



# Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevelerde Kapasite Tasarımı Yaklaşımının ve Deprem Performansının Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi ile Değerlendirilmesi

## Capacity Design and Nonlinear Time History Analysis Approach to Seismic Performance of Eccentrically Braced Steel Frames

Alpay Işın<sup>1\*</sup>, Cüneyt Vatansever<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [isina@itu.edu.tr](mailto:isina@itu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9816-1399>

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [cuneyt.vatansever@itu.edu.tr](mailto:cuneyt.vatansever@itu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9954-925X>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 27 Kasım 2024  
Revizyon 26 Şubat 2025  
Kabul 2 Mart 2025  
Online 26 Mart 2025

#### Anahtar Kelimeler:

*Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve,  
Kapasite tasarımı,  
Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz,  
Deprem performans değerlendirilmesi,  
Bağ kirişi,  
Plastik mafsal ve doğrusal olmayan davranış*

### ÖZ

Bu çalışma 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 çaprazlı çelik çerçeveler 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, görelî kat ötelenmeleri, çapraz ve kolonlarda oluşan iç kuvvet talepleri, bağ kirişlerindeki 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 çaprazlı çelik çerçeveler için öngörülen kapasite tasarımı yaklaşımının yeterliliği araştırılmış ve bina taşıyıcı sisteminin deprem performansı değerlendirilmiştir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 27 November 2025  
Received in revised form 26 February 2025  
Accepted 2 March 2025  
Available online 26 March 2025

#### Keywords:

*Eccentrically braced steel frame,  
Capacity design  
Nonlinear time history analysis,  
Earthquake performance assessment,  
Link beam,  
Plastic hinge and plastic behavior*

### ABSTRACT

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. 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 tie 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.

Doi: 10.24012/dumf.1592049

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler, yüksek enerji sönümlenme ve yatay yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Ayrıca, mimari olarak merkezi çaprazlı çerçevelere göre daha büyük geçiş alanı sağlamaları nedeniyle, çelik konstrüksiyon sistemlerin tasarımında tercih edilmektedir.

Bouwkamp ve diğerleri [1], 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 sönümlenme kapasitesine sahip olduğu ve kesme kuvveti etkileri altında gövde akma dayanımının iki katına kadar yük taşıyabildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Caprili ve diğerleri [2], düşey ve yatay kısa bağ kirişli, dışmerkez çaprazlı, bir katlı ve tek açıklıklı iki adet çelik çerçeve numunede yatay yükler altında bağ kirişli davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. 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 diğerleri [3], dinamik yükler altında basit bazı çelik çerçevelerin doğrusal olmayan davranışlarını yığılı plastisite (plastik mafsalsal) yöntemini ile sayısal olarak incelemişlerdir. Sundukları sayısal örneklerle plastik mafsalsal modelinin dinamik yükler altında uygulanabilirliğini göstermişlerdir.

Popov ve diğerleri [4], dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde bağ kirişlerinin boyutlandırılmasına ilişkin yapısal davranış iyileştirmeye yönelik araştırmalarda bulunmuşlardır. Farklı kat sayısına sahip analitik modelleri dinamik analiz yöntemini uygulayarak incelemişlerdir. Üst katlarda kullanılacak yüksek kapasiteli bağ kirişlerinin yapı davranışını olumsuz yönde etkilediğini ve kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda ekonomik olmayan sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Bosco ve Rossi [5], 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 kirişli plastik dönme değerleri arasında analitik bir ilişki tanımlamışlardır.

Koboevic ve David [6], 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 diğerleri [7], dışmerkez çaprazlı bir çelik perde üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini uygulayarak perdeye ait davranışını incelemişlerdir.

Çalışmada tasarım büyüme katsayısının ve kapasite tasarımı ilkelerinin yeterliliği araştırılmıştır.

Khan ve Bilal [8], farklı bağ kirişli 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 mafsalsal yöntemini kullanmışlardır. Bağ kirişli uzunluğunun taşıyıcı sistem davranışını üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Büyük [9], 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 [10], 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.

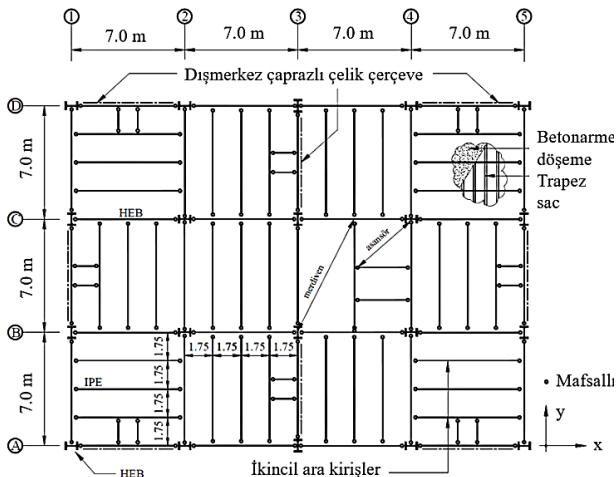
Biradar ve diğerleri [11], dayanıma göre tasarım ve performansa dayalı tasarım yöntemleri uygulayarak boyutlandırdıkları on katlı dışmerkez çaprazlı çelik çerçevenin, statik itme ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerini kullanarak deprem performansını değerlendirerek hesap yöntemlerini karşılaştırmışlardır.

Mortazavi ve diğerleri [12], farklı sayıda kat adedine sahip, değişken bağ kirişli 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, görece kat ötelemeleri ve kalıcı şekildeğiştirmeler gibi büyüklükler değerlendirilmiştir.

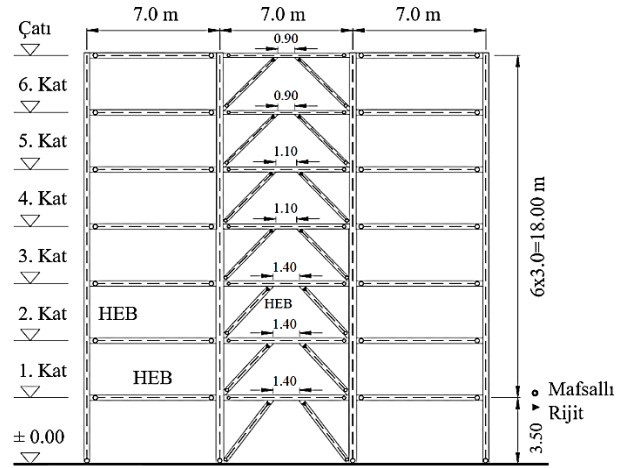
Bu çalışmada, her iki ana doğrultuda yatay yük taşıyıcı sistemi sünellik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan ve tasarımı TBDY 2018 9.8 [13]'e uygun olarak gerçekleştirilen bir ofis binasının zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi uygulanarak deprem performansı değerlendirilmiştir. 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 uyarınca, bina taşıyıcı sisteminin asal eksenleri (X ve Y) göz önünde tutularak toplam 22 adet ZTADOA gerçekleştirilmiştir. İç kuvvet ve şekildeğiştirme 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 – yerdeğiştirme ve moment – dönme taleplerine ilişkin en büyük ortalama büyüklüklerdir. Elde edilen talepler doğrultusunda, TBDY 2018'de dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler (DMÇÇÇ) için öngörülen kapasite tasarım ilkeleri ve performans hedefleri değerlendirilmiştir.

## Model Bina

Bu çalışma kapsamında, doğrusal olmayan analiz ve davranışa bağlı olarak değerlendirmeye konu olan bina, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) *Eğitim El Kitabı Açıklamalar ve Uygulama Örnekleri Kısım I-6*'da yer alan Örnek Ç-3 binasıdır, [14]. Planda 588 m<sup>2</sup> oturma alanına sahip söz konusu binanın, yedi katlı bir ofis binası olarak hizmet vermesi öngörülmüştür. 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 mafsallı olarak bağlanan ikincil ara kirişler 1.75m ara ile teşkil edilmiştir. Yapı akslarına konumlandırılan ana çerçeve kirişlerinin kolonlara bağlantısı mafsallıdır. Çaprazlar, üst uçlarında bulunan bağ kirişlerine rijit, alt uçlarında bulunan kolon – kiriş birleşim bölgesine mafsallı olarak bağlanmaktadır. Kolonların temele bağlantısı her iki ana eksenlerinde mafsallı olarak teşkil edilmiştir. Yapıda, bağ kirişi kesitleri ve boyu (e) katlar arasında farklılık göstermektedir. Kesme kuvveti etkisinde plastik şekil değiştirme göstererek enerji sönmülmesi öngörülen bağ kirişlerinin boyları (e), başlangıç aşamasında yaklaşık olarak ( $1.3M_p / V_p$ ) olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece tasarım aşamasında bağ kirişlerinin boylarının ( $1.6M_p / V_p$ ) değerini aşması ve çok küçük boyların elde edilmesi kolaylıkla önlenebilmiştir. Yapıda bulunan kolon ve çaprazlar S355JR (EN 10025), kirişler S275JR (EN 10025) sınıfı malzemeye sahiptir. Binaya ait tipik kat planı Şekil 1'de, tipik sistem enkesiti (1 aksı çerçevesi) Şekil 2'de ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve elemanlarının enkesit profilleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Çelik konstrüksiyon, trapez sac, betonarme döşeme ve kaplama gibi zafı yükler normal katlarda 4.9 kN/m<sup>2</sup> ve çatı katında 4.0 kN/m<sup>2</sup> olarak dikkate alınmaktadır. Ayrıca, normal katlarda cephe duvar yükü 3 kN/m ve çatı katı parapet yükü 2.0 kN/m olmak üzere, çevre kirişlerine etkiyen düzgün yayılı yükler öngörülmüştür. Normal katlarda ve çatı katında kullanım amacı ile uyumlu hareketli yükler 2.0 kN/m<sup>2</sup>'dir [14]. Sismik kütle hesabında, TBDY 2018 Tablo 4.3 uyarınca binanın kullanım amacı ile uyumlu olacak şekilde, hareketli yük katılım katsayısı  $n = 0.3$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Tipik kat planı [14].



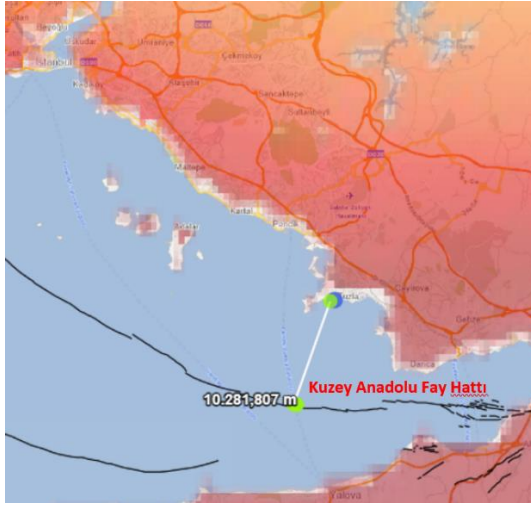
Şekil 2. Tipik sistem enkesiti (1 aksı çerçevesi) [14].

Tablo 1. Yatay yük taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların kesit bilgileri.

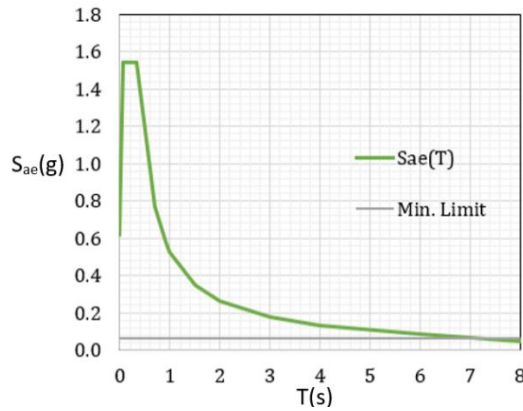
Kat	Kesitler		
	Kiriş	Çapraz	Kolon
7	HE200B	HE180B	HE360B
6	HE200B	HE180B	HE360B
5	HE240B	HE200B	HE360B
4	HE240B	HE200B	HE400B (3 aksı HE450B)
3	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)
2	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)
1	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)

## Depremsellik ve Performans Hedefleri

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 3'te gösterilmiştir. Binanın ZC yerel zemin sınıfı üzerine inşa edileceği varsayılmıştır. TBDY 2018 Tablo 3.1'e göre 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 deprem yer hareketi 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 ( $S_{D5}$ ) 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. Deprem parametrelerine bağlı olarak elde edilen yatay elastik ivme spektrumu Şekil 4'te verilmiştir. TBDY 2018 Tablo 3.2 uyarınca Deprem Tasarım Sınıfı (DTS), 1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Bina'nın fay hattına göre konumu, [15].



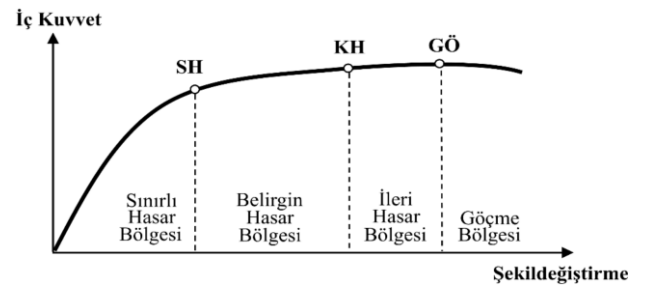
Şekil 4. Yatay elastik ivme spektrumu (hedef spektrum).

Binalar için Tablo 2'de tanımlanan deprem performans düzeyleri, TBDY 2018 3.4'te Kesintisiz Kullanım (KK), Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) olarak belirlenmiştir. TBDY 2018 Tablo 3.4(c) uyarınca, incelemeye konu olan binanın sağlaması gereken deprem performans hedefi, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyi olarak belirlenmiştir. TBDY 2018 15.8.4 uyarınca, yatay yük taşıyıcı sistemi çelik olan bir binanın KH performans hedefini sağlayabilmesi için gerekli koşullar tanımlanmıştır. Yapının mevcut hali ile Kontrollü Hasar performans hedefini sağlayabilmesi için İleri Hasar bölgesine geçen taşıyıcı eleman bulunmamalıdır, [13].

Sünek elemanlar için kesit düzeyinde dört hasar bölgesi ve bu hasar bölgelerini belirleyen üç sınır değeri tanımlanmıştır. Şekildeğiştirme değerlerine bağlı olarak tanımlanan Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), Göçme Öncesi Hasar (GÖ) sınır değerleri; Sınırlı Hasar, Belirgin Hasar, İleri Hasar ve Göçme bölgelerini birbirinden ayırmaktadır. Sınırlı Hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, İleri Hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlanmaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir. Taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan iç kuvvet ve şekildeğiştirmelere bağlı olarak meydana gelen hasar sınıfları Şekil 5'te gösterilmektedir, [13]. DMÇÇÇ elemanlarına ait şekildeğiştirme sınırları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 2. Bina performans düzeyleri [13].

Performans Düzeyi	Tanım
Kesintisiz Kullanım (KK)	Taşıyıcı sistem elemanlarında ihmal edilebilir ölçüde yapısal hasar
Sınırlı Hasar (SH)	Taşıyıcı sistem elemanlarında doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı, sınırlı düzeyde yapısal hasar
Kontrollü Hasar (KH)	Taşıyıcı sistem elemanlarında can güvenliğini sağlayacak düzeyde çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün yapısal hasar
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	Taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde hasarın meydana geldiği, binanın kısmen ya da tamamen göçmesinin önlenmesi



Şekil 5. Kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri [13].

Tablo 3. DMÇÇÇ şekildeğiştirme sınırları [13].

Yapı Elemanı	Plastik Dönme Sınırları [rad]		
	SH	KH	GÖ
Kısa Bağ Kirişi $e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$	0.005	0.12	0.15
Kolon-Çapraz-BKDKKB $P/P_c < 0.2$	$10\theta_y$	$60\theta_y$	$90\theta_y$
Kolon-Çapraz-BKDKKB $0.2 < P/P_c < 0.5$	$1.5(A^*)\theta_y$	$9(A^*)\theta_y$	$13.5(A^*)\theta_y$

$$*A = (1 - 1.66P/P_c)$$

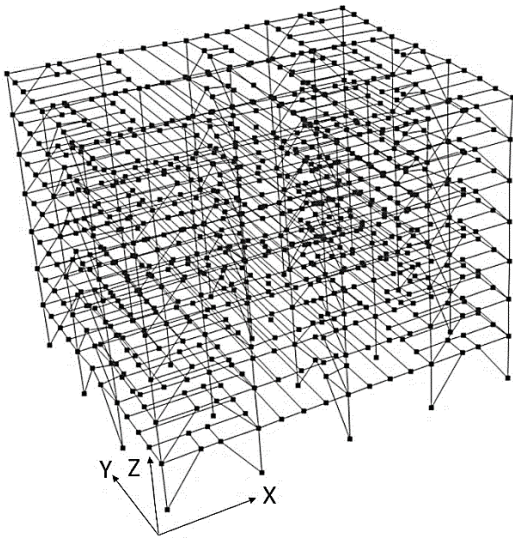
## Bina Taşıyıcı Sisteminin Hesap Modeli

Model binanın taşıyıcı sisteminin, doğrusal analizleri için ETABS [16], zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinin (ZTADOA) gerçekleştirilebilmesi için ise Perform 3D [17] yapısal analiz programlarından yararlanılmıştır. Her iki analiz türü için de ayrı ayrı olmak üzere, sonlu elemanlar yönteminin esas alındığı üç boyutlu yapısal analiz modelleri oluşturulmuştur. Kolon, çapraz ve kirişler, her iki ucundaki düğüm noktaları altı serbestlik dereceli olan çubuk elemanlar olarak modellenmiştir. Yalnızca doğrusal analiz modelinde dikkate alınan betonarme döşeme plağı sınırlı ve benzer büyüklükteki dört düğüm noktasına sahip ve her düğüm noktası altı serbestlik dereceli olan kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kat düzlemleri içinde bulunan elemanlarda meydana gelen eksenel yük taleplerinin elde edilebilmesi için döşeme plağı yalnızca doğrusal analiz modeline dahil edilmiş ve rijit

diyafram tanımı yapılmamıştır. ZTADOA yapısal analiz modelinde analiz süresinin kısaltılabilmesi için kat hizalarında rijit diyaframlar tanımlanmıştır. Bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümlerinde meydana gelen eksenel yük talepleri düğüm noktası denge denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Mevcut bağlantı detaylarına bağlı olarak, hesap modellerinde; çerçeve kirişlerinin her iki ucunda ve düşey çaprazların alt uçlarında çubuk elemanların enkesitlerine ait yerel eksenleri etrafında dönme serbestlikleri tanımlanmıştır. Perform 3D bilgisayar yazılımı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu matematik model Şekil 6'da gösterilmiştir.

ETABS bilgisayar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal analizlerde; yapı sisteminin sismik kütlesi 2441.55 kNs<sup>2</sup>/m, hakim doğal titreşim periyodu X doğrultusunda  $T_x = 0.87s$ , Y doğrultusunda  $T_y = 0.86s$  olarak elde edilmiştir. Taban kesme kuvvetleri ise, X doğrultusunda  $F_x = 1818.57kN$ , Y doğrultusunda  $F_y = 1843.63kN$  olarak hesaplanmıştır. Binanın her iki ana doğrultusundaki taban kesme kuvvetleri hesaplanırken Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı  $R=8$  olarak dikkate alınmıştır, [13].

Perform 3D yapısal analiz programında gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda; hakim doğal titreşim periyodu X doğrultusunda  $T_x = 0.87s$  ve Y doğrultusunda  $T_y = 0.86s$  olarak elde edilmiştir. Her iki yapısal analiz programından elde edilen hakim doğal titreşim periyotları birbiri ile uyumludur.



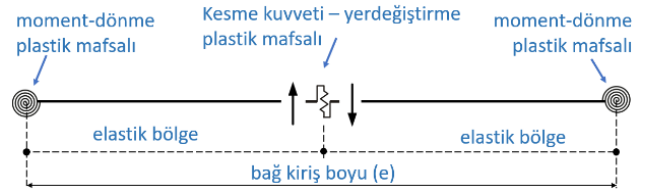
Şekil 6. Bina taşıyıcı sisteminin matematik modeli, [17].

Elastik ötesi davranış beklenen çerçeve elemanlarının ilgili bölgeleri TBDY 2018 9.2.9 uyarınca, süneklik düzeyi yüksek yatay yük taşıyıcı sistemler için kapasitesi korunmuş bölgeler olarak nitelendirilir. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin bağ kirişleri bu tür çerçeve sistemlerinde plastik şekildeğiştirme beklenen bölgelerdir, [13]. Yapısal elemanların ve buna bağlı olarak yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışlarının anlaşılabilmesi ve davranış biçiminin analizlere yeterli hassasiyette yansıtılabilmesi amacıyla farklı yaklaşımlar içeren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Gilbertson [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 mafsallı davranışını (yığılı plastisite)

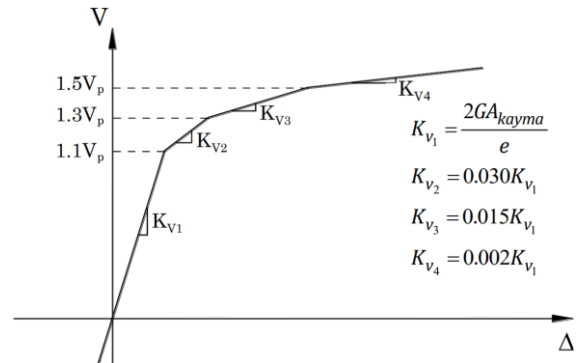
ortaya koyan deneysel ve nümerik bir çalışma yürütmüşlerdir. Farklı yapı tipleri için uygulanabilirliğini, beş örnek yapı sistemi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarla desteklemişlerdir. Plastik mafsallı yaklaşımın işlem kolaylığı sağladığı ve gerçeğe yakın bir davranış sergilediği sonucuna ulaşmışlardır.

### Plastik Mafsallı Tanımları

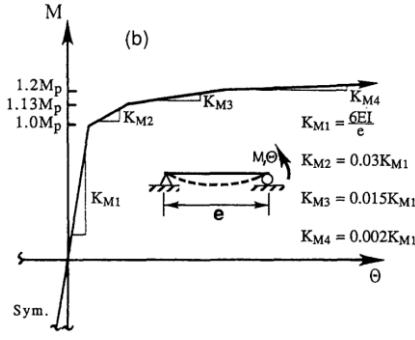
Bağ kirişinin uzunluğu; kirişin kesme kuvveti ve eğilme momenti kapasitesi ile davranış şeklini doğrudan etkilemektedir. Kesme kuvveti ve eğilme momenti etkileri altında doğrusal olmayan davranış gösteren bağ kirişleri sırası ile kısa ve uzun bağ kirişleri olarak isimlendirilebilir. Bu çalışmada doğrusal olmayan hesaplarda dikkate alınan bağ kirişi analitik davranış modeli Şekil 7'de gösterilmiştir. Kesme kuvveti etkileri altında, malzemenin pekleşme özelliğinin dikkate alındığı ve bağ kirişinin doğrusal olmayan davranışını yansıtan ilk hesap modellerinden birini Roder ve Popov [20] incelemişlerdir. Ancak deprem yükleri altında bağ kirişinde oluşan kesme kuvvetlerine ek olarak eğilme momentleri 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 davranış şekline geliştirilen model, deneysel çalışmalara bağlı olarak Richards and Uang [25] tarafından kısmen değiştirilmiştir (Şekil 8). Badalassi ve diğerleri [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 10).



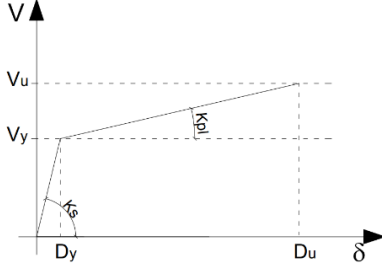
Şekil 7. Bağ kirişi analitik davranış modeli.



Şekil 8. Elastik ötesi bütünleşik paralel bağlı yay davranışı, kesme kuvveti - yerdeğiştirme [25].



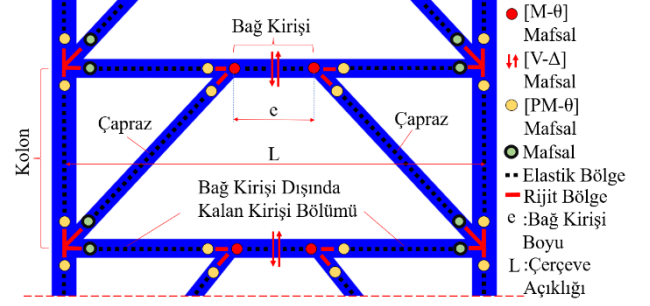
Şekil 9. Plastik mafsall davranışı, eğilme momenti- dönme [23].



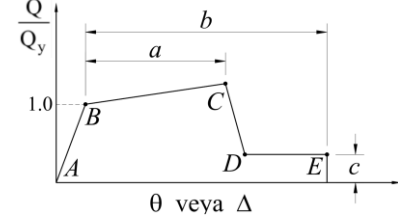
Şekil 10. Kesme kuvveti etkisinde doğrusal olmayan plastik mafsall davranış modeli [26].

Bu çalışma kapsamında incelenen binanın taşıyıcı sistem elemanlarında, deprem etkileri altında meydana gelmesi beklenen olası elastik ötesi davranışlar, plastik mafsall davranış modeli ile temsil edilmiştir. Perform 3D bilgisayar yazılımı kullanılarak, bağ kirişlerinde meydana gelmesi beklenen olası elastik ötesi davranışları temsil etmek üzere bağ kirişi uçlarında eğilme momenti-dönme plastik mafsall ve bağ kirişi orta bölgesinde kesme-yerdeğiştirme plastik mafsall tanımlanmıştır (Şekil 7). Bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarında da olası plastik şekildeğiştirme durumları için; kolon alt-üst uçlarında, düşey çapraz üst uçlarında ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölgesinin (BKDKKB) bağ kirişine bağlanan uçlarında aksel yük taleplerine bağlı olarak eğilme momenti-dönme mafsall tanımlanmıştır. Ayrıca, analizlerde ikinci mertebeye etkileri de dikkate alınmıştır. Perform 3D bilgisayar yazılımında, bağ kirişleri için eğilme momenti – dönme plastik mafsalları *momenthinge*, *rotationtypeinelasticcomponent* olarak ve kesme – yerdeğiştirme plastik mafsalları da *shearhinge*, *displacementtypeinelasticcomponent* olarak tanımlanmıştır. Elemanlar için öngörülen plastik davranış modelleri, *framemembercompoundcomponent* olarak çubuk elemanların ilgili uçlarında konumlandırılmıştır. Matematik modelde kullanılan plastik mafsallar, tipik bir kat çerçevesi esas alınarak Şekil 11’de gösterilmiştir. Mevcut çalışmalar doğrultusunda Perform 3D bilgisayar yazılımında tanımlanan genelleştirilmiş tipik eğilme momenti / kuvvet – dönme / yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 12’de verilmiştir. İlgili şekildeki a, b ve c davranış modeli değişkenleri, her bir taşıyıcı sistem bileşeni için Tablo 4’te sunulmuştur. Q ve Qy sırasıyla, bileşenin genelleştirilmiş iç kuvvetini ve genelleştirilmiş beklenen dayanımını;  $\theta/\Delta$  genelleştirilmiş dönme / yerdeğiştirme değerlerini göstermektedir. Bağ kirişi kayma dayanımı  $Q_y=V_p$ , Denk. (1 ve 2), kolon, çapraz ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü için  $Q_y=M_p$ , Denk. (5 ve 6) esas alınarak hesaplanmaktadır,[13]. Bağ kirişi elemanları için eğilme ve kayma rijitlikleri sırasıyla Denk. (3 ve 4), bağ

kirişleri için akma dönmesi Denk. (5), kolon, çapraz, bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü için akma dönmesi Denk. (7) kullanılarak hesaplanmaktadır, [13]. Şekil 12’de 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 şekildeğiştirmeye) izin verilmemiştir. Eğilme momenti, kesme kuvveti ve aksel kuvvet için beklenen dayanımların hesabında; malzeme sınıflarının beklenen akma ve çekme dayanımları, karakteristik dayanımlar olarak esas alınmıştır.



Şekil 11. Plastik mafsall yerleşimi ve davranış tipleri.



Şekil 12. Genelleştirilmiş eğilme momenti/kuvvet - dönme/yerdeğiştirme ilişkisi.

$$V_p = 0.6 * F_y * A_w \quad (1)$$

$$A_w = (h - 2 * t_f) * t_w \quad (2)$$

$$K_b = \frac{12 * E * I}{e^3} \quad (3)$$

$$K_s = \frac{G * A_w}{e} \quad (4)$$

$$\theta_y = \frac{V_p}{\frac{K_b * K_s}{K_b + K_s} * e} \quad (5)$$

$$M_p = 1.18 * W_p * F_y * \left[ 1 - \frac{|P|}{P_n} \right] \leq W_p * F_y \quad (6)$$

$$\theta_y = \frac{W_p * F_y * \ell}{6 * E * I} * \left[ 1 - \frac{|P|}{P_n} \right] \quad (7)$$

Tablo 4. Davranış modeli değişkenleri.

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	0.8
Kolon-Çapraz- BKDKKB $P/P_c < 0.2$	$60\theta_y$	$110\theta_y$	0.6
Kolon-Çapraz- BKDKKB $0.2 < P/P_c < 0.5$	$9(A^*)\theta_y$	$17(A^*)\theta_y$	0.2

$$*A = (1 - 1.66P/P_c)$$

## Deprem Yer Hareketi İvme Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Bu çalışma kapsamında deprem etkileri 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 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.

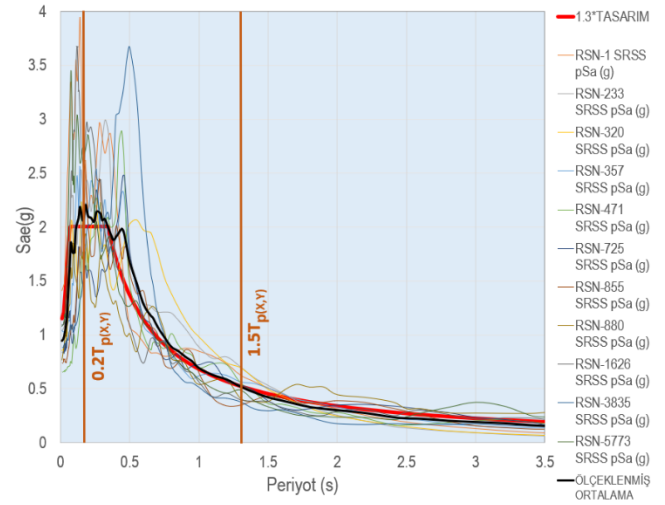
Deprem yer hareketi ivme kayıtları, PEER - (*Pasific Earthquake Engineering Research Center*) ivme kayıtları kütüphanesi kullanılarak temin edilmiştir, [28]. Seçilen deprem yer hareketi ivme kayıtları ve özellikleri Tablo 5'te verilmiştir. Deprem yer hareketi ivme kayıtları seçilirken aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır:

- Bina Kuzey Anadolu fay hattına yaklaşık 10 km uzaktadır (Şekil 3). Kuzey Anadolu fay hattının faylanma mekanizması doğrultu atımlıdır. Binanın faya uzaklığı ve Kuzey Anadolu fay hattı davranışı ile uyumlu olarak 9 adet doğrultu atımlı kayıt ve farklı faylanma mekanizmasını da dikkate alabilmek için 2 adet ters kırık deprem yer hareketi ivme kaydı seçilmiştir.
- 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, ( $V_{s30}$ ) 360-760m/sn aralığı esas alınarak sınırlandırılmıştır.
- Tasarıma esas deprem yer hareketi 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 belirtilen koşullar esas alınarak ölçeklendirilmiştir. Basit ölçeklendirme yapılırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- 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.
- Her bir deprem ivme kaydına ait bileşke yatay elastik ivme spektrumları kullanılarak ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumu elde edilir.
- Elde edilen ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumuna ait genliklerin, hakim modal titreşim periyodunun fonksiyonu olarak hesaplanan  $0.2T - 1.5T$  zaman aralığındaki tasarım spektrumu genliklerinin 1.3 katından az olmaması gerekmektedir, [13]. 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 Tablo 5'te 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 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Ölçeklendirilmiş yatay elastik ivme spektrumları, bileşke spektrum ve hedef spektrum.

Tablo 5. Deprem kayıtları ve özellikleri.

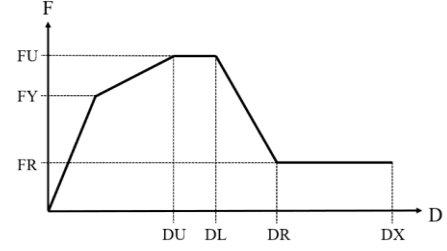
NO	Deprem Adı	PEER RSN	Ölçek Faktörü	Büyüklük	Faylanma Mekanizması	$V_{s30}$ (m/s)	Kayıt Süresi (sn)
EQ1	Helena_Montana-01	1	6.10	6	doğrultu atımlı	593	50.930
EQ2	Mammoth Lakes-02	233	4.23	5.69	doğrultu atımlı	382	29.995
EQ3	Mammoth Lakes-10	320	3.84	5.34	doğrultu atımlı	382	40.000
EQ4	Coalinga-01	357	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

## Analiz Yöntemi

Çalışma kapsamında, bina taşıyıcı sisteminin deprem etkileri altında doğrusal olmayan davranışı zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi (ZTADOA) kullanılarak araştırılmıştır. Analizlerde, 11 adet deprem yer hareketi kaydı, TBDY 2018 5.7.2.1 uyarınca, 22 adet analiz gerçekleştirilecek şekilde uygulanmıştır. Analiz ve değerlendirmelerde dikkate alınan varsayımlar aşağıda sıralanmıştır.

- Kolon, kiriş ve çapraz elemanlar, Model Bina bölümünde yapılan açıklamalara ve özelliklere 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 aksel yük talepleri düğüm noktası denge denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.
- Sonlu elemanlar hesap modelindeki çubuk elemanların doğrusal olmayan davranışları, pekleşme etkilerinin dikkate alındığı plastik mafsalsal modelleri ile temsil edilmektedir.
- Plastik mafsallara ait genelleştirilmiş iskelet eğrileri (Şekil 12) Perform 3D bilgisayar yazılımında, *trilinearshaperefration* ve *strengthloss* seçenekleri dikkate alınarak beş adet doğrudan oluşan *inelastichinge* olarak modellenmiştir (Şekil 14).
- 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 aksel yük – moment bileşik etkilerini içeren *P-M2-M3StrengthSectionSteel* tanımı yapılmıştır.
- Dinamik analizlerde dikkate alınan sismik kütle, zafî 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.
- Her bir ölçeklendirilmiş deprem yer hareketi ivme kaydına ait analizlerin başlangıç adımı, yapı sisteminin sismik ağırlığı altında  $P-\delta$  etkilerinin dikkate alındığı şekil değiştirmiş taşıyıcı sistemden oluşmaktadır.
- Düşey deprem etkisi, TBDY 2018 4.4.3.2'ye uygun olarak  $E_a^{(Z)} \approx (2/3)S_{DS}G$  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, malzeme karakteristik dayanımları, mevcut malzeme dayanımları olarak dikkate alınmıştır.



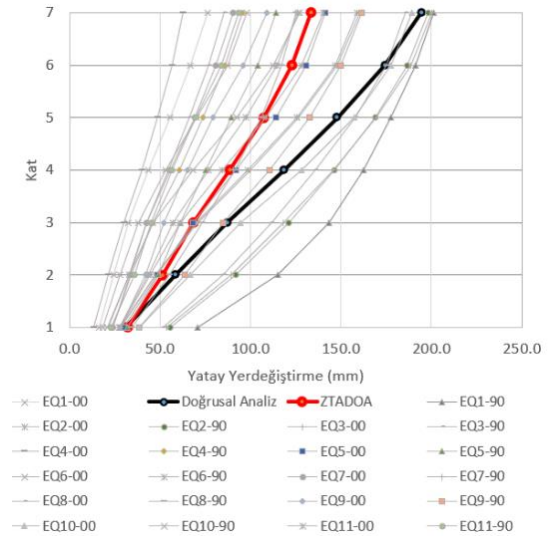
Şekil 14. Plastik mafsalsal iskelet eğrisi, [17].

## Deprem Performansının Değerlendirilmesi

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; görel kat öteleme oranları, kat kesme kuvvetleri, deprem yükü oranı ve tasarım büyütme katsayıları, bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarının iç kuvvetleri ve bağ kirişi kesme kuvveti-yerdeğiştirme ile eğilme momenti-dönme davranışları olarak elde edilmiştir. Değerlendirmeye esas şekildeğiştirme ve iç kuvvet talepleri de, yapılan 22 adet analiz her birinden elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır.

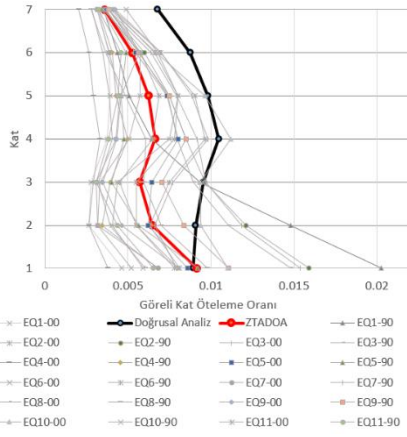
Elde edilen talepler, TBDY 2018'de sünellik düzeyi yüksek DMÇÇÇ için öngörülen kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda verilen koşullar göz önünde bulundurularak da değerlendirilmiştir.

ZTADOA sonucu en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak elde edilen kat yerdeğiştirme değerleri ve görel kat öteleme oranları sırasıyla, Şekil 15'te ve Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekil 15 incelendiğinde, ZTADOA sonucunda elde edilen ortalama-en büyük kat yerdeğiştirme değerlerinin doğrusal hesap yöntemi ile hesaplanan değerlerden daha küçük olarak elde edildiği, benzer durumun Şekil 16'da görel kat ötelemeleri için de gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 15. En büyük mutlak değerler olarak kat yerdeğiştirmeleri ve ortalama değerler.

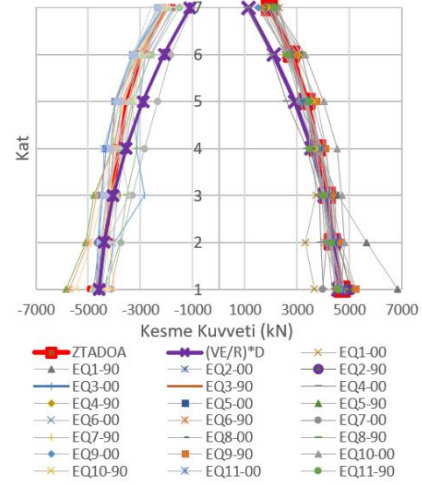




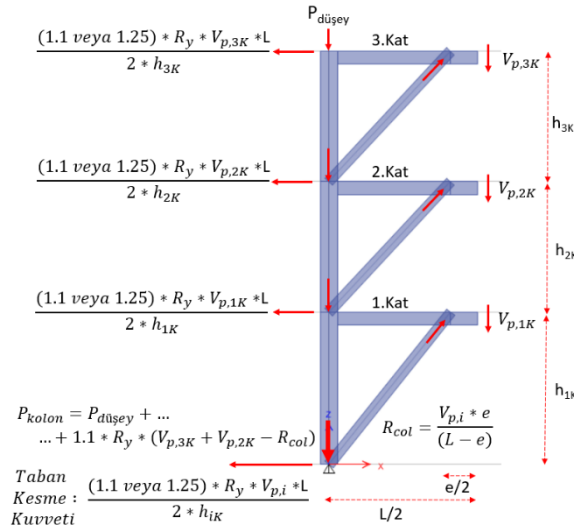
Şekil 16. En büyük mutlak değerler olarak görel kat öteleme oranları ve ortalama değerler.

Doğrusal analiz ve ZTADOA sonucunda elde edilen kat kesme kuvvetleri Şekil 17’de 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 18). Şekil 19’da 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 şekilleştirmeleri 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 19 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

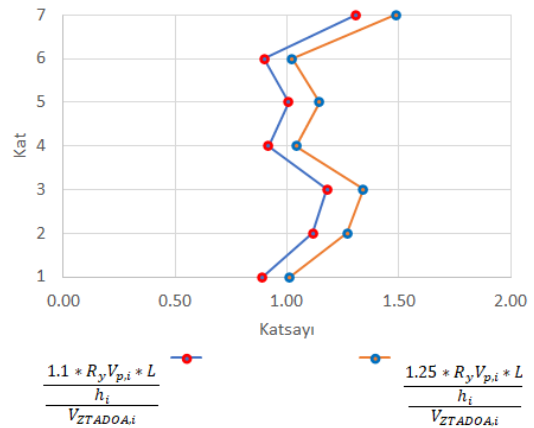
yaklaşıklıkta tahmin edilebilmesi bakımından kapasite tasarımı ilkelerine uygun olarak öngörülen tasarım büyütme katsayılarının yeterli yaklaşıklıkta sağladığı görülmektedir.



Şekil 17. Ortalama ve en büyük kat kesme kuvvetleri.



Şekil 18. Tipik bir DMÇÇÇ için mekanizma durumunda kat kesme kuvvetleri ve kolon eksenel kuvvet talepleri.



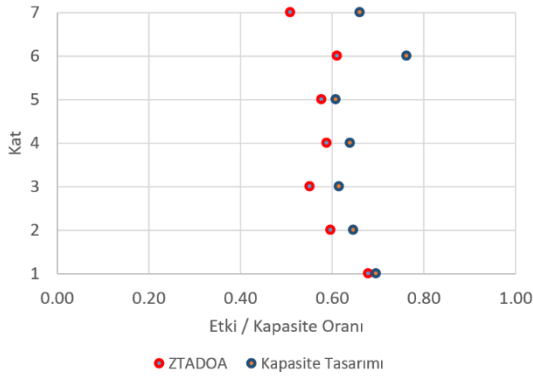
Şekil 19. Kat kesme kuvveti oranları ve tasarım büyütme katsayıları.

Yukarıdaki şekillerde yer alan  $R_y$  beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını,  $V_{p,i}$   $i$ ’inci katın bağ kirişinin plastik kesme kuvveti dayanımını,  $h_i$

kat yüksekliğini, L çerçeve açıklığını,  $V_{ZTADOA,i}$  ZTADOA sonucu elde edilen kat kesme kuvvetini,  $P_{düşey}$  kolonda düşey yüklerden oluşan eksenel kuvveti ve  $P_{kolon}$  mekanizma durumunda toplam kolon eksenel kuvvetini göstermektedir.

### Bağ Kirişi Dışında Kalan Kiriş Bölümü (BKDKKB)

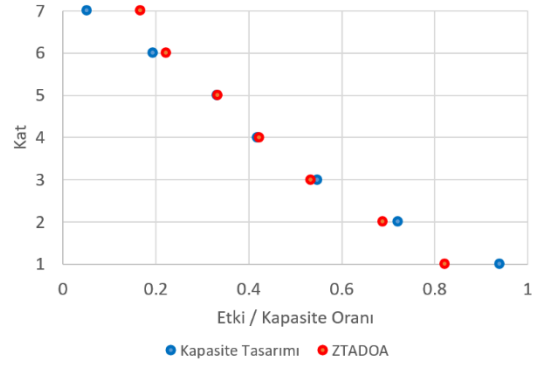
Bağ kirişlerinin dışında kalan kiriş bölümlerinin etki/kapasite oranları, ZTADOA sonucu elde edilen eğilme momenti istemleri ile düğüm noktası denge denklemleri kullanılarak elde edilen eksenel kuvvetlerin etkileşim denklemi  $(P/P_c + (8/9)M/M_c)$  yardımıyla birleştirilmesi suretiyle hesaplanmıştır. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde bağ kirişlerinin dışında kalan kiriş bölümleri için, eksenel yük ve eğilme momenti etkisine bağlı olarak tanımlanan plastik mafsallarda elastik ötesi davranış gözlemlenmemiştir. Şekil 20, 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,  $(1.1R_y V_p / V_E)$  oranı ile büyütülen iç 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 20. BKDKKB için etki/kapasite oranlarının dağılımı.

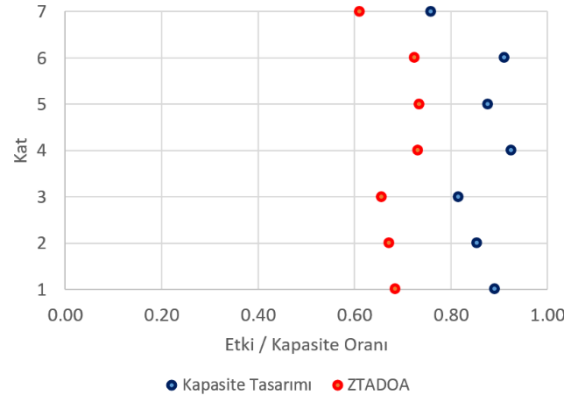
### Kolon ve Çapraz Elemanlar

ZTADOA sonuçlarına göre dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveleri oluşturan tüm kolon ve düşey çapraz elemanlarda eksenel yükün ve eğilme momentinin bileşik etkisinde meydana gelen şekildeğiştirmelerin elastik bölge içinde kaldığı görülmüştür. Şekil 21, 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 21. Kolonlarda etki/kapasite oranlarının dağılımı.

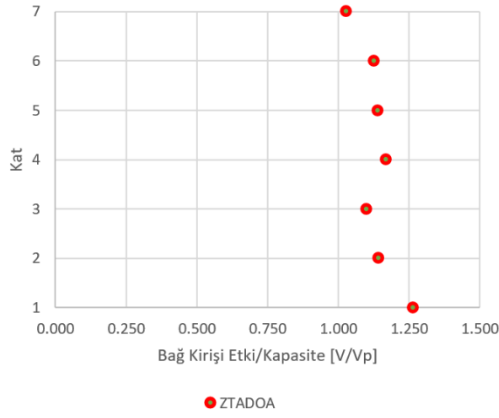
Çapraz elemanlar için hesaplanan ortalama-en büyük etki/kapasite oranlarının dağılımı, her bir kattaki en elverişsiz sonuçlara göre doğrusal ve doğrusal olmayan analizler için Şekil 22'de gösterilmektedir. Şekil 22 incelendiğinde, kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda en elverişsiz durumdaki düşey 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 22. Çaprazlarda etki/kapasite oranlarının dağılımı.

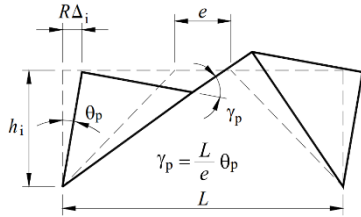
### Bağ Kirişleri

Bağ kirişleri TBDY 2018 9.8.2 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 elverişsiz durumdaki bağ kirişlerinin enkesitlerinde meydana gelen ortalama-en büyük kesme kuvveti taleplerinin, plastik kesme kuvveti kapasitelerine oranı Şekil 23'te 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.

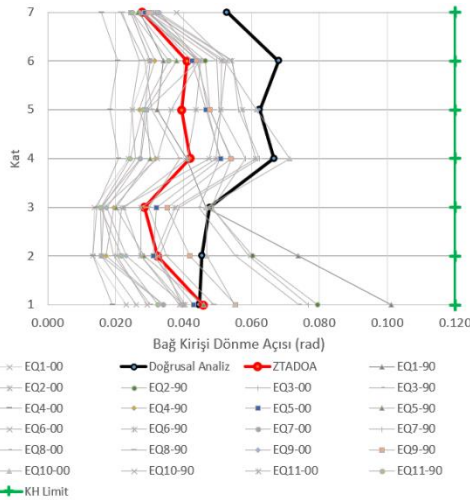


Şekil 23. Bağ kirişi kesme kuvveti talepleri / plastik kesme kuvveti kapasitesi dağılımı.

Bağ kirişi dönme açıları görel kat ötelemesi oranlarına bağlı olarak hesaplanmıştır (Şekil 24), [13]. Şekil 25, 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, [13]. Hiç bir katta KH sınır değerinin aşılmadığı görülmektedir.

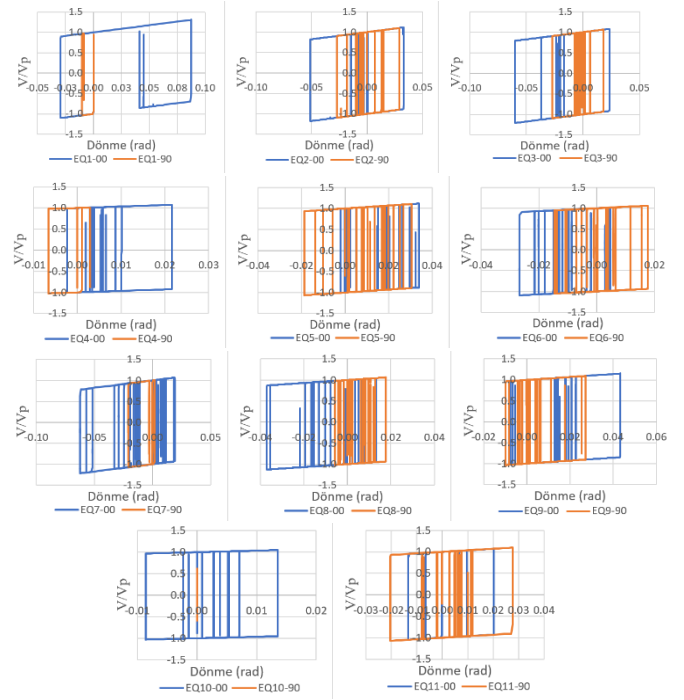


Şekil 24. Bağ kirişi dönme açısı, [13].



Şekil 25. Bağ kirişlerinin dönme açıları dağılımı.

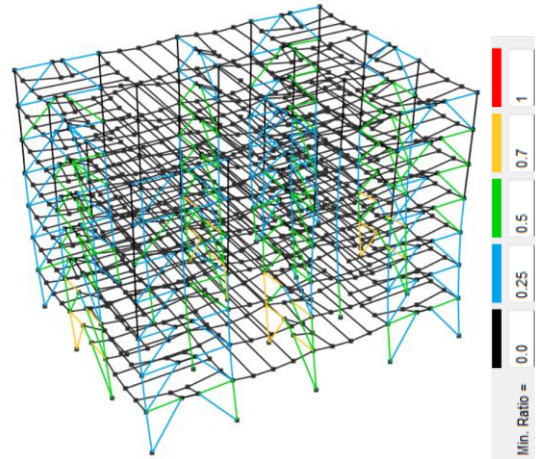
Tipik bir bağ kirişi için kesme kuvveti-dönme eğrileri Şekil 26'da gösterilmektedir. Burada 3 aksı üzerindeki, A ve B aksları arasında bulunan 1.kat bağ kirişinin 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı altında, plastik mafsalsal davranışı sergilenmiştir. İlgili bağ kirişinde en büyük şekildeğiştirme, 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 26. 3 aksı üzerindeki A ve B aksları arasında kalan 1. kat bağ kirişi plastik mafsalsal elde edilen kesme kuvveti-dönme eğrileri.

### Bina Taşıyıcı Sisteminin Performansı

ZTADOA yöntemi ile hesaplanan en elverişsiz değerlerin ortalamaları esas alındığında; bağ kirişi dışında kalan taşıyıcı sistem elemanlarının elastik bölge sınırları içerisinde kaldığı, sadece bağ kirişlerinin plastik davranış gösterdiği ve hiçbir elemanın ileri hasar düzeyinde bulunmadığı belirlenmiştir. 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 elemanlar için elde edilen talep/kapasite oranları Şekil 27'de sunulmuştur.



Şekil 27 EQ1-00 deprem kaydı altında taşıyıcı sistem elemanlarında talep/kapasite dağılımı, [17].

## Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, TBDY 2018’de 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 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  $(1.1R_y V_p / V_E)$  ve  $(1.25R_y V_p / V_E)$  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 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 göre uygulanan kapasite tasarımı esaslarının, elastik bölge içinde kalması

istenen elemanların boyutlandırılması için gerekli olan deprem taleplerinin belirlenmesinde, yeterli düzeyde bir yaklaşıklık sağladığı görülmektedir.

## Semboller

$A_w$	: Gövde enkesit alanı, $(h-2t_f)t_w$ ,
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,
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,
$\ell$	: Çubuk eleman hesap boyu,
L	: Çerçeve hesap açıklığı,
M	: Eğilme momenti etkisi,
$M_p$	: Plastik eğilme momenti,
n	: hareketli yük katsayısı,
P	: Eksenel kuvvet etkisi,
$P_c$	: Eksenel basınç kuvveti dayanımı,
$P_n$	: Karakteristik eksenel akma kuvveti dayanımı,
Q	: Genelleştirilmiş iç kuvvet,
$Q_y$	: Genelleştirilmiş beklenen dayanım,
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
$R_y$	: Olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı,
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,
$V_p$	: Plastik kesme kuvveti dayanımı,
$W_p$	: Plastik mukavemet momenti,
$\Delta$	: Yerdeğiştirme,
$\theta$	: Dönme,
$\theta_y$	: Kesitte akma dönmesi,

## Kaynaklar

- [1] Bouwkamp, J., Vetr, M. G. and Ghamari, A., "An analytical model for inelastic cyclic response of eccentrically braced frame with vertical link (V-EBF)", *Case Studies in Structural Engineering*, vol. 6, pp. 31-44, May. 2016.
- [2] Caprili, S., Mussini, N. and Salvatore, W., "Experimental and numerical assessment of EBF structures with shear links", *Steel and Composite Structures*, vol. 28, no. 2, pp. 123-138, Nov. 2018.
- [3] Silva, A. R. D. *et al.*, "Refined Elastoplastic Analysis of Plane Steel Frames Under Extreme Dynamic Loading", in *Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE2013*, Pirenópolis, GO, BRAZIL, 2013, pp. 2-18.
- [4] Popov, E. P., Ricles, J. M. and Kasai, K., "Methodology for optimum EBF link design", in *Proc. Earthquake Engineering Tenth World Conference*, Balkema, Rotterdam, 1992, pp. 3983-3988.
- [5] Bosco, M., Rossi, P.P., "Seismic behavior of eccentrically braced frames", *Engineering Structures*, Vol.31, pp. 664-674, 2009.
- [6] Koboevic, S. and David, S.O., "Design and Seismic Behaviour of Taller Eccentrically Braced Frames", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 37, pp. 195-208, 2010.
- [7] Durgun, Y. ve diğ., "Dışmerkez Çaprazlı Bir Çelik Perdenin Deprem Performansının Doğrusal Olmayan Dinamik Hesap Yöntemi İle Değerlendirilmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 19, no. 6, pp. 266-274, 2013.
- [8] Khan, N. A., and Bilal, A., "Seismic performance evaluation of eccentrically braced steel frame buildings", *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 41, no. 6, pp. 1121-1131, Dec, 2023.
- [9] Büyük, M.S., "Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevesi Çok Katlı Bir Yapının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Müh. İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, Türkiye, 2022.
- [10] Esmaili, M. R., "Seismic Performance of Eccentrically Braced Frames Designed According to Canadian Seismic Provisions", M.Sc. thesis, Dept. Building, Civil and Env. Eng., Concordia Univ., Montreal, Canada, 2015.
- [11] Biradar, B.B., *et al.*, "Seismic Evaluation of Eccentric Brace Frame Designed by Force-Based Design and Performance-Based Plastic Design Methods", in *Lecture Notes in Civil Engineering Proc. of 17th Symposium on Earthquake Engineering (Vol.2)*, Vol. 330, pp. 393-407, 2023.
- [12] Mortazavi, P., *et al.*, "Seismic Performance Assessment of Steel EBFs with Conventional Replaceable Yielding Links Designed with ASCE 7-16", *J. Struct. Eng.* ASCE, Vol. 150, no. 5, pp. 1-18, 2024, DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-13093
- [13] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [14] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) Eğitim El Kitabı Açıklamalar ve Uygulama Örnekleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2018.
- [15] Türkiye Deprem Tehlike Haritaları, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018. "https://tdth.afad.gov.tr"
- [16] ETABS (ver. 21.0.1) [Computer Software], "Integrated software for structural analysis and design program", Computers and Structures Inc., Berkely, California.
- [17] Perform 3D (ver. 8.1.0) [Computer Software], "Nonlinear Analysis and Performance Assesment of 3D Structures", Computers and Structures Inc., Berkely, California.
- [18] Gilbertson, M. F., "Two nonlinear beams with definitions of ductility", *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 95, no. 2, pp. 137-157, 1966.
- [19] Chen, P. F. and Powel, G. H., "Generalized plastic hinge concepts for 3D beam-column elements.", *EERC Report No. 82-20*, Earthquake Eng. Res. Cntr., Univ of California, Berkeley, 1982.
- [20] Roader, C. W. and Popov, E. P., "Inelastic behavior of eccentric braced steel frames under cyclic loadings", *EERC Report No. 77-18*, Earthquake Eng. Res. Cntr., Univ of California, Berkeley, 1977.
- [21] Kasai, K. and Popov, E. P., "General behavior of WF steel shear link beams." *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 112, no. 2, pp. 362-382, 1986.
- [22] Ricles, J. M. and Popov, E.P., "Composite action in eccentrically braced steel frames." *J. Struct. Eng.* ASCE, Vol. 115, no. 8, pp. 2046-2066, 1989.

- [23] Ricles, J. M. and Popov, E.P., "Inelastic link element for EBF seismic analysis.", *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 120, no. 2, 1994.
- [24] Ramadan, T., and Ghobarah, A., "Analytical model for shear-link behavior." *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 121, no. 11, pp. 1574-1580, 1995.
- [25] Richards, P.W., "Testing protocol for short links in eccentrically braced frames.", *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 132, no. 8, pp. 1183-1191, 2006.
- [26] Badalassi, *et al.*, "Influence of steel mechanical properties on EBF seismic behavior.", *Bull. Earthquake Eng.*, Vol. 11, pp. 2249-2285, 2013.
- [27] Badalassi, *et al.*, "Influence of variability of material mechanical properties on seismic performance of steel and steel-concrete composite structures.", *Bull. Earthquake Eng.*, Vol. 15, no. 4, pp. 1559-1607, 2017.
- [28] PEER Strong Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, California, 2017. "<https://ngawest2.berkeley.edu/>"