman grafiği.



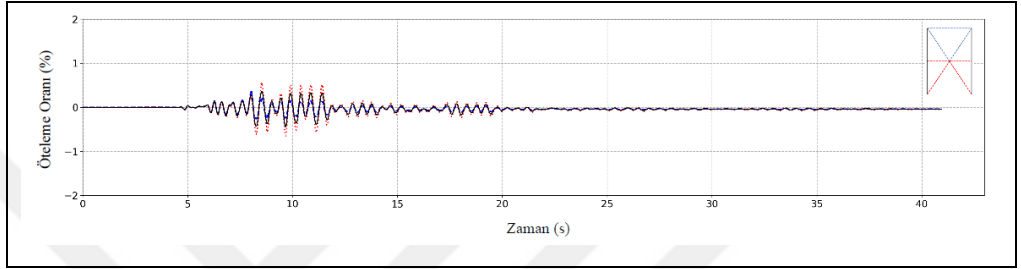
Şekil Ç1.2: Göreli kat öteleme oranı - zaman grafiği.



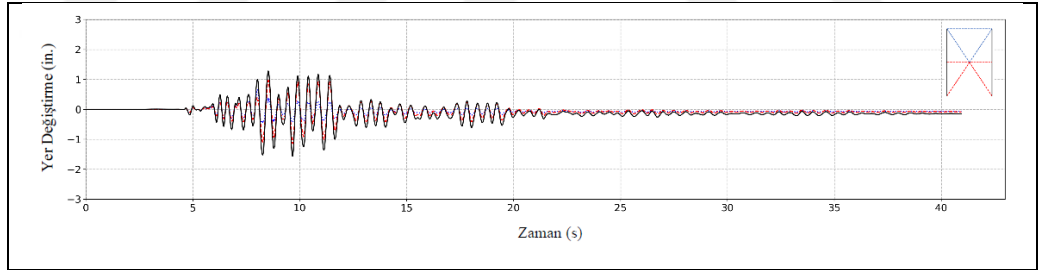
Şekil Ç1.3: Katman 1 öteleme oranı - zaman grafiği.



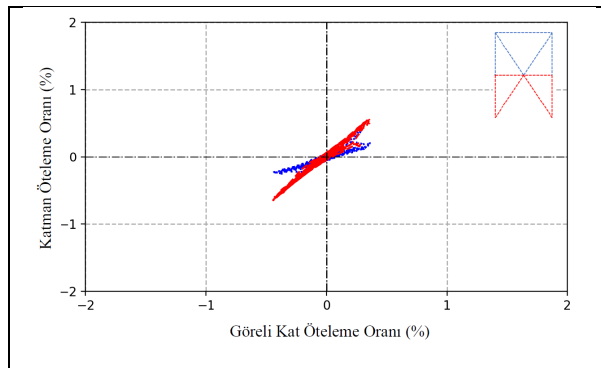
Şekil Ç1.4: Katman 2 öteleme oranı - zaman grafiği.



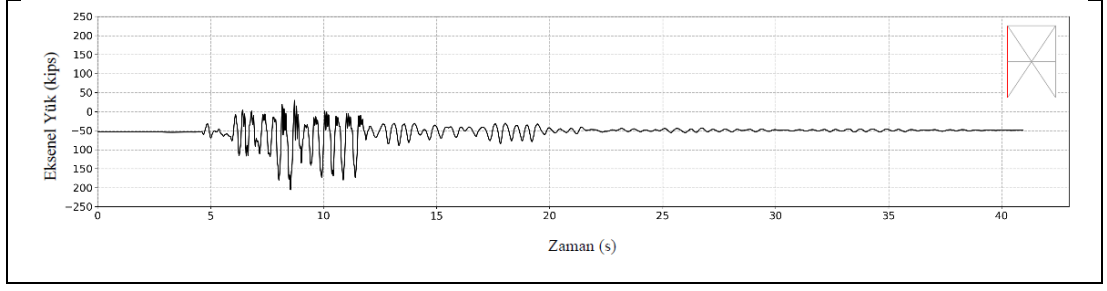
Şekil Ç1.5: Öteleme oranları karşılaştırma grafiği.



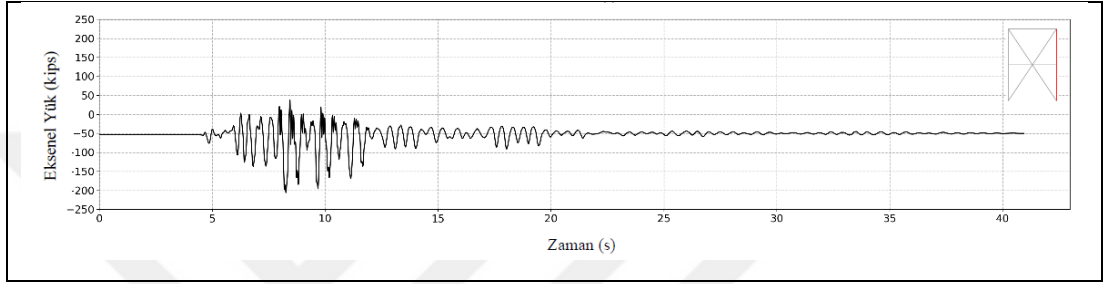
Şekil Ç1.6: Yer değiştirme karşılaştırma grafiği.



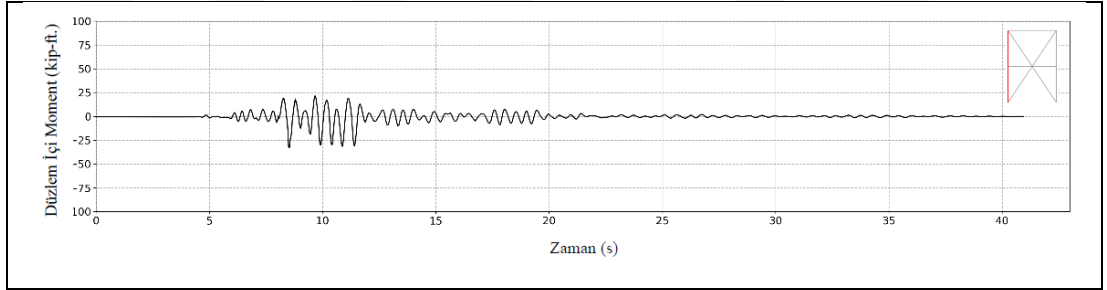
Şekil Ç1.7: Görelî kat ve katman öteleme karşılaştırma grafiği.



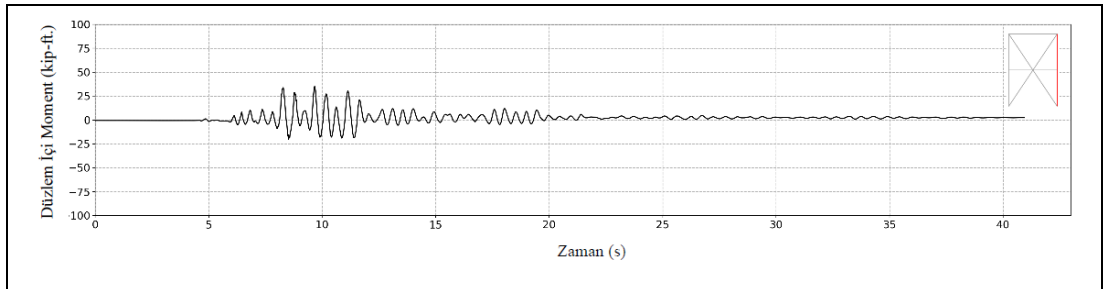
Şekil Ç1.8: Sol kolon eksenel yük – zaman grafiği.



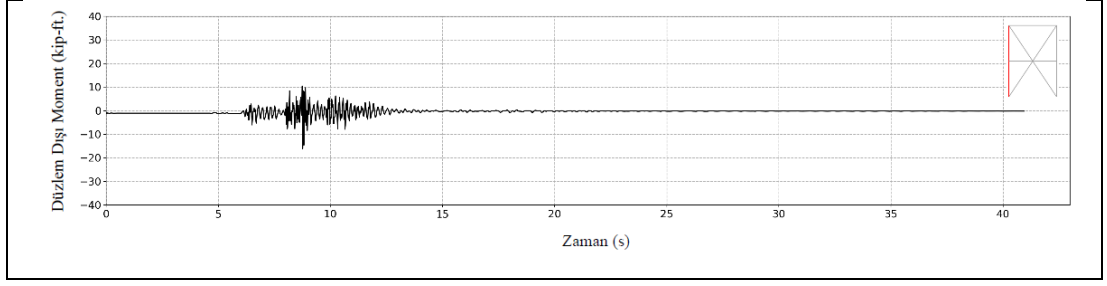
Şekil Ç1.9: Sağ kolon eksenel yük – zaman grafiği.



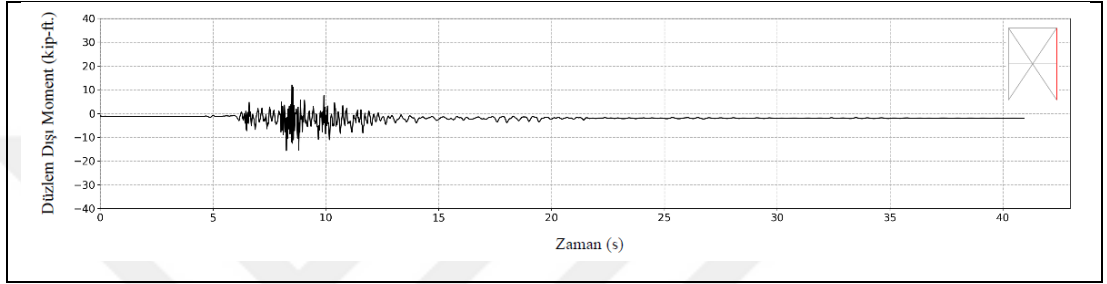
Şekil Ç1.10: Sol kolon düzlem içi eğilme momenti – zaman grafiği.



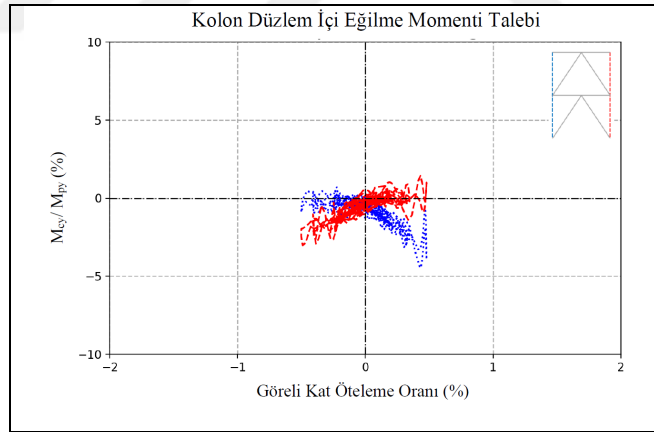
Şekil Ç1.11: Sağ kolon düzlem içi eğilme momenti – zaman grafiği.



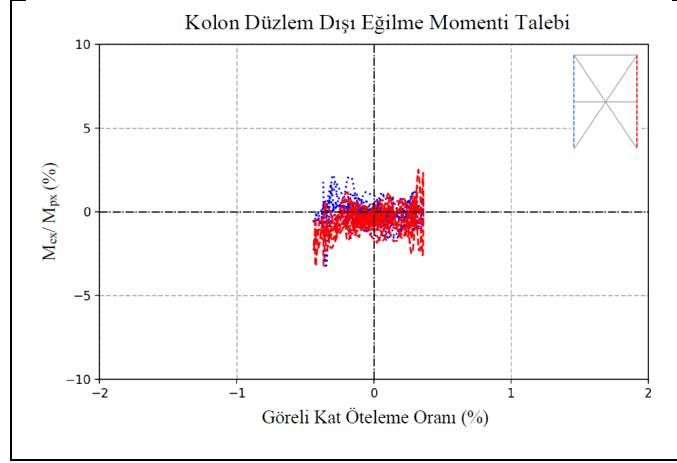
Şekil Ç1.12: Sol kolon düzlem dışı eğilme momenti – zaman grafiği.



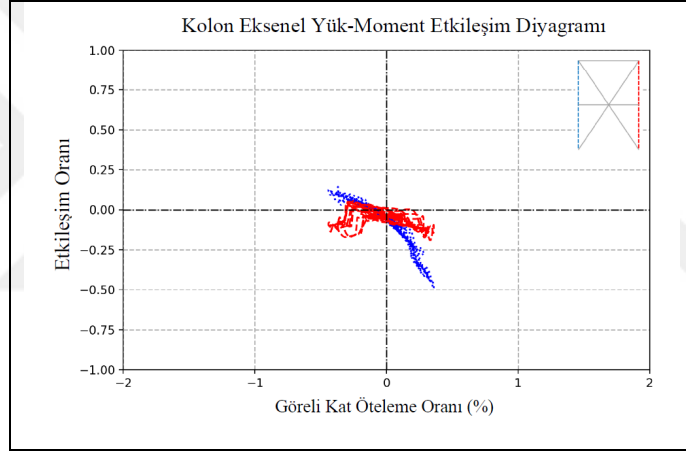
Şekil Ç1.13: Sağ kolon düzlem dışı eğilme momenti – zaman grafiği.



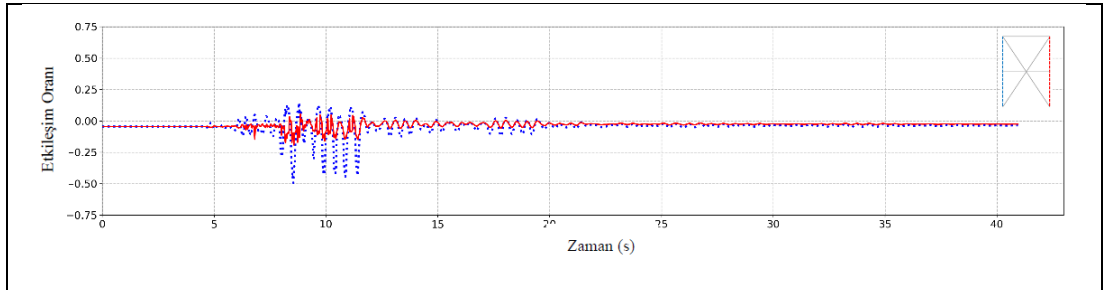
Şekil Ç1.14: Kolon düzlem içi eğilme momenti – görel kat öteleme oranı karşılaştırma grafiği.



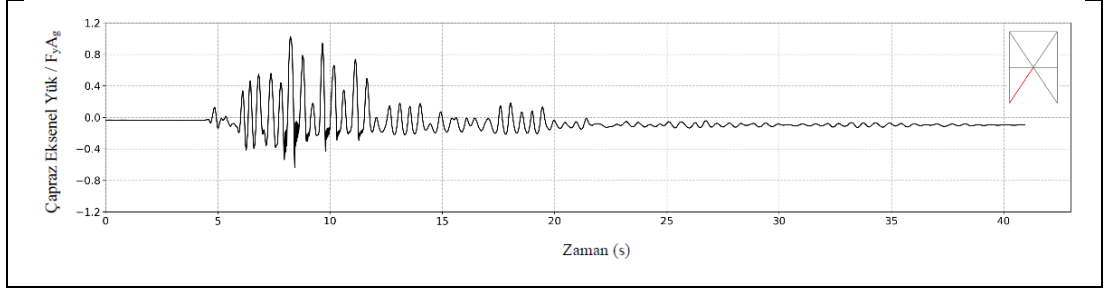
Şekil Ç1.15: Kolon düzlem dışı eğilme momenti – görel kat öteleme oranı karşılaştırma grafiği.



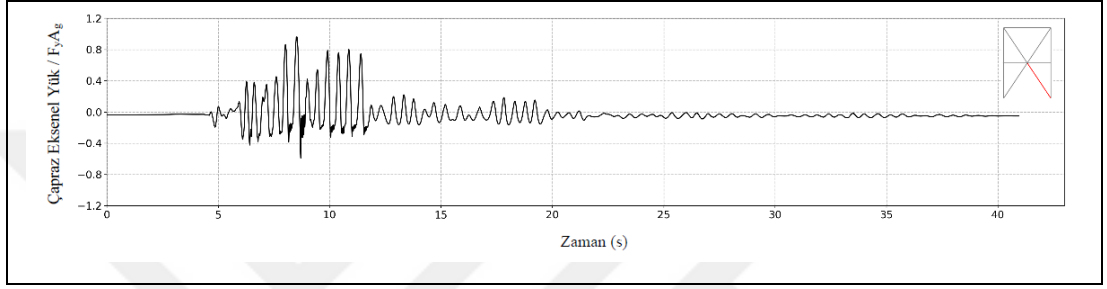
Şekil Ç1.16: Kolon eksenel yük – Moment etkileşim grafiği.



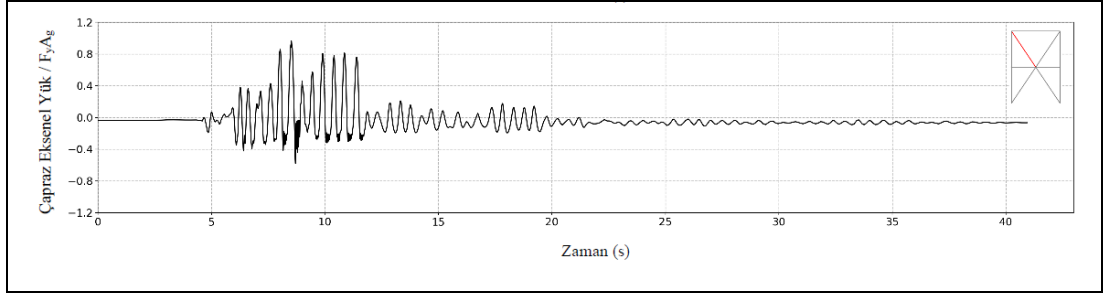
Şekil Ç1.17: Etkileşim oranı - zaman grafiği.



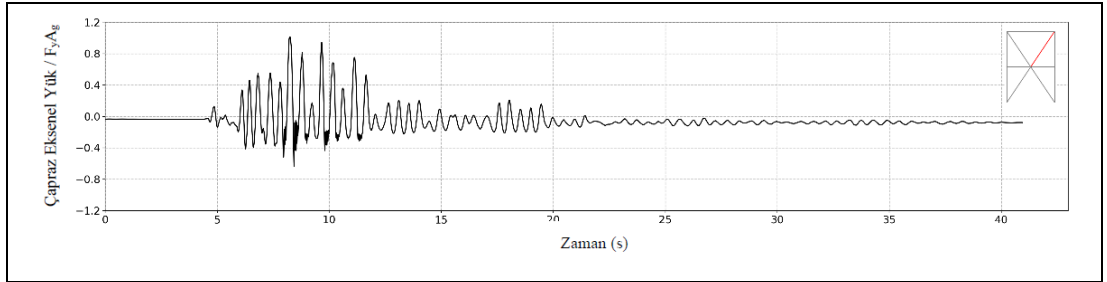
Şekil Ç1.18: Katman 1-1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



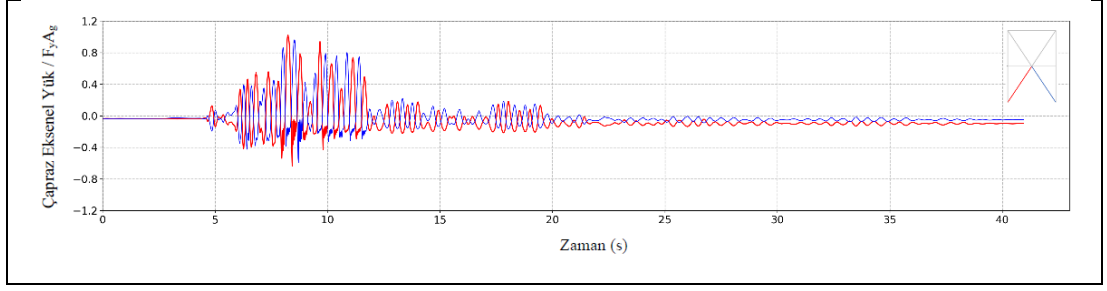
Şekil Ç1.19: Katman 1-2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



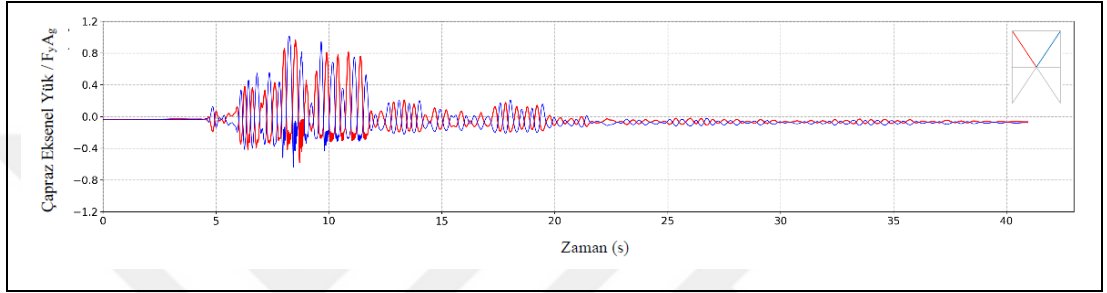
Şekil Ç1.20: Katman 2-1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



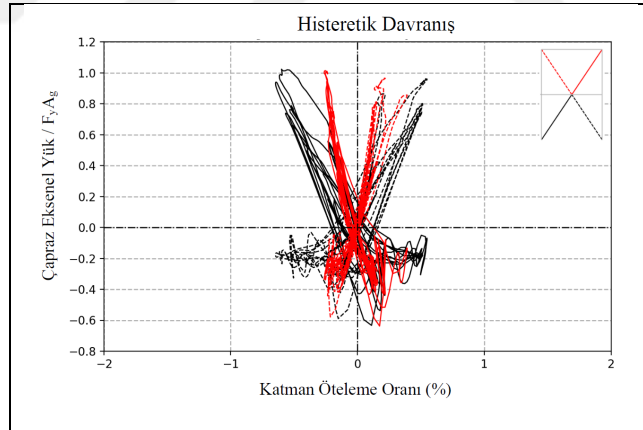
Şekil Ç1.21: Katman 2-2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



Şekil Ç1.22: Katman 1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.

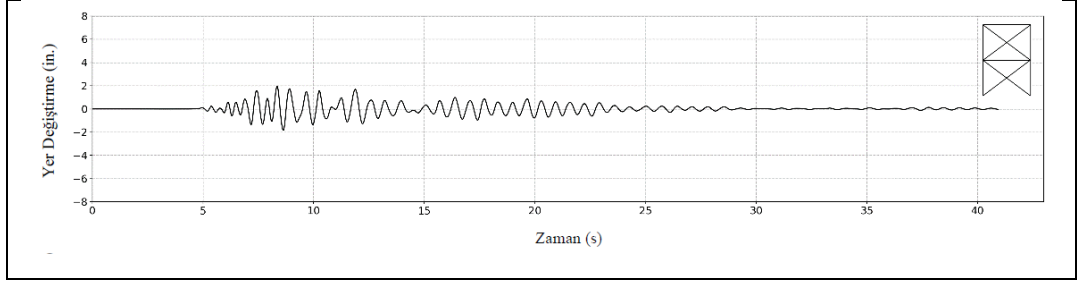


Şekil Ç1.23: Katman 2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.

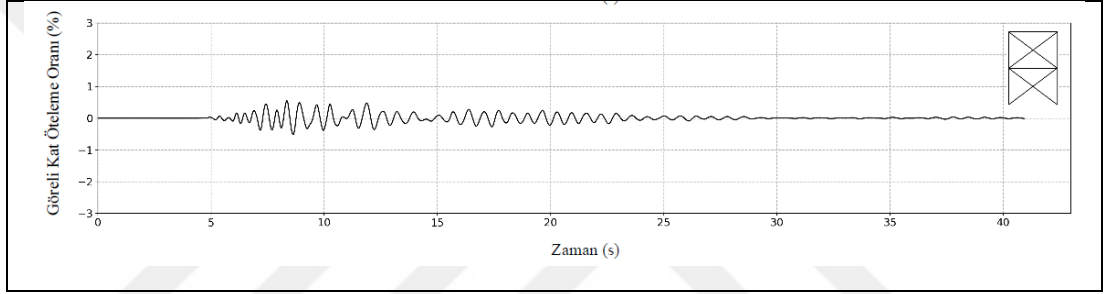


Şekil Ç1.24: Çapraz eleman eksenel yük – görel kat öteleme oranı grafiği.

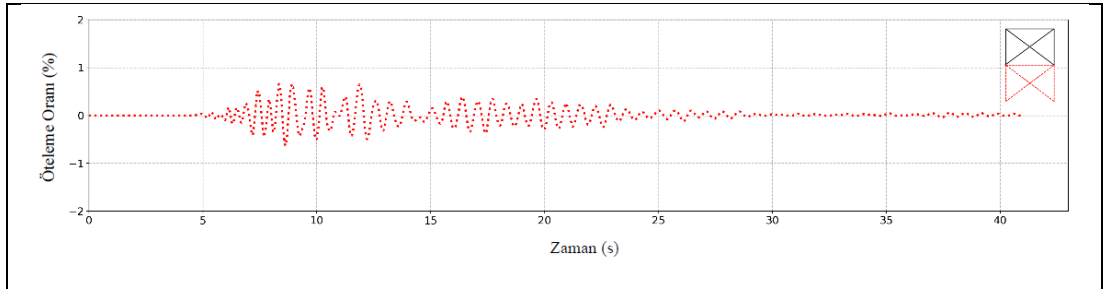
Ek D: X Çapraz Düzenine Sahip İki Katmanlı Çaprazlı Çerçevenin RSN1111 FP Deprem Yer Hareketi Etkisinde Tepkileri



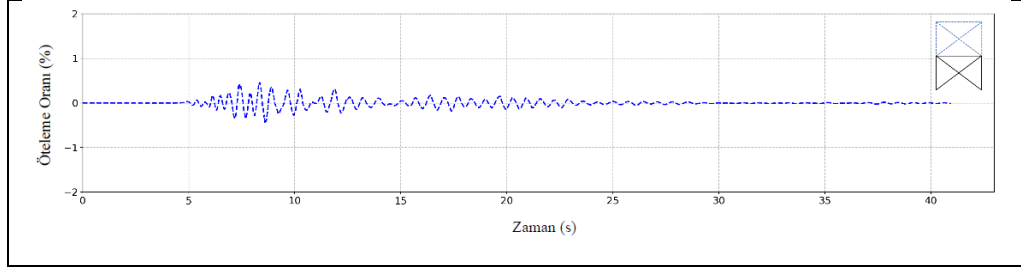
Şekil D1.1: Çatı yer değiştirme - zaman grafiği.



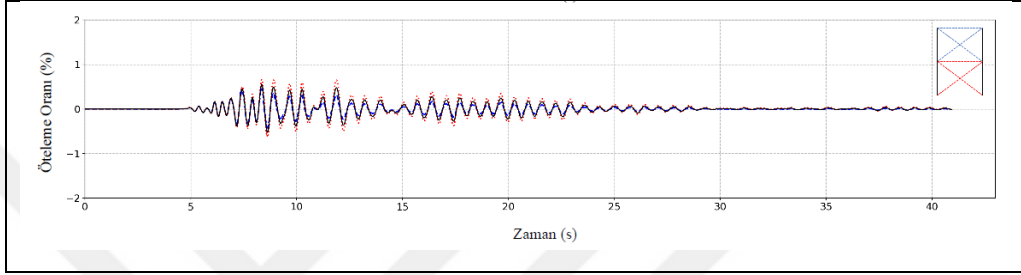
Şekil D1.2: Göreli kat öteleme oranı - zaman grafiği.



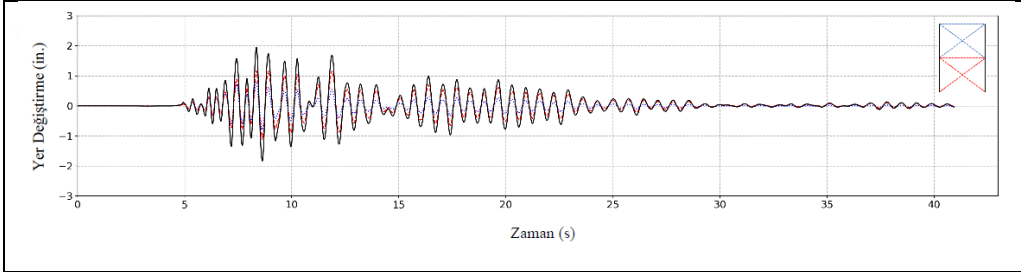
Şekil D1.3: Katman 1 öteleme oranı - zaman grafiği.



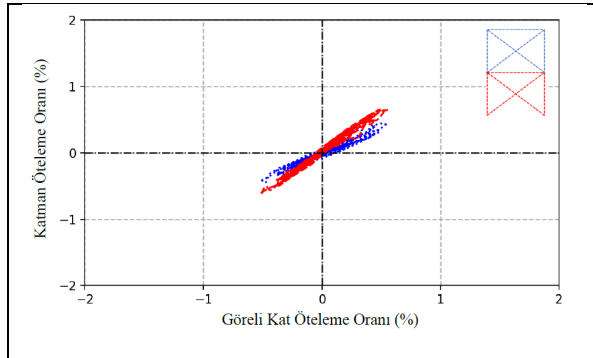
Şekil D1.4: Katman 2 öteleme oranı - zaman grafiği.



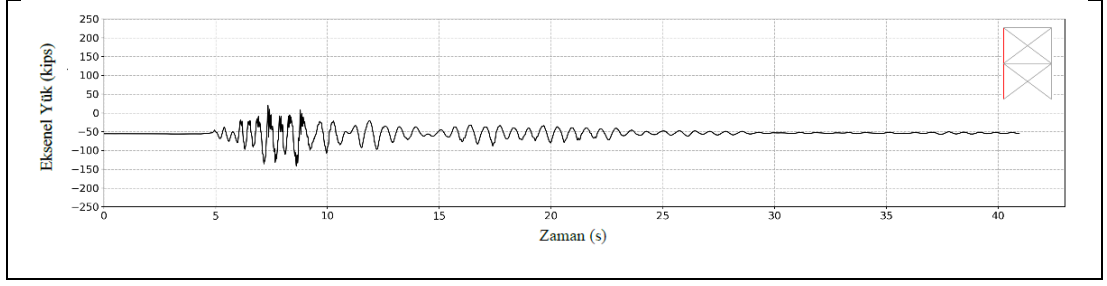
Şekil D1.5: Öteleme oranları karşılaştırma grafiği.



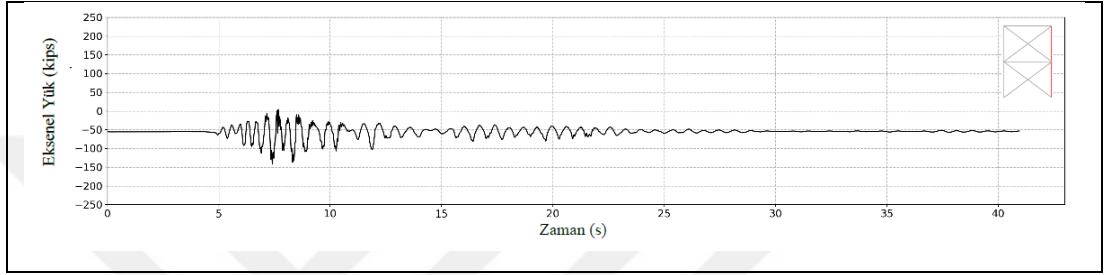
Şekil D1.6: Yer değiştirme karşılaştırma grafiği.



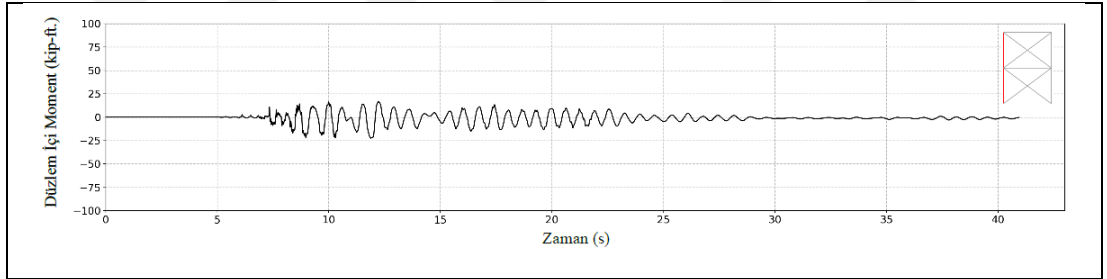
Şekil D1.7: Görelî kat ve katman öteleme karşılaştırma grafiği.



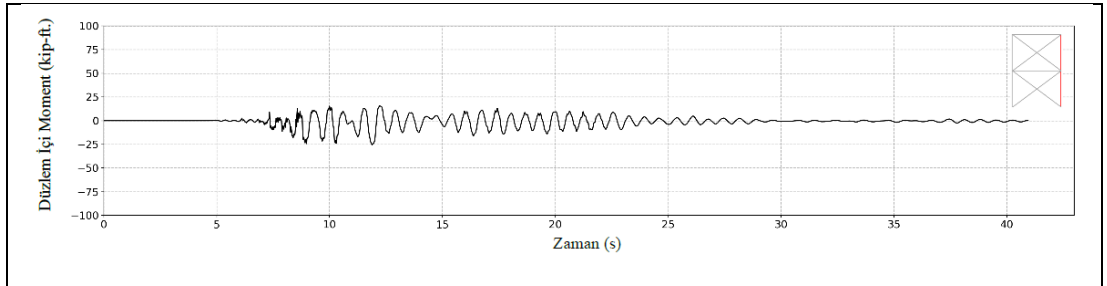
Şekil D1.8: Sol kolon eksenel yük – zaman grafiği.



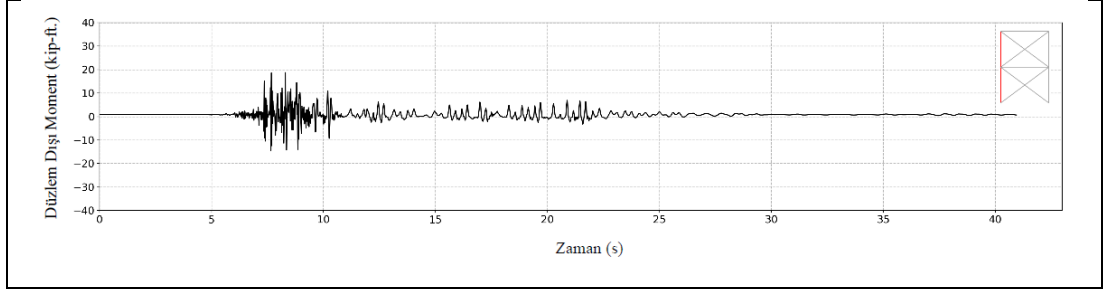
Şekil D1.9: Sağ kolon eksenel yük – zaman grafiği.



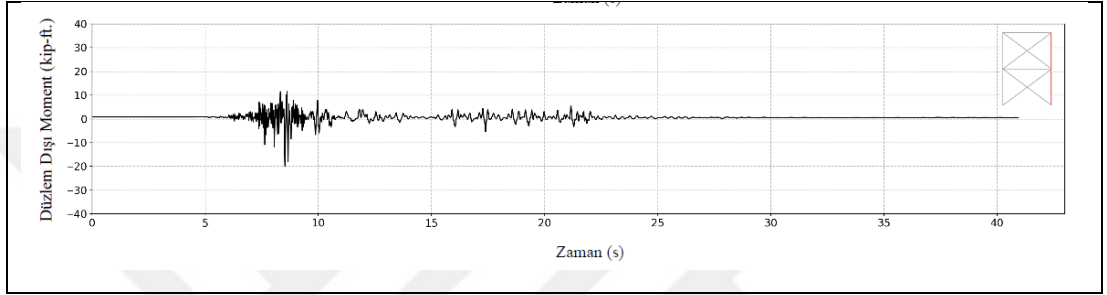
Şekil D1.10: Sol kolon düzlem içi eğilme momenti – zaman grafiği.



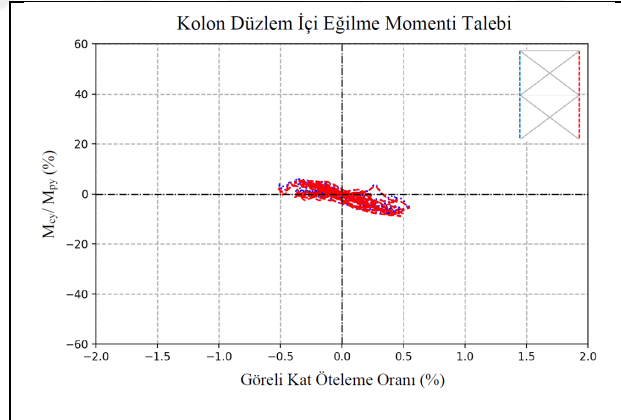
Şekil D1.11: Sağ kolon düzlem içi eğilme momenti – zaman grafiği.



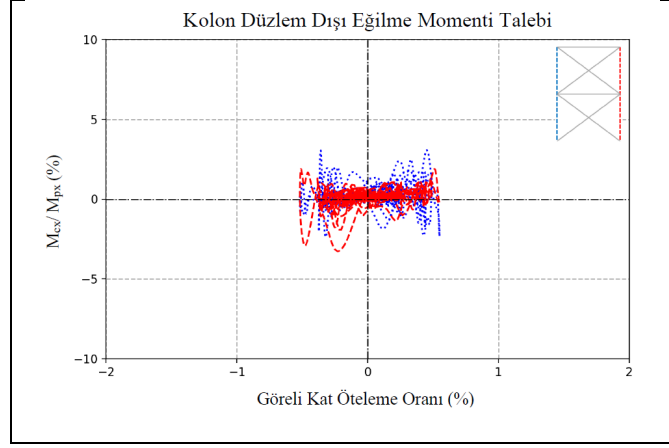
Şekil D1.12: Sol kolon düzlem dışı eğilme momenti – zaman grafiği.



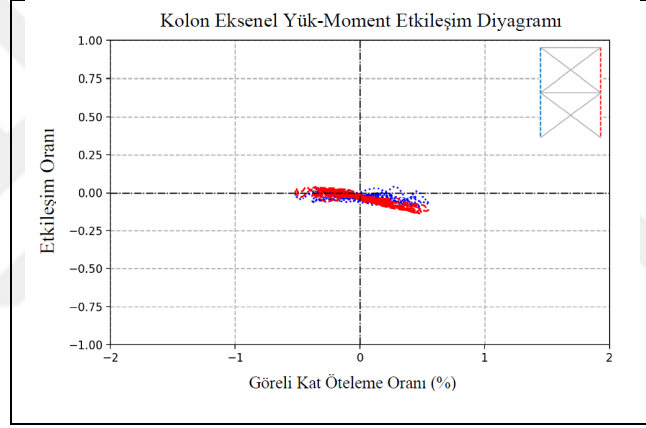
Şekil D1.13: Sağ kolon düzlem dışı eğilme momenti – zaman grafiği.



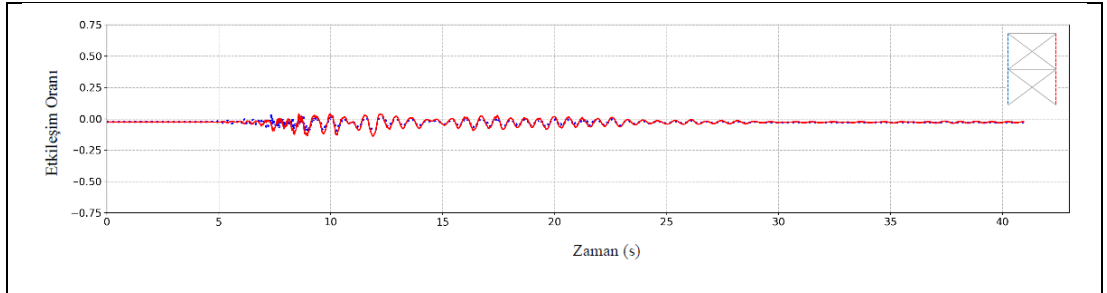
Şekil D1.14: Kolon düzlem içi eğilme momenti – görel kat öteleme oranı karşılaştırma grafiği.



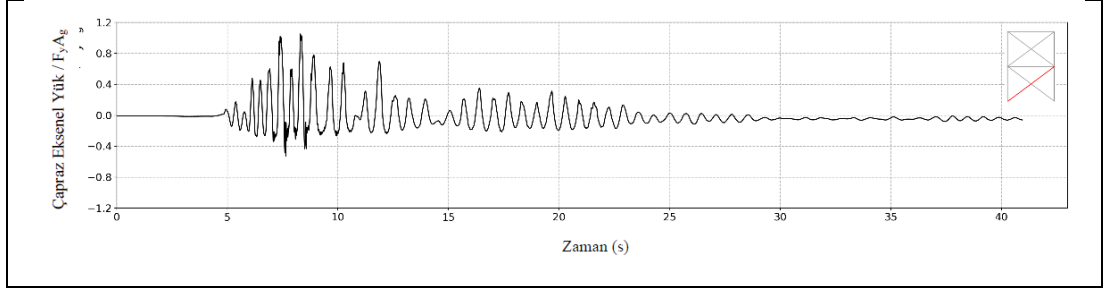
Şekil D1.15: Kolon düzlem dışı eğilme momenti – görel kat öteleme oranı karşılaştırma grafiği.



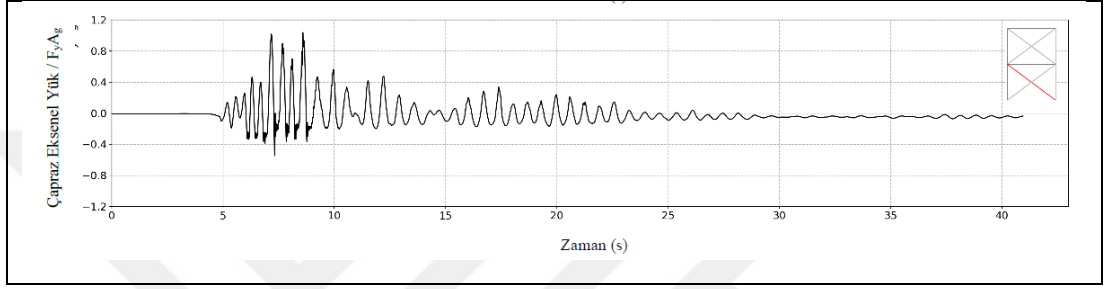
Şekil D1.16: Kolon eksenel yük – Moment etkileşim grafiği.



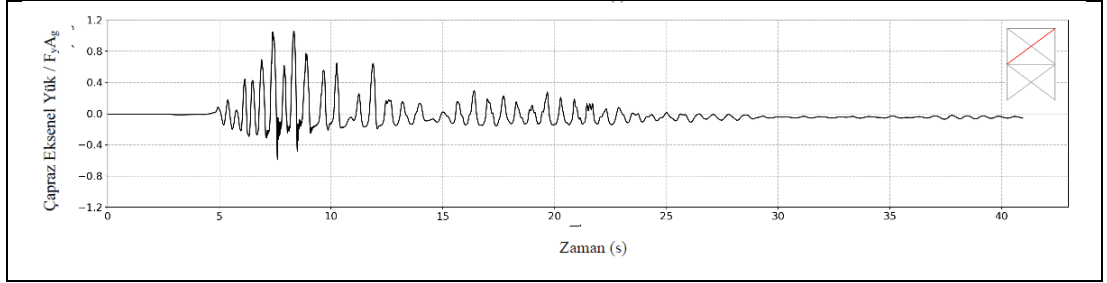
Şekil D1.17: Etkileşim oranı - zaman grafiği.



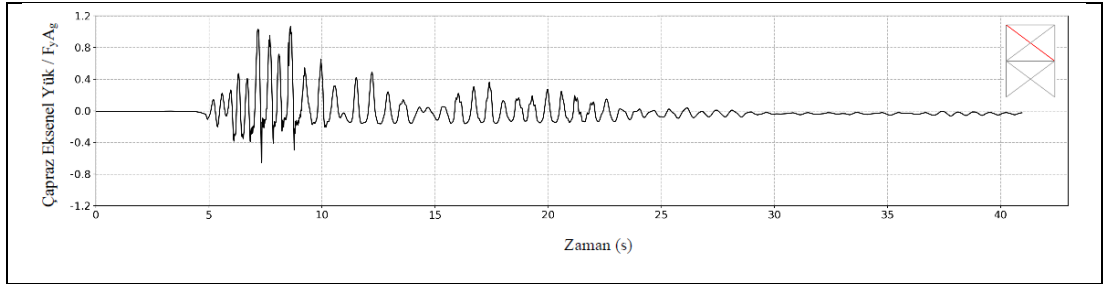
Şekil D1.18: Katman 1-1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



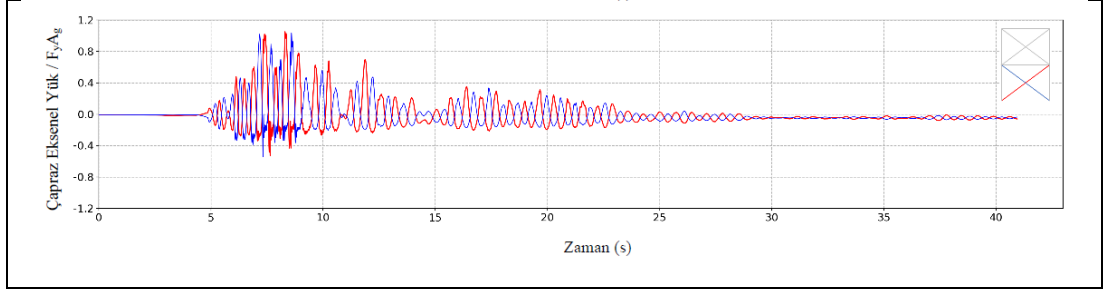
Şekil D1.19: Katman 1-2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



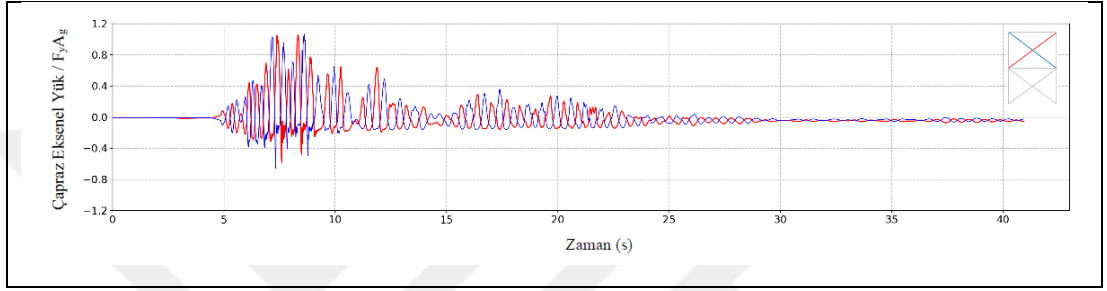
Şekil D1.20: Katman 2-1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



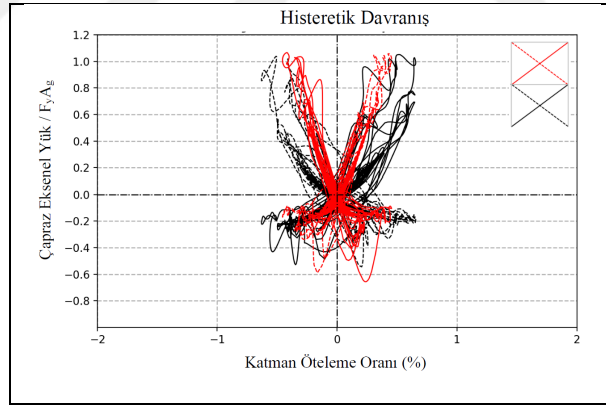
Şekil D1.21: Katman 2-2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



Şekil D1.22: Katman 1 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



Şekil D1.23: Katman 2 çapraz eleman eksenel yük - zaman grafiği.



Şekil D1.24: Çapraz eleman eksenel yük – görel kat öteleme oranı grafiği.