



## **Çapraz Konfigürasyonunun Merkezi Çaprazlı Çelik Çerçevelerin Tasarımına ve Dinamik Performansına Etkisi**

### **Effect of Braced Configuration on Design and Dynamic Performance of Concentrically Braced Frames**

**Mehmet Bakır Bozkurt<sup>1\*</sup>**, **Özer Zeybek<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Muğla, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [mehmet.bozkurt@cbu.edu.tr](mailto:mehmet.bozkurt@cbu.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 27.04.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 02.12.2020

DOI:10.21205/deufmd.2021236805

*Atıf şekli/ How to cite: BOZKURT M.B., ZEYBEK Ö., (2021). Çapraz Konfigürasyonunun Merkezi Çaprazlı Çelik Çerçevelerin Tasarımına ve Dinamik Performansına Etkisi. DEÜFMD 23(68), 399-412.*

#### **Öz**

Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (ÇYTHYE-2018) göz önüne alınarak boyutlandırılan X, ters-V ve parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çelik çerçevelerin (MÇÇÇ'lerin) dinamik performansları araştırılarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, farklı kat sayılı, farklı aks aralıklı ve farklı çapraz düzenine sahip toplam 18 adet MÇÇÇ'nin Opensees programı kullanılarak doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında, her bir MÇÇÇ'nin tonajları, elastik rijitlikleri, elastik kesme kuvvetleri ve süneklik kapasiteleri raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, çerçeve açıklığı arttıkça MÇÇÇ'lerin tonajlarının, elastik rijitliklerinin ve elastik taban kesme kuvvetlerinin arttığını fakat süneklik kapasitelerinin düştüğünü göstermektedir. Ayrıca, parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip sünekliği yüksek MÇÇÇ'lerin hem tonaj hem de dinamik performans açısından X ve ters-V tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lere kıyasla daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Merkezi çaprazlı çelik çerçeve, Eşdeğer deprem yükü yöntemi, Tasarım, Statik itme analizi, Süneklik

#### **Abstract**

In this study, dynamic performance of X, inverted-V and split-X typed special concentrically braced frames (CBFs) designed based on Turkish Building Earthquake Code (TBEC-2018) and Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures (DCCPSC-2018) were investigated and compared. Pursuant to this aim, the nonlinear push-over analyses of a total of 18 CBFs with different number of story, different frame span and different braced configuration were conducted by using Opensees software. In the analysis results, tonnage, elastic stiffness, elastic base shear force and ductility capacity of each CBF were reported. The obtained results indicated that as the frame span increases, tonnage, elastic stiffness and elastic base shear force of CBFs increases whereas ductility capacity decreases. Moreover, it was noticed that split-X typed CBFs were more advantageous than the others in terms of both tonnage and dynamic performance.

**Keywords:** Concentrically braced frame, Equivalent lateral force method, Design, Pushover analysis, Ductility

## 1. Giriş

Kolon, kiriş ve çapraz elemanlarından meydana gelen merkezi çaprazlı çelik çerçeveler (MÇÇÇ) deprem ve rüzgar gibi yatay yükleri karşılamak amacıyla kullanılan yatay yük taşıyıcı sistemlerinden birisidir. 1960'lı yıllara kadar mimari gereksinimler sebebi ile birçok uygulamada moment aktaran çerçeveler (MAÇ) kullanılmasına rağmen, bu yıllardan sonra tasarım yönetmeliklerindeki düzenlemeler ve gelişmeler ile birlikte sismik hassasiyetin yüksek olduğu bölgelerde MÇÇÇ'ler de tercih edilmeye başlanmıştır. 1994 yılında Northridge'de ve 1995 yılında Kobe'de gerçekleşen depremler sonrasında MAÇ'lerin kiriş-kolon birleşim detaylarında beklenmeyen birçok gevrek göçmeler meydana geldiği gözlenmiştir. Bu bulgulardan sonra, sünek bir davranışın yanı sıra yeterli dayanım ve rijitliğe sahip moment aktaran birleşim detayları geliştirmek için Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya başta olmak üzere birçok ülkede kapsamlı araştırma projeleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu çalışmaların sonucunda MAÇ'ler için geliştirilen yeni tip birleşim detaylarındaki imalat zorlukları ve yüksek maliyet, MAÇ'lerin MÇÇÇ'lere kıyasla popüleritesinin düşmesine neden olmuştur. Ayrıca, 2010 ve 2011 yıllarında Yeni Zelanda'da meydana gelen Christchurch depremlerinde dış merkez çaprazlı çelik çerçeve (DMÇÇÇ) sistemlerindeki bağ kirişlerinde meydana gelen beklenmeyen göçmeler MÇÇÇ'lerin popüleritesini daha da arttırmıştır [1-2].

MÇÇÇ'lerin yapısal davranışı üzerine ilk çalışmalar 1970'li yıllarda başlamıştır. Bazan ve Rosenblueth [3] X tipi çapraz konfigürasyonundan oluşan tek katlı ve tek açıklıklı çelik çerçeve sistemlerin sismik davranışını sayısal olarak araştırmış olup bu tip ve benzer yapıların tasarımı için kriterler önermişlerdir. Goel ve Hanson [4] ise diagonal çaprazlardan teşkil edilen çok katlı ve tek açıklıklı çelik çerçeve sistemlerin sismik davranışını incelemiştir. Anderson [5] güçlü deprem yer hareketine maruz K tipi çapraz sistemlerden teşkil edilen çelik çerçevelerin elastik ötesi sismik davranışını ele almıştır. Maison ve Popov [6] K tipi çaprazlardan oluşan 1/2 ölçekli çelik çerçevelerin deprem etkisini simule etmek amacıyla tekrarlı yükler altındaki davranışını analitik ve deneysel olarak incelemiştir. Popov ve arkadaşları [7] kutu profilli çapraz elemanlardan oluşan 1/6 ölçekli düzlem çelik

çerçevelerin tekrarlı yatay yükler altındaki davranışı ile ilgili elde edilen bulguları raporlamışlardır. Ayrıca çapraz elemanların elastik ötesi davranışı da deneysel olarak incelenmiştir. Astaneh-Asl ve Goel [8] ve Astaneh-Asl ve arkadaşları [9] sırt sırta yerleştirilmiş köşebentlerden oluşan çapraz elemanların düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarını araştırmış olup, elde ettikleri bulgular ışığında çaprazların daha fazla sünek ve enerji sönmeme kapasitesine yönelik yeni tasarım metodları önermişlerdir. Goel ve El-Tayem [10] ise köşebentlerden oluşan ve kaynaklı birleşime sahip gerçek ölçekli X-tipi çaprazların statik benzeri tekrarlı yükleme altındaki davranışını deneysel olarak incelemişler ve bu tip çaprazların sismik tasarımına yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Fukuta ve arkadaşları [11] ters V tipi çaprazlarda oluşan çelik çerçevelerin sismik performansını deneysel olarak araştırmışlar ve bu tip çaprazların yatay kesme kuvveti ile görelî kat ötelenme oranı ilişkisini gösteren basit bir histeritik model önermişlerdir. Yamanouchi ve arkadaşları [12] gerçek ölçekte K tipi çaprazlardan teşkil edilen MÇÇÇ sistemlerin yatay yük taşıma ve yer değiştirme kapasitelerini dinamik benzeri test tekniği ile incelemiştir. Tremblay [13] MÇÇÇ sistemlerin sünek tasarımı kapsamında çapraz elemanların davranışını etkileyen parametreler için geçmişte yapılmış deneysel çalışmalarını inceleyerek bu tip sistemlerin sismik tasarımına yönelik tavsiyelerde bulunmuştur. Tremblay ve arkadaşları [14] soğukta şekillendirilmiş dikdörtgen kutu tipindeki çaprazlar kullanılarak teşkil edilen MÇÇÇ sistemlerin statik benzeri yükleme altındaki sismik performansını deneysel olarak ele almışlardır. Çaprazların süneklik düzeyine bağlı olarak düzlem dışı deformasyonunu tahmin eden basitleştirilmiş bir model geliştirmişlerdir. Lee ve Brunea [15] MÇÇÇ sistemler ile ilgili mevcut yapılmış deneysel çalışmalardaki basınca maruz kalan çapraz elemanların enerji sönmeme kapasitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Roeder ve arkadaşları [16] X tipi çapraz elemanlardan oluşan MÇÇÇ sistemlerde guse plakası bağlantısı ve çaprazların yapının sismik performansına olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Okazaki ve arkadaşları [17] ters V tipi çaprazlarla teşkil edilen MÇÇÇ sistemlerin sarsma tablası yardımıyla dinamik davranışını araştırmışlardır. Wijesundara ve arkadaşları [18] MÇÇÇ sistemlerinde farklı tip çapraz konfigürasyonları

için guse plakasının bu çaprazlar ile birlikte bağlantısını da göz önüne alarak, histeretik davranışı simule etmek amacıyla elastik ötesi kiriş-kolon elemanları kullanmışlardır. Elde edilen nümerik sonuçlar ile mevcut deneysel çalışma sonuçları arasında bir korelasyon olduğu belirtilmiştir. Kazemzadeh Azad ve arkadaşları [19] farklı çapraz konfigürasyonlarla teşkil edilen MÇÇÇ sistemlerin Amerikan ve Avrupa yönetmeliklerine göre ayrı ayrı tasarımını yapmışlar ve 880 adet zaman tanım aralığında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca bu yönetmeliklerde verilen koşulların MÇÇÇ sistemlerin sismik davranışa etkisini de araştırmışlardır. Silva ve arkadaşları [20] X tipi çaprazlarla teşkil edilen MÇÇÇ sistemlerin Avrupa yönetmeliğine göre tasarımlarının gereksiz malzeme kullanımından dolayı tonaj artışına yol açtığını ve bu yönetmeliğin mevcut halinin güncellenmesine yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Silva ve arkadaşları [21] Avrupa yönetmeliğine göre tasarlanan MÇÇÇ'lerde bağlantı yerleri ile ilgili tasarım koşullarını incelemiş olup, diagonal ve guse bağlantısı davranışının geleneksel tasarımda yeterince göz önüne alınmadığını ifade etmişlerdir.

MÇÇÇ ile ilgili eleman ve sistem bazında gerçekleştirilen sayısal ve deneysel araştırmalar tasarım standartlarının gelişmesine katkıda bulunmuştur. Amerika Birleşik Devletleri'nde (A.B.D'de) çelik yapıların tasarımları AISC 360-16 [22] ve AISC 341-16 [23] esas alınarak yapılırken, Avrupa Birliği (A.B.) ülkelerinde Eurocode 3 [24] ve Eurocode 8 [25] kullanılmaktadır. Bu tasarım yönetmelikleri arasındaki benzerlikler ve farklılıklar birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur [19, 26].

Ülkemizde ise çelik yapıların tasarımı 2016 yılında yürürlüğe giren ve 2018 yılında güncellenen Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYE-2018) [27] ve 2018 yılında yayımlanan ve 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) [28] kullanılarak yapılmaktadır. Çelik yapıların tasarımı amacıyla yakın zaman içerisinde yürürlüğe girmiş olan bu yönetmelikler ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan, Akgönen [29], TBDY-2018'de yer alan farklı MÇÇÇ'lerin ve süneklik düzeyi yüksek MAÇ sistemlerinin sismik davranışlarını incelemiştir. Öte yandan, Yaman ve Ağacakoca [30] süneklik düzeyi yüksek diyagonal ve ters V tipi

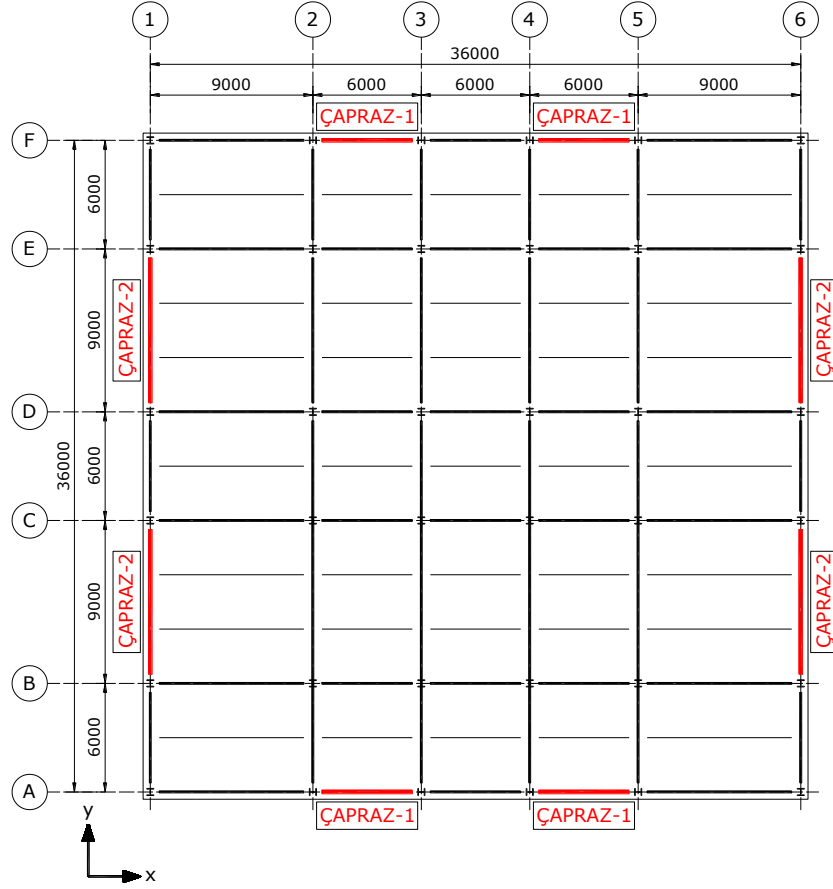
çaprazlardan oluşan MÇÇÇ sistemlerinin ÇYTHYE-2018 ve TBDY-2018'i esas alarak tasarımını ve analizini yapmışlardır. Çalışmalarında, diyagonal MÇÇÇ sisteminin ters V tipi MÇÇÇ sistemine göre daha fazla enerji sönmüleme kapasitesine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bozkurt ve Serin [31] ise Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 (DBYBHY-2007) [32] ve TBDY-2018 [28] yönetmeliklerini esas alarak ters-V ve parçalı-X tipi MÇÇÇ'lerin farklı deprem yer hareketi altındaki davranışını karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır.

Bu çalışma kapsamında öncelikle uygulamada yaygın olarak kullanılan farklı aks aralıklarına sahip X, ters-V ve parçalı-X tipi şekilde düzenlenmiş süneklik düzeyi yüksek 3, 6 ve 9 katlı toplam 18 adet MÇÇÇ, ÇYTHYE-2018 ve TBDY-2018 esaslarına göre boyutlandırılmıştır. Daha sonra boyutlandırılan her bir MÇÇÇ için ayrı ayrı doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilerek prototip binaların elastik rijitlikleri, elastik taban kesme kuvvetleri ve süneklik kapasiteleri belirlenerek karşılaştırılmıştır.

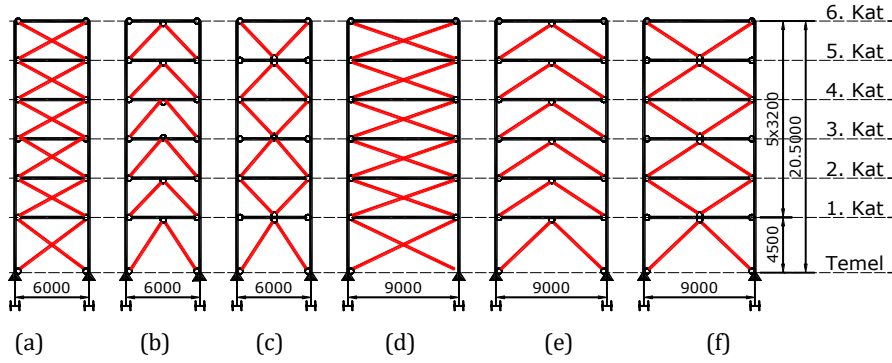
## 2. Prototip Binaların Boyutlandırılması

Plan ebatları 36.0 m x 36.0 m, enlem ve boylam değerleri sırasıyla 41.0<sup>o</sup> ve 28.7<sup>o</sup> olan İstanbul/Avcılar'da yapılacağı varsayılan 3, 6 ve 9 katlı prototip binaların tipik plan görünüşleri Şekil 1'de ve farklı çapraz düzenine sahip 6 katlı prototip binaların cephe görünüşleri Şekil 2'de gösterilmiştir. X yönünde yer alan MÇÇÇ'lerin aks aralığı 6.0 m ve Y yönünde yer alan MÇÇÇ'lerin aks aralığı 9.0 m'dir. 3.0 m aralıklar ile teşkil edilen tali kirişler, ana kirişlere ve ana kirişlerde kolon elemanlarına her iki yönde de mafsalı olarak bağlanmaktadır. Ayrıca çapraz elemanların kolon-kiriş birleşim noktalarına ve/veya kiriş elemanlarının orta noktalarına bağlantıları da mafsalıdır. Birinci katın kat yüksekliği 4.5 m iken diğer tüm katların kat yükseklikleri 3.2 m'dir. Kolonlar ±0.00 kotunda temele sabit mesnet ile bağlanmaktadır.

Farklı kat yüksekliğine ve aks aralıklarına sahip X, ters-V ve parçalı-X çapraz düzeninin kullanıldığı toplam 18 adet MÇÇÇ'nin doğrusal elastik yapısal analizleri Sap2000 v21 [33] programı ile gerçekleştirilmiştir. İç kuvvetler elde edildikten sonra ÇYTHYE-2018 ve TBDY-2018 esaslarına göre S275 malzeme kalitesi ve I-enkesitli profiller kullanılarak MÇÇÇ'ler boyutlandırılmış ve boyutlandırma aşamaları aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 1. Prototip binaların tipik plan görünüşü



Şekil 2. 6 m. aks aralığına sahip (a) X-tipi, (b) ters-V tipi, (c) parçalı-X tipi ve 9 m. aks aralığına sahip (d) X-tipi, (e) ters-V tipi ve (f) parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip 6 katlı prototip binaların cephe görünüşleri

Analiz ve boyutlandırma hesaplarında ÇYTHYE- Katsayıları ile Tasarım Yöntemi (YDKT) 2018 5.2.2'de tanımlanan Yük ve Dayanım kullanılmıştır.

Kat döşemeleri, çelik kirişlere mesnetlenen ve trapez sac levhalar üzerinde yerinde dökme betonarme olarak inşa edilen kompozit döşeme sistemlerinden meydana gelmektedir. Düzlemi içinde rijit bir diyafram oluşturan betonarme döşemesinin çelik kirişlere bağlantısı kesme civileri ile sağlanmıştır. Kompozit döşeme hesapları bu çalışmanın kapsamı dışındadır. İkinci mertebeye analizleri ÇYTHYE-2018'de tanımlanan genel analiz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Dolayısıyla taşıyıcı sistemi oluşturan yapısal elemanların dayanım hesaplarında azaltılmış eleman rijitlikleri ile yapısal analizler

**Tablo 1.** Spektral ivme katsayıları

	$S_s$	$S_1$	$S_{DS}$	$S_{D1}$	PGA (g)	PGV (cm/sn)	$T_A$ (sn)	$T_B$ (sn)
DD-2	1.176	0.319	1.211	0.632	0.481	29.100	0.104	0.522
DD-3	0.433	0.115	0.629	0.273	0.184	11.399	0.087	0.434

$S_s$ : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı,  $S_1$ : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı,  $S_{DS}$ : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı,  $S_{D1}$ : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı, PGA: en büyük yer ivmesi (g), PGV: En büyük yer hızı (cm/sn),  $T_A$  ve  $T_B$ : yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyotlarıdır (s).

TDBY-2018 esaslarına göre işyeri amaçlı kullanılacak olan bu yapılar için Bina Kullanım Sınıfı BKS=3 ve buna karşılık gelen Bina Önem Katsayısı  $I=1.0$ 'dir. BKS=3 ve  $0.75 \leq S_{DS}=1.211$  için Deprem Tasarım Sınıfı tüm prototip binalar için DTS=1 olarak elde edilir. 3 katlı prototip bina için DTS=1 ve  $10.5m < H_N=10.9m \leq 17.5m$  olduğundan Bina Yükseklik Sınıfı BYS=6, 6 katlı prototip bina için DTS=1 ve  $17.5m < H_N=20.5m \leq 28m$  olduğundan Bina Yükseklik Sınıfı BYS=5, 9 katlı prototip bina için DTS=1 ve  $28m < H_N=30.1m \leq 42m$  olduğundan Bina Yükseklik Sınıfı BYS=4 olarak elde edilir. Deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek MÇÇÇ ile karşılandığı binalar için taşıyıcı sistem davranış katsayısı,  $R=5$  ve dayanım fazlalığı katsayısı,  $D=2$ 'dir ve TBDY-2018 Tablo 4.1'de verilen  $BYS \geq 4$  koşulu tüm prototip binalar için sağlanmaktadır. DTS=1 ve  $BYS \geq 4$  koşulları sağlandığı için bu çalışmada eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılmıştır. Diğer taraftan yapıya etkileyen düşey yükler Tablo 2'de verilmiştir.

TBDY-2018 esaslarına göre her bir kata etkileyen sismik kütle hesabında  $n$ , hareketli yük kütle katılım katsayısı iş yeri ve kar yükü için TBDY-2018 esaslarına göre 0.30 olarak seçilmiştir.

gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan görelî kat ötelemeleri ve sehîm kontrollerinde eleman rijitliklerinde azaltma yapılmamıştır.

Yerel zemin sınıfı ZD (Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları) olarak kabul edilen prototip binanın 41.0° enlem ve 28.7° boylam değerlerine tekabül eden harita ve tasarım spektral ivme katsayıları, en büyük yer ivmeleri ve hızları ile yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyotları DD-2 ve DD-3 deprem yer hareketlerine göre Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Prototip binalara etkileyen düşey yükler

Yüklemeler	Normal Kat Döşemesi	Çatı Döşemesi
Sabit yük, G	5.0 kN/m <sup>2</sup>	4.0 kN/m <sup>2</sup>
Hareketli yükü, Q	2.0 kN/m <sup>2</sup>	
Çatı Har. yükü, $Q_r$	-	1.5 kN/m <sup>2</sup>
Kar yükü, S	-	0.75 kN/m <sup>2</sup>
Dış Duvar yükü, $G_d$	3.0 kN/m	-

TBDY-2018 esaslarına göre toplam eşdeğer deprem yükü ya da taban kesme kuvveti ( $V_{tE}$ ) ise aşağıdaki formül ile belirlenir.

$$V_{tE} = m_t S_{aR}(T_p) \geq 0.04 m_t I S_{DS} g \quad (1)$$

Burada,  $T_p$  binanın hakim doğal titreşim periyodu,  $S_{aR}(T_p)$  azaltılmış tasarım spektral ivmesi,  $S_{DS}$  kısa periyot için tanımlanan tasarım spektral ivme katsayısı ve  $g$  yerçekimi ivmesidir.

Yatay deprem etkisi altında azaltılmış tasarım ivme spektrumu  $S_{aR}(T)$  aşağıdaki formülle elde edilir.

$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)} \quad (2)$$

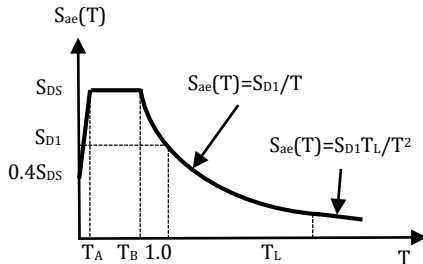
Burada  $S_{ae}(T)$  yatay elastik tasarım spektral ivmesi ( $g$ ),  $R_a(T)$  öngörülen süneklik kapasitesi ve periyoda bağlı deprem yükü azaltma katsayısıdır ve Denklem (3-4) ile verilmiştir.

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \quad T > T_B \quad (3) \quad 1.4422G + 0.5Q + 0.2S + E_d^{(H)} \quad (8)$$

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right) \frac{T}{T_B} \quad T \leq T_B \quad (4) \quad 0.6578G + E_d^{(H)} \quad (9)$$

Burada,  $R$  taşıyıcı sistem davranış katsayısı,  $D$  dayanım fazlalığı katsayısı ve  $T$  ise doğal titreşim periyodudur.

Göz önüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için yatay elastik tasarım ivme spektrumunun ordinatları olan yatay elastik tasarım spektral ivmeleri  $S_{ae}(T)$ , doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi ( $g$ ) cinsinden Şekil 3'de gösterilen formüller ile hesaplanır.



Şekil 3. TBDY-2018'e göre yatay elastik tasarım spektrumu

Taşıyıcı sistem tasarımında esas alınan ve deprem etkilerini içeren yük birleşimleri aşağıda verilmiştir.

$$1.2G + Q + 0.2S + E_d^{(H)} + 0.3E_d^{(Z)} \quad (5)$$

$$0.9G + H + E_d^{(H)} - 0.3E_d^{(Z)} \quad (6)$$

Burada,  $G$  sabit yükü,  $Q$  hareketli yükü,  $S$  kar yükü,  $H$  yatay zemin etkisi etkisi,  $E_d^{(H)}$  tasarıma esas yatay deprem etkisi,  $E_d^{(Z)}$  ise düşey doğrultudaki depremin etkisini göstermektedir. Bu çalışmada, 20 m'yi aşan kiriş elemanları, 5m'yi aşan konsol kiriş elemanları, kirişlere oturan ve düşeyde eğimli olan kolon elemanları bulunmadığı için  $E_d^{(Z)}$  düşey deprem etkisi aşağıdaki formül ile hesaplanarak göz önüne alınmıştır.

$$E_d^{(Z)} \approx (2/3)S_{DS}G \quad (7)$$

Bu çalışmada zemin etkisi olmayıp ( $H=0$ ) ve hareketli yük değeri 5 kPa'ın altında olduğu için TBDY-2018 esaslarına göre  $Q$  değeri %50 azaltılmıştır. Ayrıca  $S_{DS} = 1.211$  Denklem (7)'de yerine yazılarak  $E_d^{(Z)}$  değeri elde edilmiş ve bu değer Denklem (5) ve (6)'da yerine yazılarak yük birleşimleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Dayanım fazlalığı katsayısı ( $D=2$ ) ile büyütülen yük birleşimleri ise aşağıdaki gibidir.

$$1.4422G + 0.5Q + 0.2S + 2(E_d^{(H)}) \quad (10)$$

$$0.6578G + 2(E_d^{(H)}) \quad (11)$$

Ayrıca, ÇYTHYE-2018 esaslarına göre geometrik kusurların da göz önüne alındığı deprem yükü içermeyen yük birleşimleri aşağıda tanımlandığı gibidir.

$$1.4G \quad (12)$$

$$1.2G + 1.6(Q_r \text{ veya } S) \quad (13)$$

$$1.2G + 1.6Q + 0.5(Q_r \text{ veya } S) \quad (14)$$

$$1.2G + 1.6(Q_r \text{ veya } S) + Q \quad (15)$$

Göz önüne alınan prototip binalarda  $Q_r = 1.50 \text{ kPa} > S = 0.75 \text{ kPa}$  olduğu için çatı katında sadece  $Q_r$  göz önüne alınmış olup, kar yükü ( $S$ ) yük birleşimlerinde dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla, hem deprem yükü hem de deprem yükü içermeyen yük birleşimlerinden oluşan toplam 8 adet yükleme birleşimi (YB) aşağıdaki gibidir.

$$YB1: 1.4G \quad (16)$$

$$YB2: 1.2G + 1.6Q_r \quad (17)$$

$$YB3: 1.2G + 1.6Q + 0.5Q_r \quad (18)$$

$$YB4: 1.2G + 1.6Q_r + Q \quad (19)$$

$$YB5: 1.4422G + 0.5Q + 0.2S + E_d \quad (20)$$

$$YB6: 0.6578G + E_d \quad (21)$$

$$YB7: 1.4422G + 0.5Q + 0.2S + 2E_d \quad (22)$$

$$YB8: 0.6578G + 2E_d \quad (23)$$

Çalışma kapsamında incelenen 3, 6 ve 9 katlı prototip binaların ön boyutlandırması için Denklem (24) ile hesaplanan  $T_{pA}$  ampirik periyot değerine göre elde edilen toplam taban kesme kuvvetleri Tablo 3'de verilmiştir.

$$T_{pA} = C_t H_N^{3/4} \quad (24)$$

Burada,  $C_t$  çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalar için 0.08 değerine eşit bir katsayı ve  $H_N$  toplam yapı yüksekliğidir.

**Tablo 3.** Ön boyutlandırma için kullanılan toplam taban kesme kuvvetleri

Kat Sayısı	Toplam Sismik Ağırlık (kN)	Yapı Yüksekliği $H_N$ (m)	Ampirik hakim doğal titreşim periyodu $T_{pA}$ (sn)	$S_{ae}(T)$	$R_a(T)$	Taban kesme kuvveti katsayısı (g)	$V_{TE}$ (kN)	$\Delta F_{NE}$
3	21438.0	10.9	0.480	1.211	4.759	0.254	5445.3	122.5
6	44506.8	20.5	0.771	0.820	5	0.164	7299.1	328.5
9	67575.6	30.1	1.028	0.615	5	0.123	8311.8	561.0

TBDY-2018 esaslarına göre süneklik düzeyi yüksek MÇÇÇ'lerin tasarımı çapraz elemanların boyutlandırılması ile başlar. Öncelikli olarak düşey yükler ve yukarıda bahsedilen  $T_{pA}$  ampirik periyot değerine göre hesaplanan deprem yükleri altında Denklem (16) ile (21) arasındaki yük birleşimleri sonucundaki iç kuvvetler belirlenir. Daha sonra bu iç kuvvetleri karşılayacak gerekli dayanıma sahip, narinliği 200'den küçük ve enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları  $\lambda_{hd}$  koşulunu sağlayacak çapraz enkesitler seçilir. Süneklik düzeyi yüksek MÇÇÇ'lerin kolon, kiriş ve birleşimleri aşağıda ifade edilen iç kuvvetlerden küçüğü göz önüne alarak boyutlandırılır.

- Deprem etkilerinin dayanım fazlalığı katsayısı  $D$  ile çarpılarak büyütülmesi ile elde edilmiş olan Denklem (22) ve (23) ile tanımlanan yük birleşimleri altındaki iç kuvvetler
- Çapraz elemanların burkulma anına ve burkulma sonrası anına karşılık gelen tipik mekanizma durumlarında elde edilen iç kuvvetler

Şekil 4'de gösterildiği gibi tipik mekanizma durumlarında çapraz elemanların olası aksel basınç ve çekme kuvvetleri Denklem (25), (26) ve (27)'de verilmiştir.

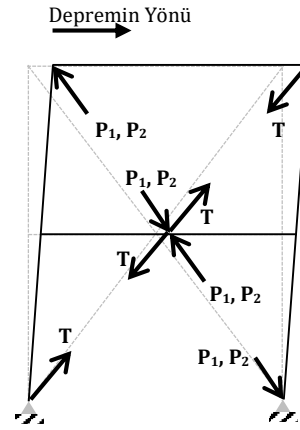
$$P_1 = 1.14F_{cre}A_g \quad (25)$$

$$P_2 = 0.30(1.14F_{cre}A_g) \quad (26)$$

$$T = R_y F_y A_g \quad (27)$$

Burada,  $P_1$  ve  $P_2$  sırasıyla çapraz elemanın burkulma anındaki ve burkulma sonrasındaki olası dayanımları,  $T$  çapraz elemanın olası çekme dayanımı,  $F_{cre}$  olası akma gerilmesi ile hesaplanan kritik burkulma gerilmesi,  $A_g$  kayıpsız enkesit alanı ve  $R_y$  olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranıdır. TBDY-2018 esaslarına göre sadece  $V$ , ters-V ve parçalı-X şeklinde düzenlenmiş çapraz

örgüsüne sahip MÇÇÇ'lerde yer alan kirişler ve kiriş birleşimleri çapraz elemanların burkulması ve burkulma sonrası meydana gelen tipik mekanizma durumlarında ortaya çıkan dengelenmemiş kuvvetleri ve kiriş elemanları üzerindeki düşey yükleri göz önüne alarak oluşturulan yük birleşimleri altında da gerekli dayanımı sağlamalıdır.

**Şekil 4.** Tipik mekanizma durumları

Ayrıca MÇÇÇ'ler TBDY-2018 esaslarına göre tanımlanan deprem yükleri altında yanal ötelenme kriterlerini de sağlamalıdır. Ön boyutlandırma sonrasındaki yapının periyodu ön boyutlandırma aşamasında kullanılan yapı periyodundan farklı olduğu için yeni yapı periyodu ile deprem hesapları ve dolayısıyla tüm MÇÇÇ tasarımı güncellenir. Deprem yükleri altındaki yatay deplasmanlar kontrol edilir. Bu işlem birkaç adım daha tekrarlanarak nihai yapı periyodu ve eleman enkesitleri belirlenir. Boyutlandırılması tamamlanan prototip binaların doğal titreşim periyotları ve taban kesme kuvvetleri Tablo 4'de, eleman enkesitleri ise Tablo 5, 6 ve 7'de verilmiştir.

S275 malzeme sınıfından ve I-enkesitli profillerden teşkil edilen, ÇYTHYE-2018 ve TBDY-2018 esaslarına göre boyutlandırılan MÇÇÇ'lerdeki kolon, kiriş ve çapraz elemanların tonajları her bir prototip bina için x ve y eksenleri ayrı ayrı olmak üzere sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir. Tüm prototip binalarda kolon ve çapraz elemanların tonajları X tipi MÇÇÇ'lerde yüksek olmasına rağmen kiriş elemanların tonajları çapraz burkulması ile ortaya çıkan dengelenmemiş kuvvetlerin en fazla

olduğu ters-V tipi MÇÇÇ'lerde daha yüksektir. Toplam tonaj açısından X ve parçalı-X tipi MÇÇÇ'ler birbirine benzer olmasına rağmen, ters-V tipi MÇÇÇ'lerin tonajı açıklığın 6 m olduğu X ve açıklığın 9 m olduğu Y ekseninde diğer MÇÇÇ'lere kıyasla sırasıyla %37 ve %43 daha fazla çıkmıştır. Çerçeve açıklığı arttıkça kiriş ve çapraz elemanların tonajları ciddi miktarda arttığı için toplam tonajlar da buna bağlı olarak artmaktadır.

**Tablo 4.** Prototip binaların doğal titreşim periyotları ve taban kesme kuvvetleri

Prototip Bina	Kat Sayısı	Çapraz Konfigürasyonu	Doğal Titreşim periyodu, $T_p$ (sn)		1.4 $T_{PA}$ sınır periyot (sn)	Taban Kesme Kuvveti, $V_{TE}$ (kN)		Karşılaştırma $\frac{V_{TE}^x}{V_{TE}^y}$
			X Yönü	Y Yönü		X Yönü	Y Yönü	
1	3	X	0.438	0.393	0.672	5750	6095	0.94
2		Ters-V	0.461	0.396		5583	6068	0.92
3		Parçalı-X	0.481	0.404		5449	6006	0.91
4	6	X	0.889	0.711	1.079	6328	7914	0.80
5		Ters-V	0.909	0.739		6190	7613	0.81
6		Parçalı-X	0.943	0.747		5969	7530	0.79
7	9	X	1.411	1.108	1.439	6054	7709	0.79
8		Ters-V	1.432	1.127		5966	7579	0.79
9		Parçalı-X	1.467	1.145		5936	7458	0.80

**Tablo 5.** X- tipi çapraz düzeninin kullanıldığı MÇÇÇ'lerin eleman kesitleri

PB	KN	X Yönü (6 metre açıklık)			Y Yönü (9 metre açıklık)		
		Kolon	Kiriş	Çapraz (Narinlik)	Kolon	Kiriş	Çapraz (Narinlik)
3 Kat	3	HE200B	IPE300	HE180B (149)	HE200B	IPE500	HE220B (171)
	2	HE400B	IPE300	HE200B (134)	HE300B	IPE500	HE240B (157)
	1	HE400B	IPE300	HE240B (123)	HE300B	IPE500	HE280B (142)
6 Kat	6	HE200B	IPE300	HE160B (168)	HE240B	IPE500	HE200B (188)
	5	HE200B	IPE300	HE200B (134)	HE240B	IPE500	HE240B (157)
	4	HE400B	IPE300	HE200B (134)	HE400B	IPE500	HE260B (145)
	3	HE400B	IPE300	HE220B (122)	HE400B	IPE500	HE280B (135)
	2	HE1000M	IPE300	HE220B (122)	HE1000M	IPE500	HE280B (135)
	1	HE1000M	IPE300	HE260B (114)	HE1000M	IPE500	HE320B (133)
9 Kat	9	HE200B	IPE300	HE160B (168)	HE200B	IPE500	HE200B (188)
	8	HE260B	IPE300	HE200B (134)	HE280B	IPE500	HE220B (171)
	7	HE260B	IPE300	HE200B (134)	HE280B	IPE500	HE240B (157)
	6	HE700B	IPE300	HE200B (134)	HE700B	IPE500	HE260B (145)
	5	HE700B	IPE300	HE200B (134)	HE700B	IPE500	HE260B (145)
	4	HE1000M	IPE300	HE220B (122)	HE1000M	IPE500	HE280B (135)
	3	HE1000M	IPE300	HE220B (122)	HE1000M	IPE500	HE280B (135)
	2	H1250x400	IPE300	HE220B (122)	H1250x400	IPE500	HE280B (135)
	1	H1250x400	IPE300	HE260B (114)	H1250x400	IPE500	HE320B (133)



**Tablo 6.** Ters-V tipi çapraz düzeninin kullanıldığı MÇÇÇ'lerin eleman kesitleri

PB	KN	X Yönü (6 metre açıklık)			Y Yönü (9 metre açıklık)		
		Kolon	Kiriş	Çapraz (Narin.)	Kolon	Kiriş	Çapraz (Narin.)
3 Kat	3	HE200B	HE800B	HE160B (108)	HE200B	HE1000B	HE180B (121)
	2	HE280B	HE1000B	HE200B (87)	HE260B	HE1000M	HE200B (109)
	1	HE280B	H1100x350	HE240B (89)	HE260B	H1250x400	HE240B (105)
6 Kat	6	HE200B	HE650B	HE140B (123)	HE200B	HE900B	HE160B (136)
	5	HE200B	HE900B	HE180B (96)	HE200B	HE1000M	HE200B (109)
	4	HE360B	HE900B	HE180B (96)	HE360B	HE1000M	HE200B (109)
	3	HE360B	HE1000B	HE200B (87)	HE360B	H1100x350	HE220B (99)
	2	HE1000B	HE1000B	HE200B (87)	HE1000B	H1100x350	HE220B (99)
	1	HE1000B	H1100x350	HE260B (82)	HE1000B	H1250x400	HE260B (97)
9 Kat	9	HE200B	HE650B	HE140B (123)	HE200B	HE900B	HE160B (136)
	8	HE240B	HE900B	HE180B (96)	HE240B	HE1000B	HE180B (121)
	7	HE240B	HE1000B	HE200B (87)	HE240B	HE1000M	HE200B (109)
	6	HE400B	HE1000B	HE200B (87)	HE400B	HE1000M	HE200B (109)
	5	HE400B	HE1000B	HE200B (87)	HE400B	H1100x350	HE220B (99)
	4	HE1000B	HE1000B	HE200B (87)	HE1000B	H1100x350	HE220B (99)
	3	HE1000B	HE1000B	HE200B (87)	HE1000B	H1250x400	HE240B (91)
	2	H1250x400	HE1000B	HE200B (87)	H1250x400	H1250x400	HE240B (91)
1	H1250x400	H1100x350	HE260B (82)	H1250x400	H1250x400	HE260B (97)	

**Tablo 7.** Parçalı-X tipi çapraz düzeninin kullanıldığı MÇÇÇ'lerin eleman kesitleri

PB	KN	X Yönü (6 metre açıklık)			Y Yönü (9 metre açıklık)		
		Kolon	Kiriş	Çapraz (Narin.)	Kolon	Kiriş	Çapraz (Narin.)
3 Kat	3	HE200B	HE800B	HE160B (108)	HE200B	HE1000B	HE180B (121)
	2	HE280B	IPE450	HE200B (87)	HE260B	HE400B	HE200B (109)
	1	HE280B	HE650B	HE240B (89)	HE260B	HE800B	HE240B (105)
6 Kat	6	HE200B	IPE300	HE140B (123)	HE200B	HE300B	HE160B (136)
	5	HE200B	HE450B	HE180B (96)	HE200B	HE550B	HE200B (109)
	4	HE360B	IPE450	HE180B (96)	HE360B	HE400B	HE200B (109)
	3	HE360B	IPE450	HE200B (87)	HE360B	HE450B	HE220B (99)
	2	HE1000B	IPE500	HE200B (87)	HE1000B	HE450B	HE220B (99)
	1	HE1000B	HE700B	HE260B (82)	HE1000B	HE900B	HE260B (97)
9 Kat	9	HE200B	H1100x350	HE260B (67)	HE200B	HE900B	HE160B (136)
	8	HE240B	IPE600	HE320B (58)	HE240B	HE360B	HE180B (121)
	7	HE240B	HE700B	HE240B (72)	HE240B	HE450B	HE200B (109)
	6	HE400B	IPE550	HE240B (72)	HE400B	HE400B	HE200B (109)
	5	HE400B	HE500B	HE200B (87)	HE400B	HE450B	HE220B (99)
	4	HE1000B	IPE500	HE200B (87)	HE1000B	HE450B	HE220B (99)
	3	HE1000B	IPE330	HE200B (87)	HE1000B	HE500B	HE240B (91)
	2	H1250x400	IPE500	HE200B (87)	H1250x400	HE450B	HE240B (91)
1	H1250x400	HE700B	HE260B (82)	H1250x400	HE700B	HE260B (97)	

PB: Prototip bina, KN: Kat numarası, H1100x350: H1100x350x35x25, H1250x400: H1250x400x40x30

**Tablo 8.** Prototip binaların X ekseninde yer alan MÇÇÇ'lerin tonajları

Yapısal Elemanlar	3 Katlı Prototip Bina (ton)			6 Katlı Prototip Bina (ton)			9 Katlı Prototip Bina (ton)		
	X	Ters-V	Parçalı-X	X	Ters-V	Parçalı-X	X	Ters-V	Parçalı-X
Kolon	2.786	1.976	1.976	8.141	7.438	7.438	17.224	15.576	15.576
Kiriş	0.760	5.823	3.385	1.520	10.493	4.239	2.280	16.763	9.127
Çapraz	2.779	1.812	1.812	5.579	3.273	3.273	8.218	4.974	6.534
Toplam	6.325	9.611	7.173	15.240	21.204	14.950	27.722	37.313	31.237

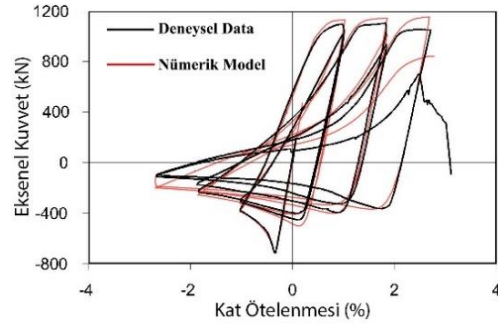
**Tablo 9.** Prototip binaların Y ekseninde yer alan MÇÇÇ'lerin tonajları

Yapısal Elemanlar	3 Katlı Prototip Bina (ton)			6 Katlı Prototip Bina (ton)			9 Katlı Prototip Bina (ton)		
	X	Ters-V	Parçalı-X	X	Ters-V	Parçalı-X	X	Ters-V	Parçalı-X
Kolon	2.193	1.819	1.819	8.421	7.438	7.438	17.354	15.576	15.576
Kiriş	2.458	10.702	6.584	4.917	20.733	9.946	7.375	33.039	15.308
Çapraz	5.023	2.302	2.302	11.002	4.581	4.581	16.100	6.985	6.985
Toplam	9.674	14.823	10.705	24.340	32.752	21.965	40.829	55.600	37.869

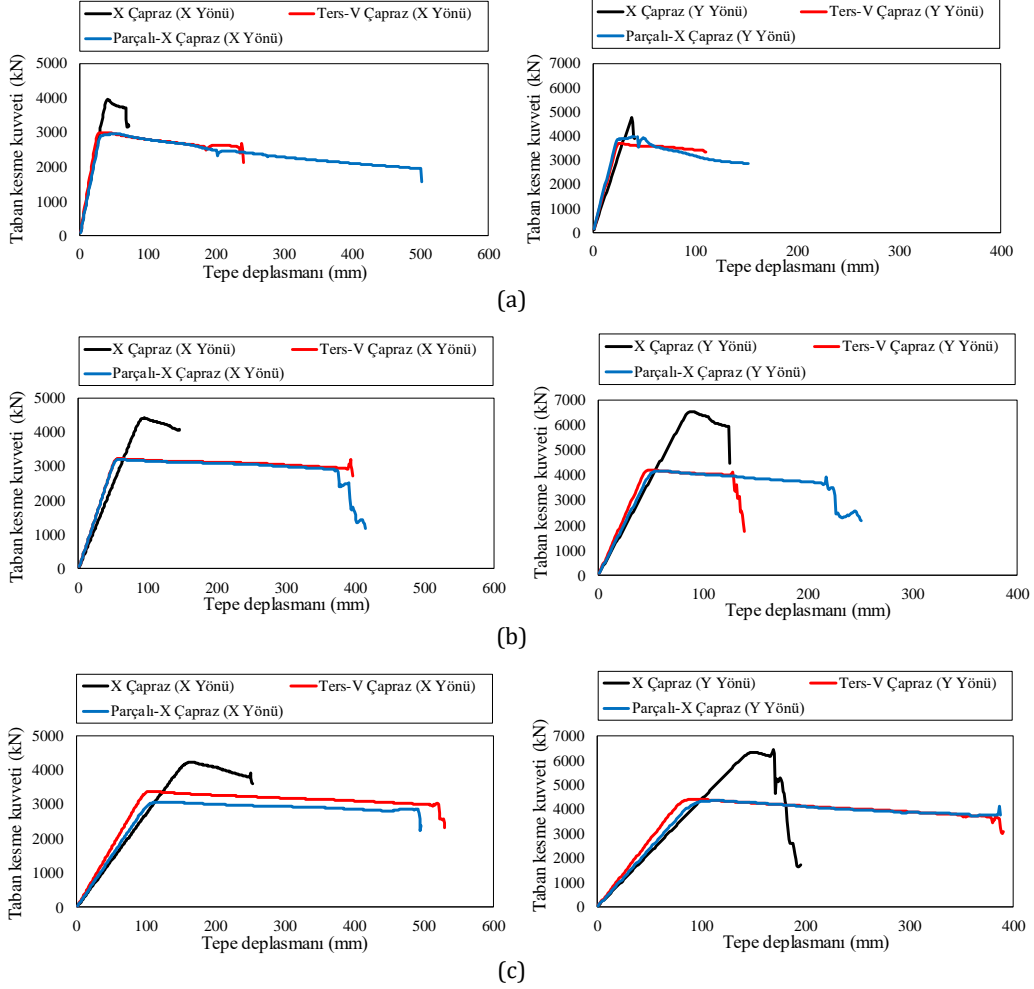
### 3. Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizleri

Prototip binaların sismik performanslarının karşılaştırılması için Opensees [34] programı kullanılarak toplam 18 adet doğrusal olmayan statik itme analizi gerçekleştirilmiştir. Çapraz, kolon ve kiriş elemanları için "forceBeamColumn" modelinin kullanıldığı iki boyutlu nümerik modellerde, birim şekil değiştirme oranı, b değeri 0.003 olarak göz önüne alınmıştır. Ayrıca malzeme modeli olarak "steel02" ve "Giuffre-Menegotto-Pinto" kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde P-Δ etkilerini göz önüne alabilmek için "elasticBeamcolumn" elemanlarından teşkil edilen gravity kolonlar ve bunları MÇÇÇ'lere bağlayan "truss" elemanlarından teşkil edilen kiriş elemanlar da nümerik modele ilave edilmiştir. Mafsallı kiriş-kolon birleşimleri için MÇÇÇ'lerde yer alan tüm kiriş kolon birleşimine yatay ve düşey yükleri aktarıp, momenti aktarmayan "equalDOF" elemanları tanımlanmıştır. Modellerde çapraz elemanlar, kiriş ve/veya kolon elemanlarına bağlantı levhası ile bağlanmıştır. Bu bağlantı levhaları çapraz elemanların basınç yükü altında burkulma davranışını gerçekleştirebilmeleri için çapraz elemanın ucundan itibaren bağlantı levhası kalınlığının iki katına karşılık gelecek uzunluğu boyunca plastik deformasyon yapabilen "forceBeamColumn" elemanları kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca birleşim bölgelerinde bulunan rijit bölgeler o bölgede bulunan

elemanların mevcut kesit alanları ve atalet momentleri 10 kat artırılarak sadece elastik davranış yapabilen "elasticBeamcolumn" elemanları ile modellenmiştir. Opensees programında gerçekleştirilen nümerik model, Fell ve arkadaşları [35] tarafından gerçekleştirilen 17 numaralı deney datası ile karşılaştırılarak kalibre edilmiştir (Şekil 5).

**Şekil 5.** Nümerik modelin deneysel davranış ile karşılaştırılması

Bu karşılaştırma sonucunda çapraz elemanın başlangıçtaki eğriliğinin efektif çapraz uzunluğunun %0.1'ine karşılık geldiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucunda her bir MÇÇÇ için elde edilen taban kesme kuvveti-tepe deplasman eğrileri Şekil 6'da, elastik rijitlik, elastik taban kesme kuvveti ve süneklik kapasiteleri ise Tablo 10'da verilmiştir.



**Şekil 6.** (a) 3 katlı, (b) 6 katlı ve (c) 9 katlı MÇÇÇ'lere ait statik itme eğrileri

Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçlarına göre, 9 metre açıklığa sahip Y yönündeki 3, 6 ve 9 katlı MÇÇÇ'lerin elastik rijitlikleri, 6 metre açıklığa sahip X yönündeki MÇÇÇ'lere kıyasla sırasıyla ortalama yaklaşık %28, %48 ve %59 oranında daha yüksektir. Diğer taraftan, Y yönündeki 3, 6 ve 9 katlı MÇÇÇ'lerin elastik taban kesme kuvvetleri, X yönündeki MÇÇÇ'lere kıyasla sırasıyla ortalama yaklaşık %23, %36 ve %40 daha fazla olmasına rağmen, süneklik kapasitesi %56, %39 ve %15 oranında daha düşüktür. Bu sonuçlar çerçeve açıklığı arttıkça MÇÇÇ'lerin elastik rijitliklerinin ve elastik taban kesme kuvvetlerinin arttığını fakat süneklik kapasitelerinin düştüğünü göstermektedir. Ters-V tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin elastik rijitlikleri, parçalı-X tipi MÇÇÇ'lere kıyasla

ortalama yaklaşık %10 daha yüksek olmasına rağmen, her iki MÇÇÇ'nin elastik taban kesme kuvvetleri birbirlerine benzer çıkmıştır. Ayrıca 3 katlı parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin süneklik kapasiteleri, ters-V tipi MÇÇÇ'lere kıyasla ortalama yaklaşık %43 oranında daha yüksek çıkmasına rağmen 6, 9 katlı ters-V tipi ve parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin süneklik kapasiteleri birbirlerine benzer çıkmıştır. Diğer taraftan, X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin elastik rijitlikleri ve elastik kesme kuvvetleri ters-V ve parçalı-X tipi çaprazlı düzenine sahip MÇÇÇ'lere kıyasla ortalama yaklaşık %17 ve %28 daha yüksek olmasına rağmen süneklik kapasiteleri %282 oranında daha düşüktür.

**Tablo 10.** Prototip binaların sismik kapasiteleri

Prototip Bina	Kat Sayısı	Çapraz Konfigürasyonu	X yönü			Y yönü		
			$K_e$ (kN/mm)	$V_e$ (kN)	$\mu_s$	$K_e$ (kN/mm)	$V_e$ (kN)	$\mu_s$
1	3	X	103.68	3949	1.68	117.62	4753	1.05
2		Ters-V	118.87	2977	8.21	155.31	3697	4.23
3		Parçalı-X	100.74	2915	13.08	139.96	3881	5.03
4	6	X	49.62	4379	1.62	76.88	6443	1.36
5		Ters-V	60.89	3224	6.70	93.92	4203	2.72
6		Parçalı-X	61.33	3155	7.04	82.83	4164	4.09
7	9	X	27.18	4232	1.54	43.96	6329	1.13
8		Ters-V	34.65	3371	4.82	54.25	4384	4.49
9		Parçalı-X	29.73	3055	4.33	47.61	4318	3.85

$K_e$ : elastik rijitlik,  $V_e$ : elastik taban kesme kuvveti,  $\mu_s$ : süneklilik kapasitesi.

#### 4. Tartışma

Yatay yüklere maruz kalan MÇÇÇ'lerin yanal stabiliteleri çapraz elemanların aksel rijitlikleri sayesinde sağlanır. Farklı çapraz konfigürasyonları sonucunda değişen çapraz elemanların uzunlukları, enkesitleri ve dolayısıyla narinlikleri MÇÇÇ'lerin tonajlarını ve dinamik karakteristiklerini etkileyen en önemli değişkenlerdir. X-tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerde çapraz elemanların her iki ucu da direkt kiriş-kolon birleşim noktalarına bağlanırken, ters-V ve parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerde çapraz elemanların bir ucu kiriş-kolon birleşim noktasına diğer ucu ise kiriş elemanlarının orta noktasına bağlanmaktadır. Çapraz elemanların aksel çekme yükü altındaki akma dayanımları ile aksel basınç yükü altındaki burkulma dayanımları arasındaki fark ters-V ve parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin kiriş elemanlarında kiriş elemanının akseline dik doğrultuda dengelenmemiş kuvvetlere neden olmaktadır. Bu dengelenmemiş kuvvetler ise kiriş elemanlarında ilave moment ve kesme kuvvetlerine neden olmaktadır. Parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin X-tipi ve ters-V tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lere kıyasla tonaj ve dinamik karakteristikleri açısından avantajları güncel yönetmeliklere uygun tasarım yapmak şartıyla mümkün olmaktadır. Parçalı-X ve ters-V tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin kiriş elemanlarında meydana gelebilecek bu dengelenmemiş kuvvetlerin göz önüne alınarak boyutlandırılması ülkemizde kullandığımız TBDY-2018, A.B.D.'de kullanılan AISC 341-16 ve A.B.'de kullanılan Eurocode 8 ile benzerlikler ve farklılıklar göstermektedir. TBDY-2018 ve AISC 341-16 çapraz elemanların burkulma

sonrasında MÇÇÇ'lerde meydana gelecek mekanizma durumunda çapraz elemanların olası aksel çekme dayanımlarını belirlemek için Denklem (27)'de tanımlanan  $R_y F_y A_g$  eşitliğini kullanırken, Eurocode 8  $F_y A_g$  eşitliğini kullanır. Diğer taraftan TBDY-2018 ve AISC 341-16 çapraz elemanların burkulma sonrası olası aksel basınç dayanımlarını belirlemek için Denklem (26)'da tanımlanan  $0.3 * 1.14 (F_{cre} A_g)$  eşitliğini kullanırken Eurocode 8  $0.3 (F_y A_g)$  eşitliğini kullanır. Bu durum, ters-V ve parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin kiriş elemanlarının TBDY-2018 ve AISC 341-16 esaslarına göre boyutlandırılmasında Eurocode 8'e kıyasla çapraz elemanların burkulma sonrası ortaya çıkan dengelenmemiş kuvvetlerin çok daha yüksek mertebelerde göz önüne alındığını göstermektedir [19]. Ayrıca, X tipi çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lerin boyutlandırılmasında Eurocode 8 yönetmeliği, TBDY-2018 ve AISC 341-16'dan farklı olarak çapraz elemanların basınç dayanımlarını göz ardı ederek çapraz elemanların sadece çekme yükü dayanımlarına göre tasarım yapmaktadır. TBDY-2018 esaslarına göre tasarım yaklaşımının temelleri AISC 341-16'ya dayanır. AISC 341-16 ve Eurocode 8 esaslarına göre tasarlanan farklı çapraz örgüsüne sahip MÇÇÇ'lerin eleman enkesitleri ve dolayısıyla eleman narinlikleri de birbirinden farklı çıkmaktadır. Bu farklı tasarım yaklaşımları MÇÇÇ'lerin dinamik davranışlarını etkilemektedir [19].

#### 5. Sonuç

Uygulamada yaygın olarak kullanılan X, ters-V ve parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip toplam 18 adet sünekliliği yüksek MÇÇÇ öncelikle ÇYTHYE-

2018 ve TBDY-2018 esaslarına göre boyutlandırılmıştır. Çapraz konfigürasyonu, çerçeve açıklıkları ve kat sayıları temel değişkenler olarak göze alınmıştır. Boyutlandırılması tamamlanan her bir MÇÇÇ'nin Opensees programı ile doğrusal olmayan statik itme analizleri yapılarak dinamik performansları karşılaştırılmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Çerçeve açıklığı arttıkça kiriş ve çapraz elemanların tonajları ciddi miktarda arttığı için toplam tonajlar da buna bağlı olarak artmaktadır.
- X ve parçalı-X tipi MÇÇÇ'lerin tonajları birbirine benzer olmasına rağmen, ters-V tipi MÇÇÇ'lerin tonajları diğerlerine kıyasla ortalama %40 daha fazladır.
- Çerçeve açıklığı arttıkça MÇÇÇ'lerin elastik rijitlikleri ve elastik taban kesme kuvvetleri artarken süneklik kapasiteleri düşmektedir.
- X tipi MÇÇÇ'lerin elastik rijitlikleri ve elastik taban kesme kuvveti kapasiteleri diğerlerine kıyasla ortalama %23 fazla olmasına rağmen süneklik kapasiteleri %282 düşüktür.
- Parçalı-X tipi MÇÇÇ'lerin tonajlarının ters-V tipi MÇÇÇ'lere kıyasla daha düşük olmasına rağmen süneklik kapasiteleri 3 katlı prototip binalarda yaklaşık %43 daha fazla, 6 ve 9 katlı prototip binalarda ise benzer çıkmıştır.

Bu sonuçlar parçalı-X tipi çapraz düzenine sahip sünekliği yüksek MÇÇÇ'lerin tonaj ve dinamik performans açısından diğer çapraz düzenine sahip MÇÇÇ'lere kıyasla daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Bu çalışma MÇÇÇ'lerin doğrusal olmayan statik itme analizleri sonuçlarından elde edilen verilere göre hazırlanmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak çalışmanın genişletilmesi önerilmektedir.

#### Kaynakça

[1] Bruneau, M., Uang, C.M., Sabelli R. 2011. Ductile Design of Steel Structures. McGraw Hill Professional, 928s.  
 [2] Gioncu, V., Mazzolani, F.M. 2014. Seismic Design of Steel Structures. CRC Press, Boca Raton, 487s.  
 [3] Bazan, E., Rosenblueth, E. 1974. Seismic Response of One-Story X-Braced Frames, Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 100, ST2, s. 489-493.  
 [4] Goel, S.C. and Hanson, R.D. 1974. Seismic Behaviour of Multistory Braced Steel Frames, Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 100, ST1, s. 79-95.  
 [5] Anderson, J.C. 1975. Seismic Behavior of K-Braced Framing Systems", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 101, ST10, s. 2147-2159.

[6] Maison, B.F., Popov, E.P. 1980. Cyclic response prediction for braced steel frames. Journal of Structural Engineering, ASCE, 106(7): s. 1401-1416.  
 [7] Popov, E.P., Mahin, S.A. and Zayas, V.A. 1980. Inelastic Cyclic Behavior of Tubular Braced Frames, Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 106, ST12, s. 2375-2390.  
 [8] Astaneh-Asl, A. and Goel, S.C. 1984. Cyclic in-plane buckling of double angle bracing, Journal of Structural Engineering, ASCE, 110 (9), s. 2036-2055. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:9(2036).  
 [9] Astaneh-Asl, A., Goel, S.C. and Hanson, R.D. 1985. Cyclic out-of-plane buckling of double-angle bracing, Journal of Structural Engineering, ASCE, 111 (5), s. 1135-1153. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:5(1135).  
 [10] Goel, S.C., El-Tayem, A.A. 1986. Cyclic Load Behavior of Angle X-Bracing, Journal of Structural Engineering, ASCE, 112 (11) s. 2528-2539. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:11(2528).  
 [11] Fukuta, T., Nishiyama, I., Yamanouchi, H. and Kato, B. 1989. Seismic performance of steel frames with inverted V braces, Journal of Structural Engineering, ASCE 115 (8) s. 2016-2028. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:8(2016).  
 [12] Yamanouchi, H., Midorikawa, M., Nishiyama, I., Watabe, M. 1989. Seismic behavior of full-scale concentrically braced steel building structure, Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(8), s. 1917-1929. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:8(1917).  
 [13] Tremblay, R. 2002. Inelastic seismic response of steel bracing members, Journal of Constructional Steel Research, 58 (5-8) s. 665-701. DOI: 10.1016/S0143-974X(01)00104-3.  
 [14] Tremblay, R., Archambault, M.H., Filiatrault, A. 2003. Seismic response of concentrically braced steel frames made with rectangular hollow bracing members, Journal of Structural Engineering, ASCE, 129 (12) s. 1626-1636. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1626).  
 [15] Lee, K. Bruneau, M. 2005. Energy Dissipation of Compression Members in Concentrically Braced Frames: Review of Experimental Data, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131 (4), s. 552-559. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:4(552).  
 [16] Roeder, C.W., Lehman, D.E., Clark, K., Powell, J., Yoo, J.H., Tsai, K.C., Lin, C.H. and Wei, C.Y. 2011. Influence of gusset plate connections and braces on the seismic performance of X-braced frames, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40 (4), s. 355-374. DOI: 10.1002/eqe.1024.  
 [17] Okazaki, T., Lignos, D.G., Hikino, T. and Kajiwara, K. 2013. Dynamic response of a chevron concentrically braced frame, Journal of Structural Engineering, ASCE 139 (4), s. 515-525. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000679.  
 [18] Wijesundara, K.K., Nascimbene, R. and Rassati, G.A. 2014. Modeling of different bracing configurations in multi-storey concentrically braced frames using a fiber-beam based approach, Journal of Constructional Steel Research, 101, s. 426-436. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.009.  
 [19] Kazemzadeh Azad, S., Topkaya, C. and Astaneh-Asl A. 2017. Seismic behavior of concentrically braced frames designed to AISC341 and EC8 provisions, Journal of Constructional Steel Research, 133, s. 383-404, DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.02.026.

- [20] Silva, A., Santos, L., Ribeiro, T. and Castro, J.M. 2018. Improved seismic design of concentrically X-braced steel frames to Eurocode 8, *Journal of Earthquake Engineering*, 1-26. DOI: 10.1080/13632469.2018.1528912.
- [21] Silva, A., Castro, J.M. and Monteiro R. 2019. Practical considerations on the design of concentrically-braced steel frames to Eurocode 8, *Journal of Constructional Steel Research*, 158, s. 71-85. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.011.
- [22] AISC, 2016. Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [23] AISC, 2016. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [24] Eurocode 3, 2003. Design of steel structures - part 1-1: general rules and rules for buildings, EN 1993-1-2003, European Standard, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- [25] Eurocode 8, 2004. Design of structures for earthquake resistance - part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1:2004, European Standard, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- [26] Topkaya, C., Şahin S., A. 2011. Comparative Study of AISC-360 and EC3 Strength Limit States, *International Journal of Steel Structures*, 11(1) 13-27.
- [27] ÇYTHYE, 2018. Çelik yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, T.C. Resmi Gazete, sayı:29614, s.247.
- [28] TBDY, 2018. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, s.417, Ankara.
- [29] Akgönen, A.İ. 2017. Yüksek Sünek Merkezi Çaprazlı Çelik Çerçevelerin Yatay Yükler Altında Davranışının İncelenmesi, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), s. 16-23.
- [30] Yaman, Z., Ağacakoca, E. 2018. Dairesel Kesite Sahip Merkezi Çelik Çaprazların Performans Analizi. *Sakarya Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), s. 340-349.
- [31] Bozkurt, M, Serin, B. 2021. DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 Esas Alınarak Boyutlandırılan MÇÇÇ'lerin Deprem Performanslarının Karşılaştırılması, *Teknik Dergi*, 32 (1) , DOI: 10.18400/tekderg.620816.
- [32] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, DBYBHY-2007, Ankara.
- [33] SAP 2000 Structural Analysis Program, Nonlinear Version 21.0 ultimate, Computers and Structures, Inc. 2019. Berkeley, California.
- [34] OPENSEES, 2009. Version 2.0 User Command-Language Manual.
- [35] Fell, B.V., Kanvinde, A.M., Deierlein, G.G., Mayers, A. T., 2009. Experimental investigation of inelastic cyclic buckling and fracture of steel braces. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 135(1): 19-32. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:1(19).