

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI ÇELİK ÇERÇEVELER İÇİN KAPASİTE TASARIMI
YAKLAŞIMININ VE DEPREM PERFORMANSININ ZAMAN TANIM ALANINDA
DOĞRUSAL OLMAYAN HESAP YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alpay İŞİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MART 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI ÇELİK ÇERÇEVELER İÇİN KAPASİTE TASARIMI
YAKLAŞIMININ VE DEPREM PERFORMANSININ ZAMAN TANIM ALANINDA
DOĞRUSAL OLMAYAN HESAP YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alpay İŞİN
(501191072)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER

MART 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**CAPACITY DESIGN AND NONLINEAR TIME HISTORY ANALYSIS
APPROACH TO SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF
ECCENTRICALLY BRACED STEEL FRAMES**

M.Sc. THESIS

**Alpay IŞIN
(501191072)**

Department of Civil Engineering

Structure Engineering Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Cüneyt VATANSEVER

MARCH 2025

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501191072 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alpay IŞIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI ÇELİK ÇERÇEVELER İÇİN KAPASİTE TASARIMI YAKLAŞIMININ VE DEPREM PERFORMANSININ ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL OLMAYAN HESAP YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Haluk Emre ALÇİÇEK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Edip SEÇKİN
İstanbul Kültür Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mart 2025**
Savunma Tarihi : **26 Mart 2025**





Aileme,



ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü eğitim süreci boyunca bilgi ve tecrübeleri ile mühendislik kariyeri yoluma ışık tutan, ilgi ve emeğini hiç esirgemeyen başta tez danışmanım Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER olmak üzere tüm hocalarıma, lisansüstü eğitim ve çalışmalar sürecinde mühendis yaklaşımı ve bakış açısı kazanımlarımı geliştirmemde emeği olan Dr. İnş. Müh. Orkun GÖRGÜLÜ ve İnş. Yük. Müh. Ali Rıza YIKILMAZ'a teşekkürü borç bilirim.

Doğduğum günden başlayarak bugüne kadar maddi ve manevi olarak her alanda ve konuda yanımda en büyük destekçim olan, iyi bir eğitim alabilmem hususunda zor şartlar altında ve imkanlarının ötesinde ellerinden gelenin en iyisini yapan annem Sevil İŞİN, babam Ahmet İŞİN ve abim Uzm. Dr. Alper İŞİN'a, lisansüstü eğitim süreci boyunca her adımda ve zorlukta yanımda olan eşim Bucu İŞİN'a özveri, katkı ve destekleri için sonsuz teşekkür ederim.

Mart 2025

Alpay İŞİN
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	4
2. MODEL BİNANIN TASARIMI	7
2.1 Taşıyıcı Sistem Tanımı	8
2.2 Sabit ve Hareketli Yükler	10
2.2.1 Zati yükler	10
2.2.2 Hareketli yükler	10
2.2.3 Kar yükü	11
2.3 Depremsellik	11
2.4 Taşıyıcı Sistem Analizleri	12
2.4.1 Bina performans hedefleri ve hesap yöntemi	13
2.4.2 Hesap ve modelleme kabulleri	15
2.4.3 Modal analiz sonuçları	15
2.4.4 Taban kesme kuvveti kontrolü	17
2.4.5 Göreli kat öteleme oranları	18
2.5 Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Boyutlandırılması	19
2.5.1 Bağ kirişi	19
2.5.2 Bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü	23
2.5.3 Çapraz	25
2.5.4 Kolon	26
3. MODEL BİNANIN DEPREM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	31
3.1 Binalardan Bilgi Toplanması	31
3.1.1 Çelik binalarda sınırlı bilgi düzeyi	32
3.1.2 Çelik binalarda kapsamlı bilgi düzeyi	32
3.1.3 Bilgi düzeyi katsayıları	32
3.2 Deprem Performans Hedefinin Belirlenmesi	33
3.2.1 Kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri	34
3.2.2 Mevcut yapılar değerlendirilirken kullanılan hesap yöntemleri	35
3.2.3 Mevcut yapı deprem performansının belirlenmesi	36
3.3 Taşıyıcı Sistem Modeli	37

3.3.1 Yığılı plastik mafsalları.....	40
3.3.2 Dayanım kesiti tanımları	47
3.4 Deprem İvme Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi	49
3.5 Modal Analiz Sonuçları.....	52
4. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	53
4.1 Görelî Kat Öteleme Oranları	53
4.2 Kat Kesme Kuvvetleri	55
4.3 Bağ Kirişî Dışında Kalan Kiriş Bölümleri	57
4.4 Kolon Elemanları.....	57
4.5 Çapraz Elemanları	58
4.6 Bağ Kirişleri	59
4.7 Bina Performans Özeti	62
5. SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69



KISALTMALAR

AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AISC	: American Institute of Steel Construction
ASCE	: American Society of Civil Engineers
BKS	: Bina Kullanım Sınıfı
BYS	: Bina Yükseklik Sınıfı
ÇYTHYE	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar
DD2	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi düzeyi
DGT	: Dayanıma Göre Tasarım
DMÇÇÇ	: Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçeve
DTS	: Deprem Tasarım Sınıfı
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
GKÖO	: Görelî Kat Öteleme Oranı
GÖ	: Göçmenin Önlenmesi performans hedefi
KH	: Kontrollü Hasar performans hedefi
KK	: Kesintisiz Kullanım performans hedefi
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
PGA	: Maksimum Yer İvmesi
PGV	: Maksimum Yer Hızı
PGD	: Maksimum Yer Deplasmanı
S_a	: Spektral İvme
S_d	: Spektral Deplasman
SH	: Sınırlı Hasar performans hedefi
ŞGDT	: Şekildeğiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
YDKT	: Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım
ZTADOA	: Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz



SEMBOLLER

A_w	: Gövde enkesit alanı
D	: Dayanım fazlalığı katsayısı
DU	: En büyük dayanım anında şekildeğiştirme
DL	: Dayanım kaybı başladığı andaki şekildeğiştirme
DR	: Dayanım kaybı sonundaki şekildeğiştirme
DX	: En büyük şekildeğiştirme
e	: Bağ kirişi boyu
E	: Yapı çeliği elastisite modülü
FU	: En büyük dayanım değeri
F_X	: X Doğrultusu deprem taban kesme kuvveti
F_Y	: Y Doğrultusu deprem taban kesme kuvveti
F_y	: Yapı çeliği karakteristik akma gerilmesi
FY	: Elastik dayanımın son değeri
FR	: Dayanımın azaldığı durumdaki son değer
h	: Enkesit yüksekliği
I	: Kesit eylemsizlik momenti
K	: Burkulma katsayısı
K_e	: Toplam bağ kirişi rijitliği
K_b	: Bağ kirişi elemanı için eğilme rijitliği
K_s	: Bağ kirişi elemanı için kayma rijitliği
ℓ	: Çubuk eleman hesap boyu
L	: Çerçeve hesap açıklığı
M	: Eğilme momenti etkisi
M_E	: Deprem yüklerinden kaynaklanan moment talebi
M_p	: Plastik eğilme momenti
M_v	: Düşey yüklerden kaynaklanan moment talebi
M_U	: Boyutlandırmaya esas moment talebi
n	: hareketli yük katsayısı
P	: Enkesitte bulunan en büyük aksenal yük talebi

P_c	: Eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_n	: Karakteristik eksenel akma kuvveti dayanımı
P_E	: Deprem yüklerinden kaynaklanan eksenel yük talebi
P_U	: Boyutlandırmaya esas eksenel yük talebi
P_V	: Düşey yüklerden kaynaklanan eksenel yük talebi
P_y	: Çelik elemanın eksenel akma kuvveti
Q	: Genelleştirilmiş iç kuvvet
Q_y	: Genelleştirilmiş beklenen dayanım
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_a(T)	: Deprem yükü azaltma katsayısı
R_y	: Olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı
S_{ae}(T)	: Yatay elastik tasarım spektral ivmesi
T	: Doğal titreşim periyodu
T_A	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyot
T_B	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyot
T_x	: X Doğrultusu hakim doğal titreşim periyodu
T_y	: Y Doğrultusu hakim doğal titreşim periyodu
V	: Kesme kuvveti etkisi
V_e	: Deprem etkilerinden oluşan tasarım kesme kuvveti
V_n	: Karakteristik kesme kuvveti dayanımı
W_p	: Plastik mukavemet momenti
Δ	: Yerdeğiştirme
θ	: Dönme
θ_y	: Kesitte akma dönmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yatay yük taşıyıcı sistem kesit bilgileri.....	8
Çizelge 2.2 : İkincil elemanların enkesit bilgileri.....	8
Çizelge 2.3 : Normal katlar döşeme yükleri bilgileri.....	10
Çizelge 2.4 : Çatı katı döşeme yükleri bilgileri.....	10
Çizelge 2.5 : Yeni yapılacak çelik binalar performans hedefleri ve tasarım yaklaşımları (BYS≥2) [1].	13
Çizelge 2.6 : Modal kütle katılım oranları, ETABS [16].	16
Çizelge 2.7 : Taban kesme kuvvetleri ve kuvvet büyütme katsayıları.....	17
Çizelge 2.8 : Binanın en elverişsiz görelî kat öteleme oranları.....	18
Çizelge 2.9 : Bağ kirişlerin malzeme ve kesit bilgileri.....	22
Çizelge 2.10 : Bağ kirişlerinde kapasite hesapları ve davranış.....	22
Çizelge 2.11 : En elverişsiz bağ kiriş iç kuvvetleri, etki/kapasite dağılımı, tasarım büyütme katsayısı ve bağ kirişi dönme açısı.	22
Çizelge 2.12 : BKDKB en elverişsiz iç kuvvet talepleri.....	23
Çizelge 2.13 : BKDKB dayanım hesapları.....	24
Çizelge 2.14 : Çaprazlarda en elverişsiz iç kuvvet talepleri.....	25
Çizelge 2.15 : Çaprazlarda dayanım hesapları.....	25
Çizelge 2.16 : Kolonlarda en elverişsiz iç kuvvet talepleri.....	28
Çizelge 2.17 : Kolonlarda dayanım hesapları.....	28
Çizelge 3.1 : Mevcut Çelik Binalar performans hedefleri ve değerlendirme yaklaşımları (BYS≥2) [1].	33
Çizelge 3.2 : Süneklik düzeyi yüksek çelik kolon, çapraz ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü plastik dönme sınırları [1].	35
Çizelge 3.3 : Dışmerkez çelik çaprazlı çerçevelerde bağ kirişi plastik dönme sınırları [1].	35
Çizelge 3.4 : Davranış modeli değişkenleri [1].	43
Çizelge 3.5 : Bağ kirişleri kesme kuvveti plastik mafsallı davranış modeli değişkenleri.	44
Çizelge 3.6 : Bağ kirişleri moment plastik mafsallı davranış modeli değişkenleri. ...	44
Çizelge 3.7 : BKDKKB moment plastik mafsallı davranış modeli değişkenleri.	45
Çizelge 3.8 : Çaprazlar moment plastik mafsallı davranış modeli değişkenleri.....	46
Çizelge 3.9 : Kolonlar moment plastik mafsallı davranış modeli değişkenleri.....	47
Çizelge 3.10 : Deprem kayıtları ve özellikleri.....	51



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Tipik dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve [1].....	7
Şekil 2.2 : Tipik kat planı [2].....	9
Şekil 2.3 : Tipik sistem enkesiti (1 aksı çerçevesi) [2].....	9
Şekil 2.4 : Binanın aktif fay hattına göre konumu.....	12
Şekil 2.5 : Yatay elastik tasarım spektrumu.....	12
Şekil 2.6 : Yatay elastik/inelastik tasarım spektrumları.....	14
Şekil 2.7 : UX mod şekli ($T_x=0.87s$).....	16
Şekil 2.8 : UY mod şekli ($T_y=0.86s$).....	16
Şekil 2.9 : Bağ kirişi boyunun isimlendirme ve davranışa etkisi [11].....	21
Şekil 2.10 : Göreli kat öteleme açısı ve bağ kirişi dönme açısı [1].....	21
Şekil 2.11 : BKDKKB talep / dayanım dağılımı.....	24
Şekil 2.12 : Çaprazlarda talep / dayanım dağılımı.....	26
Şekil 2.13 : Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevede tipik serbest cisim diyagramı.....	27
Şekil 2.14 : Tipik bir DMÇÇÇ için mekanizma durumunda kat kesme kuvvetleri ve kolon aksenal kuvvet talepleri.....	27
Şekil 2.15 : Kolonlarda talep / dayanım dağılımı.....	29
Şekil 3.1 : Kesit hasar bölgeleri [1].....	34
Şekil 3.2 : Sonlu elemanlar yapı matematik modeli, PERFORM-3D [17].....	39
Şekil 3.3 : Plastik mafsal iskelet eğrisi, PERFORM-3D [17].....	39
Şekil 3.4 : Bağ kirişi analitik davranış modeli.....	41
Şekil 3.5 : Elastik ötesi bütünleşik paralel bağlı yay davranışı, kesme kuvveti – yerdeğiştirme [25].....	41
Şekil 3.6 : Plastik mafsal davranışı, eğilme momenti – dönme [23].....	41
Şekil 3.7 : Kesme kuvveti etkisinde doğrusal olmayan plastik mafsal davranış modeli [26].....	41
Şekil 3.8 : Plastik mafsal bölgeleri ve tipik çerçeve enkesiti.....	43
Şekil 3.9 : Genelleştirilmiş moment/kuvvet – dönme/yerdeğiştirme ilişkisi [1].....	43
Şekil 3.10 : HE300B bağ kirişi kesme plastik mafsalı tanımı PERFORM-3D [17].....	44
Şekil 3.11 : HE300B bağ kirişi moment plastik mafsalı tanımı [17].....	45
Şekil 3.12 : 1. kat HE300B BKDKKB plastik mafsalı tanımı [17].....	45
Şekil 3.13 : 1. kat HE240B çapraz plastik mafsalı tanımı PERFORM-3D.....	46
Şekil 3.14 : 2. kat HE400B kolon plastik mafsalı tanımı PERFORM-3D.....	47
Şekil 3.15 : HE450B kolon PERFORM-3D [17], P-M2-M3 StrengthSectionSteel..	48
Şekil 3.16 : HE300B BKDKKB PERFORM-3D [17], P-M2-M3 StrengthSectionSteel.....	48
Şekil 3.17 : HE240B çapraz PERFORM-3D [17], P-M2-M3 StrengthSectionSteel.	48
Şekil 3.18 : Ölçeklendirilmiş yatay elastik ivme spektrumları, bileşke spektrum ve hedef spektrumu.....	50
Şekil 3.19 : Mod-1, $T_x=0.86s$ PERFORM-3D [17].....	52
Şekil 3.20 : Mod-2, $T_y=0.86s$ PERFORM-3D [17].....	52

Şekil 4.1 : En büyük mutlak değerler olarak kat yerdeğıştirmeleri ve ortalama değerler.	54
Şekil 4.2 : En büyük mutlak değerler olarak görelî kat ötelemesi oranları ve ortalama değerler.	54
Şekil 4.3 : Ortalama ve en büyük kat kesme kuvvetleri.	56
Şekil 4.4 : Kat kesme kuvveti oranları ve tasarım büyütme katsayıları.	56
Şekil 4.5 : BKDKKB için etki/kapasite oranlarının dağılımı.	57
Şekil 4.6 : Kolonlarda etki/kapasite oranlarının dağılımı.	58
Şekil 4.7 : Çapraz elemanları ortalama – en büyük etki/kapasite dağılımı.....	58
Şekil 4.8 : Bağ kirişî kesme kuvveti talepleri / plastik kesme kuvveti kapasitesi dağılımı.	59
Şekil 4.9 : Bağ kirişlerinin dönme açıları dağılımı.	60
Şekil 4.10 : 3 Aksı üzerindeki A ve B aksları arasında kalan 1. kat bağ kirişî plastik mafsalından elde edilen kesme kuvveti – dönme eğrileri.	61
Şekil 4.11 : EQ1-00 deprem kaydı altında taşıyıcı sistem elemanlarında talep/kapasite dağılımı.	62



DIŞMERKEZ ÇAPRAZLI ÇELİK ÇERÇEVELER İÇİN KAPASİTE TASARIMI YAKLAŞIMININ VE DEPREM PERFORMANSININ ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL OLMAYAN HESAP YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Düşey ve yatay yükleri taşıyan yapı taşıyıcı sistemleri ahşap, betonarme, yığma ve elik gibi çeşitli yapısal malzemeler ile üretilebilmektedir. elik, yüksek sünekliğe ve karbon içeriğine bağlı olarak yüksek dayanıma sahip yapısal bir malzemedir. Süneklik, yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde korunduğu, taşıyıcı yapı elemanlarının őkildeėiőtirme ve taşıyıcı sistemin yerdeğiştirme kabiliyetidir. elik malzemenin yüksek sünek ve dayanımlı bir malzeme olması, hafif ve dayanıklı yapılar imal edilmesine, yer hareketleri sonucu yapıda kütleli oranında meydana gelen deprem yüklerinin de az olmasına olanak tanımaktadır. Deprem, her an meydana gelebilecek, önlem gerektiren ve sürekli riskler içeren bir doğal afettir. Türkiye, yüzey alanı olarak büyük oranda Anadolu levhası üzerinde konumlanmıştır. Türkiye’de aktif 3 adet büyük fay hattı bulunmaktadır. Bahsi geçen fay hatları; Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay hattı ve Batı Anadolu Fay Hattı’dır. Türkiye nüfusunun %90’dan fazlası deprem tehlikesi altında yaşamaktadır. Bu sebeple, günümüzde yeni yapılacak yapılar bu etkiler göz önünde bulundurularak ve yetkin mühendislik hizmetleri çerçevesinde, yürürlükteki Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ışığında üretilmektedir.

Bu alıőma kapsamında, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY 2018)’de belirtilen boyutlandırma esaslarına uygun olarak tasarımı yapılan, her iki asal doğrultusunda yatay yüklerin süneklik düzeyi yüksek dışmerkez aprazlı elik erevesel tarafından karşılandığı yedi katlı bir ofis binasının deprem performansı, zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların doğrusal olmayan davranışları için yığılı plastik davranış (plastik mafsal) modeli esas alınmıştır. Çalışmada, on bir farklı deprem yer hareketi kullanılarak toplam yirmi iki adet zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmede taban ve kat kesme kuvvetleri, görelili kat ötelenmeleri, çapraz ve kolonlarda oluşan iç kuvvet talepleri, bağ kiriőlerindeki kesme kuvveti – yer değiştirme ve moment – dönme talepleri dikkate alınmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan yirmi iki adet analiz sonucu elde edilen taleplerin ortalama değerleri esas alınarak, TBDY 2018’de dış merkez aprazlı elik erevesel için öngörülen kapasite tasarımı yaklaşımının yeterliliği araőtırılmıő ve bina taşıyıcı sisteminin deprem performansı değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonunda, gerçek deprem kayıtları ile yürütölen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar ışığında; bina taşıyıcı sisteminin doğrusal olmayan davranışı tasarım prensibi ile uyumlu olarak sadece bağ kirişlerinin plastik őkildeėiőtirme göstermesi ile gerekleőtitiėi, tasarımda öngöröldüğü gibi plastik őkildeėiőtirmelerin kesme kuvveti etkisinde meydana geldiği, bağ kiriş

dışında kalan çerçeve elemanlarında oluşan şekildeğişirmelerin elastik bölge içinde kaldığı, bağ kirişlerinin kesme etkileri altında performans hedefini sağlayacak yeterli şekildeğiştirme kapasitesine sahip olduğu ve boyutlandırma esaslarına göre hesaplanan en büyük bağ kirişi dönme açısı 0.07 radyan iken ZTADOA ile hesaplanan en elverişsiz bağ kirişi dönme açısı 0.05 radyan olduğu, bağ kirişleri enkesitinde oluşan ortalama-en büyük kesme kuvveti etkisinin birinci katta ve $1.26V_p$ olduğu, bağ kirişi dışında kalan DMÇÇÇ elamanlarının boyutlandırılmasında bağ kirişinin plastikleşmesine neden olan yüklemenin pekleşmeli beklenen malzeme dayanımı katsayıları ile büyütülmesi esasına dayalı kullanılan $(1.1R_yV_p/V_E)$ ve $(1.25R_yV_p/V_E)$ büyütme katsayıları ZTADOA sonucu elde edilen ortalama-en büyük iç kuvvetler ile uyumlu olduğu, bağ kirişlerinin yapı yüksekliği boyunca herhangi bir katta bir yığılma göstermeksizin üniforma yakın bir şekilde plastikleştiği, taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların hiç birinde ileri hasar düzeyinde olmadığı ve buna göre birleşim ve eklerin yeterli dayanıma sahip olduğu varsayıldığında TBDY 2018 15.8.4 uyarınca, bina taşıyıcı sisteminin mevcut çelik yapılar için DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı 10% olan deprem) deprem yer hareketi düzeyinde Kontrollü Hasar performans düzeyini sağladığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın ilk bölümünde; binaların maruz kaldıkları yükler, Türkiye depremselliği, yeryüzü levhaları, fay hatları, çelik yapılar hakkında bilgiler, çalışmanın amacı ve bu konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

İkinci bölümde, model bina bilgileri dikkate alınarak dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin TBDY 2018 ışığında boyutlandırılmasına ilişkin hesap detayları sunulmuştur. Taşıyıcı sistem tanımı, eleman kesit ve malzeme bilgileri, kat planı, sistem enkesiti, yükler, depremsellik, sonlu elemanlar hesap modelinin kurulmasına ilişkin hesap ve modelleme kabulleri, taşıyıcı sistem kontrolleri, taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırılmasına ilişkin mekanizma durumuna karşı gelen iç kuvvet talepleri, kapasite hesaplarına ilişkin detaylar ve talep/kapasite dağılımları bu bölümün konusunu oluşturmaktadır.

Üçüncü bölümde çalışma kapsamında incelenen model binanın TBDY 2018 uyarınca deprem performansının belirlenmesine ilişkin detaylar sunulmuştur. Deprem performans hedefinin belirlenmesi, kesit hasar sınırları ve hasar bölgelerinin tayini, hesap yöntemi, taşıyıcı sistem modeli, plastik mafsal tanımları, dayanım kesiti tanımları, gerçek deprem yer hareketi kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi gibi doğrusal olmayan hesap yöntemi ile model bina deprem performansının değerlendirilmesine ilişkin detaylardan bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda boyutlandırılan ve ZTADOA yöntemi ile doğrusal olmayan dinamik davranışı araştırılan incelemeye tabi binanın her iki analiz yöntemi ile elde edilen sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Beşinci ve son bölümde ise TBDY 2018’de dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler için öngörülen kapasite tasarımı yaklaşımı, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ile elde edilen sonuçlar ışığında yorumlanmış ve yaklaşımlar ile ilgili sonuçlar verilmiştir.

Çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlara göre, süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin tasarımında TBDY 2018’e göre uygulanan kapasite tasarımı esaslarının, elastik bölge içinde kalması istenen elemanların boyutlandırılması için gerekli olan deprem taleplerinin belirlenmesinde yeterli düzeyde bir yaklaşıklık sağladığı görülmüştür.

CAPACITY DESIGN AND SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF ECCENTRICALLY BRACED STEEL FRAME BY NON-LINEAR TIME HISTORY ANALYSIS

SUMMARY

Structural systems that carry vertical and horizontal loads are constructed using various materials such as wood, reinforced concrete, masonry, and steel. Steel is a structural material with high ductility and strength, attributed to its carbon content. Ductility is the ability of load-bearing structural elements to undergo deformation while significantly maintaining their load-carrying capacity, as well as the capability of the structural system to displace. The high ductility and strength of steel allow for the construction of lightweight and seismic resistance structures, while also minimizing the earthquake loads generated due to ground motions relative to the mass of the structure. Earthquakes are natural disasters that can occur at any moment, necessitating precautions and posing continuous risks. Türkiye is predominantly situated on the Anatolian plate. There are three major active fault lines in Türkiye: the North Anatolian Fault, the East Anatolian Fault, and the West Anatolian Fault. More than 90% of Türkiye's population lives in areas at risk of earthquakes. Therefore, contemporary structures are designed considering these effects and within the framework of competent engineering services, in accordance with the current Turkish Seismic Code.

In this study, the seismic performance of a seven-storey office building designed in accordance with the principles specified in the Turkish Seismic Code for Buildings-2018 (TSCB 2018) and resisting the lateral loads in both principal directions with highly ductile eccentrically braced steel frames is evaluated using nonlinear time history analysis method. General information regarding the structural elements, overall layout, materials, loading conditions, and seismicity of the building under investigation is presented. The capacity design approach related to the mechanism condition under seismic loading is explained, and the internal force demands used for the design of structural components—such as the beams excluding the link beam portion, link beams, braces, and columns forming the lateral load-resisting system—are defined. The demand-to-capacity ratios of the existing structural members are derived based on linear analysis results. The nonlinear seismic behavior of the building is investigated using the nonlinear time history analysis method, one of the nonlinear analysis procedures presented in the Turkish Seismic Code (TSCB 2018). In addition to the details regarding the implementation of the nonlinear analysis method, the selection and scaling of real ground motion records, the development of the structural analysis model, and the evaluation of the results are comprehensively described. The nonlinear behavior of the structural members is based on the lumped plastic behavior (plastic hinge) model. In the study, a total of twenty-two nonlinear time history analyses were performed using eleven different earthquake ground motions. Storey and floor shear forces, relative storey drifts, internal force demands on diagonals and columns, shear force - displacement and moment - rotation demands on link beams

were taken into account in the evaluation. Based on the average values of the demands obtained as a result of twenty-two nonlinear analyses, the adequacy of the capacity design approach prescribed in TSCB 2018 for eccentrically braced frames was investigated and seismic performance of the structural system was also assessed.

At the end of the study, based on the results obtained from nonlinear time history analyses with real earthquake records, it is concluded that the nonlinear behavior of the structural system is in accordance with the design principle where plastic deformations occurred only in the link beams, as preceding in the design. The plastic deformations occurred under shear force effects on the link beam web, and the deformations in the frame elements outside of the link beam remained within the elastic region. The link beams have sufficient deformation capacity under shear effects to meet the performance target. The maximum link beam rotation calculated according to the design criteria is 0.07 radians, while the most unfavourable link beam rotation calculated using nonlinear time history analysis is 0.05 radians. The average-maximum shear force effect in the link beam cross-section observed on the first floor is $1.26V_p$. In the design of the frame elements outside of the link beams, the amplification factors $1.1R_yV_p/V_E$ and $1.25R_yV_p/V_E$ which are based on the loading that causes plasticization of the link beam, are found to be consistent with the average-maximum internal forces obtained from nonlinear time history analysis. The link beams plastify uniformly, without any accumulation at any floor along the building height. No element in the structural system reached advanced damage level, and assuming that the joints and connections have sufficient strength, it was concluded that the building's structural system meets the Controlled Damage (Life Safety) performance level under a DD-2 design level earthquake ground motion (with a 10% probability of exceedance in 50 years) according to TSCB 2018 15.8.4.

In the first chapter of this study, information is provided regarding the loads acting on buildings, the seismicity of Türkiye, tectonic plates and fault lines, and steel structures. Additionally, the objective of the study and a review of previous research related to the subject are presented.

In the second chapter, based on the characteristics of the model building, detailed calculations related to the design of eccentrically braced steel frames in accordance with TSCB 2018 are presented. This chapter covers the definition of the structural system, cross-sectional and material properties of the members, floor plan, system cross-section, loading conditions, seismicity, assumptions made for establishing the finite element analysis model, structural system verifications, internal force demands corresponding to the mechanism condition for the design of structural elements, detailed capacity calculations, and demand-to-capacity ratios.

In the third chapter, detailed information is presented regarding the seismic performance evaluation of the model building investigated in this study, in accordance with TSCB 2018. The chapter discusses the determination of the seismic performance target, identification of section damage limits and damage zones, the nonlinear analysis method, structural system model, definitions of plastic hinges, strength section definitions, and the selection and scaling of real earthquake ground motion records. These topics are addressed within the scope of the nonlinear analysis method used to evaluate the seismic performance of the model building.

In the fourth section, the results obtained from both analysis methods for the model building, which is designed according to the capacity design principles and

investigated for nonlinear dynamic behavior using the nonlinear time history analysis method are presented and evaluated.

In the fifth and final section, the capacity design approach proposed for eccentrically braced steel frames in Turkish Seismic Code is interpreted in light of the results obtained from nonlinear time history dynamic analysis and conclusions regarding the approaches are provided.

In conclusion, it is observed that the capacity design principles applied in accordance with TSCB 2018 for the design of high ductility eccentrically braced steel frames provides a sufficiently accurate approach for determining the earthquake demands required for design the elements that remain in the elastic region.





1. GİRİŞ

Yapılar, kullanım ömürleri boyunca, kullanım amacına bağlı olarak; insan – cisim ağırlıkları, rüzgar, yangın, deprem, makine – ekipman titreşimi gibi çeşitli iç ve dış etkilere maruz kalmaktadır. Yerçekimi kanunu sebebiyle; yapı öz ağırlığı, insan ve cisim ağırlıkları gibi etkiler yapının maruz kaldığı statik düşey yükleri oluşturmaktadır. Hava ve yer hareketlerine bağlı olarak meydana gelen rüzgar ve deprem gibi etkiler dinamik yatay yüklerdir. Türkiye, yüzey alanı olarak büyük oranda Anadolu levhası üzerinde konumlanmıştır. Anadolu levhasının kuzeyinde Avrasya levhası, güney batısında Afrika levhası ve güney doğusunda Arabistan levhası bulunmaktadır. Anadolu levhasının, sürekli tektonik hareketlere bağlı olarak bahsi geçen üç büyük levha tarafından sıkıştırılması sonucu büyük ve aktif fay hatları oluşmuştur. Türkiye’de aktif 3 adet büyük fay hattı bulunmaktadır. Bahsi geçen fay hatları; Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay hattı ve Batı Anadolu Fay Hattıdır. Türkiye’de meydana gelen depremlerin büyük çoğunluğu bu fay hatları tarafından üretilmektedir. Deprem tehlike haritalarına göre Türkiye’nin %92’sinin deprem eğilimli bölgeler içerisinde olduğu, nüfusun %95’inin deprem korkusu ile yaşadığı ve ülke ekonomisine büyük katkısı olan sanayi işletmelerinin %98’inin deprem eğilimli bölgelerde bulunduğu bilinmektedir.

Yapı stabilitesi, yapının düşey ve yatay etkiler altında ayakta kalabilme, etkilere karşı koyabilme yeteneğini ifade etmektedir. Süregelen zaman içerisinde, şehirlerdeki hızlı nüfus artışları sonucu meydana gelen kontrolsüz yapılaşmaya bağlı olarak yapı stoğunun büyük bölümünün bilgi ve tecrübeye dayalı imalat süreçlerinden geçtiği, mühendislik hizmeti almadığı görülmektedir. Türkiye’de yaşanan büyük depremler sonucu meydana gelen mal ve can kayıplarının temel sebebi düşük malzeme kalitesi, kötü işçilik ve eksik yetkin mühendislik hizmeti sonucu yer hareketlerine bağlı yapılara etkiyen deprem yüklerinin güvenle zemine aktarılamaması, dayanım yetersizliği ve stabilitenin bozulmasıdır. Aktif fay hatları sürekli olarak depremler üretmektedir. Depremin meydana geldiği merkezde açığa çıkardığı enerjinin ölçüsü depremin büyüklüğünü ifade etmektedir. Depremin şiddeti, deprem merkezinde açığa

çıkan enerjinin yeryüzündeki etkisinin ölçüsüdür. Depremın şiddeti, depremin büyüklüğü, deprem merkezinin yeryüzüne uzaklığı, yapıların depreme karşı gösterdiği dayanıklılık gibi parametrelere bağlıdır. Bir depremin yeryüzünde herhangi bir noktadaki şiddetini ölçebilmek için o bölgede meydana gelen etkilerin araştırılması gerekir. Farklı yerlerde meydana gelen aynı büyüklükteki depremlerin şiddetleri farklı olabilir. Türkiye’de mevcut yapı stoğunun büyük bölümünün deprem etkilerini karşılayacak yeterli dayanıklılığı sağlayamaması sebebiyle, meydana gelen depremlerin şiddeti büyük olmakta, yıkım ve kayıplarla sonuçlanmaktadır. Can ve mal kayıplarının önüne geçmek, sürdürülebilir bir yaşam ve iş alanı sağlayabilmek ancak depreme karşı önlem almakla mümkündür. Mevcut yapı stoğunu dayanıklı hale getirmek ve yeni yapılaşmaları planlı ve mühendislik hizmetleri çerçevesinde yürürlükteki yönetmelik ve standartlar ışığında yürütmek başlıca önlemlerdir. Mevcut yapıların deprem performansları belirlenir, varsa eğer görülen yetersizliklere istinaden yeterli performans seviyesini sağlayacak güçlendirme önlemleri alınır veya ekonomik olmayan sonuçlara ulaşılması durumunda yıkıma karar verilir. Türkiye’deki yeni yapılacak çelik yapıların yürürlükteki yönetmelik ve standartlarda öngörülen tasarım ilkelerine bağlı olarak boyutlandırılması ve inşa edilmesi deprem güvenliği için şart çalışmalarıdır. Ek olarak, mevcut yapı stoğu içerisinde bulunan çelik yapıların deprem performans seviyelerinin belirlenmesi ve yetersizliklere dayalı gerekli önlemlerin alınması can ve mal kayıplarının önüne geçilmesi için gerekli bir çalışmadır. Olası deprem etkileri altındaki çelik bir binanın, boyutlandırılması veya mevcut durum deprem performansının belirlenebilmesi için çeşitli çalışmalar yürütülmelidir, ilgili çalışmalar ve güçlendirme esasları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY 2018’de [1] açıklanmıştır.

Düşey ve yatay yükleri karşılayan yapı taşıyıcı sistemleri ahşap, betonarme, yığma ve çelik gibi çeşitli malzemeler ile üretilebilmektedir. Yer hareketlerine bağlı meydana gelen ivmeler, Newton’un ikinci hareket yasası ile açıklanan yapı kütesine bağlı olarak taşıyıcı sistem üzerinde meydana gelen deprem yüklerini oluşturmaktadır. Süneklik, yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde korunduğu, taşıyıcı yapı elemanlarının şekil değiştirme ve taşıyıcı sistemin yer değiştirme kabiliyetidir. Çelik, yüksek sünekliğe ve karbon içeriğine bağlı olarak yüksek dayanıma sahip bir malzemedir. Çeliğin yüksek sünek ve dayanımlı bir malzeme olması, hafif ve dayanıklı yapılar imal edilmesine, yer hareketleri sonucu yapıda kütesi oranında

meydana gelen deprem yüklerinin de az olmasına olanak tanımaktadır. Çelik taşıyıcı sistemler moment aktaran çelik çerçeveler, merkezi çaprazlı çelik çerçeveler, dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler ve burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeveler olarak taşıyıcı sistem düzenine göre gruplandırılır. Bahsi geçen gruplandırma içinde yer alan her bir taşıyıcı sistem belirli koşullara bağlı olarak süneklik düzeyi yüksek, süneklik düzeyi sınırlı ve süneklik düzeyi karma sistemler olarak sınıflandırılır. Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler ve burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeveler yüksek yatay yük taşıma kapasitesine ve düşük sünekliğe sahipken moment aktaran çelik çerçeveler, yüksek sünekliğe ve görece daha düşük yatay yük taşıma kapasitesine sahiptir. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler, bağ kirişlerinin sağladığı yüksek süneklik kabiliyeti sayesinde önemli ölçüde enerji sönmüleme, yatay yük taşıma kapasitesine sahiptir. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler, yatay yüklerin mevcut olduğu yüklenme durumunda yük taleplerinin bağ kirişinde meydana gelen şekildeğişimlere bağlı olarak sönmülendiği, yüksek elastik rijitlik ve süneklik kapasitesine sahip yapısal yatay yük taşıyıcı sistemlerdir.

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, TMMOB-İMO (2018) tarafından yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 Eğitim Elkitabı [2], “ÖRNEK Ç-3: TBDY 2018’e Göre Süneklik Düzeyi Yüksek Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevesi Bina Taşıyıcı Sisteminin Hesabı ve Tasarımı” başlığı altında boyutlandırılan bina mevcut bir bina olarak kabul edilmiş ve üzerinde araştırmalarda bulunulmuştur. Her iki ana doğrultuda yatay yük taşıyıcı sistemi süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan ve tasarımı TBDY 2018 9.8’e [1] uygun olarak gerçekleştirilen çalışmaya konu ofis binasının zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi uygulanarak deprem performansı değerlendirilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler (ZTADOA) için belirlenen 11 adet deprem yer hareketi TBDY 2018 2.5.2.1(b)’ye uygun olarak ölçeklendirilmiştir. TBDY 2018 5.7.2.1 [1] uyarınca, bina taşıyıcı sisteminin asal eksenleri (X ve Y) göz önünde tutularak toplam 22 adet ZTADOA gerçekleştirilmiştir. İç kuvvet ve şekildeğişim talepleri, her bir analizden elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır. Bu talepler, taban ve kat kesme kuvvetleri, görece kat ötelemeleri, kolon ve çaprazların dayanımları, bağ kirişlerinde meydana gelen kesme kuvveti – yerdeğişim ve

moment – dönme taleplerine ilişkin en büyük ortalama büyüklüklerdir. Elde edilen talepler doğrultusunda, TBDY 2018’de [1] dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler (DMÇÇÇ) için öngörülen kapasite tasarım ilkeleri ve performans hedefleri değerlendirilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Bu çalışma, dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler ile ilgili mevcut çalışmalar ışığında hazırlanmıştır. Faydalanılan mevcut çalışmaların bir kısmı bu bölümde sunulmuştur.

Bouwkamp ve diğ. [3], kısa ve düşey bağ kirişli dışmerkez çaprazlı çelik numuneler üzerinde deneysel ve nümerik bir çalışma yürütmüşlerdir. Şekildeğiştirmelere bağlı olarak, rijitlik kaybı ve pekleşme etkisinin dikkate alındığı nümerik analizlerin sonuçlarının deney sonuçları ile uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Çevrimsel davranış eğrileri elde edilen kısa ve düşey bağ kirişlerinin yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu ve kesme kuvveti etkileri altında gövde akma dayanımının iki katına kadar yük taşıyabildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Caprili ve diğ. [4], düşey ve yatay kısa bağ kirişli, dışmerkez çaprazlı, bir katlı ve tek açıklıklı iki adet çelik çerçeve numunede yatay yükler altında bağ kirişi davranışını deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmaya ek olarak, ilgili çerçevelere ait literatürdeki çalışmalara dayalı idealleştirilmiş analitik hesap modelleri oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada, tasarım için hesap kolaylığı sağlanması ve bağ kirişlerinin gerçek davranışına en uygun şekilde modellenmesi hedeflenmiştir.

Silva ve diğ. [5], dinamik yükler altında basit bazı çelik çerçevelerin doğrusal olmayan davranışlarını yığılı plastisite (plastik mafsal) yöntemini ile sayısal olarak incelemiştir. Sundukları sayısal örneklerle plastik mafsal modelinin dinamik yükler altında uygulanabilirliğini göstermişlerdir.

Popov ve diğ. [6], dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde bağ kirişlerinin boyutlandırılmasına ilişkin yapısal davranışı iyileştirmeye yönelik araştırmalarda bulunmuşlardır. Farklı kat sayısına sahip analitik modelleri dinamik analiz yöntemini uygulayarak incelemiştir. Üst katlarda kullanılacak yüksek kapasiteli bağ kirişlerinin yapı davranışını olumsuz yönde etkilediğini ve kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda ekonomik olmayan sonuçlar verdiğini belirlemiştir.

Bosco ve Rossi [7], kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda boyutlandırılan bir dışmerkez çaprazlı çelik yapıda hasar dağıtma kapasite katsayısı dağılımını incelemişlerdir. Kendi geliştirdikleri bu parametrenin yapıların sismik davranışına olan etkilerini araştırmışlardır. Dayanım fazlalığı katsayısı, hasar dağıtma kapasite katsayısı ve bağ kirişi plastik dönme değerleri arasında analitik bir ilişki tanımlamışlardır.

Koboevic ve David [8], kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda boyutlandırılan dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveli yüksek yapıların, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerle deprem yükleri altındaki davranışlarını irdelemişlerdir. Bu amaçla Kanada'da inşa edilecek farklı kat yüksekliklerindeki üç adet bina için sayısal analizler yürütmüşlerdir. Analizlerde tasarım spektrumu ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilen deprem yer hareketi kayıtları kullanılmıştır.

Durgun ve diğ. [9], dışmerkez çaprazlı bir çelik perde üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini uygulayarak perdeye ait davranışı incelemişlerdir. Çalışmada tasarım büyütme katsayısının ve kapasite tasarımı ilkelerinin yeterliliği araştırılmıştır.

Khan ve Bilal [10], farklı bağ kirişi uzunluklarına sahip benzer dışmerkez çaprazlı çelik yapılara ait yapısal analiz modelleri üzerinde 22 adet deprem yer hareketinin dikkate alındığı doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmişlerdir. Doğrusal olmayan kesit davranışını temsil eden plastik mafsal yöntemini kullanmışlardır. Bağ kirişi uzunluğunun taşıyıcı sistem davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Büyük [11], doğrusal analiz yöntemi ile kapasite tasarımı ilkelerine göre boyutlandırılan dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveli çok katlı bir yapıyı deprem yer hareketi ivme kayıtları altında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemini uygulayarak incelemiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarını karşılaştırarak kapasite tasarımı ilkelerini değerlendirmiştir.

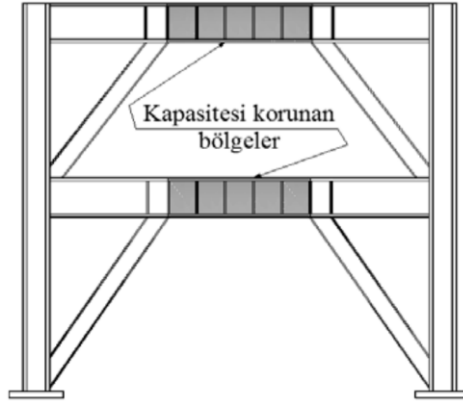
Esmaili [12], Kanada Deprem Yönetmeliği esas alınarak boyutlandırılan 4, 8 ve 14 katlı dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin deprem performansını incelemiştir. Doğrusal olmayan dinamik analizlerde, her bir yapı için ayrı ayrı ölçeklendirilen sekiz adet deprem yer hareketi ivme kaydı kullanmıştır.

Biradar ve diğ. [13], dayanıma göre tasarım ve performansa dayalı tasarım yöntemleri uygulayarak boyutlandıkları on katlı dışmerkez çaprazlı çelik çerçevenin, statik itme ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerini kullanarak deprem performansını değerlendirerek hesap yöntemlerini karşılaştırmışlardır.

Mortazavi ve diğ. [14], farklı sayıda kat adedine sahip, değişken bağ kirişi özellikleri gösteren çeşitli dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin deprem performansları üzerine araştırmalarda bulunmuşlardır. Yapıların deprem performansları belirlenirken, hedef tepki spektrumuna göre ölçeklendirilen 40 adet deprem yer hareketi kaydı kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda dayanım fazlalığı, görelî kat ötelemeleri ve kalıcı şekildeğişirmeler gibi büyüklükler değerlendirilmiştir.

2. MODEL BİNANIN TASARIMI

Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler, kapasite tasarım ilkeleri çerçevesinde bağ kirişlerinin elastik ötesi davranış gösterme kabiliyetine bağlı olarak deprem yüklerini sönümlediği esnada bağ kirişi dışında kalan taşıyıcı sistem elamanlarının elastik bölgede kalması esasına göre boyutlandırılmaktadır. TBDY 2018’de [1] dış merkez çaprazlı çelik çerçevelerin yalnızca yüksek sünek tasarımına izin verilmektedir. Bu çerçeve düzeninde bağ kirişleri kapasitesi korunan bölge olarak nitelendirilmektedir. Tipik çerçeve enkesiti ve kapasitesi korunan bölgeler Şekil 2.1’de verilmiştir. Yüksek sünekliğin eleman bazında sağlanabilmesi amacıyla yatay yük taşıyan kolon, çapraz, bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü ve bağ kirişi gibi tüm çerçeve elemanlarının başlık genişliği/kalınlığı, gövde yüksekliği/kalınlığı ve çap/kalınlık oranlarının TBDY 2018 Tablo 9.3’te [1] verilen yüksek sünek kesit sınır değerlerini aşmayacaktır. Süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin (DMÇÇÇ) boyutlandırılmasına ilişkin uygulanacak kurallar TBDY 2018 9.8’de [1] verilmiştir.



Şekil 2.1 : Tipik dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve [1].

Bu çalışma kapsamında, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz ve davranışa bağlı olarak değerlendirmeye konu bina Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 Eğitim Elkitabı [2], “ÖRNEK Ç-3: TBDY 2018’e Göre Süneklik Düzeyi Yüksek Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevesi Bina Taşıyıcı Sisteminin Hesabı ve Tasarımı” başlığı altında boyutlandırılan binadır, [2]. Planda 588 m² oturum alanına sahip söz konusu binanın, yedi katlı bir ofis binası olarak hizmet vermesi öngörülmüştür.

2.1 Taşıyıcı Sistem Tanımı

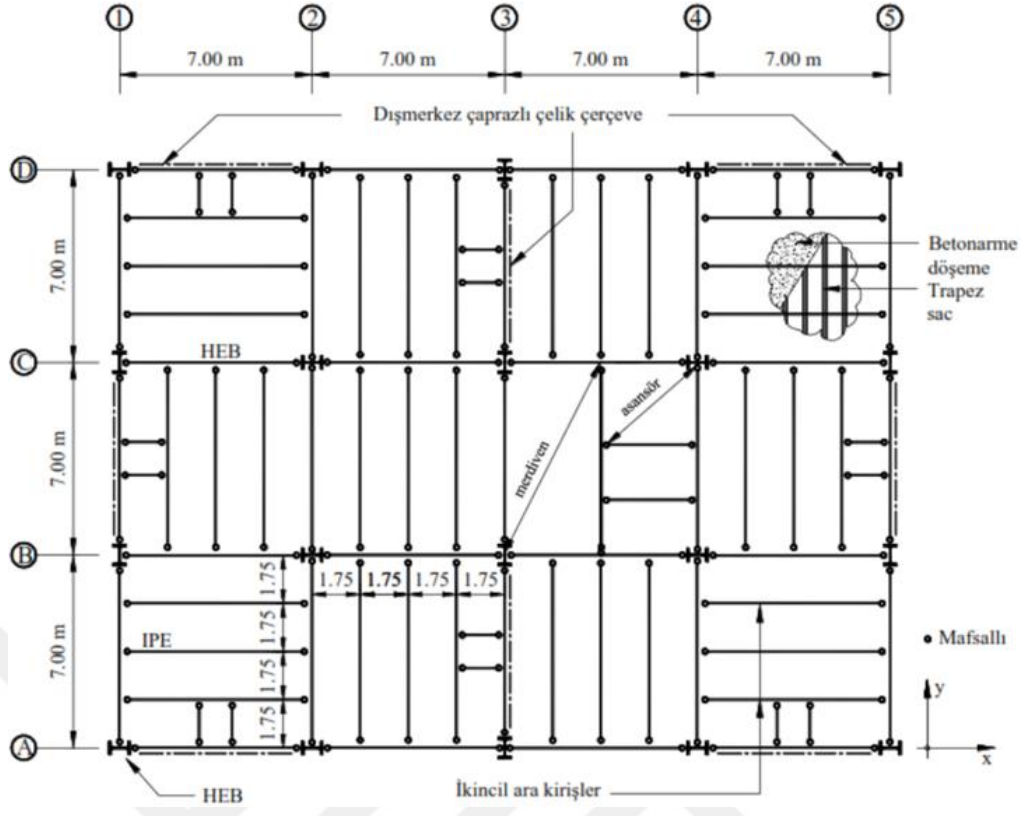
Bu çalışma kapsamında incelemeye tabi binanın her iki ana doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı sistemi süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerden oluşmaktadır. Kat döşemeleri, çelik kirişlere başlıklı çelik ankrajlar vasıtasıyla mesnetlenen trapez sac levhalar üzerindeki yerinde dökme betonarme döşeme sistemiyle oluşturulmuştur. Döşeme yüklerinin aktarıldığı, ana kirişlere mafsalı olarak bağlanan ikincil ara kirişler 1.75m ara ile teşkil edilmiştir. Yapı akslarına konumlandırılan ana çerçeve kirişlerinin kolonlara bağlantısı mafsalıdır. Çaprazlar, üst uçlarında bulunan bağ kirişlerine rijit, alt uçlarında bulunan kolon – kiriş birleşim bölgesine mafsalı olarak bağlanmaktadır. Kolonların temele bağlantısı her iki ana eksenlerinde mafsalı olarak teşkil edilmiştir. Yapıda, bağ kirişi kesitleri ve boyu (e) katlar arasında farklılık göstermektedir. Yapıda bulunan kolon ve çaprazlar S355JR (EN 10025), kirişler S275JR (EN 10025) sınıfı malzemeye sahiptir. Binaya ait tipik kat planı Şekil 2.2’de, tipik sistem enkesiti (1 aksı çerçevesi) Şekil 2.3’te, dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve elemanlarının enkesit profilleri Çizelge 2.1’de ve ikincil elemanlar Çizelge 2.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1 : Yatay yük taşıyıcı sistem kesit bilgileri.

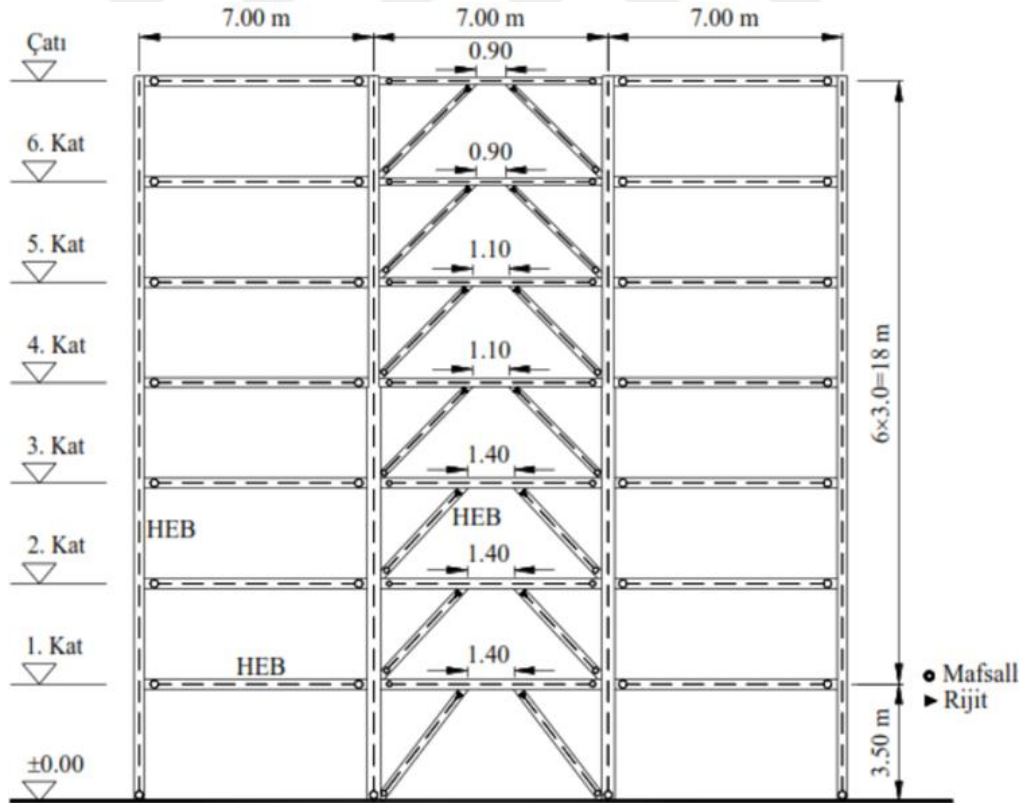
Kat	Kesitler		
	Kiriş	Çapraz	Kolon
7	HE200B	HE180B	HE360B
6	HE200B	HE180B	HE360B
5	HE240B	HE200B	HE360B
4	HE240B	HE200B	HE400B (3 aksı HE450B)
3	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)
2	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)
1	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)

Çizelge 2.2 : İkincil elemanların enkesit bilgileri.

Eleman	Kesit
Tali kirişler (tüm katlarda aynı)	IPE300
Ana kirişler (tüm katlarda aynı)	HE300B



Şekil 2.2 : Tipik kat planı [2].



Şekil 2.3 : Tipik sistem enkesiti (1 aksı çerçevesi) [2].

2.2 Sabit ve Hareketli Yükler

Üst yapıya gelen statik yükler bu bölümde açıklanmıştır. Hesaplarda, merdiven ve asansör bölgesindeki sabit ve hareketli yüklerin döşemenin diğer bölgelerindeki sabit ve hareketli yüklere eşit olduğu varsayılmıştır.

2.2.1 Zati yükler

Döşemeler üzerinde bulunan sabit yükler Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'te verilmiştir. Taşıyıcı sistem elemanlarının zati ağırlıkları döşeme üzerinde yayılı yük olarak dikkate alınmıştır, ilgili tablolarda sunulmuştur.

Çizelge 2.3 : Normal katlar döşeme yükleri bilgileri.

Nitelik	Yük	Birim
Kaplama	0.5	kN/m ²
Trapez sac + betonarme döşeme	2.1	kN/m ²
Asma tavan + tesisat	0.5	kN/m ²
Bölme duvarlar	1.0	kN/m ²
Çelik konstrüksiyon (kolonlar dahil)	0.5	kN/m ²
TOPLAM	4.9	kN/m²

Çizelge 2.4 : Çatı katı döşeme yükleri bilgileri.

Nitelik	Yük	Birim
Kaplama	0.5	kN/m ²
İzolasyon	0.4	kN/m ²
Trapez sac + betonarme döşeme	2.1	kN/m ²
Asma tavan + tesisat	0.5	kN/m ²
Çelik konstrüksiyon	0.5	kN/m ²
TOPLAM	4.0	kN/m²

Döşeme üzerindeki düzgün yayılı yüklere ek olarak çevre kirişlere; normal katlarda dış cephe duvar ağırlığını temsil etmek üzere 3.0 kN/m, gezilebilir çatı katında parapet ağırlığını temsil etmek üzere 2.0 kN/m düzgün yayılı çizgisel yük dikkate alınmıştır.

2.2.2 Hareketli yükler

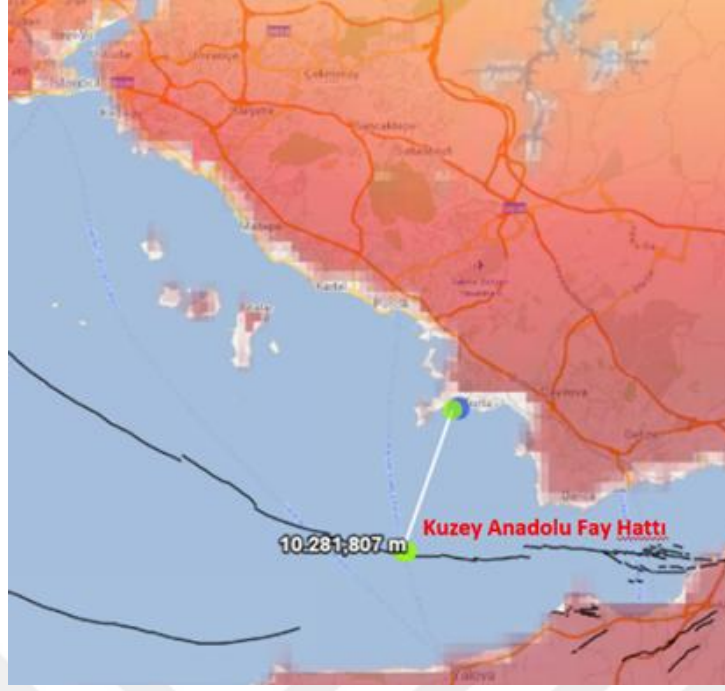
İnceleme kapsamındaki binanın kullanım amacı işyeridir. Yapı kullanım amacına uygun olarak, hareketli yükler çatı katında ve normal katlarda 2.0 kN/m² olarak dikkate alınmıştır.

2.2.3 Kar yükü

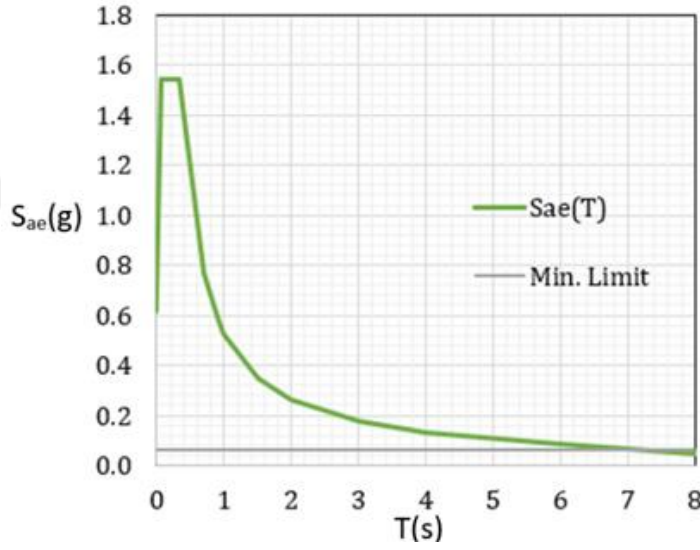
İstanbul geneli için yerdeki kar yüksekliği meteorolojik verilere göre en fazla 75 cm olarak verilmektedir. Fakat, bu çalışma kapsamında, en fazla kar yüksekliği 80 cm olarak dikkate alınmıştır. Karın ortalama birim hacim ağırlığı 2.0 kN/m^3 olmak üzere, kullanılabilir çatı alanında beklenen en fazla kar yükü 1.3 kN/m^2 hesaplanmıştır.

2.3 Depremsellik

Çalışma konusu kapsamında incelenen dışmerkez çaprazlı çelik yapının ofis (işyeri) binası olarak hizmet vermesi öngörülmektedir. Binanın coğrafi konumu, İstanbul/Tuzla bölgesi içinde olmak üzere, enlem ve boylam değerleri sırasıyla, 40.8140 ve 29.2903 olarak seçilmiştir. Yapının diri faylara göre konumu Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Binanın ZC yerel zemin sınıfı üzerine inşa edileceği varsayılmıştır. TBDY 2018 Tablo 3.1 ışığında kullanım amacına uygun, Bina Kullanım Sınıfı (BKS), 3 ve Bina Önem Katsayısı (I), 1 olarak dikkate alınmıştır. Deprem Tasarım Sınıfı'nın (DTS) belirlenebilmesi amacıyla Türkiye Deprem Tehlike Haritaları [15] kullanılarak, 50 yılda aşılma olasılığı 10% olan deprem (DD-2) yer hareket düzeyine ait parametreler elde edilmiştir. Binanın konumu, zemin sınıfı ve yer hareket düzeyine bağlı olarak Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı (S_s) 1.286, 1.0 Saniye Periyot İçin Harita Spektral İvme Katsayısı (S_1) 0.351, Kısa Periyot Spektral İvme Katsayısı (S_{DS}) 1.543, 1.0 Saniye Periyot İçin Spektral İvme Katsayısı (S_{D1}) 0.526 ve Hedef Spektrum Köşe Periyotları (T_A ve T_B) sırası ile 0.068s ve 0.341s olarak elde edilmiştir. Depremsellik parametrelerine bağlı olarak elde edilen yatay elastik ivme spektrumu Şekil 2.5'te verilmiştir. TBDY 2018 Tablo 3.2 [1] uyarınca Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) 1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.4 : Binanın aktif fay hattına göre konumu.



Şekil 2.5 : Yatay elastik tasarım spektrumu.

2.4 Taşıyıcı Sistem Analizleri

Bu bölümde, bu çalışma kapsamında incelenen binanın doğrusal analiz ve tahkikleri için hazırlanan matematik hesap modeline ilişkin analitik modelleme kabulleri ve doğrusal analiz sonuçları verilmiştir. Eşdeğer deprem yükü yöntemi esas alınarak gerçekleştirilen detaylı hesaplara Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 Eğitim Elkitabı [2], “ÖRNEK Ç-3: TBDY 2018’e Göre Süneklik Düzeyi Yüksek Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçeveli Bina Taşıyıcı Sisteminin Hesabı ve Tasarımı”

başlığında ulaşılmaktadır. Doğrusal analizler Computers and Structures Incorporation (CSI) şirketi tarafından üretilen ve bina türü yapıların sonlu elemanlar analizlerinin yapılmasında oldukça yaygın olarak kullanılan ETABS v21.0.1 [16] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İncelenen binanın malzeme, eleman enkesitleri, elemanların uç bağlantı koşulları, mesnetler, statik yükler ve yatay elastik ivme spektrumu gibi mevcut durum özellikleri ETABS bilgisayar yazılımına tanıtarak matematik hesap modeli oluşturulmuştur.

2.4.1 Bina performans hedefleri ve hesap yöntemi

Deprem Tasarım Sınıfı'na bağlı olarak yeni yapılacak çelik binalar için deprem performans hedefleri ve uygulanacak tasarım yaklaşımı Çizelge 2.5'te sunulmuştur. İncelenen binanın Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, tasarım yaklaşımı Dayanıma Göre Tasarım (DGT), performans hedefi DD-2 deprem yer hareket düzeyinde "Kontrollü Hasar" olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.5 : Yeni yapılacak çelik binalar performans hedefleri ve tasarım yaklaşımları (BYS≥2) [1].

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-3	-	-	SH	ŞGDT
DD-2	KH	DGT	KH	DGT
DD-1	-	-	KH	ŞGDT

Dayanıma Göre Tasarıma yaklaşımına göre, tasarıma esas eleman iç kuvvetlerinin elde edilebilmesi amacıyla azaltılmış deprem yükleri altında binanın doğrusal deprem hesabı yapılır. Doğrusal analizlere bağlı olarak elde edilen deprem yükünün azaltılmasına ilişkin uygulanan deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$ denklem 2.1 ve denklem 2.2'de verilmiştir. Süneklik düzeyi yüksek çelik bina taşıyıcı sistemleri için taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D) TBDY 2018 Tablo 4.1'de [1] tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında incelenen bina için $I=1$, $R=8$, $D=2.5$ olarak belirlenmiştir.

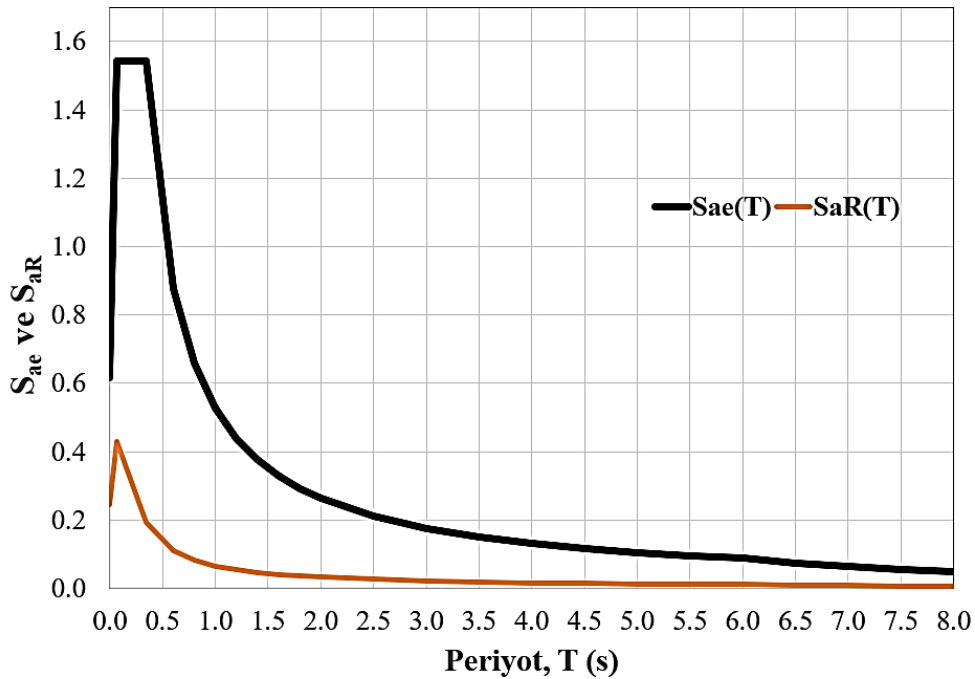
$$R_a(T) = \frac{R}{I} \quad T > T_B \quad (2.1)$$

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right) \frac{T}{T_B} \quad T \leq T_B \quad (2.2)$$

Doğrusal analize dayalı deprem yüklerinin yatay elastik tasarım spektrumu kullanılarak hesap edilmesi modal hesap yöntemidir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için binanın asal eksenlerinde yeterli titreşim modu sayısı dikkate alınarak, her bir mod için hesap edilen taban kesme kuvveti modal etkin kütlelerinin toplam yapı kütlelerinin 95%'inden daha az olmayacaktır. Bu çalışma kapsamında yürütülen doğrusal analizlerde mod birleştirme yöntemi kullanılmıştır. Binanın asal eksenlerinde, yeterli titreşim modu sayısı altında toplam modal etkin kütleler 95%'den büyüktür. Mod birleştirme yöntemi ile deprem hesabında, yatay doğrultuda azaltılmış deprem yüklerinin hesaplanması için kullanılacak azaltılmış tasarım ivme spektrumunun yapının ilgili doğrultusunda hakim modal davranışa bağlı olarak elde edilen T doğal titreşim periyodu için Azaltılmış Tasarım Spektral İvmesi $S_{aR}(T)$ ile hesap edilmektedir. İlgili hesap denklem 2.6'da verilmiştir.

$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)} \quad (2.3)$$

Yapının ana eksenlerinde, yukarıda bahsi geçen kurallar ve yönlendirmeler ışığında elde edilen yatay elastik ve inelastik tasarım spektrumları Şekil 2.6'da sunulmuştur.



Şekil 2.6 : Yatay elastik/inelastik tasarım spektrumları.

2.4.2 Hesap ve modelleme kabulleri

Modelleme, analiz ve tahkiklerde ETABS v21.0.1 [16] bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Doğrusal analiz için oluşturulan matematik hesap modelinde ve hesaplarda dikkate alınan yaklaşım ve kabuller aşağıda sunulmuştur.

- Kolon, çapraz ve kiriş gibi elemanlar her düğüm noktasında altı adet serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar olarak modellenmiştir.
- Döşeme plağı, sınırlı ve benzer büyüklükteki dört düğüm noktasına sahip ve her düğüm noktası altı serbestlik dereceli kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir.
- Rijit diyafram tanımı yapılmamıştır.
- Deprem yükleri altındaki davranış incelenmesi sebebiyle, betonarme döşeme plağını temsilen kullanılan kabuk elemanların etkin kesit rijitlikleri kullanılmıştır. Döşeme plağı için öngörülen etkin kesit rijitliği çarpanları TBDY 2018 Tablo 4.2’de [1] sunulmuştur.
- Sönüm oranı 5% kabul edilmiştir.
- Zati ağırlıklar ve azaltılmış hareketli ağırlıklar deprem yüklerinin hesabına ilişkin bina kütesini oluşturmaktadır. Yapı kullanım amacına göre öngörülen hareketli yük katılım katsayıları TBDY 2018 Tablo 4.3’te [1] sunulmuştur. Azaltılmış hareketli yükler hesap edilirken, yapının kullanım amacı ile uyumlu olarak hareketli yük katılım katsayısı n , 0.3 olarak dikkate alınmıştır.
- Düşey deprem etkisi, TBDY 2018 4.4.3.2’ye [1] uygun olarak $E_d^{(Z)} \approx (2/3)S_{DS}G$ şeklinde dikkate alınmıştır.
- Döşeme betonunun elastisite modülü E_c , 33000 MPa olarak dikkate alınmıştır.
- Yapısal çelik malzeme elastisite modülü 200000 MPa olarak dikkate alınmıştır.

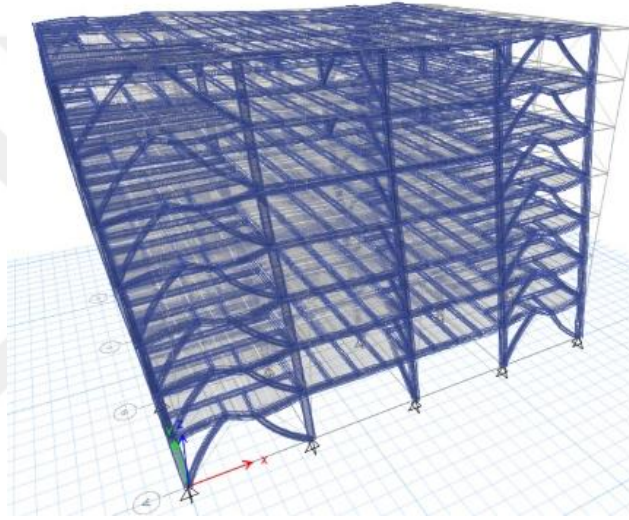
2.4.3 Modal analiz sonuçları

Bu bölümde, yapının mevcut dinamik özellikleri sunulmuştur. Yapının dinamik özellikleri Çizelge 2.6’da özetlenmiştir. İlgili tablo ışığında her iki ana doğrultu için toplam modal kütle katılım oranı 95%’in üzerinde olduğu görülmektedir. İncelenen

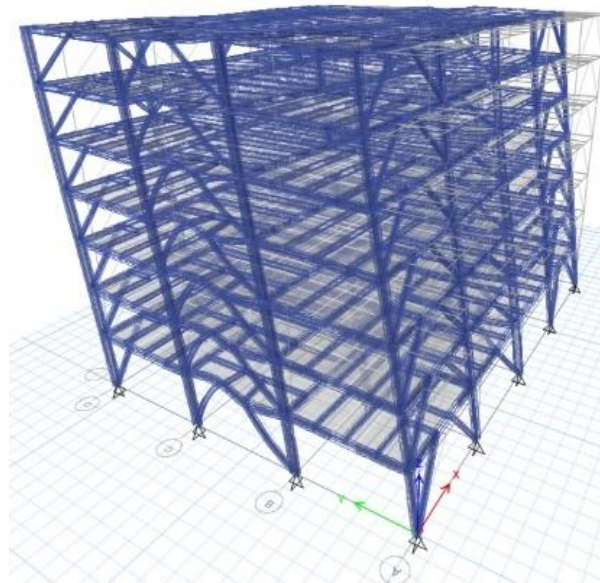
binanın hakim titreşim periyotlarına ait mod şekilleri Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 : Modal kütle katılım oranları, ETABS [16].

Mod (No)	Periyot (s)	Modal Kütle Katılım Oranları			Toplam Kütle Katılım Oranları		
		UX	UY	RZ	UX	UY	RZ
1	0.87	0.81	0	0	0.81	0	0
2	0.86	0	0.81	0	0.81	0.81	0
3	0.65	0	0	0.81	0.81	0.81	0.81
4	0.31	0.14	0	0	0.95	0.81	0.81
5	0.30	0	0.14	0	0.95	0.95	0.81
6	0.23	0	0	0.14	0.95	0.95	0.95



Şekil 2.7 : UX mod şekli ($T_x=0.87s$).



Şekil 2.8 : UY mod şekli ($T_y=0.86s$).

2.4.4 Taban kesme kuvveti kontrolü

Mod birleştirme yöntemi ile yatay elastik tasarım spektrumuna bağlı olarak ve deprem yükü azaltma katsayısı dikkate alınarak elde edilen taban kesme kuvvetlerinin, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile elde edilen taban kesme kuvvetlerine oranına bağlı olarak TBDY-2018 4.8.4'te [1] belirtilen şekliyle uyumlu ölçeklendirme bu bölümde araştırılmıştır. Yapıda, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 Eğitim Elkitabı [2], “ÖRNEK Ç-3: TBDY 2018’e Göre Süneklik Düzeyi Yüksek Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçeve Bina Taşıyıcı Sisteminin Hesabı ve Tasarımı” başlığında sunulan eşdeğer deprem yükü yöntemine göre yürütülen çalışmalar neticesinde TBDY 2018’de [1] tanımlanmış olan A1, B2 ve B3 türü düzensizliklerden hiçbirinin bulunmadığı bilinmektedir. γ_E eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayısının belirlenmesinde kullanılan ampirik katsayıdır. Eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayısının $\beta_{tE}^{(X,Y)}$ hesabı denklem 2.4’te sunulmuştur. Burada, eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplanan toplam eşdeğer deprem yükü $V_{tE}^{(X,Y)}$ ve mod birleştirme yöntemine göre elde edilen toplam deprem yükü $V_t^{(X,Y)}$ ile ifade edilmektedir. Yapıda, deprem yükleri hesaplanırken toplam kullanılan sismik kütle $2441.55 \text{ kNs}^2/\text{m}$ olarak elde edilmiştir. Eşdeğer deprem yükü yöntemi ve mod birleştirme yöntemi ile hesaplanan taban kesme kuvvetleri ve eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayıları ($\beta_{tE}^{(X,Y)}$) Çizelge 2.7’de verilmiştir. Hesaplarda, güvenli tarafta kalınarak mod birleştirme yöntemi ile elde edilen taban kesme kuvveti azaltılmamıştır.

$$\beta_{tE}^{(X,Y)} = \frac{\gamma_E V_{tE}^{(X,Y)}}{V_t^{(X,Y)}} \quad (2.4)$$

Çizelge 2.7 : Taban kesme kuvvetleri ve kuvvet büyütme katsayıları.

Büyüklik	Sembol	Birim	Doğrultu X	Doğrultu Y
Hakim periyot	T	sn	0.87	0.86
Yapı sismik ağırlığı	m	kN	23952	23952
Yatay elastik tasarım spektral ivme katsayısı	$S_{ae}(T)$	-	0.61	0.62
Deprem yükü azaltma katsayısı	$R_a(T)$	-	8	8
Azaltılmış tasarım spektral ivme katsayısı	$S_{aR}(T)$	-	0.08	0.08
Eşdeğer deprem yükü	V_{tE}	kN	1832	1839
Mod birleştirme yöntemi taban kesme kuvveti	V_t	kN	1708	1730
Ampirik katsayı	γ_E	-	0.80	0.80
Taban kesme kuvveti büyütme katsayısı	$\beta_{tE}^{(X,Y)}$	-	0.86	0.85

2.4.5 Göreli kat öteleme oranları

Bu bölümde göreli kat öteleme değerlerinin ve göreli kat öteleme oranlarının hesabı sunulmaktadır. Azaltılmış deprem yükleri altında, birbirini takip eden katlar arasında yatay yerdeğiştirme farkı azaltılmış göreli kat ötelemesi, Δ_i ile ifade edilmektedir. Azaltılmış göreli kat öteleme değerlerinin hesabı denklem 2.5'te sunulmuştur. Bu denklemde bulunan u_i ve u_{i-1} ifadeleri sırası ile binanın i 'inci ve $(i-1)$ 'inci katlarında azaltılmış deprem yükleri altındaki yatay yerdeğiştirme değerleridir.

$$\Delta_i = u_i - u_{i-1} \quad (2.5)$$

Hesap yapılan ilgili katta, etkin göreli kat ötelemesi δ_i azaltılmamış deprem yükleri altında hesaplanmaktadır. Etkin göreli kat ötelemesinin hesabı denklem 2.6'da sunulmuştur.

$$\delta_i = \frac{R}{I} \Delta_i \quad (2.6)$$

Mod birleştirme yöntemi ile hesaplanan deprem yükleri altında meydana gelen yatay yerdeğiştirmeler, göreli kat öteleme değerleri ve etkin göreli kat ötelemesi ve göreli kat öteleme oranları gibi çıktılar ve hesap sonuçları Çizelge 2.8'de verilmiştir. İlgili tabloda, her bir ardışık kat döşemesinin üst kotları arasındaki düşey mesafe kat yüksekliği olarak alınmış, h_i ile ifade edilmiştir. Göreli kat öteleme oranları (GKÖO) etkin göreli kat ötelemesi değerinin kat yüksekliğine bölünmesiyle elde edilmiştir (Denklem 2.7).

$$GKÖO = \frac{\delta_i}{h_i} \quad (2.7)$$

Çizelge 2.8 : Binanın en elverişsiz göreli kat öteleme oranları.

Kat	h_i (mm)	u_i (mm)	Δ_i (mm)	δ_i (mm)	GKÖO
7	3000	24.34	2.55	20.40	0.007
6	3000	21.79	3.28	26.24	0.009
5	3000	18.51	3.68	29.44	0.010
4	3000	14.83	3.93	31.44	0.010
3	3000	10.90	3.58	28.64	0.010
2	3000	7.32	3.41	27.28	0.009
1	3500	3.91	3.91	31.28	0.009
Mesnet	-	0	0	0	-

2.5 Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Boyutlandırılması

Bu bölümde kolon, çapraz, bağ kirişi, bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü elemanlarına ait dayanıma göre tasarım ve kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda boyutlandırma sonuçları sunulmuştur. Kapasite tasarımı, elastik ötesi sünek davranışın taşıyıcı sistem üzerinde açıkça tanımlanmış elamanlarda sınırlandırılması ve bu davranış ile uyumlu olarak kapasite elemanları dışında kalan tüm taşıyıcı sistem elemanlarının yeterli dayanım kapasitesine sahip olmasını hedefleyen boyutlandırma yaklaşımıdır. İnceleme kapsamındaki dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveli bina için kapasite elemanları bağ kirişler olarak belirlenmiştir. İlgili çerçeve düzeninde bağ kirişi dışında kalan tüm taşıyıcı sistem elemanlarının, bağ kirişi kapasitesine ulaştığında elastik bölgede ve yeterli dayanım kapasitesinde olması hedeflenmiştir. Her bir elemanın tasarımı TBDY 2018’de [1] verilen yük birleşimleri, kural ve tanımlar ışığında gerçekleştirilmiştir. Eşdeğer deprem yükü hesabına dayanan detaylı boyutlandırma hesapları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 Eğitim Elkitabı [2], “ÖRNEK Ç-3: TBDY 2018’e Göre Süneklik Düzeyi Yüksek Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçeveli Bina Taşıyıcı Sisteminin Hesabı ve Tasarımı” başlığında verilmiştir. Mod birleştirme yöntemi ile deprem hesabına dayalı olarak, her bir taşıyıcı sistem elemanına ait nihai boyutların hesap özeti aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

2.5.1 Bağ kirişi

Bağ kirişlerinin TBDY 2018 [1] boyutlandırmaya esaslarına uygun tasarım hesap özeti bu bölümün konusunu oluşturmaktadır. Bağ kirişleri, şekildeğiştirme kapasiteleri sayesinde deprem yüklerinin önemli ölçüde sönmüldüğü taşıyıcı sistem elemanlarıdır. Çerçevenin elastik ötesi davranış kapasitesi bağ kirişinin boyu ile doğrudan ilgilidir. Bağ kirişi boyunun (e) çerçeve açıklığına (L) oranı arttıkça çerçeve rijitliği azalmakta ve plastik şekildeğiştirme kapasitesini önemli ölçüde kaybetmektedir. Bağ kirişinin kesme kuvveti dayanımı, kesme kuvveti talepleri ile kiriş gövdesinde akma ve eğilme momenti talepleri altında akma sınır durumlarından elde edilen en küçük kesme kuvveti dayanımı olarak hesaplanmaktadır. Bağ kirişinin kesme kuvveti dayanımı denklem 2.8 – denklem 2.10 aralığında belirtildiği şekilde ve yük ve dayanım katsayıları ile tasarım (YDKT) esaslarına bağlı olarak dayanım azaltma katsayısı $\Phi_v = 0.9$ dikkate alınarak, TBDY 2018 9.2.5’te [1] verilen deprem yüklerini içeren yük birleşimleri esas alınarak hesaplanmaktadır.

$$V_n = \min[V_p; 2M_p/e] \quad (2.8)$$

$$\frac{P_r}{P_y} \leq 0.15 \text{ için } V_p = 0.6F_y A_w \text{ ve } M_p = F_y W_p \quad (2.9)$$

$$\frac{P_r}{P_y} > 0.15 \text{ için } V_p = 0.6F_y A_w \sqrt{1 - (P_r/P_y)^2} \text{ ve } M_p = F_y W_p \left[\frac{1 - P_r/P_y}{0.85} \right] \quad (2.10)$$

Bu denklemlerde; karakteristik kesme kuvveti dayanımı V_n , plastik kesme kuvveti dayanımı V_p , karakteristik plastik eğilme dayanımı M_p , gerekli eksenel kuvvet dayanımı P_r , akma sınır durumunda eksenel kuvvet dayanımı P_y , yapı çeliğinin karakteristik akma gerilmesi F_y , gövde enkesit alanı A_w , plastik mukavemet momenti W_p ile ifade edilmektedir. Çekme veya basınç akma sınır durumlarında eksenel kuvvet dayanımı P_y hesaplanırken dayanım azaltma katsayısı kullanılmamaktadır.

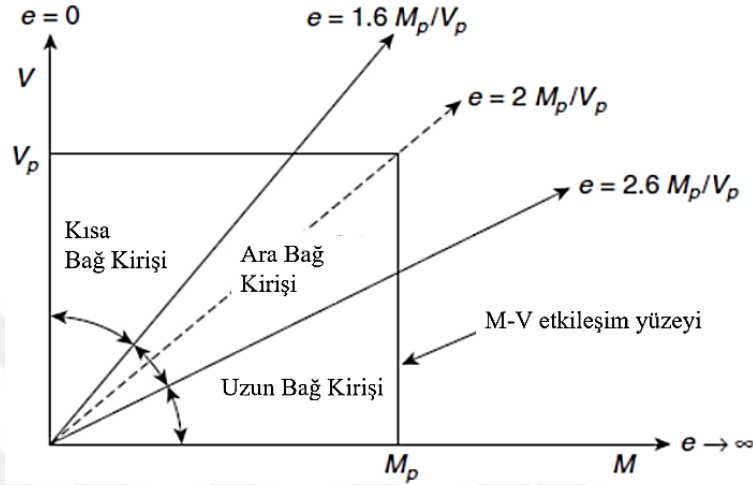
Görelî kat öteleme açısı θ_p görelî kat ötelemelerine bağılı olarak hesaplanmaktadır. Görelî kat öteleme açısına bağılı olarak hesaplanan, bağı kirişî dönme açısı γ_p bağı kirişî davranışına bağılı olarak sınırlandırılmaktadır. Görelî kat öteleme açısı ve bağı kirişî dönme açısı hesabı sırası ile denklem 2.11 ve denklem 2.12'de verilmiştir. R taşıyıcı sistem davranış katsayısını, Δ_i görelî kat ötelemesini, I bina önem katsayısını, h_i kat yüksekliğini, L çerçeve açıklığını ve e bağı kirişî boyunu ifade etmektedir.

$$\theta_p = \frac{R \Delta_i}{I h_i} \quad (2.11)$$

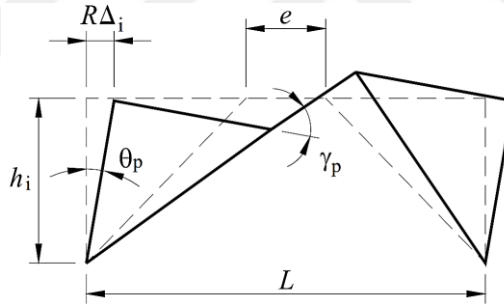
$$\gamma_p = \frac{L}{e} \theta_p \quad (2.12)$$

Bağı kirişî boyu (e) ve kesit kapasiteleri V_p ve M_p doğrusal olmayan şekildeğıştirmelerin meydana geliş biçimlerini belirlemektedir. Bağı kirişî boyunun $1.6M_p/V_p$ 'den küçük olduğu durumlarda, bağı kirişî kısa bağı kirişî olarak isimlendirilmektedir. Kısa bağı kirişlerinde plastik şekildeğıştirmeler kesme kuvveti etkilerine bağılı olarak enkesit gövdesinin akması ile gerçekleşmektedir. Kısa bağı kirişlerinde bağı kirişî dönme açısının 0.08 radyan sınır değerini aşmayacaktır. Bağı kirişî boyunun $2.6M_p/V_p$ 'den büyük olduğu durumlarda, bağı kirişî uzun bağı kirişî olarak isimlendirilmektedir. Uzun bağı kirişlerinde elastik ötesi şekildeğıştirmeler eğilme momenti etkisinde kesit başlığında akma ile gerçekleşmektedir. Bağı kirişî

dönme açısı uzun bağ kirişlerinde 0.02 radyan sınır değeri içerisinde kalacaktır. Bağ kirişi uzunluğunun bahsi geçen iki sınır değer arasında bulunduğu durumlarda doğrusal interpolasyon yapılmaktadır. Bağ kirişi uzunluğunun kesit davranışına olan etkisi Şekil 2.9’da verilmiştir. Yatay yük altındaki tipik çerçeve davranışı Şekil 2.10’da sunulmuştur.



Şekil 2.9 : Bağ kirişi boyunun isimlendirme ve davranışa etkisi [11].



Şekil 2.10 : Göreli kat öteleme açısı ve bağ kirişi dönme açısı [1].

İncelemeye tabi binanın bağ kirişleri katlar arasında kesit ve boy farklılıkları göstermektedir. Bağ kirişlerinin kat bazında boyları, malzeme bilgileri, kesit bilgileri ve kesit sünekliği kontrolleri Çizelge 2.9’da verilmiştir. Kiriş olarak kullanılan “H” enkesitlerin yüksek sünek koşulları sağlayabilmesi için malzemesi ile uyumlu olarak, TBDY 2018 Tablo 9.3 [1] uyarınca; h enkesit gövde yüksekliğinin t_w enkesit kalınlığına oranı 66.1 sınır değerini ve B enkesit genişliğinin başlık kalınlığının iki katına $2t_f$ oranı 8.1 sınır değerini aşmayacaktır. Tablodan görüleceği üzere, tüm katlarda bulunan bağ kirişleri yüksek sünek enkesit sınır şartlarını sağlamaktadır. Bağ kirişi enkesitlerinin plastik kesme kuvveti dayanımı V_p , karakteristik plastik eğilme dayanımı M_p , karakteristik kesme kuvveti dayanımı V_n gibi kapasitelerin hesap özeti ve bağ kirişi kapasitesini belirleyen davranış Çizelge 2.10’da sunulmuştur. Elde edilen

verilere göre, tüm bağ kirişlerin kısa bağ kirişi olduğu ve kesme kuvveti etkisinde gövde akmasına bağlı davranış sergilediği tayin edilmiştir.

Çizelge 2.9 : Bağ kirişlerin malzeme ve kesit bilgileri.

Kat	Kesit	Malzeme	b (mm)	h (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	Başlık (b/2t _f)	Gövde (h/t _w)	Kesit Kontrolü
7	HE200B	S275	200	200	9	15	6.7	18.9	Yüksek Sünek
6	HE200B	S275	200	200	9	15	6.7	18.9	Yüksek Sünek
5	HE240B	S275	240	240	10	17	7.1	20.6	Yüksek Sünek
4	HE240B	S275	240	240	10	17	7.1	20.6	Yüksek Sünek
3	HE300B	S275	300	300	11	19	7.9	23.8	Yüksek Sünek
2	HE300B	S275	300	300	11	19	7.9	23.8	Yüksek Sünek
1	HE300B	S275	300	300	11	19	7.9	23.8	Yüksek Sünek

Çizelge 2.10 : Bağ kirişlerinde kapasite hesapları ve davranış.

Kat	Kesit	Malzeme	e (mm)	M _p (kNm)	V _p (kN)	V _n (kN)	1.6M _p /V _p (mm)	Kapasite Davranışı
7	HE200B	S275	900	177	252	252	1120	Kesme Akması
6	HE200B	S275	900	177	252	252	1120	Kesme Akması
5	HE240B	S275	1100	290	340	340	1360	Kesme Akması
4	HE240B	S275	1100	290	340	340	1360	Kesme Akması
3	HE300B	S275	1400	514	476	476	1730	Kesme Akması
2	HE300B	S275	1400	514	476	476	1730	Kesme Akması
1	HE300B	S275	1400	514	476	476	1730	Kesme Akması

Depremlerle etkileri içeren yük birleşimleri altında bağ kirişlerinde meydana gelen en elverişsiz kesme kuvveti talepleri, karakteristik kesme kuvveti kapasiteleri, taleplerin kapasitelere oranı, bağ kirişi dışında kalan taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırılmasında esas alınacak tasarım büyütme katsayısı (V_n/V_e), yatay yerdeğiştirmelere bağlı olarak denklem 2.11 ve denklem 2.12 kullanılarak hesaplanan bağ kirişi dönme açısı talepleri ve bağ kirişi kapasite davranışına bağlı olarak belirlenen plastik dönme açısı sınırlarının kontrolü Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Çizelge 2.11 : En elverişsiz bağ kiriş iç kuvvetleri, etki/kapasite dağılımı, tasarım büyütme katsayısı ve bağ kirişi dönme açısı.

Kat	Kesit	L (mm)	e (mm)	V _e (kN)	V _n (kN)	Etki/Kapasite	V _n /V _e	γ _p (rad)	Dönme Sınırı	Dönme Kontrolü
7	HE200B	7000	900	85	252	0.34	2.98	0.053	0.08	OK
6	HE200B	7000	900	114	252	0.45	2.21	0.068	0.08	OK
5	HE240B	7000	1100	164	340	0.48	2.08	0.062	0.08	OK
4	HE240B	7000	1100	179	340	0.53	1.90	0.067	0.08	OK
3	HE300B	7000	1400	217	476	0.46	2.19	0.048	0.08	OK
2	HE300B	7000	1400	218	476	0.46	2.18	0.045	0.08	OK
1	HE300B	7000	1400	245	476	0.52	1.94	0.045	0.08	OK

2.5.2 Bağ kirişi dışında kalan kiriş bۆlümü

Bağ kirişi dışında kalan kiriş bۆlümü (BKDKKB) boyutlandırılırken, deprem y¼klerini içeren y¼k birleşimleri altında meydana gelen en elverişsiz iç kuvvetler elde edilir. Elde edilen iç kuvvetlerin deprem y¼klerinden kaynaklanan bileşeni, bağ kirişi boyunca bağlı ۆngör¼len davranışla uyumlu olarak hesaplanan karakteristik kesme kuvveti dayanımının bağ kirişinde meydana gelen tasarım kesme kuvvetine oranı V_n / V_e olmak üzere, elde edilen tasarım büy¼tme katsayısı ile uyumlu olacak şekilde arttırılmaktadır. Deprem etkilerini içeren y¼k birleşimleri altında meydana gelen taleplere bağlı olarak BKDKKB boyutlandırması için gerekli dayanımının belirlenmesinde, kapasite tasarım ilkeleri gereği, deprem etkilerinin tasarım büy¼tme katsayısına ek olarak; kirişlerin betonarme dۆřemeler ile birlikte çalıştığı durumda bağ kirişinin elastik ötesi davranışına sebep olan y¼klemenin $1.1 R_y$ katı ile, diğer durumlarda ise $1.25R_y$ katı ile deprem talepleri büy¼t¼lmektedir. R_y , olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını ifade etmektedir. Malzeme sınıfına bağlı olarak uygulanacak R_y katsayıları TBDY 2018 Tablo 9.2’de [1] verilmiştir. BKDKKB, deprem y¼klerini içeren y¼k birleşimleri altında elde edilen en elverişsiz i kuvvetlere göre eksenel y¼k – moment bileşik etkisinde boyutlandırılmıştır. Kapasite tasarımı yaklaşımı esas alınarak en elverişsiz iç kuvvetlerin deprem y¼kü bileşeni, bağ kirişi tasarımından elde edilen artık kapasiteye bağlı olarak hesaplanan tasarım büy¼tme katsayısı ve $1.1R_y$ ile arttırılmıştır. YDKT y¼k birleşimleri altında hesaplanan en elverişsiz talepler izelge 2.12’de verilmiştir.

Çizelge 2.12 : BKDKKB en elverişsiz iç kuvvet talepleri.

Kat	Kesit	Malzeme	R_y	$1.1R_y V_n / V_e$	P_E (kN)	P_V (kN)	P_U (kN)	M_E (kNm)	M_V (kNm)	M_U (kNm)
7	HE200B	S275	1.30	4.26	53	47	272	22	29	122
6	HE200B	S275	1.30	3.16	77	33	275	36	31	143
5	HE240B	S275	1.30	2.97	117	31	377	50	34	184
4	HE240B	S275	1.30	2.72	133	26	389	59	32	194
3	HE300B	S275	1.30	3.13	171	24	560	93	38	331
2	HE300B	S275	1.30	3.12	184	17	592	101	34	348
1	HE300B	S275	1.30	2.77	194	20	558	124	37	380

BKDKKB ait eksenel y¼k ve moment kapasitesi hesap özeti kat bazında izelge 2.13’te verilmiştir. Burkulma katsayıları K_x , K_y , K_z sırası ile x eksenini etrafında eğilmeli burkulma, y eksenini etrafında eğilmeli burkulma ve z eksenini etrafında burulmalı burkulma katsayılarını ifade etmektedir. Hesaplarda, güvenli tarafta kalmak üzere K değerleri 1 olarak dikkate alınmıştır. Her bir burkulma sınır durumu içerisinde

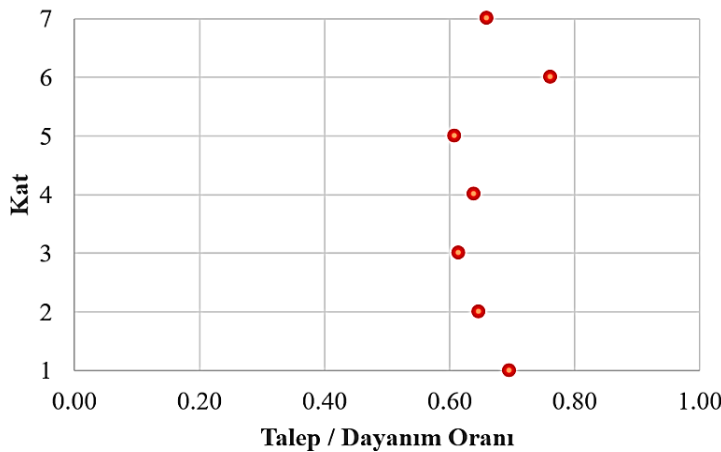
en narin durumu ifade eden atalet yarıçapı i_{min} , kiriş boyu L_{BKDKKB} , kritik burkulma gerilmesi F_{cr} , eksenel kuvvet dayanımı P_c ve karakteristik eğilme dayanımı M_p 'dir.

Çizelge 2.13 : BKDKKB dayanım hesapları.

Kat	Kesit	K_x, K_y, K_z	i_{min} (mm)	L_{BKDKKB} (mm)	L_c/i_{min}	F_{cr} (MPa)	P_d (kN)	M_p (kNm)
7	HE200B	1	50.5	3050	60.4	271	1917	208
6	HE200B	1	50.5	3050	60.4	271	1917	208
5	HE240B	1	60.7	2950	48.6	299	2861	339
4	HE240B	1	60.7	2950	48.6	299	2861	339
3	HE300B	1	75.8	2800	36.9	322	4323	601
2	HE300B	1	75.8	2800	36.9	322	4323	601
1	HE300B	1	75.8	2800	36.9	322	4323	601

En elverişsiz etki / kapasite değerleri, Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ilkeleri doğrultusunda eksenel yük ve eğilme dayanımları Dayanım Katsayısı Φ çarpanı ile azaltılarak hesaplanmıştır. Dayanım katsayısı eksenel yük ve eğilme momenti karakteristik değerleri için 0.9 olarak dikkate alınmıştır. Buna göre, tasarım basınç kuvveti dayanımı P_d , tasarım eğilme momenti dayanımı M_d 'dir. Elde edilen verilere bağlı olarak eksenel yük talep/dayanım (P_U/P_d) değerlerinin 0.20'den küçük olması sebebiyle bileşik etkileri altında talep/dayanım değeri denklem 2.13 kullanılarak hesaplanmıştır. Katlara göre en elverişsiz talep/dayanım değerleri dağılımı Şekil 2.11'de verilmiştir. Bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümlerinin depremlerli yük birleşimleri altında tüm katlarda; eksenel yük – moment bileşik etkisinde yeterli dayanımda, talep/dayanım dağılımının 0.61 – 0.76 aralığında ve en büyük talep/dayanım oranının 0.76 olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

$$\frac{Talep}{Dayanım} = \frac{P_U}{2P_d} + \left(\frac{M_U}{M_d} \right) \quad (2.13)$$



Şekil 2.11 : BKDKKB talep / dayanım dağılımı.

2.5.3 Çapraz

Bu bölümde, kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda YDKT esaslarına göre deprem etkilerini içeren yük birleşimleri altında en elverişsiz iç kuvvetlere dayalı olarak boyutlandırılan çapraz elemanlara ait kat bazında sonuçları sunulmuştur. Yük birleşimlerinin deprem etkilerini içeren bileşeni, boyutlandırma yaklaşımı ile uyumlu olarak, $1.25R_y$ çarpanı ve tasarım büyütme katsayısı ile arttırılmıştır. Çapraz elemanların çerçeve kirişine bağlanan ucunun moment aktaran bağlantı tipi olması sebebiyle ilgili elemanlar eksenel yük – moment bileşik etkisinde boyutlandırılmıştır. Çapraz elemanların burkulma katsayıları güvenli tarafta kalınarak 1 kabul edilmiştir. Çaprazlar için elde edilen tasarıma esas iç kuvvetler ve karakteristik dayanımlar Çizelge 2.14 ve Çizelge 2.15’te sırası ile sunulmuştur.

Çizelge 2.14 : Çaprazlarda en elverişsiz iç kuvvet talepleri.

Kat	Kesit	Malzeme	R_y	$1.25R_y V_n/V_e$	P_E (kN)	P_V (kN)	P_U (kN)	M_E (kNm)	M_V (kNm)	M_U (kNm)
7	HE180B	S355	1.30	4.84	92	83	528	7	8	43
6	HE180B	S355	1.30	3.59	153	92	639	12	9	51
5	HE200B	S355	1.30	3.37	220	94	835	18	9	68
4	HE200B	S355	1.30	3.09	259	88	888	20	8	71
3	HE240B	S355	1.30	3.56	313	88	1199	29	10	113
2	HE240B	S355	1.30	3.54	335	84	1271	31	9	117
1	HE240B	S355	1.30	3.15	376	115	1300	34	6	112

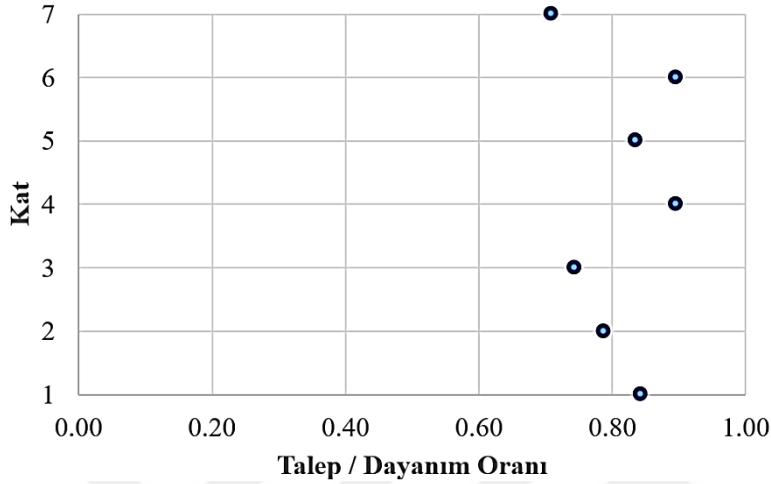
Çizelge 2.15 : Çaprazlarda dayanım hesapları.

Kat	Kesit	K_x, K_y, K_z	i_{min} (mm)	L_{CAPRAZ} (mm)	L_c/i_{min}	F_{cr} (MPa)	P_c (kN)	M_p (kNm)
7	HE180B	1	45.7	4278	93.6	184	1199	158
6	HE180B	1	45.7	4278	93.6	184	1199	158
5	HE200B	1	50.5	4207	83.3	211	1654	214
4	HE200B	1	50.5	4207	83.3	211	1654	214
3	HE240B	1	60.7	4104	67.6	252	2676	354
2	HE240B	1	60.7	4104	67.6	252	2676	354
1	HE240B	1	60.7	4482	73.8	236	2504	354

Tasarıma esas eksenel yük ve moment dayanımları hesaplanırken YDKT ilkeleri doğrultusunda dayanım katsayısı Φ kullanılmıştır, hem eksenel yük hem de moment dayanımlarının hesabında 0.90 olarak hesaplarda dikkate alınmıştır. Çapraz elemanların depremlili yük birleşimleri altında eksenel yük talep/dayanım (P_U/P_d) değerlerinin 0.20’den büyük olması sebebiyle bileşik etkileri altında talep/dayanım değeri denklem 2.14 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, depremlili yük birleşimleri altında tüm çapraz elemanlar talepleri karşılayacak yeterli

dayanımdadır. En büyük talep/dayanım oranı 0.90 olarak elde edilmiştir. En elverişsiz talep/dayanım değerlerinin katlara göre dağılımı Şekil 2.12’de sunulmuştur.

$$\frac{Talep}{Dayanım} = \frac{P_U}{P_d} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_U}{M_d} \right) \quad (2.14)$$

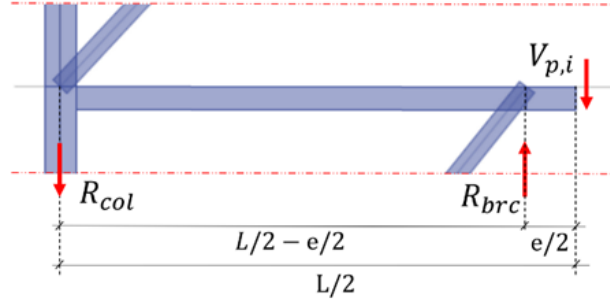


Şekil 2.12 : Çaprazlarda talep / dayanım dağılımı.

2.5.4 Kolon

Dışmerkez çaprazlı çerçeve kolonlarının kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda boyutlandırma hesap özetleri bu bölümde verilmiştir. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin kolonları deprem yükleri altında boyutlandırılırken, boyutlandırmaya esas talepler mekanizma durumunda meydana gelen iç kuvvetler olarak hesaplanmaktadır. Depremlili durumda, TBDY 2018 9.2.5’te [1] verilen deprem yüklerini içeren yük birleşimlerinin statik yüklerden kaynaklanan bileşenine ek olarak bağ kirişlerinin plastikleşmesinden kaynaklanan ilave talepler kolonlardaki en elverişsiz iç kuvvet taleplerini meydana getirmektedir. Mekanizma durumunda, tasarıma esas iç kuvvetler hesaplanırken bağ kirişlerinin plastikleştiği ve pekleşmeli beklenen malzeme dayanımlarına ulaştığı öngörülmektedir. Bu yaklaşım, TBDY 2018 9.8.6.4’te [1] bağ kirişlerinin plastikleşmesine neden olan yüklemenin $1.1R_y$ katı olarak kabul edilmektedir. DMÇÇÇ açıklığında boyutlandırılacak kolonun bulunduğu kattaki bağ kirişinde meydana gelen kesme kuvvetinden kaynaklanan R_{col} ve R_{brc} reaksiyonları oluşmaktadır, (Şekil 2.13). İlgili katta, düşey çapraz üst uç noktasına göre moment denge denklemleri yazılarak bu kattaki bağ kirişinin plastikleşmesinden kaynaklanan kolon reaksiyonu hesaplanır, (Denklem 2.15). Mekanizma durumunda meydana gelmesi beklenen kat kesme kuvvetleri ve iç kuvvetler üç katlı tipik bir

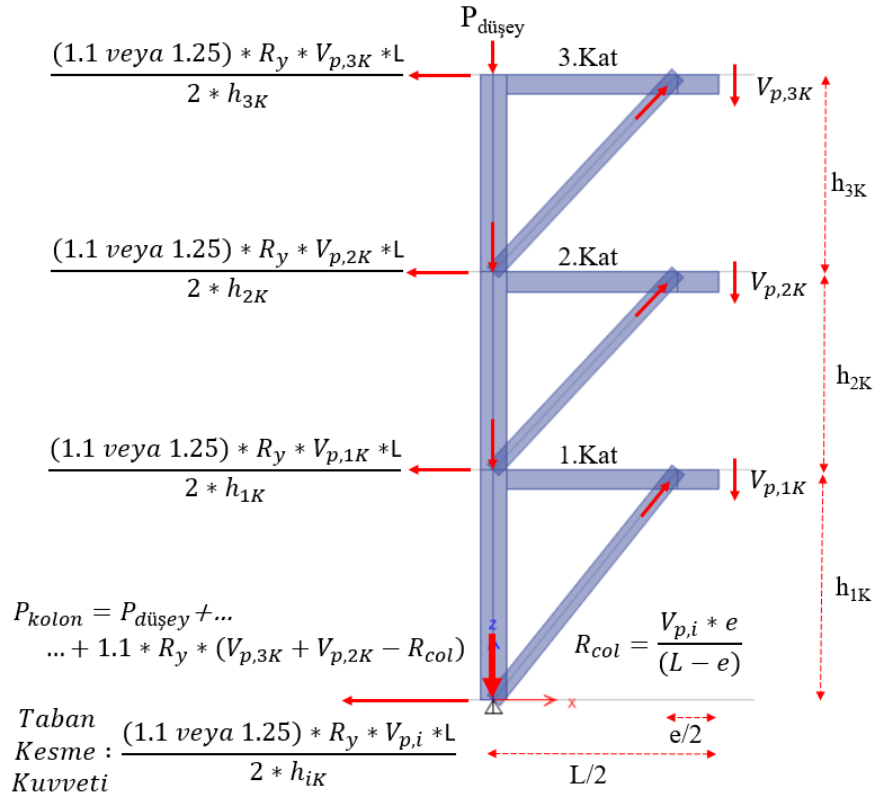
dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve üzerinde tariflenmiştir, (Şekil 2.14). Aşağıdaki denklem ve şekillerde; kata ait bağ kirişi kesme kuvveti kapasitesi $V_{p,i}$, depremlü yük birleşimlerinin düşey yüklerden kaynaklanan kolon eksenel yük bileşeni $P_{düşey}$, mekanizma durumunda üç katlı dışmerkez çaprazlı çelik çerçevenin en alt kat kolonunda oluşan eksenel yük talebi P_{kolon} ve kat yükseklikleri h_i ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.13 : Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevede tipik serbest cisim diyagramı.

$$R_{col} = \frac{V_{p,i} * e}{(L - e)} \quad (2.15)$$

$$P_{kolon} = P_{düşey} + 1.1 * R_y * (V_{p,2} + V_{p,3} - R_{col}) \quad (2.16)$$



Şekil 2.14 : Tipik bir DMÇÇÇ için mekanizma durumunda kat kesme kuvvetleri ve kolon eksenel kuvvet talepleri.

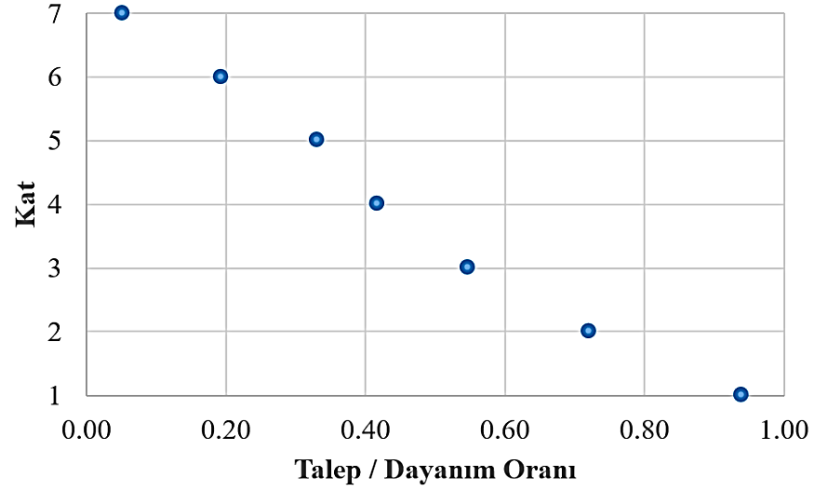
Mekanizma durumunda, kapasite tasarım ilkeleri ve TBDY 2018 [1] ile uyumlu olarak $1.1R_y$ katsayısı ile bağ kirişinin pekleşmeli beklenen dayanımı esas alınmıştır. Kolonlar, ihmal edilebilir düzeyde moment etkisi olduğu için yalnızca aksel yük etkisinde boyutlandırılmıştır. Kolonların, her ana eksen etrafındaki burkulma katsayıları güvenli tarafta kalınarak 1 kabul edilmiştir. Kolon elemanları için elde edilen tasarıma esas iç kuvvetler ve karakteristik dayanımlar Çizelge 2.16 ve Çizelge 2.17’de sırası ile sunulmuştur. Tasarım dayanımlarının hesabında $\Phi=0.90$ olarak dikkate alınmıştır. DMÇÇÇ elemanı olan tüm kolonlarda aksel yük taleplerinin dayanımlara oranı 0.20’den büyük olduğu için talep/dayanım oranları denklem 2.14 esas alınarak hesaplanmıştır. Şekil 2.15’te görüleceği üzere kat bazında dağılımı sunulan en elverişsiz talep/dayanım değerleri 1’den küçüktür.

Çizelge 2.16 : Kolonlarda en elverişsiz iç kuvvet talepleri.

Kat	Kesit	e (mm)	L (mm)	R_{col} (kN)	$1.1R_y$	P_E (kN)	P_V (kN)	P_U (kN)
7	HE360B	900	7000	37	1.43	53	214	267
6	HE360B	900	7000	37	1.43	307	685	992
5	HE360B	1100	7000	63	1.43	630	1066	1697
4	HE450B	1100	7000	63	1.43	1116	1449	2566
3	HE450B	1400	7000	119	1.43	1523	1835	3358
2	HE450B	1400	7000	119	1.43	2204	2226	4429
1	HE450B	1400	7000	119	1.43	2884	2627	5512

Çizelge 2.17 : Kolonlarda dayanım hesapları.

Kat	Kesit	Malzeme	K_x, K_y, K_z	i_{min} (mm)	L_{KOLON} (mm)	L_c/i_{min}	F_{cr} (MPa)	P_c (kN)
7	HE360B	S355	1	74.8	3000	40.1	315	5123
6	HE360B	S355	1	74.8	3000	40.1	315	5123
5	HE360B	S355	1	74.8	3000	40.1	315	5123
4	HE450B	S355	1	73.3	3000	40.9	313	6140
3	HE450B	S355	1	73.3	3000	40.9	313	6140
2	HE450B	S355	1	73.3	3000	40.9	313	6140
1	HE450B	S355	1	73.3	3500	47.7	299	5867



Şekil 2.15 : Kolonlarda talep / dayanım dağılımı.





3. MODEL BİNANIN DEPREM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, çalışma kapsamında incelenen model binanın TBDY 2018 [1] uyarınca deprem performansının belirlenmesine ilişkin detaylar sunulmuştur. 2018 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Bölüm 15'te mevcut binaların değerlendirilmesine ilişkin koşullar ve hesap kuralları tanımlanmıştır. Mevcut bir çelik yapının TBDY 2018'e [1] göre deprem performans seviyesinin belirlenmesine ilişkin adımlar aşağıda sunulmuştur.

- 1- Binalardan bilgi toplanması
- 2- Deprem performans hedefinin saptanması
- 3- Kesit hasar sınır değerleri ve hasar bölgelerinin tayini
- 4- Hesap yönteminin seçilmesi
- 5- Yapı deprem performansının belirlenmesi

3.1 Binalardan Bilgi Toplanması

Yapının deprem performans seviyesinin belirlenebilmesi için mevcut durumun ortaya konulması büyük önem taşımaktadır. Yapının mevcut durumunu ortaya koyabilmek için yapısal sistemin tanımlanması, taşıyıcı sistem geometrisi, taşıyıcı sistem elemanlarına ait malzeme, kesit ve bağlantı detayları, temel sisteminin ve zemin özelliklerinin belirlenmesi, varsa mevcut durumdaki hasarların veya onarımların saptanması ve projesine uyumluluğunun kontrolü gerekmektedir. Yapının mevcut durumundan elde edilen verilerin kapsamına göre bilgi düzeyi sınırlaması bulunmaktadır. Sınırlı ve kapsamlı olarak sınıflandırılan bilgi düzeyleri hesaplarda kullanılacak bilgi düzeyi katsayılarını belirlemektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen binanın mevcut bir bina olduğu varsayılmıştır. Binadan elde edilen verilerin kapsamlı bilgi düzeyi gereksinimlerini sağladığı varsayılmıştır ve bilgi düzeyi katsayısı hesaplarda 1.0 olarak dikkate alınmıştır.

3.1.1 Çelik binalarda sınırlı bilgi düzeyi

İncelemeye tabi mevcut bina yürütülen saha çalışmaları kapsamında bina hesap modelini gerçek durumu yansıtacak şekilde oluşturmak amacıyla bina geometrisini ortaya koyan taşıyıcı sistem rölövesi çıkarılır, temel sisteminin anlaşılabilmesi için yeterli sayıda muayene çukuru açılır. Bina çevresinde davranışı ve performansı etkileyebilecek komşu bina vb. yapılar varsa yapılarla ilişkisi belirlenir. Yapıya ait genel yerleşim resimleri veya imalat çizimlerinin bulunmaması durumunda yapıda bulunan tüm taşıyıcı elemanların boyut bilgileri ve birleşim detayları ayrıntılı olarak elde edilir. Projesi mevcut olmayan çelik yapıda, her çelik yapı elemanı türünden birer numune alınarak deneye tabi tutulur. Malzeme deneyi sonucunda, malzemeye ait gerilme – şekildeğiştirme ilişkisi elde edilir. Benzer uygulama kaynak ve bulonlar için de geçerlidir. Eleman kapasitelerinin hesabında deneye bağlı elde edilen verilerin ortalaması mevcut çelik akma gerilmesi olarak dikkate alınır.

3.1.2 Çelik binalarda kapsamlı bilgi düzeyi

Kapsamlı bilgi düzeyi yapıya ait projelerin mevcut olduğu durumu ifade etmektedir. Binaya ait geometrik bilgilerin temini ve teyidi için saha çalışmaları yürütülür. Eleman boyutları ve birleşim detayları yerinde ölçülerek ve incelenerek projede belirtilen boyut ve detaylara uyumluluğu kontrol edilir. Eleman ve birleşimlerde yürütülen uyum kontrolü çalışmasının toplam eleman sayısının 1/5'i oranında teyit edilip doğrulanması yeterlidir. Hesaplarda dikkate alınacak malzemenin teyidi için projede belirtilen çelik sınıfı en az bir çelik elemandan örnek numune alınır. Numune deneye tabi tutularak projede belirtilen çelik sınıfı teyit edilir. Benzer uygulama kaynak ve bulonlar için de geçerlidir. Mevcut durumdan elde edilen verilerin proje verileriyle uyuşması durumunda eleman kapasitelerinin hesabında projede belirtilen karakteristik dayanımlar mevcut çelik akma gerilmesi olarak kullanılır. Elde edilen verilerin proje ile uyumluluk göstermemesi durumunda en az üçer adet numune alınır ve deneye tabi tutulur. Deney sonucu elde edilen en elverişsiz değerler, hesaplarda mevcut çelik akma gerilmesi olarak dikkate alınır.

3.1.3 Bilgi düzeyi katsayıları

Eleman kapasitelerinin hesabında mevcut malzeme dayanımları doğrudan kullanılır, malzeme katsayıları ile azaltma yapılmaz. Mevcut yapıda yürütülen saha çalışmaları neticesinde elde edilen bilgi düzeyi doğrultusunda eleman kapasitelerinin hesabında

uygulanacak bilgi düzeyi katsayıları; sınırlı bilgi düzeyi için 0.75, kapsamlı bilgi düzeyi için 1.00'dir. İlgili katsayılar TBDY 2018 Tablo 15.1'de [1] verilmektedir.

3.2 Deprem Performans Hedefinin Belirlenmesi

Mevcut bir binanın TBDY 2018'e [1] göre deprem performans hedefi ve değerlendirme yaklaşımı belirlenirken yapıya ait Bina Kullanım Sınıfı (BKS), Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) ve Bina Yükseklik Sınıfı (BYS) kullanılmaktadır. TBDY 2018'de [1] binalar kullanım amacına göre sınıflandırılmıştır. Bina kullanım amacına bağlı olarak Bina Önem Katsayısı (I) ve BKS belirlenmektedir (TBDY 2018 Tablo 3.1). Yapının konumu, faya uzaklığı ve zemin özelliklerine bağlı olarak, Türkiye Deprem Tehlike Haritası kullanılarak kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) elde edilir. BKS ve S_{DS} değerlerine bağlı olarak, TBDY 2018 Tablo 3.2'de [1] verilen DTS belirlenir. TBDY 2018'de [1] binalar yüksekliklerine göre sınıflandırılmıştır. İlgili yükseklik sınıflandırması TBDY 2018 Tablo 3.3'te [1] verilmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında Çizelge 3.1 kullanılarak, mevcut bir çelik binanın TBDY 2018 [1] ile uyumlu olarak ilgili deprem yer hareket düzeyindeki performans hedefi ve değerlendirme yaklaşımı belirlenir.

Çizelge 3.1 : Mevcut Çelik Binalar performans hedefleri ve değerlendirme yaklaşımları (BYS \geq 2) [1].

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-3	-	-	SH	ŞGDT
DD-2	KH	ŞGDT	-	-
DD-1	-	-	KH	ŞGDT

TBDY-2018'de dört farklı deprem yer hareket düzeyi tanımlanmıştır. DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 olarak isimlendirilen deprem yer hareketleri sırası ile 2475 yıl, 475 yıl, 72 yıl, 43 yıl tekrarlanma periyoduna sahiptir ve çok seyrek, seyrek, sık ve çok sık deprem yer hareketlerini nitelemektedir. DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketlerine ait 50 yılda aşılma olasılıkları sırası ile %2, %10, %50 ve %68'dir.

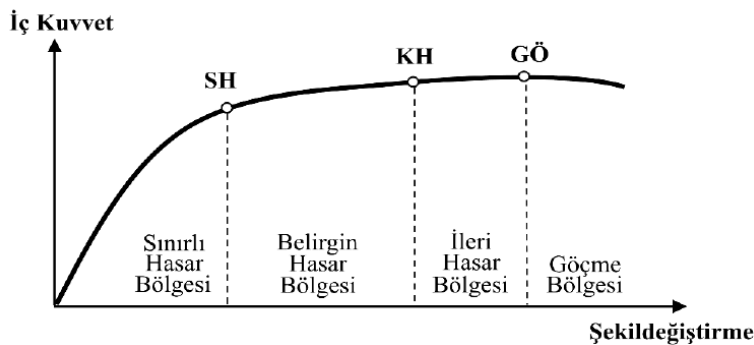
Binaların deprem performans düzeyleri “Kesintisiz Kullanım” (KK), “Sınırlı Hasar” (SH), “Kontrollü Hasar” (KH), “Göçmenin Önlenmesi” (GÖ) olarak sınıflandırılmıştır. Binanın KK hedefinin sağlanabilmesi için yapısal taşıyıcı elemanlarda hasar olmaması veya yok sayılabilecek derecede az olması gerekir. SH

performans düzeyi doğrusal ötesi davranışın gözlemlendiği fakat taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen hasar düzeyinin sınırlı kaldığı bina durumu temsil etmektedir. KH performans düzeyi, taşıyıcı sistem elemanlarında onarılması mümkün ve çok ağır olmayan, can güvenliği hasar düzeyine karşı gelmektedir. GÖ performans düzeyi, taşıyıcı sistem elemanlarında onarılması mümkün olmayan büyük hasarların meydana geldiği, binada kısmen veya tamamen göçmenin önlenmesi öncesi durumu ifade etmektedir.

Çizelge 3.1 uyarınca incelemeye konu binanın sağlaması gereken deprem performans hedefi, DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde Kontrollü Hasar (KH) olarak belirlenmiştir. Performans hedefinin değerlendirilmesine ilişkin hesap yöntemi yine aynı tablodan Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım (ŞDGT) olarak elde edilmiştir.

3.2.1 Kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri

TBDY 2018’de [1] elastik ötesi davranış gösterebilen sünek taşıyıcı sistem elemanlarına ait üç adet kesit hasar durumu ve sınırı tanımlanmıştır. Her bir kesit hasar durumu için hasar sınırları verilmiştir. Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), Göçme Öncesi Hasar (GÖ) ilgili hasar durumlarıdır ve sırası ile sınırlı miktarda, kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği miktarda ve ileri düzeyde elastik ötesi davranış ifade etmektedir. Elastik ötesi davranış gösteremeyen ve gevrek olarak hasar gören elemanlar bu sınıflandırmaların dışında tutulmuştur. Kesit hasar sınır değerleri, hasar bölgelerinin başlangıç ve bitiş noktalarını oluşturmaktadır. Elastik ötesi davranışa bağlı olarak “Sınırlı Hasar Bölgesi”, “Belirgin Hasar Bölgesi”, “İleri Hasar Bölgesi” ve Göçme Bölgesi olmak üzere 4 adet kesit hasar bölgesi bulunmaktadır. Elastik ötesi davranış gösterebilen taşıyıcı sistem elemanlarında yük etkileri altında meydana gelen şekil değiştirmeler kesit hasar sınır değerleri ile karşılaştırılır ve kesite ait hasar bölgesi belirlenir. Kesit hasar bölgeleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Kesit hasar bölgeleri [1].

Bahsi geçen performans düzeyleri için çelik bir binanın taşıyıcı sistem elemanlarına ait plastik şekildeğiştirme ve dönme sınırları bu bölümlerde sunulmuştur. Çalışma kapsamında incelenen dışmerkez çaprazlı çelik binanın yatay yük taşıyan çerçevelerinde bulunan kolon, bağ kiriş dışında kalan kiriş bölümü, çapraz ve bağ kirişi gibi taşıyıcı sistem elemanlarına ait, bina performans düzeyine bağlı plastik şekildeğiştirme ve dönme sınırları Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir. Bu çalışma kapsamında incelenen binanın düşey çaprazları bir ucu mafsallı bir ucu moment bağlantılı teşkil edilmesi sebebiyle eksenel yük moment bileşik etkisindedir. Bu doğrultuda, eksenel yük – moment bileşik etkisinde çaprazlar ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü için şekildeğiştirme sınırları kolon elemanlar ile aynı kabul edilmiştir. Çelik kolonlarda plastik şekildeğiştirme sınırları Akma Dönmesi θ_y cinsinden verilmiştir. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevenin bağ kirişleri dışında kalan eksenel yük – moment bileşik etkisindeki taşıyıcı sistem elemanları için akma dönmesinin hesabı denklem 3.1'de sunulmuştur. Bu elemanlarda, eksenel basınç taleplerinin kesit kapasitesine oranı 0.50'yi geçiyorsa elastik ötesi davranışlara izin verilmemektedir.

$$\theta_y = \frac{W_p F_y \ell}{6EI} \left[1 - \frac{P}{P_y} \right] \quad (3.1)$$

Çizelge 3.2 : Süneklik düzeyi yüksek çelik kolon, çapraz ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü plastik dönme sınırları [1].

Eksenel Yük Seviyesi	Şekildeğiştirme Sınırları [rad]		
	SH	KH	GÖ
$P/P_c < 0.20$	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$9\theta_y$
$0.20 \leq P/P_c \leq 0.50$	$1.5(1-1.66P/P_c)\theta_y$	$9(1-1.66P/P_c)\theta_y$	$13.5(1-1.66P/P_c)\theta_y$

Çizelge 3.3 : Dışmerkez çelik çaprazlı çerçevelerde bağ kirişi plastik dönme sınırları [1].

Eleman Tipi	Şekildeğiştirme Sınırları [rad]		
	SH	KH	GÖ
$e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$	0.005	0.12	0.15

3.2.2 Mevcut yapılar değerlendirilirken kullanılan hesap yöntemleri

TBDY 2018 [1] mevcut yapıların deprem performansının değerlendirmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin uygulanabileceğini belirtmektedir.

Fakat betonarme yapılar için doğrusal değerlendirme koşulları bulunmasına karşın mevcut çelik yapıların değerlendirilmesine ilişkin doğrusal değerlendirme koşulları bulunmamaktadır. Çelik taşıyıcı sisteme sahip mevcut yapıların değerlendirilmesi doğrusal olmayan hesap yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bir binaya ait mevcut durum bilgilerinin temini sonrası tayin edilen bina deprem performans hedefleri doğrultusunda, TBDY 2018 [1] ışığında belirlenen değerlendirmeye esas deprem yer hareket düzeyine bağlı hesaplarda dikkate alınacak bir depremin elastik ötesi sünek davranışa bağlı olarak taşıyıcı sistem elemanlarında meydana getireceği plastik şekildeğiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanması doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin kullanım amacıdır. TBDY 2018’de “Tek Modlu İtme Yöntemleri”, “Çok Modlu İtme Yöntemleri” ve “Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi” olmak üzere 3 adet doğrusal olmayan deprem hesabı yöntemi sunulmuştur.

Bu çalışmada, çalışma kapsamında incelenen dışmerkez çaprazlı çelik binaya ilişkin deprem performansı araştırılırken Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi kullanılmıştır. Bu hesap yöntemi, belirli süreli bir deprem yer hareketi ivme kaydının her bir zaman adımında taşıyıcı sistem ve elemanlarında oluşturduğu yerdeğiştirme, şekildeğiştirme, dönme ve iç kuvvet taleplerinin hesabına dayanmaktadır. Yapının mevcut durumunun hesaplara doğru bir şekilde yansıtılabilmesi ve nitelikli bir değerlendirme için kesit ve yapısal malzemeye ait doğrusal olmayan davranışların doğru bir şekilde modellenmesi gerekir. Doğrusal olmayan hesaplarda kullanılmak üzere TBDY 2018’de [1] yayılı ve yığılı plastik davranış modelleri ve taşıyıcı sistemin modellenmesi ile ilgili kurallar açıklanmıştır. Malzeme ve kesit bilgilerine bağlı olarak, doğrusal olmayan davranış modellerinin oluşturulmasında literatürde bulunan deneysel çalışmalar ve örnek modeller kullanılmaktadır.

3.2.3 Mevcut yapı deprem performansının belirlenmesi

Mevcut binaların deprem performans hedefleri ile uyumlu olarak deprem performans seviyesi belirlenirken 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde tanımlanmış olan “Sınırlı Hasar Bölgesi”, “Belirgin Hasar Bölgesi”, “İleri Hasar Bölgesi” ve “Göçme Bölgesi” kesit hasar bölgeleri esas alınmaktadır. TBDY 2018’de [1] tanımlanmış olan hesap yöntemlerinden yapıya uygun bir hesap yöntemi seçilir, eleman bazında değerlendirmeye esas talepler hesaplanır, kesitler için belirlenen hasar sınırları

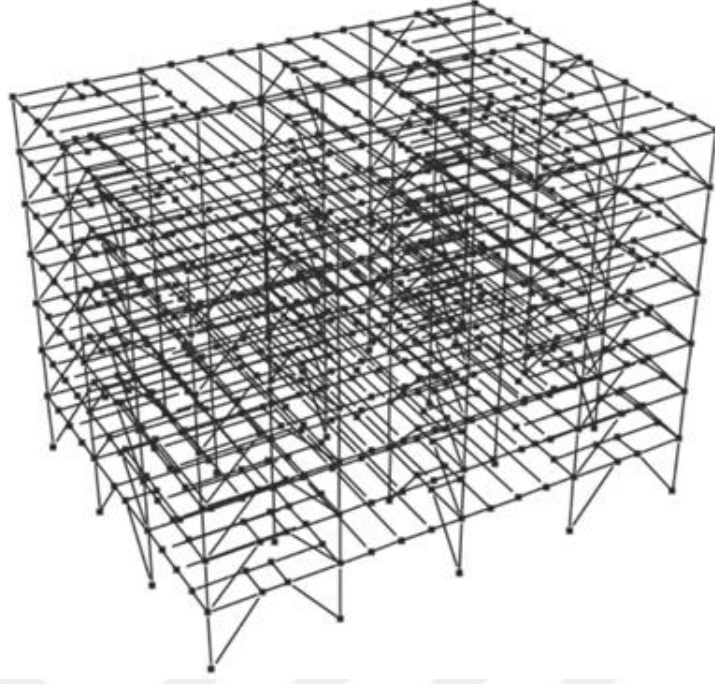
doğrultusunda kesit hasar bölgesi tayin edilir. Yürütülen hesaplar sonucu elde edilen eleman performansları esas alınarak bina düzeyindeki deprem performans düzeyi saptanır. Çelik taşıyıcı sisteme sahip mevcut bir binanın “Kontrollü Hasar” performans düzeyini sağlayabilmesi için deprem etkilerini içeren yük birleşimleri altında meydana gelen, kesit bazındaki tüm şekildeğiştirme ve dönme taleplerinin “Kontrollü Hasar” hasar sınır değeri içerisinde ve kesitin en fazla “İleri Hasar Bölgesi” içinde olması gerekmektedir.

3.3 Taşıyıcı Sistem Modeli

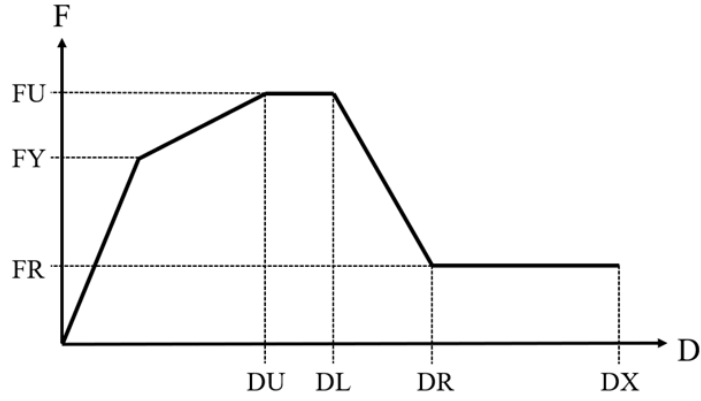
Doğrusal olmayan modelleme, analiz ve tahkiklerde Computers and Structures Incorporation (CSI) şirketi tarafından üretilen ve bina türü yapıların plastik şekildeğiştirmelere bağlı doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerinin yapılmasında oldukça yaygın olarak kullanılan PERFORM-3D v8.1.0 [17] yazılımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yapı matematik modeline ait üç boyutlu görüntü Şekil 3.2’de verilmiştir. Doğrusal olmayan analizler için oluşturulan matematik hesap modelinde ve hesaplarda dikkate alınan yaklaşım ve kabuller aşağıda sunulmuştur.

- Kolon, çapraz ve kiriş elemanlar her düğüm noktasında altı serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar olarak modellenmiştir.
- Döşeme plakları analiz modeline dahil edilmemiş ve kat düzlemlerinde rijit diyafram tanımı uygulanmıştır.
- Bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü elemanlarında eksenel yük talepleri düğüm noktası denge denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.
- Sonlu elemanlar hesap modelindeki çubuk elemanların doğrusal olmayan davranışları, pekleşme etkilerinin dikkate alındığı plastik mafsallık davranış modelleri ile temsil edilmektedir.
- Plastik mafsallara ait genelleştirilmiş iskelet eğrileri (Şekil 3.9) PERFORM-3D [17] bilgisayar yazılımında, *trilinearshapeofrelationship* ve *strengthloss* seçenekleri dikkate alınarak beş adet doğrudan oluşan *inelastichinge* olarak modellenmiştir (Şekil 3.3).
- Plastik mafsallarda, tekrarlı yükler altında çevrimsel dayanım azalması (*cyclicdegradation*) davranışı terk edilmiştir.

- Elastik ötesi davranış göstermeyen elemanlarda, talep/kapasite değerlerinin hesaplanabilmesi amacıyla kesit ve malzeme bilgileri ile uyumlu eksenel yük – moment bileşik etkilerini içeren *P-M2-M3StrengthSectionSteel* tanımı yapılmıştır.
- Dinamik analizlerde dikkate alınan sismik kütle, zati ağırlıklarla birlikte binanın kullanım amacına uygun olarak belirlenen hareketli yüklerin belirli oranda katılımı ile belirlenmektedir.
- Yapı kullanım amacı ile uyumlu olarak hareketli yük katılım katsayısı n , 0.3 olarak dikkate alınmıştır (TBDY 2018 Tablo 4.3 [1]).
- Her bir ölçeklendirilmiş deprem yer hareketi ivme kaydına ait analizlerin başlangıç adımı, yapı sisteminin sismik ağırlığı altında P- δ etkilerinin dikkate alındığı şekil değiştirmiş taşıyıcı sistemden oluşmaktadır.
- Düşey deprem etkisi, TBDY 2018 4.4.3.2'ye [1] uygun olarak $E_d^{(Z)} \approx (2/3)S_{DS}G$ şeklinde dikkate alınmıştır.
- Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde kütle ve rijitlikle orantılı Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanılmıştır. Rayleigh sönüm oranı hakim doğal titreşim periyotları aralığında 2% olarak dikkate alınmıştır.
- Kolon, çapraz ve BKDKKB için hesaplarda dikkate alınan burkulma katsayısı $K = 1.0$ 'dir.
- İncelenen yapının mevcut durum deprem performansı belirlenirken, TBDY 2018 15.2.7 [1] uyarınca karakteristik malzeme dayanımları mevcut malzeme dayanımı olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 3.2 : Sonlu elemanlar yapı matematik modeli, PERFORM-3D [17].



Şekil 3.3 : Plastik mafsals iskelet eğrisi, PERFORM-3D [17].

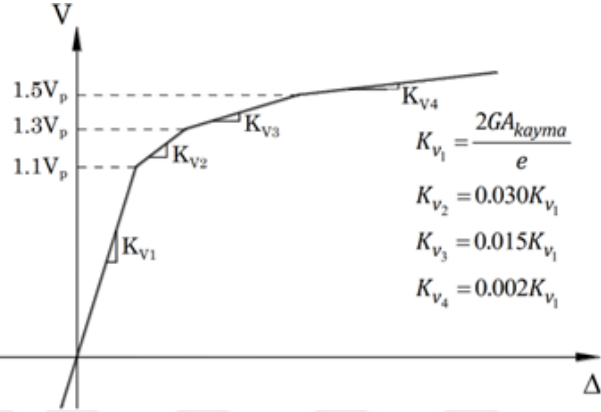
- DU : En büyük dayanım anında şekildeğiştirme
- DL : Dayanım kaybının başladığı andaki şekildeğiştirme
- DR : Dayanım kaybı sonundaki şekildeğiştirme
- DX : En büyük şekildeğiştirme
- FR : Dayanımın azaldığı durumdaki son değer
- FU : En büyük dayanım değeri
- FY : Elastik dayanımın son değeri

3.3.1 Yığılı plastik mafsal tanımları

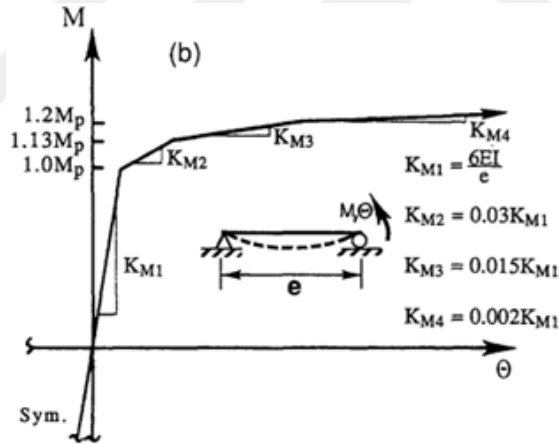
Yapısal elemanların ve buna bağlı olarak yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışlarının anlaşılabilirliği ve davranış biçiminin analizlere yeterli hassasiyetle yansıtılabilirliği amacıyla farklı yaklaşımlar içeren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Gilberson [18], deprem bölgelerinde inşa edilecek yapıların çerçeve elemanları için, eğilme etkileri altında akma dayanımı sonrası şekildeğiştirmelerin devam etmesine ilişkin sünekliği tanımladığı davranış modellerinden birini geliştirmiştir. Chen ve Powel [19], çelik ve betonarme elemanlarda plastik mafsal davranışını (yığılı plastisite) ortaya koyan deneysel ve nümerik bir çalışma yürütmüşlerdir. Farklı yapı tipleri için uygulanabilirliğini, beş örnek yapı sistemi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarla desteklemiştir. Plastik mafsal yaklaşımının işlem kolaylığı sağladığı ve gerçeğe yakın bir davranış sergilediği sonucuna ulaşmışlardır. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde bağ kirişinin uzunluğu; kirişin kesme kuvveti ve eğilme momenti kapasitesi ile davranış şeklini doğrudan etkilemektedir. Kesme kuvveti ve eğilme momenti etkileri altında doğrusal olmayan davranış gösteren bağ kirişleri sırası ile kısa ve uzun bağ kirişleri olarak isimlendirilebilir. Bu çalışmada doğrusal olmayan hesaplarda dikkate alınan bağ kirişi analitik davranış modeli Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Kesme kuvveti etkileri altında, malzemenin pekleşme özelliğinin dikkate alındığı ve bağ kirişinin doğrusal olmayan davranışını yansıtan ilk hesap modellerinden biri Roader ve Popov [20] incelemiştir. Ancak deprem yükleri altında bağ kirişinde oluşan kesme kuvvetine ek olarak kiriş uçlarında eğilme momenti etkileri de oluşmaktadır, [21],[22]. Kısa bağ kirişlerinde, büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti etkilerinin bir arada bulunduğu, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelere bağlı olarak gelişen pekleşmenin dikkate alındığı, deneysel ve sayısal çalışmalara dayanan davranış modeli Ricles ve Popov [23] tarafından ortaya konmuştur. Bu analitik davranış modeli Ramadan ve Gorah [24] tarafından geliştirilmiştir. Paralel bağlı yayların doğrusal olmayan bütünleşik davranışı şeklinde geliştirilen model, deneysel çalışmalara bağlı olarak Richards ve Uang [25] tarafından kısmen değiştirilmiştir (Şekil 3.5). Badalassi ve diğ. [26], [27], Ricles ve Popov [23] tarafından önerilen davranış modelini, modelleme ve hesap kolaylığı sağlayacak şekilde doğrusallaştırarak daha kolay tanımlanabilen bir davranış modeli haline dönüştürmüşlerdir (Şekil 3.7).



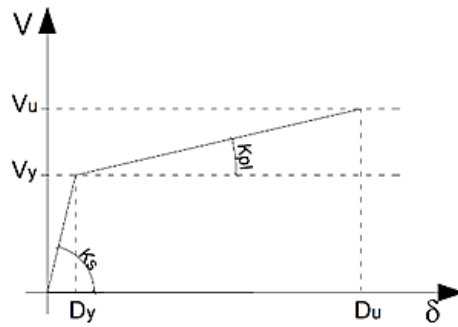
Şekil 3.4 : Bağ kirişi analitik davranış modeli.



Şekil 3.5 : Elastik ötesi bütünlük paralel bağlı yay davranışı, kesme kuvveti - yerdeğiştirme [25].

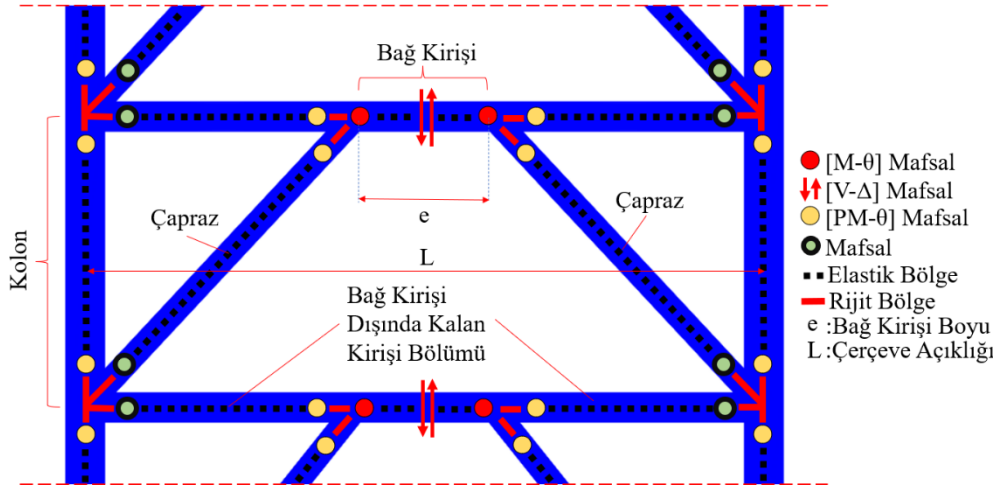


Şekil 3.6 : Plastik mafsallı davranış, eğilme momenti - dönme [23].

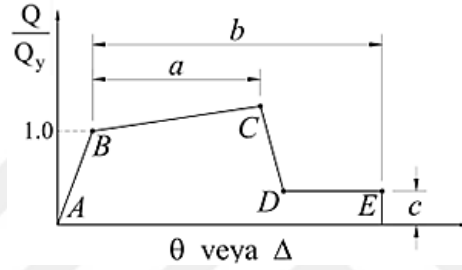


Şekil 3.7 : Kesme kuvveti etkisinde doğrusal olmayan plastik mafsallı davranış modeli [26].

Bu çalışma kapsamında incelenen yapının taşıyıcı sistem elemanlarında, deprem etkileri altında meydana gelmesi beklenen olası elastik ötesi davranışlar, plastik mafsallık davranış modeli ile temsil edilmiştir. Perform 3D [17] bilgisayar yazılımı kullanılarak, bağ kirişinde meydana gelmesi beklenen olası elastik ötesi davranışları temsil etmek üzere bağ kirişi uçlarında eğilme momenti- dönme plastik mafsallık ve bağ kirişi orta bölgesinde kesme-yerdeğiştirme plastik mafsallık tanımlanmıştır (Şekil 3.4). Bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarında da olası plastik şekil değiştirme durumları için; kolon alt-üst uçlarında, düşey çapraz üst uçlarında ve BKDKKB bağ kirişine bağlanan uçlarında eksenel yük taleplerine bağlı olarak moment-dönme mafsallık tanımlanmıştır. Ayrıca, analizlerde ikinci mertebeye etkileri de dikkate alınmıştır. PERFORM-3D [17] bilgisayar yazılımında, bağ kirişleri için eğilme momenti – dönme plastik mafsalları *momenthinge*, *rotationtypeinelasticcomponent* olarak ve kesme – yerdeğiştirme plastik mafsalları *shearhinge*, *displacementtypeinelasticcomponent* olarak tanımlanmıştır. Elemanlar için öngörülen plastik davranış modelleri, *framemembercompundcomponent* olarak çubuk elemanların ilgili uçlarında konumlandırılmıştır. Matematik modelde kullanılan plastik mafsallar, tipik bir kat çerçevesi esas alınarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Mevcut çalışmalar doğrultusunda PERFORM-3D [17] bilgisayar yazılımında tanımlanan genelleştirilmiş tipik eğilme momenti / kuvvet – dönme / yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.9’da verilmiştir. İlgili şekildeki a, b ve c davranış modeli değişkenleri, her bir taşıyıcı sistem bileşeni için Çizelge 3.4’te sunulmuştur. Q ve Q_y sırasıyla, bileşenin genelleştirilmiş iç kuvvetlerini ve genelleştirilmiş beklenen dayanımını; Δ/θ genelleştirilmiş dönme / yerdeğiştirme değerlerini göstermektedir. Bağ kirişi kayma dayanımı $Q_y=V_p$, denklem 2.8, 2.9 ve 2.10, kolon, çapraz ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü için $Q_y=M_p$ denklem 2.9 ve denklem 2.10 esas alınarak hesaplanmaktadır, [1]. Kolon, çapraz ve BKDKKB için akma dönmesi denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmaktadır, [1]. Şekil 3.9’da belirtilen pekleşmenin dikkate alındığı en büyük dönme / yerdeğiştirme noktasında (C), $V_u/V_p = 1.5$ ve $M_u/M_p = 1.2$ ’dir. $P/P_n > 0.5$ olan çerçeve elemanlarında sünek davranışa (plastik şekil değiştirmeye) izin verilmemiştir. Eğilme momenti, kesme kuvveti ve eksenel kuvvet için beklenen dayanımların hesabında; malzeme sınıflarının beklenen akma ve çekme dayanımları, karakteristik dayanımlar olarak esas alınmıştır.



Şekil 3.8 : Plastik mafsallık bölgeleri ve tipik çerçeve enkesiti.



Şekil 3.9 : Genelleştirilmiş moment/kuvvet – dönme/yerdeğiştirme ilişkisi [1].

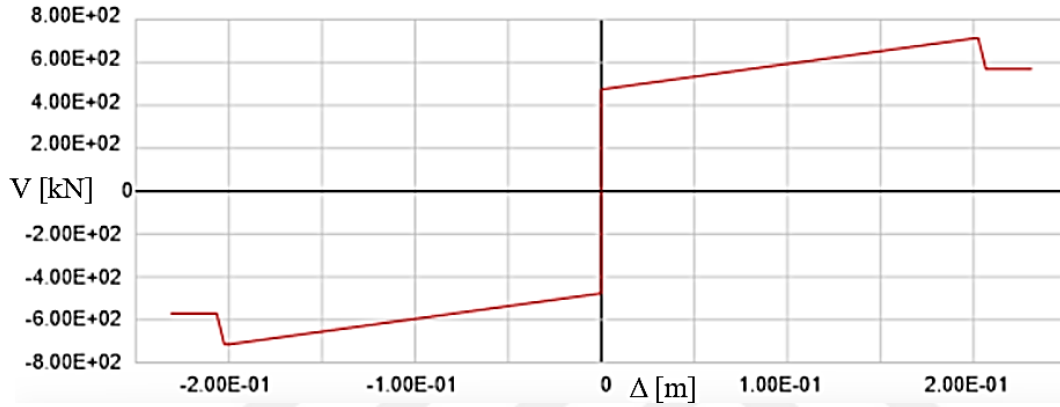
Çizelge 3.4 : Davranış modeli değişkenleri [1].

Yapı Elemanı	Plastik Dönme Açısı [rad]		Artık Dayanım Oranı
	a	b	
Kısa Bağ Kirişi: $e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$	0.14	0.16	0.80
Kolon – Çapraz – BKDKKB $P/P_c \leq 0.20$	$6\theta_y$	$11\theta_y$	0.60
Kolon – Çapraz – BKDKKB $0.20 < P/P_c < 0.50$	$9(1-1.66P/P_c)$	$17(1-1.66P/P_c)$	0.20

Doğrusal analiz ve boyutlandırma sonuçlarına bağlı olarak tüm bağ kirişlerinin kesme etkisinde gövde akmasına bağlı davranış sergileyen kısa bağ kirişleri olduğu bilinmektedir. Bağ kirişlerinin elastik ötesi davranışı için Çizelge 3.4 ışığında elde edilen kesme kuvveti – yerdeğiştirme ilişkisi her bir katta bulunan bağ kirişleri için Çizelge 3.5’te sunulmuştur. Yerdeğiştirmeler, dönme değişkenleri ve bağ kirişi boyuna bağlı olarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.5 ışığında PERFORM-3D [17] bilgisayar yazılımında *shearhinge*, *displacementtypeinelasticcomponent* olarak tanımlanan HE300B enkesitli bağ kirişlerin plastik mafsallık bileşeni Şekil 3.10’da sunulmuştur.

Çizelge 3.5 : Bağ kirişleri kesme kuvveti plastik mafsallı davranış modeli değişkenleri.

Kat	Kesit	V_p (kN)	$1.5V_p$ (kN)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)
7	HE200B	252	379	0	3.28	130.11	133.38	148.52
6	HE200B	252	379	0	3.28	130.11	133.38	148.52
5	HE240B	340	510	0	4.03	159.05	163.08	181.55
4	HE240B	340	510	0	4.03	159.05	163.08	181.55
3	HE300B	476	713	0	5.16	202.45	207.62	231.09
2	HE300B	476	713	0	5.16	202.45	207.62	231.09
1	HE300B	476	713	0	5.16	202.45	207.62	231.09

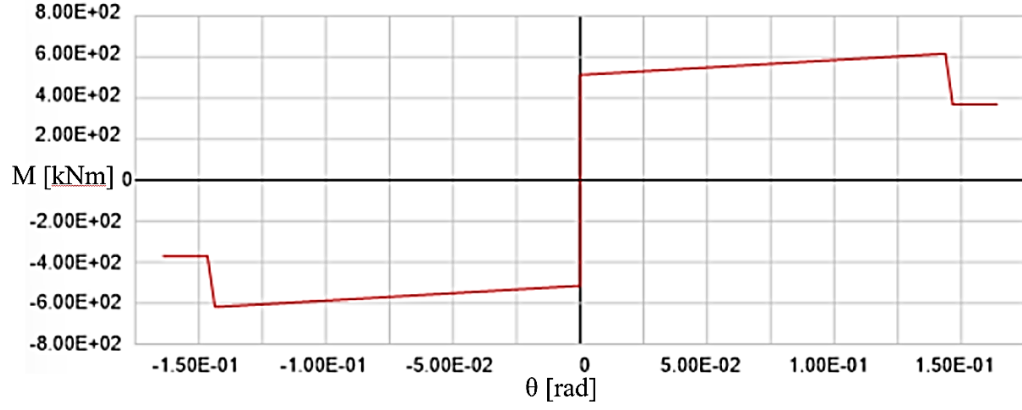


Şekil 3.10 : HE300B bağ kirişi kesme plastik mafsallı tanımı PERFORM-3D [17].

Bağ kirişlerinde meydana gelmesi durumunda izlenebilmesi için davranış ile uyumlu olarak tanımlanan kesme plastik mafsallarına ek olarak bağ kirişi uçlarında moment – dönme ilişkisini içeren plastik mafsalları yapılmıştır. Bağ kirişlerinin elde edilen moment – dönme ilişkisi her bir katta bulunan bağ kirişleri için Çizelge 3.6’da sunulmuştur. PERFORM-3D [17] bilgisayar yazılımında *momenthingetypeinelasticcomponent* olarak tanımlanan HE300B enkesitli bağ kirişlerin plastik mafsallı bileşeni Şekil 3.11’de sunulmuştur.

Çizelge 3.6 : Bağ kirişleri moment plastik mafsallı davranış modeli değişkenleri.

Kat	Kesit	M_p (kN)	$1.2M_p$ (kN)	A (rad)	B (rad)	C (rad)	D (rad)	E (rad)
7	HE200B	177	212	0	0.004	0.144	0.147	0.164
6	HE200B	177	212	0	0.004	0.144	0.147	0.164
5	HE240B	290	348	0	0.004	0.144	0.147	0.164
4	HE240B	290	348	0	0.004	0.144	0.147	0.164
3	HE300B	514	617	0	0.004	0.144	0.147	0.164
2	HE300B	514	617	0	0.004	0.144	0.147	0.164
1	HE300B	514	617	0	0.004	0.144	0.147	0.164

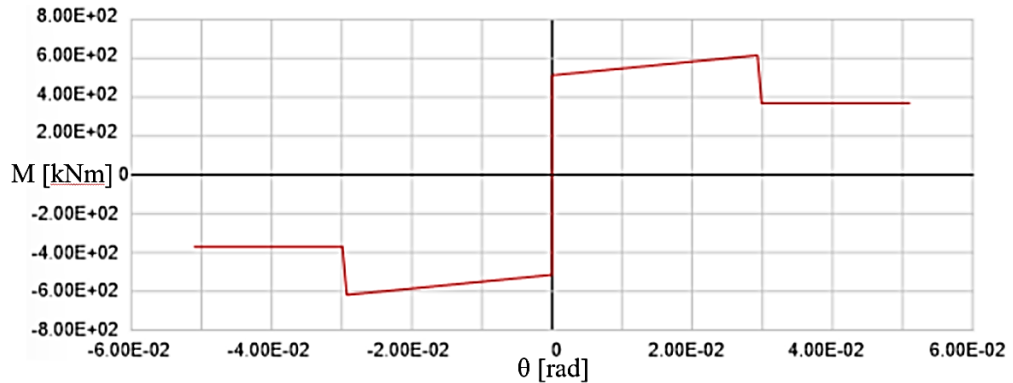


Şekil 3.11 : HE300B bağ kirişi moment plastik mafsalı tanımı [17].

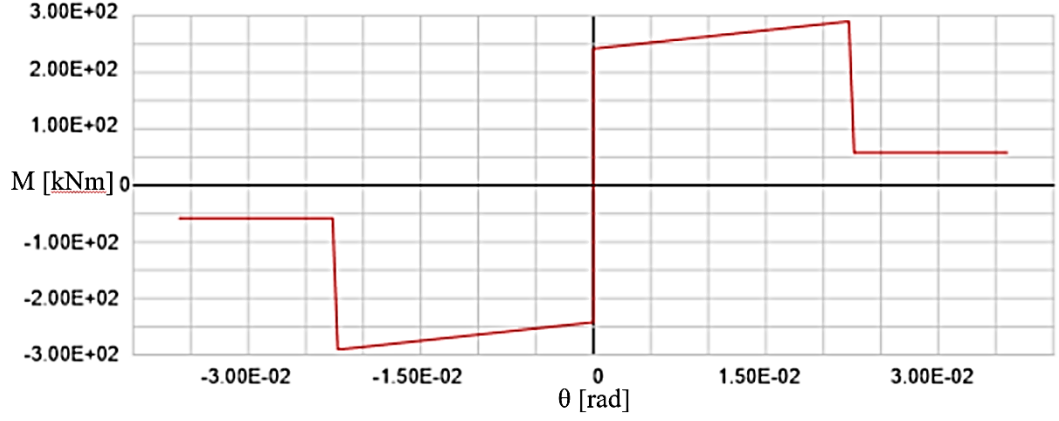
Bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümünün doğrusal analizler sonucu elde edilen veriler ışığında aksel yük – moment bileşik etkisinde olduğu görülmektedir. Bu sebeple, aksel yük taleplerine bağlı olarak elastik ötesi davranışı temsilen elde edilen moment – dönme ilişkisi her bir katta bulunan BKDKKB için Çizelge 3.7’de sunulmuştur. Şekil 3.8’de BKDKKB için plastik mafsal tanımı yapılan bölgeler gösterilmiştir. PERFORM-3D bilgisayar yazılımında *momenthing*, *rotationtypeinelasticcomponent* olarak tanımı yapılan HE300B enkesitli 1. kat BKDKKB plastik mafsal bileşeni Şekil 3.12’de sunulmuştur.

Çizelge 3.7 : BKDKKB moment plastik mafsalı davranış modeli değişkenleri.

Kat	Kesit	M_p (kN)	$1.2M_p$ (kN)	A (rad)	B (rad)	C (rad)	D (rad)	E (rad)
7	HE200B	177	212	0	0.007	0.048	0.055	0.083
6	HE200B	177	212	0	0.007	0.048	0.055	0.083
5	HE240B	290	348	0	0.006	0.039	0.045	0.067
4	HE240B	290	348	0	0.006	0.039	0.044	0.067
3	HE300B	514	617	0	0.004	0.029	0.034	0.051
2	HE300B	514	617	0	0.004	0.029	0.033	0.050
1	HE300B	514	617	0	0.004	0.029	0.034	0.051



Şekil 3.12 : 1. kat HE300B BKDKKB plastik mafsalı tanımı [17].



Şekil 3.14 : 2. kat HE400B kolon plastik mafsali tanımı PERFORM-3D.

Çizelge 3.9 : Kolonlar moment plastik mafsali davranış modeli değişkenleri.

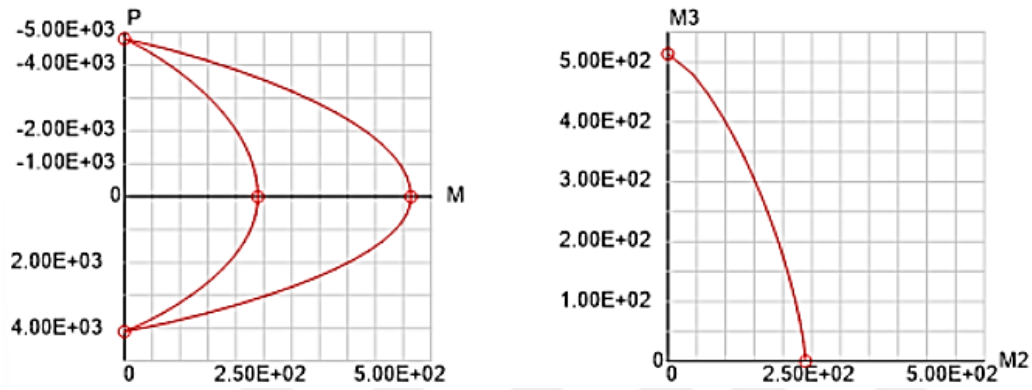
Kat	Kesit	M_p (kN)	$1.2M_p$ (kN)	A (rad)	B (rad)	C (rad)	D (rad)	E (rad)
7	HE360B	952	1143	0	0.005	0.037	0.042	0.064
6	HE360B	952	1143	0	0.005	0.033	0.038	0.057
5	HE360B	860	1032	0	0.004	0.027	0.032	0.048
4	HE400B	1043	1251	0	0.004	0.025	0.029	0.044
4	HE450B	1183	1419	0	0.003	0.018	0.021	0.031
3	HE400B	891	1069	0	0.003	0.016	0.019	0.027
3	HE450B	972	1166	0	0.003	0.010	0.012	0.016
2	HE400B	734	881	0	0.005	0.037	0.042	0.064
2	HE450B	P/P _c >0.50 (Çizelge 5.15 & Çizelge 5.16)						
1	HE400B	P/P _c >0.50 (Çizelge 5.15 & Çizelge 5.16)						
1	HE450B	P/P _c >0.50 (Çizelge 5.15 & Çizelge 5.16)						

3.3.2 Dayanım kesiti tanımları

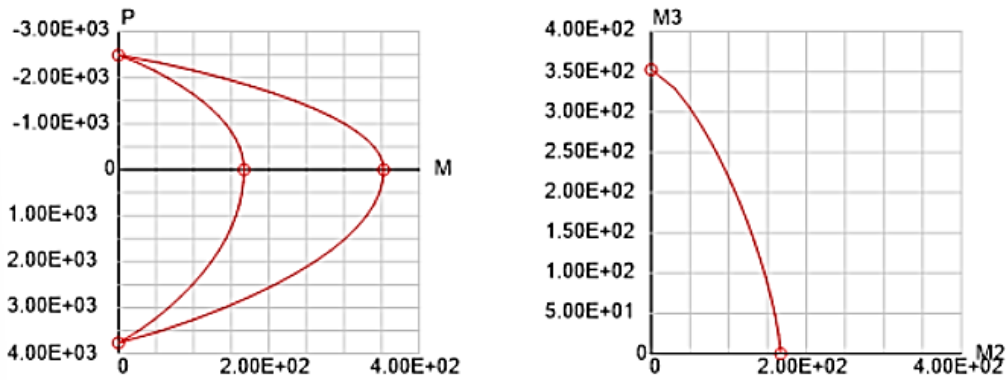
Bu bölümde kolon, çapraz ve BKDKKB elemanları için PERFORM-3D [17] bilgisayar yazılımında yapılan dayanım kesiti tanımları sunulmuştur. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucu taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen şekildeğişirmelerin elastik bölge ile sınırlı kalması durumunda, doğrusal davranışla sınırlı kalan bileşik etkilerin izlenebilmesi amacıyla PERFORM-3D [17] bilgisayar yazılımında her bir kesit tipi için bu çalışmanın beşinci bölümünde sunulan dayanıma göre tasarım esaslarına bağlı olarak hesaplanan kesit dayanımları tanımlanmıştır. Kolon, BKDKKB ve çapraz elemanlar üzerindeki bileşik lineer etkilerin izlenebilmesi amacıyla her bir kesit tipi için burkulma boyları ile uyumlu *P-M2-M3 StrengthSectionSteel* tanımı yapılmıştır. Her bir eleman türü için birinci katta tanımlanan tipik PERFORM-3D [17] etkileşim diyagramları aşağıda sırası ile sunulmuştur.



Şekil 3.15 : HE450B kolon PERFORM-3D [17], P-M2-M3 StrengthSectionSteel.



Şekil 3.16 : HE300B BKDKKB PERFORM-3D [17], P-M2-M3 StrengthSectionSteel.



Şekil 3.17 : HE240B çapraz PERFORM-3D [17], P-M2-M3 StrengthSectionSteel.

3.4 Deprem İvme Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Bu çalışma kapsamında deprem yükleri altında doğrusal olmayan yapısal davranışın incelenebilmesi amacıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz (ZTADOA) yönteminden yararlanılmıştır. Bu analiz yönteminin uygulanabilmesi için uygun deprem yer hareketlerine ait ivme kayıtlarının belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre, TBDY 2018 2.5.1.3 [1] uyarınca, her bir deprem kaydı takımında birbirine dik ana doğrultuları temsil eden ikişer adet gerçek deprem yer hareketi ivme kaydı olmak üzere, 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı seçilmiştir. Bu kayıtlar seçilirken, tasarıma esas deprem yer hareketi ile uyumlu olacak şekilde; faylanma mekanizmaları, faya uzaklık, yerel zemin şartları ve deprem büyüklüğü gibi değişkenler dikkate alınmıştır.

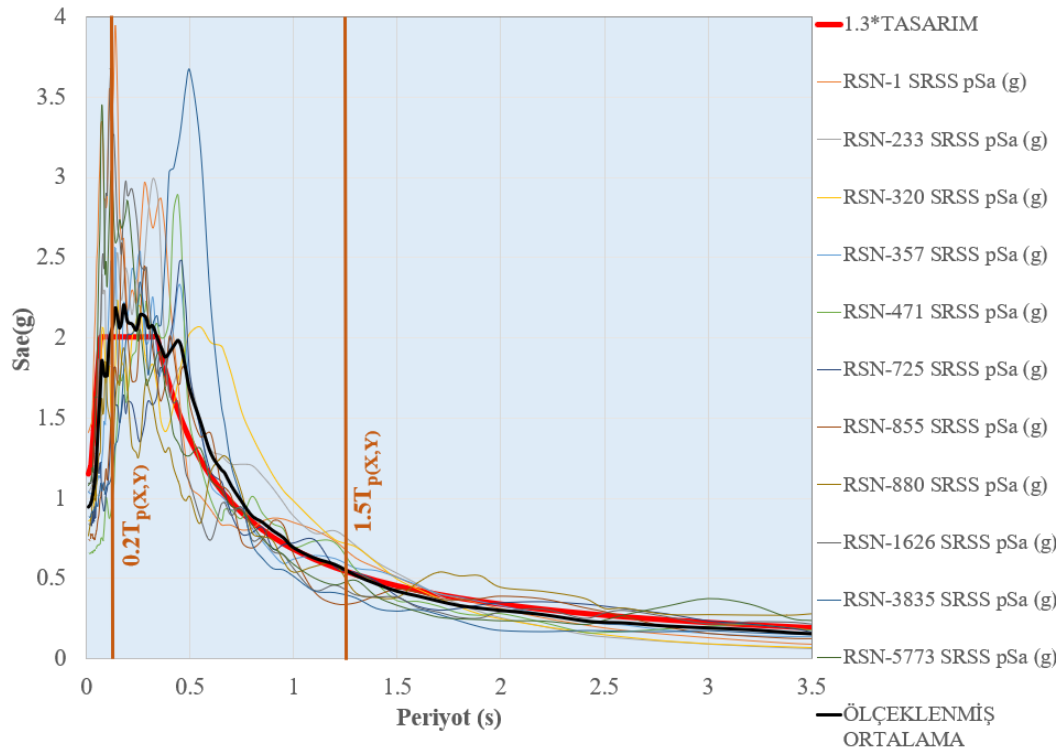
Deprem yer hareketi ivme kayıtları, Pasific Earthquake Engineering Research Center (PEER) [28] ivme kayıtları kütüphanesi kullanılarak temin edilmiştir. Seçilen deprem yer hareketi ivme kayıtları ve özellikleri Çizelge 3.10'da verilmiştir. Deprem yer hareketi ivme kayıtları seçilirken aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır:

- 1- Bina, Kuzey Anadolu Fay Hattı'na yaklaşık 10 km uzaklıktadır (Şekil 2.4). Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın faylanma mekanizması doğrultu atımlıdır. Binanın faya uzaklığı ve fay hattı davranışı ile uyumlu olarak 9 adet doğrultu atımlı kayıt ve farklı faylanma mekanizmasını da dikkate alabilmek için 2 adet ters kırık deprem ivme kaydı seçilmiştir.
- 2- Binanın bulunduğu konuma ait zemin sınıfı (ZC) ile uyumlu olarak, deprem yer hareketi ivme kayıtları seçilirken zemin için üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı, (V_{s30}) 360-760 m/sn aralı esas alınarak sınırlandırılmıştır.
- 3- Tasarıma esas deprem yer hareket düzeyi ile uyumlu olarak, kayıtların filtrelenmesi ve seçiminde kullanılan deprem büyüklüğü aralığı 5.5 – 8.0 olarak belirlenmiştir.

Yukarıdaki kriterler ile uyumlu deprem yer hareketi ivme kayıtlarının seçimi sonrası, söz konusu kayıtlar, bina taşıyıcı sisteminin analizi için uygun hale getirilebilmesi amacıyla TBDY 2018 2.5.2.1(b)'de [1] belirtilen koşullar esas alınarak ölçeklendirilmiştir. Basit ölçeklendirme yapılırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- 1- Her bir deprem yer hareketi kaydı için, ana yatay doğrultulardaki ivme bileşenleri, karelerinin toplamının karekökü (SRSS) yöntemi uygulanarak birleştirilir ve bileşke yatay elastik ivme spektrumları oluşturulur.
- 2- Her bir deprem ivme kaydına ait bileşke yatay elastik ivme spektrumları kullanılarak ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumu elde edilir.
- 3- Elde edilen ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumuna ait genliklerin, hakim modal titreşim periyodunun fonksiyonu olarak hesaplanan $0.2T - 1.5T$ zaman aralığında tasarım spektrumu genliklerinin 1.3 katından az olmaması gerekmektedir, [1]. Her bir deprem ivme kaydı için belirtilen koşulu sağlayan ölçek faktörleri elde edilir.

Bu çalışma kapsamında, ölçeklendirilmiş ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumu, yukarıda belirtilen koşullar altında PEER [28] ölçeklendirme modülü kullanılarak elde edilmiştir. Her bir deprem kaydı takımına ait hesaplanan ölçek faktörleri Çizelge 3.10'da ve her bir deprem kaydına ait ölçeklendirilmiş yatay elastik ivme spektrumu, 1.3 katsayısı ile büyütülmüş yatay elastik tasarım spektrumu ve ölçeklendirilmiş ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumu Şekil 3.18'de verilmiştir.



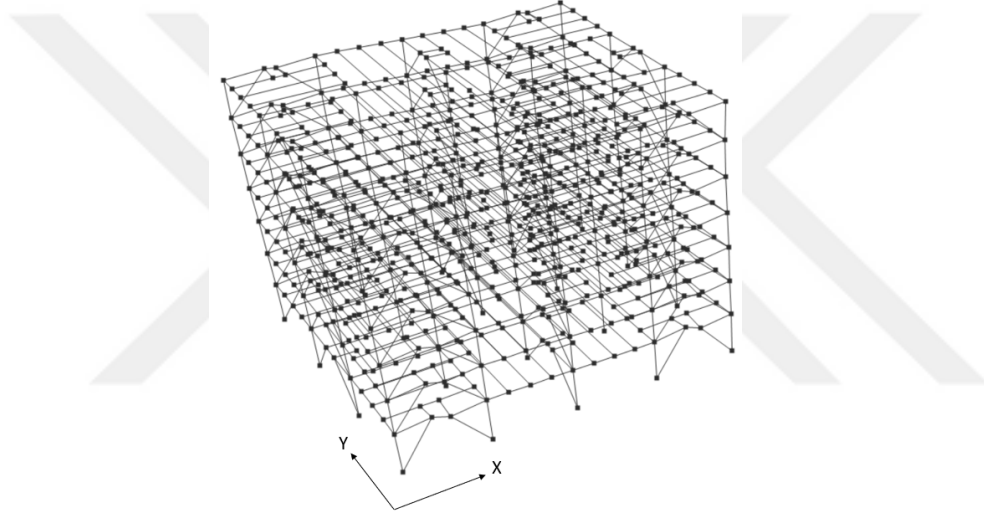
Şekil 3.18 : Ölçeklendirilmiş yatay elastik ivme spektrumları, bileşke spektrum ve hedef spektrumu.

Çizelge 3.10 : Deprem kayıtları ve özellikleri.

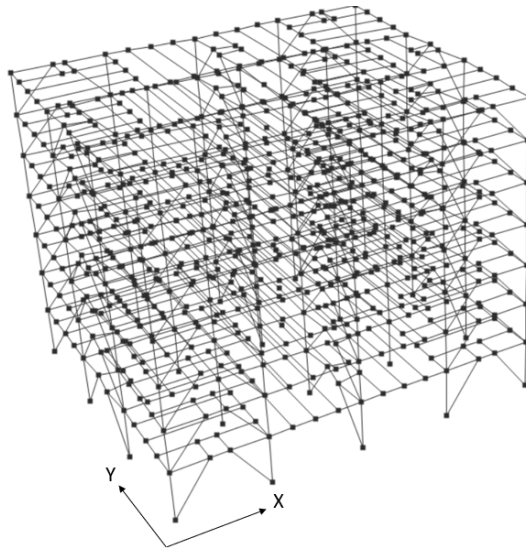
NO	Deprem Adı	PEER RSN	Ölçek Faktörü	Büyüklik	Faylanma Mekanizması	V _{S30} (m/s)	Kayıt Süresi (sn)
EQ1	Helena_Montana-01	1	6.10	6	doğrultu atımlı	593	50.930
EQ2	Mammoth Lakes-02	233	4.23	5.69	doğrultu atımlı	382	29.995
EQ3	Mammoth Lakes-10	320	3.84	5.34	doğrultu atımlı	382	40.000
EQ4	Coalinga-01	357	5.57	6.36	ters kırık	565	59.990
EQ5	Morgan Hill	471	6.13	6.19	doğrultu atımlı	544	28.365
EQ6	Superstition Hills-02	725	1.49	6.54	doğrultu atımlı	317	22.300
EQ7	Landers	855	4.38	7.28	doğrultu atımlı	367	40.000
EQ8	Landers	880	4.19	7.28	doğrultu atımlı	355	99.815
EQ9	Sitka_Alaska	1626	8.26	7.68	doğrultu atımlı	650	55.095
EQ10	Denali_Alaska	3835	7.26	7.9	doğrultu atımlı	428	83.595
EQ11	Iwate_Japan	5773	3.82	6.9	ters kırık	531	60.000

3.5 Modal Analiz Sonuçları

Bu bölümde PERFORM-3D [17] ile yürütülen modal analizlere ait sonuçlar sunulmuştur. Analiz programında gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda; baskın serbest öteleme titreşim periyodu X doğrultusunda $T_x= 0.86s$ ve Y doğrultusunda $T_y= 0.86s$ olarak elde edilmiştir. Baskın modlara ilişkin modal kütle katılım oranı X doğrultusunda 0.813, Y doğrultusunda 0.814'tür. Her iki analiz yöntemi ile elde edilen yapı ana doğrultularındaki serbest öteleme titreşim periyotları ve modal kütle katılım oranları birbiri ile uyumludur. Ana doğrultulardaki hakim modlara ait mod şekilleri Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de sunulmuştur.



Şekil 3.19 : Mod-1, $T_x=0.86s$ PERFORM-3D [17].



Şekil 3.20 : Mod-2, $T_y=0.86s$ PERFORM-3D [17].

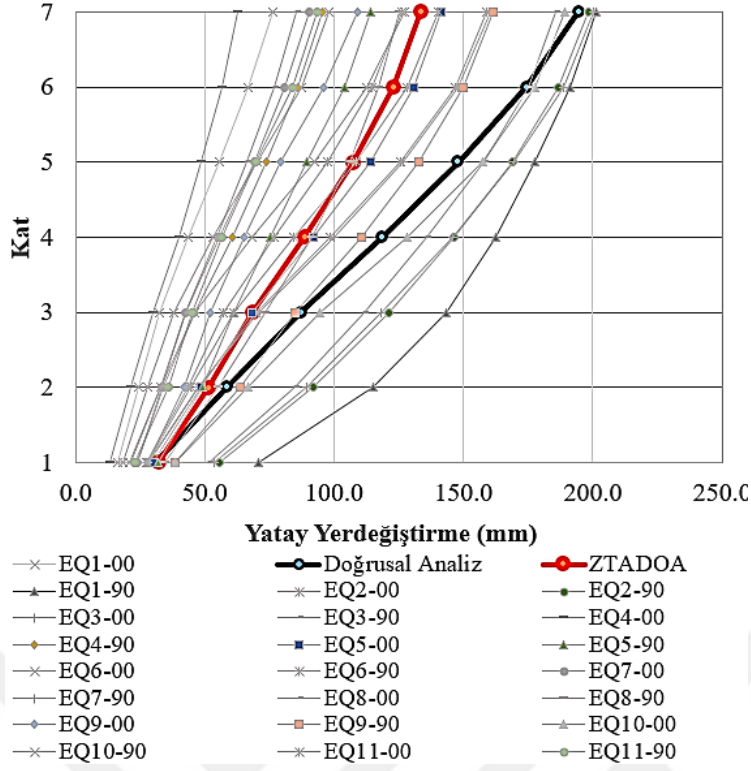
4. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ölçeklendirilen 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı etkisinde ZTADOA gerçekleştirilerek elemanlara ait en büyük deprem talepleri elde edilmiştir. Her bir deprem kaydı için elde edilen en büyük deprem talepleri; görelî kat öteleme oranları, kat kesme kuvvetleri, deprem yükü oranı ve tasarım büyütme katsayıları, bağ kirişî dışında kalan çerçeve elemanlarının iç kuvvetleri ve bağ kirişî kesme kuvveti- yerdeğîştirme ile eğilme momenti-dönme davranışları olarak elde edilmiştir. Değerdendirmeye esas şekildeğîştirme ve iç kuvvet talepleri de, yapılan 22 adet analizin her birinden elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerdlerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır.

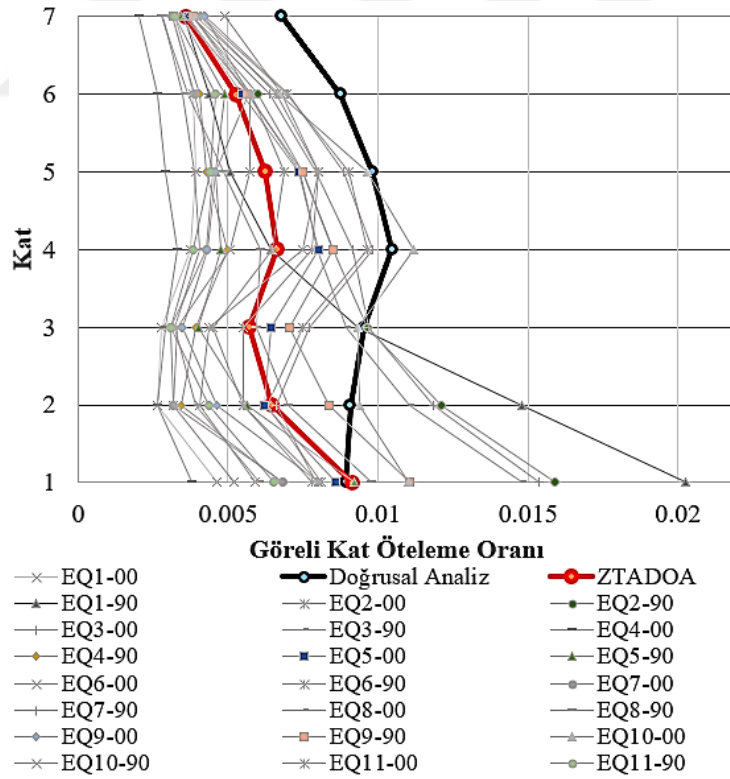
Elde edilen talepler, TBDY 2018'de [1] süneklik düzeyi yüksek DMÇÇÇ için öngörülen kapasite tasarım ilkeleri doğrudusunda verilen koşullar göz önünde bulundurularak da değerdendirilmiştir.

4.1 Görelî Kat Öteleme Oranları

ZTADOA sonucu en büyük mutlak değerdlerinin ortalaması olarak elde edilen kat yerdeğîştirme değerdleri ve görelî kat öteleme oranları sırasıyla, Şekil 4.1'de ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde, ZTADOA sonucunda elde edilen ortalama-en büyük kat yerdeğîştirme değerdlerinin doğrusal hesap yöntemi ile hesaplanan değerdlerden daha küçük olarak elde edildiğî, benzer durumun Şekil 4.2'de görelî kat ötelemeleri için de gerçekteğîğî görülmektedir.



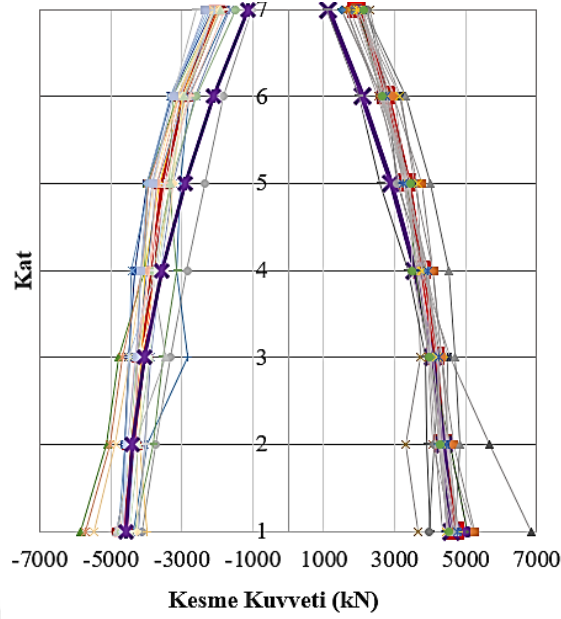
Şekil 4.1 : En büyük mutlak değerler olarak kat yerdeğiştirmeleri ve ortalama değerler.



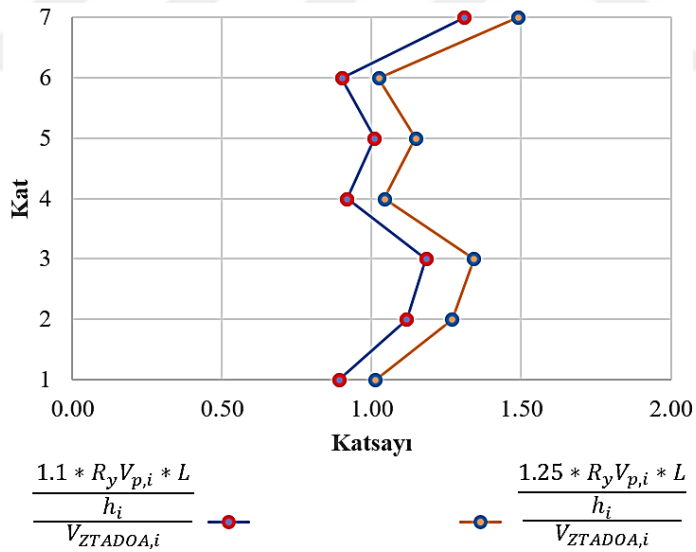
Şekil 4.2 : En büyük mutlak değerler olarak görelü kat ötelemesi oranları ve ortalama değerler.

4.2 Kat Kesme Kuvvetleri

Doğrusal analiz ve ZTADOA sonucunda elde edilen kat kesme kuvvetleri Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Taşıyıcı sistemin akma durumuna karşı gelen taban kesme kuvveti, tasarım taban kesme kuvvetinin (V_E / R) dayanım fazlalığı katsayısı D ile çarpılarak büyütülmesi şeklinde elde edilebilmektedir. ZTADOA sonucunda elde edilen taban kesme kuvvetinin tasarım taban kesme kuvvetine oranı 2.58 olarak hesaplanmaktadır. Dayanım fazlalığı katsayısı D 'nin dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler için 2.50 olarak verildiği düşünüldüğünde bu katsayının, tüm bağ kirişlerinin plastikleştiği göz önüne alındığında (akma durumu), uygun bir değer olarak belirlendiği anlaşılmaktadır. Mekanizma durumuna ilişkin meydana gelmesi beklenen kat kesme kuvvetleri, taban kesme kuvveti ve kolonlarda meydana gelen iç kuvvet talepleri tipik bir DMÇÇÇ üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2.14). Şekil 4.4'te mekanizma durumuna bağlı olarak tasarım büyütme katsayıları ile elde edilen kat kesme kuvvetlerinin ZTADOA yöntemiyle elde edilen kat kesme kuvvetlerine oranı sunulmuştur. Kesme kuvveti etkisinde artarak ilerleyen kayma şekildeğiştirmeleri nedeniyle, bağ kirişlerinin kesme kuvveti dayanımları, beklenen akma gerilmesi ve pekleşme göz önünde tutulduğunda, modelleme aşamasında dikkate alındığı gibi, $V_u = 1.5V_p$ değerine ulaşabilmektedir. Bu durumda Şekil 4.4 incelendiğinde, $1.25R_y$ ($R_y = 1.3$) ile büyütülen V_p değerlerinin, bağ kirişinin plastikleşmesine karşı gelen yükleme durumunu daha tutarlı bir şekilde temsil ettiği görülmektedir. Ancak bu durumun, özellikle kat sayısının üçten fazla olduğu dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin kolonları için oldukça emniyetli bir tasarım anlamına geleceği düşünülmelidir. Bu durumda en alt kattaki kolon için mekanizma durumuna karşı gelen eksenel kuvvetin, en az üç katın dikkate alınması halinde, $P_{kolon} = 1.1R_y (V_{p,2} + V_{p,3} - R_{col})$ şeklinde hesaplanması uygun görünmektedir. TBDY 2018'de, dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveleri oluşturan çaprazların gerekli dayanımlarının hesabı için ise, bağ kirişlerinin plastikleşmesine neden olan yüklemenin $1.25R_y$ katı ve kirişlerin betonarme döşemeler ile birlikte kompozit olarak çalıştığı BKDKKB elemanları için de $1.1R_y$ katı ile büyütülmesi öngörülmektedir. Buna göre, bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarının boyutlandırılmasında esas alınacak iç kuvvetlerin güvenli bir yaklaşıklıkta tahmin edilebilmesi bakımından kapasite tasarımı ilkelerine uygun olarak öngörülen tasarım büyütme katsayılarının yeterli yaklaşıklığı sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.3 : Ortalama ve en büyük kat kesme kuvvetleri.

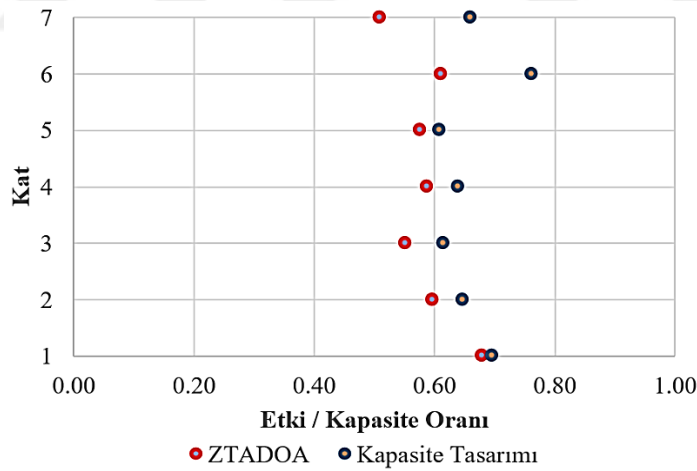


Şekil 4.4 : Kat kesme kuvveti oranları ve tasarım büyütme katsayıları.

Yukarıdaki şekillerde yer alan R_y , $V_{p,i}$, h_i , L , $V_{ZTADOA,i}$, $P_{düşey}$ ve P_{kolon} sırasıyla; beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını, i 'inci katın bağ kirişinin plastik kesme kuvveti dayanımını, kat yüksekliğini, çerçeve açıklığını, ZTADOA sonucu elde edilen kat kesme kuvvetini, kolonda düşey yüklerden oluşan aksel kuvveti, mekanizma durumunda toplam kolon aksel kuvvetini göstermektedir.

4.3 Bağ Kirişi Dışında Kalan Kiriş Bölümleri

Bağ kirişlerinin dışında kalan kiriş bölümlerinin etki/kapasite oranları, ZTADOA sonucu elde edilen eğilme momenti istemleri ile düğüm noktası denge denklemleri kullanılarak elde edilen eksenel kuvvetlerin etkileşim denklemi (Denklem 2.13) yardımıyla birleştirilmesi suretiyle hesaplanmıştır. Dışmerkez aprazlı elik çerçevelerde bağ kirişlerinin dışında kalan kiriş bölümleri için, eksenel yük ve eğilme momenti etkisine bağlı olarak tanımlanan plastik mafsallarda elastik ötesi davranış gözlemlenmemiştir. Şekil 4.5, ZTADOA sonuçlarının en büyük mutlak değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen etki/kapasite oranları ile kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda hesaplanan etki/kapasite oranlarının dağılımını göstermektedir. Boyutlandırma aşamasında deprem talepleri, kapasite tasarımı ilkelerine uygun olarak, kirişlerin döşeme plağı ile birlikte kompozit olarak çalıştığı varsayıldığında, $1.1R_yV_p/V_e$ oranı ile büyütülen i kuvvetlerden oluşmaktadır. ZTADOA modelinde döşeme plağının etkisi göz önüne alınmamasına rağmen, elde edilen etki/kapasite oranlarının kat hizaları boyunca dağılımları arasında iyi düzeyde bir uyum olduğu görülmektedir.

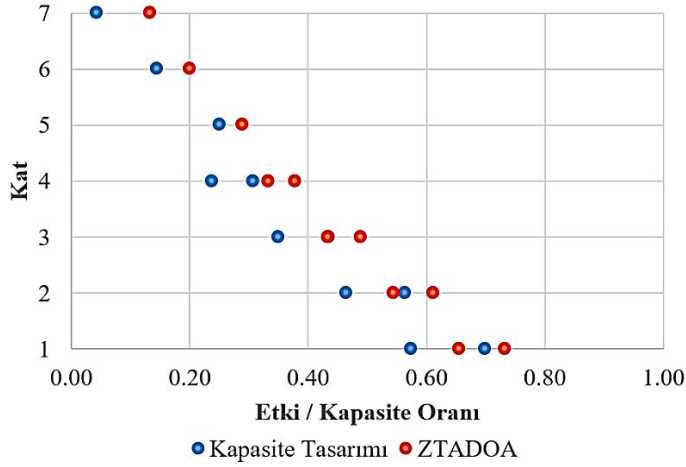


Şekil 4.5 : BKDKKB için etki/kapasite oranlarının dağılımı.

4.4 Kolon Elemanları

ZTADOA sonuçlarına göre dışmerkez aprazlı elik çerçeveleri oluşturan tüm kolon elemanlarda eksenel yükün ve eğilme momentinin bileşik etkisinde meydana gelen Şekildeğiştirmelerin elastik bölge içinde kaldığı görülmüştür. Şekil 4.6, ZTADOA ile elde edilen en elverişsiz etkiler altındaki kolonlar için en büyük mutlak değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen etki/kapasite oranları ile kapasite tasarımı ilkeleri

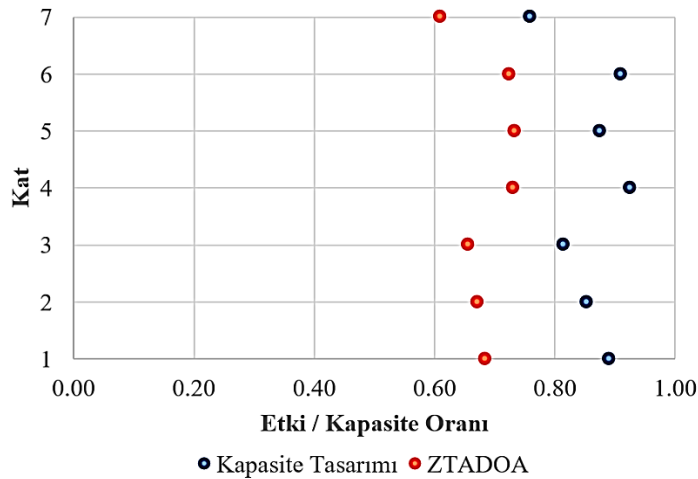
doğrultusunda hesaplanan etki/kapasite oranlarının dağılımlarını kat düzeyinde göstermektedir. Elde edilen etki/kapasite oranlarının bina yüksekliği boyunca belirli bir uyum içinde olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.6 : Kolonlarda etki/kapasite oranlarının dağılımı.

4.5 Çapraz Elemanları

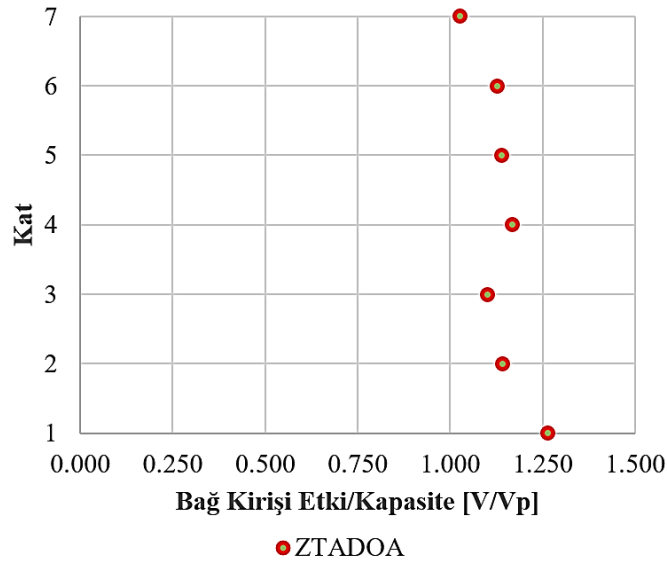
Çapraz elemanlar için hesaplanan ortalama-en büyük etki/kapasite oranlarının dağılımı, her bir kattaki en elverişsiz sonuçlara göre doğrusal ve doğrusal olmayan analizler için Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Şekil 4.7 incelendiğinde, kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda en elverişsiz durumdaki düşey çaprazlar için, eksenel kuvvet ve eğilme momentinin bileşik etkisi altında hesaplanan iç kuvvet taleplerinin, ZTADOA sonucunda elde edilen iç kuvvet taleplerine oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda, doğrusal analiz sonucunda elde edilen deprem taleplerinin $1.25R_y V_p / V_e$ katsayısı ile büyütülmesi güvenli tarafta kalan bir yaklaşım sağlamaktadır.



Şekil 4.7 : Çapraz elemanları ortalama – en büyük etki/kapasite dağılımı.

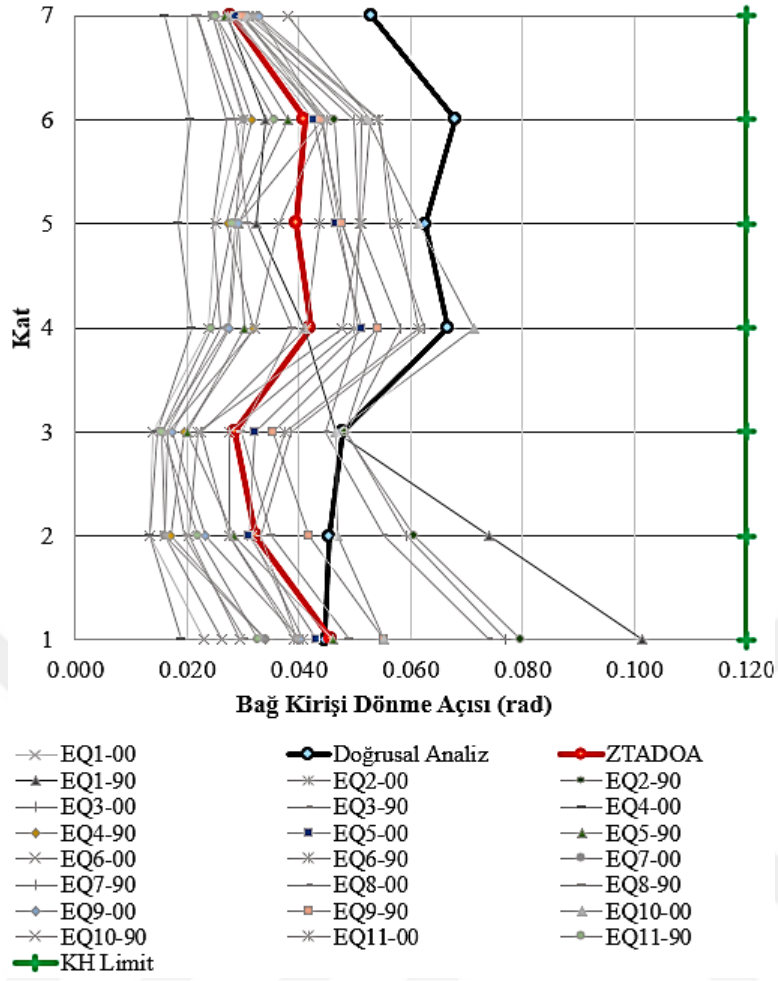
4.6 Bağ Kirişleri

Bağ kirişleri TBDY 2018 9.8.2 [1] uyarınca, kesme kuvveti etkisinde plastik şekildeğiştirme gösterecek şekilde ($V_n = V_p$) kısa bağ kirişleri olarak boyutlandırılmıştır. Bağ kirişlerinin uzunlukları ve enkesitleri katlar arasında farklılık göstermektedir. ZTADOA sonucunda en elveriğsiz durumdaki bağ kirişlerinin enkesitlerinde meydana gelen ortalama-en büyük kesme kuvveti taleplerinin, plastik kesme kuvveti kapasitelerine oranı Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Tüm katlarda bulunan bağ kirişleri, plastik kesme kuvveti kapasitelerine ulaşmıştır. Kısa bağ kirişlerinde kesme kuvveti etkisinde gerçekleşen elastik ötesi davranışın (kayma şekildeğiştirmeleri), TBDY 2018’de kısa bağ kirişleri için öngörülen $e < 1.6M_p/V_p$ uzunluk sınırı ifadesi ile uyumlu olduğu görülmektedir.



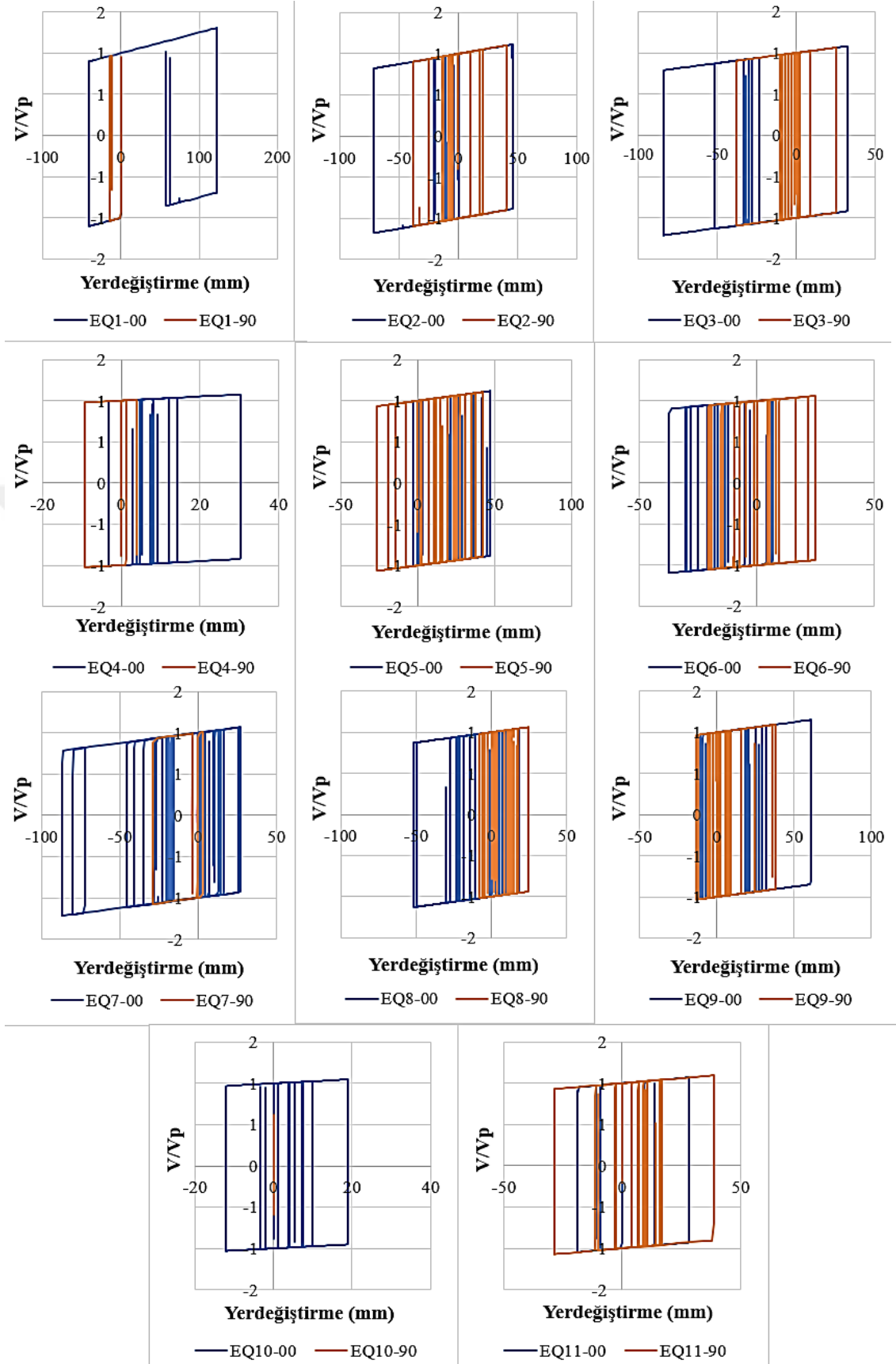
Şekil 4.8 : Bağ kirişi kesme kuvveti talepleri / plastik kesme kuvveti kapasitesi dağılımı.

Bağ kirişi dönme açıları göreli kat ötelemesi oranlarına bağlı olarak hesaplanmıştır (Şekil 2.10), [1]. Şekil 4.9, bağ kirişlerinde meydana gelen ortalama-en büyük dönme açılarının katlara göre dağılımını göstermektedir. Kısa bağ kirişleri için tasarımda dikkate alınan bağ kirişi dönme açısı sınır değeri 0.08 radyandır. Kontrollü Hasar (KH) şekildeğiştirme sınırı olarak verilen plastik dönme değeri 0.12 radyandır, [1]. Hiç bir katta KH sınır değerinin aşılmadığı görülmektedir.



Şekil 4.9 : Bağ kirişlerinin dönme açıları dağılımı.

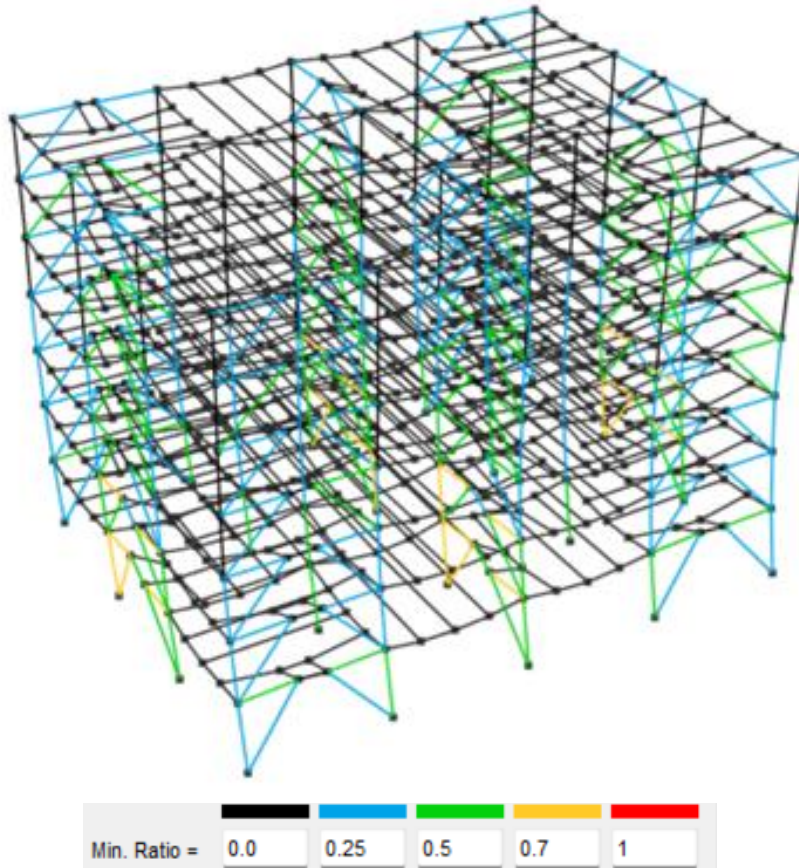
Tipik bir bağ kirişi için kesme kuvveti-dönme eğrileri Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Burada 3 aksı üzerindeki, A ve B aksları arasında bulunan 1. kat bağ kirişinin 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı altında, plastik mafsal davranışı sergilenmiştir. İlgili bağ kirişinde en büyük şekildeğiştirme, EQ1-00 (RSN1_HELENA.A_A-HMC180) deprem kaydı altında 123mm, buna karşı gelen bağ kirişi dönme açısı 0.088 radyan ve kesme kuvveti değeri $1.3 \cdot V_p$ olarak elde edilmiştir.



şekil 4.10 : 3 Aksı zerindeki A ve B aksları arasında kalan 1. kat bağ kirişi plastik mafsalından elde edilen kesme kuvveti – dönme eğrileri.

4.7 Bina Performans Özeti

ZTADOA yöntemi ile hesaplanan en elverişsiz değerlerin ortalamaları esas alındığında; bağ kirişi dışında kalan taşıyıcı sistem elemanlarının elastik bölge sınırları içerisinde kaldığı, yalnızca bağ kirişlerinde plastik davranış gözlemlendiği ve hiçbir elemanın ileri hasar düzeyinde bulunmadığı elde edilmiştir. Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların uç birleşimlerinin ve eklerinin yeterli kapasiteye sahip olduğu varsayımına bağlı olarak, incelenen binanın DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde normal performans hedefi olan Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyini sağladığı görülmüştür. Taşıyıcı sistem elemanlarına ait *P-M2-M3StrengthSectionSteel* ve *inelastichinge* tanımlarının EQ1-00 (RSN1_HELENA.A_A-HMC180) deprem kaydı altında kullanım oranlarını içeren eleman bazında renkli dağılım Şekil 4.11’de sunulmuştur.



Şekil 4.11 : EQ1-00 deprem kaydı altında taşıyıcı sistem elemanlarında talep/kapasite dağılımı.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, TBDY 2018’de [1] belirtilen kapasite tasarım ilkelerine uygun olarak boyutlandırılan, her iki asal doğrultusunda yatay yüklerin süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı yedi katlı bir ofis binasının ZTADOA yöntemi ile deprem performansı irdelenmiştir. Basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilen 11 adet deprem yer hareketi ivme kayıt takımı kullanılarak toplam 22 adet ZTADOA gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması esas alınarak TBDY 2018’de [1] öngörülen kapasite tasarımı yaklaşımının yeterliliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- 1- Bina taşıyıcı sisteminin doğrusal olmayan davranışı, tasarım prensibi ile uyumlu olarak, sadece bağ kirişlerinin plastik şekildeğiştirme göstermesi ile gerçekleşmiştir.
- 2- Tasarımda öngörüldüğü gibi, plastik şekildeğiştirmeler kesme kuvveti etkisinde meydana gelmiştir.
- 3- Bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarında oluşan şekildeğiştirmeler elastik bölge içinde kalmıştır.
- 4- Bağ kirişleri kesme etkileri altında performans hedeflerini sağlayacak yeterli şekildeğiştirme kapasitesine sahiptir. Boyutlandırma esaslarına göre hesaplanan en büyük bağ kirişi dönme açısı 0.07 radyan iken, ZTADOA ile hesaplanan en elverişsiz bağ kirişi dönme açısı 0.05 radyan olarak elde edilmiştir.
- 5- Bağ kirişleri enkesitinde oluşan ortalama-en büyük kesme kuvveti etkisi birinci katta ve $1.26V_p$ ’dir.
- 6- Bağ kirişi dışında kalan DMÇÇÇ elemanlarının boyutlandırılmasında, bağ kirişinin plastikleşmesine neden olan yüklemenin pekleşmeli beklenen malzeme dayanımı katsayıları ile büyütülmesi esasına dayalı kullanılan

$1.1R_yV_p/V_e$ ve $1.25R_yV_p/V_e$ büyütme katsayıları, ZTADOA sonucu elde edilen ortalama-en büyük iç kuvvetler ile uyumludur.

- 7- Bağ kirişlerinin yapı yüksekliği boyunca herhangi bir katta bir yığılma göstermeksizin üniforma yakın bir şekilde plastikleştiği gözlenmiştir.
- 8- Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların hiç birinde ileri hasar düzeyi gözlenmemiştir. Buna göre birleşim ve eklerin yeterli dayanıma sahip olduğu varsayıldığında, TBDY 2018 15.8.4 [1] uyarınca, bina taşıyıcı sisteminin mevcut çelik yapılar için DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde normal performans hedefi olarak tanımlanan Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyini sağladığı görülmektedir.

Böylece, süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin tasarımında TBDY 2018'e [1] göre uygulanan kapasite tasarımı esaslarının, elastik bölge içinde kalması istenen elemanların boyutlandırılması için gerekli olan deprem taleplerinin belirlenmesinde, yeterli düzeyde bir yaklaşıklık sağladığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **TBDY** (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [2] **TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası** (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY – 2018) Eğitim Elkitabı Açıklamalar ve Uygulama Örnekleri. Ankara.
- [3] **Vetr, M. G. & Ghamari, A.** (2016). An analytical model for inelastic cyclic response of eccentrically braced frame with vertical link (V-EBF). *Case Studies in Structural Engineering*, 6, 31-44.
- [4] **Caprili, S., Mussini, N. & Salvatore, W.** (2018). Experimental and numerical assessment of EBF structures with shear links. *Steel and Composite Structures*, 28 (2), 123-138.
- [5] **Silva, A. R. D., Batelo, E.A.P. & Silveria, R.A.M.** (2013). Refined Elastoplastic Analysis of Plane Steel Frames Under Extreme Dynamic Loading. (Z.J.G.N Del Prado (Editör), *In proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE2013*, (s.2-18). Pirenópolis, GO, BRAZIL: Kasım 10-13.
- [6] **Popov, E. P., Ricles, J. M. & Kasai, K.** (1992). Methodology for optimum EBF link design, *in proceedings Earthquake Engineering Tenth World Conference*, (s.3983-3988). Balkema, Rotterdam, NETHERLAND.
- [7] **Bosco, M. & Rossi, P.P.** (2009). Seismic behavior of eccentrically braced frames, *Engineering Structures*, 31, 664-674.
- [8] **Koboevic, S. & David, S.O.** (2010). Design and Seismic Behaviour of Taller Eccentrically Braced Frames, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 195-208.
- [9] **Durgun, Y., Vatansever, C., Girgin, K. ve Orakdöğen, E.** (2013). Dışmerkez Çaprazlı Bir Çelik Perdenin Deprem Performansının Doğrusal Olmayan Dinamik Hesap Yöntemi İle Değerlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (6), 266-274.
- [10] **Khan, N. A. & Bilal, A.** (2023). Seismic performance evaluation of eccentrically braced steel frame buildings, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 41 (6), 1121-1131.
- [11] **Büyük, M.S.** (2022). *Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevesi Çok Katlı Bir Yapının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [12] **Esmaili, M. R.** (2015). *Seismic Performance of Eccentrically Braced Frames Designed According to Canadian Seismic Provisions* (Yüksek lisans

tezi). Concordia Üniversitesi, Dept. Building, Civil and Env. Engineering, Montreal, Kanada.

- [13] **Biradar, B.B., Shirkol, A.I. & Patil, B.I.** (2023). Seismic Evaluation of Eccentric Brace Frame Designed by Force-Based Design and Performance-Based Plastic Design Methods. M. Shrikhande ve diğ. (Editörler), *Proc. of 17th Symposium on Earthquake Engineering (Vol.2)*, 330, (s.393-407). Roorkee, INDIA.
- [14] **Mortazavi, P., Kwon, O. & Christopoulos, C.** (2024). Seismic Performance Assessment of Steel EBFs with Conventional Replaceable Yielding Links Designed with ASCE 7-16, *J. Struct. Eng. ASCE*, 150 (5), 1-18. doi: 10.1061/JSENDH.STENG-13093.
- [15] **TDTH** (2018). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Erişim: 10 Eylül 2024, <https://tdth.afad.gov.tr/>.
- [16] **ETABS** (ver. 21.0.1) [Bilgisayar yazılımı]. Integrated software for structural analysis and design program, Computers and Structures Inc., California.
- [17] **Perform 3D** (ver. 8.1.0) [Bilgisayar yazılımı]. Nonlinear Analysis and Performance Assesment of 3D Structures, Computers and Structures Inc., Berkely, California.
- [18] **Gilbertson, M. F.** (1966). Two nonlinear beams with definitions of ductility, *J. Struct. Eng. ASCE*, 95 (2), 137-157.
- [19] **Chen, P. F. & Powel, G. H.** (1982). Generalized plastic hinge concepts for 3D beam-column elements (EERC Rapor No. 82-20). Berkeley: Earthquake Eng. Res. Cntr. Univ of California.
- [20] **Roader, C. W. & Popov, E. P.** (1977). Inelastic behavior of eccentric braced steel frames under cyclic loadings (EERC Rapor No. 77-18). Berkeley: Earthquake Eng. Res. Cntr. Univ of California.
- [21] **Kasai, K. & Popov, E. P.** (1986). General behavior of WF steel shear link beams. *J. Struct. Eng. ASCE*, 112 (2), 362-382.
- [22] **Ricles, J. M. & Popov, E.P.** (1989). Composite action in eccentrically braced steel frames. *J. Struct. Eng. ASCE*, 115 (8), 2046-2066.
- [23] **Ricles, J. M. & Popov, E.P.** (1994). Inelastic link element for EBF seismic analysis. *J. Struct. Eng. ASCE*, 120 (2).
- [24] **Ramadan, T., & Ghobarah, A.** (1995). Analytical model for shear-link behavior. *J. Struct. Eng. ASCE*, 121 (11), 1574-1580.
- [25] **Richards, P.W.** (2006). Testing protocol for short links in eccentrically braced frames. *J. Struct. Eng. ASCE*, 132 (8), 1183-1191.
- [26] **Badalassi, M. Braconi, A., Caprili, S. & Salvatore, W.** (2013). Influence of steel mechanical properties on EBF seismic behavior. *Bull. Earthquake Eng.*, 11, 2249-2285.
- [27] **Badalassi, M., Braconi, A., Cajot, L., Caprili, S., Somja, H.** (2017). Influence of variability of material mechanical properties on seismic performance of steel and steel-concrete composite structures. *Bull. Earthquake Eng.*, 15 (4), 1559-1607.

[28] **PEER** (2017) Strong Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, California. Erişim: 10 Ekim 2024, <https://ngawest2.berkeley.edu>.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Alpay Işın

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği.

MESLEKİ DENEYİM:

- 2018 – 2021 yılları arasında RISE Mühendislik ve Danışmanlık firmasında yapısal tasarım mühendisi olarak görev aldı.
- 2021 – halen Tekfen Mühendislik A.Ş. firmasında deneyimli yapısal tasarım mühendisi olarak görev almakta.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

- **Işın A. ve Vatansever C.** (2025). Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevelerde Kapasite Tasarımı Yaklaşımının ve Deprem Performansının Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi ile Değerlendirilmesi, *DÜMF MD*, 16 (1), 243–256. doi: 10.24012/dumf.1592049.