



Yüksek Binalarda Burkulması Önlenmiş Çaprazların Kullanımının Sismik Performansa Etkisi

Arslan UÇAR^{1,a}, Seda ÖNCÜ-DAVAS^{2,b}

¹Rüya Dizayn İnşaat San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye

²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

^aORCID: 0009-0003-6440-0863; ^bORCID: 0000-0001-5023-1980

Makale Bilgileri

Geliş : 09.11.2025

Kabul : 30.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1757157

Sorumlu Yazar

Seda ÖNCÜ-DAVAS

seda.oncu@iuc.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Burkulması önlenmiş çapraz

Yüksek bina

Sismik performans

Atf şekli: UÇAR, A., ÖNCÜ-DAVAS, S., (2026). Yüksek Binalarda Burkulması Önlenmiş Çaprazların Kullanımının Sismik Performansa Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 101-113.

ÖZ

Deprem performansının iyileştirilmesine yönelik yapısal sistemler olarak yaygın biçimde kullanılan burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) sistemleri, süneklik ve enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapısal güvenliği artırmaktadır. BÖÇ elemanların stratejik yerleşiminin kesme kuvveti, moment ve yer değiştirme taleplerini anlamlı ölçüde azalttığı birçok çalışmada gösterilmiştir. Bu kapsamda, biri referans olmak üzere, farklı BÖÇ yerleşimlerine sahip iki modeli içeren toplam üç yüksek bina modeli oluşturulmuş ve Perform-3D yazılımı ile doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir model için elde edilen veriler, tescilli bir veri işleme yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiş; göreceli kat ötelemesi, kesme kuvveti, enerji tüketimi ve talep/kapasite oranı gibi performans göstergeleri açısından karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Bulgular, BÖÇ sistemlerinin yapının enerji sönümleme kapasitesini artırarak, taşıyıcı elemanlardaki plastik şekil değiştirme taleplerini azalttığını ve yapının sismik performansını artırmada başarı sağladığını göstermektedir.

The Effect of Using Buckling-Restrained Braces on the Seismic Performance of High-Rise Buildings

Article Info

Received : 09.11.2025

Accepted : 30.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1757157

Corresponding Author

Seda ÖNCÜ-DAVAS

seda.oncu@iuc.edu.tr

Keywords

Buckling restrained brace

High-rise building

Seismic performance

How to cite: UÇAR, A., ÖNCÜ-DAVAS, S., (2026). The Effect of Using Buckling-Restrained Braces on the Seismic Performance of High-Rise Buildings. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 101-113.

ABSTRACT

Buckling-restrained brace (BRB) systems, which are widely used as structural systems for seismic performance enhancement, enhance structural safety by increasing ductility and energy dissipation capacity. Numerous studies have demonstrated that the strategic placement of BRB elements leads to significant reductions in shear force, moment, and displacement demands. In this context, three high-rise building models were developed, including one reference model and two models with different BRB configurations. Nonlinear time history analyses were conducted using the Perform-3D software. The data obtained for each model were processed using registered data analysis software, and comparative evaluations were carried out based on performance indicators such as inter-story drift, shear force, energy dissipation, and demand to capacity ratios. The findings indicate that BRB systems enhance the structure's energy dissipation capacity, reduce plastic deformation demands on structural members, and contribute effectively to improving the seismic performance of the building.

1. GİRİŞ

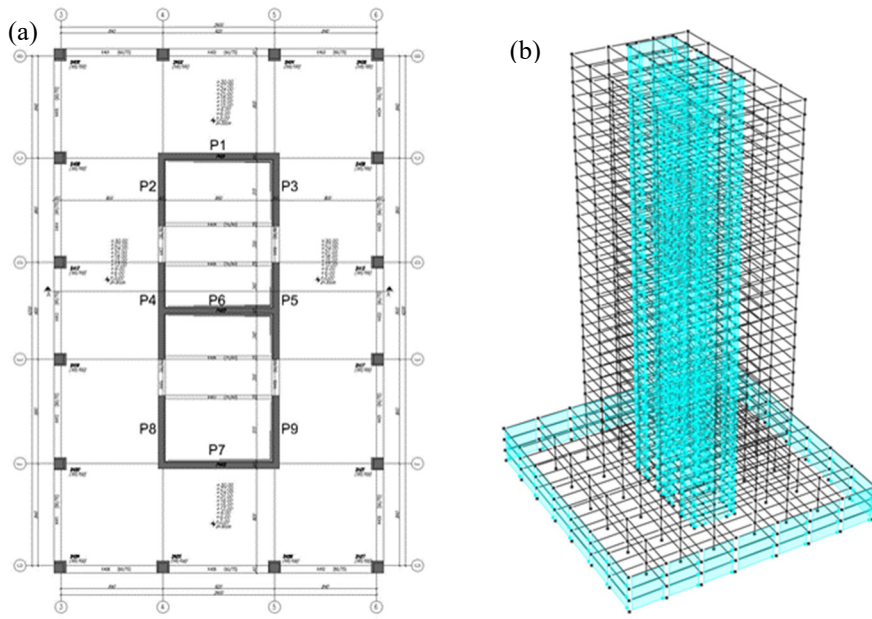
Son yıllarda farklı deprem yönetmelikleri ve taşıyıcı sistem tipleri esas alınarak gerçekleştirilen çalışmalar, betonarme yapıların sismik davranışının ve performans düzeyinin, taşıyıcı sistem seçimine ve yapısal özelliklere güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymuştur [1-4]. Bu doğrultuda, deprem etkilerine maruz kalan yapıların dinamik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla sismik izolasyon [5] ve enerji sönümleme [6-8] gibi etkin yapısal kontrol yöntemleri geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemler hem yeni yapıların sismik performansının artırılmasında hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ) etkinliği kanıtlanmış ve dünya çapında yaygın bir biçimde kullanılan bir sönümleme elemanıdır [9]. İlk olarak 1980'lerde Japonya'da geliştirilen bu sistemler [10], 1994 Northridge depremi sonrası ABD'de yaygınlaşmıştır [11]. BÖÇ elemanlar, geleneksel çaprazlama sistemlerine kıyasla katlar arası ötelenme, taban kesme kuvveti ve maksimum ivme gibi sismik talepleri önemli ölçüde azaltır. Kumar ve arkadaşları [12] çalışmada, BÖÇ sistemlerinin geleneksel çelik çaprazlara kıyasla genel sismik davranım açısından üstün performans sergilediğini ve bu nedenle sismik bölgelerde yer alan modern yüksek katlı yapılarda tercih edilen bir çözüm olduğunu belirtmiştir. Basınç altında burkulmayı önleyen kararlı histeretik davranışları sayesinde, yapısal güvenilirliği artırır ve olası deprem hasarlarını azaltır [12]. Ayrıca, sismik enerjiyi etkili bir şekilde sönümleyerek yatay yer değiştirmeleri ve katlar arası ötelemeleri yönetmelik sınırları içerisinde kontrol altında tutar. Bu sayede, şiddetli depremler sırasında ana taşıyıcı yapı elemanlarında oluşabilecek hasarlar azaltılır [13].

BÖÇ elemanların yüksek katlı betonarme perde duvarlı binalara entegrasyonu, sismik performansı önemli ölçüde artırmaktadır. Örneğin, 43 katlı BÖÇ ile güçlendirilmiş betonarme çekirdekli yüksek bir yapı, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi ile incelenmiş ve bu sayede BÖÇ elemanların büyük depremler altında yatay yer değiştirmeleri ve sismik talepleri etkin bir şekilde kontrol ettiği doğrulanmıştır [13]. 40 katlı betonarme bir bina üzerine yapılan bir çalışmada [14], BÖÇ kullanılan sistemlerde kesme kuvveti taleplerinde yaklaşık %10, eğilme momentlerinde %45 ve şekil değiştirme taleplerinde yine %45 oranında azalma sağlandığını belirtmiştir. Özellikle, maksimum yatay kesme kuvveti ve iç kuvvet taleplerinin yoğunlaştığı katlarda BÖÇ elemanların yerleştirilmesinin sismik performansın artırılmasına fayda sağladığı belirtilmiştir. Sy ve arkadaşları [15] tarafından, 50 katlı bir betonarme binaya, farklı deprem şiddetlerine karşı optimum yapısal tepki elde etmek amacıyla BÖÇ elemanlar entegre edilmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım analizleri sonucunda güçlü yer hareketi koşullarında etkili performans sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca, BÖÇ elemanların sayısının ve yerleşiminin optimize edilmesi amacıyla kullanılan optimizasyon algoritmaları ile yapılan çalışmalar da [16-18] literatürde yer almaktadır. Bunların yanı sıra, BÖÇ elemanlarda akma çekirdeği uzunluğunun, elemanın artık yer değiştirmeleri ve akma sonrası rijitliği üzerinde belirleyici olduğu; daha kısa çekirdek uzunluklarının artırılmış rijitlik ve böylece yatay ötelenmelerin bir miktar daha indirgenmesini sağladığı belirtilmiştir [19]. Bu çalışmalar, BÖÇ sistemlerinin genel etkinliğini, eleman sayısının artırılması, optimizasyon algoritmaları veya farklı taşıyıcı sistem tipleri bağlamında ortaya koymakla birlikte; yüksek bina ölçeğinde, taşıyıcı sistem geometrisi, eleman özellikleri ve deprem girdileri sabit tutularak, yalnızca BÖÇ yerleşim stratejisinin değiştirilmesinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini irdeleyen çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Mevcut literatürde BÖÇ elemanların varlığı ya da sayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler ağırlık kazanırken, yerleşim stratejisinin eleman bazında sismik talep dağılımı, enerji tüketim mekanizmaları ve sünek elemanların zorlanma düzeyleri üzerindeki rolü, bütüncül ve karşılaştırmalı bir çerçevede ele alınmamıştır. Bu bağlamda, BÖÇ yerleşiminin yalnızca global yapı tepkisi değil, aynı zamanda hangi elemanların ne ölçüde enerji tükettiği ve hangi taşıyıcı elemanlarda sismik talep düzeylerinin yeniden dağılımına yol açtığı açısından da sistematik olarak incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek katlı binalarda burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) uygulamasının yapısal performansa etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla, biri referans olmak üzere üç farklı yapı modeli oluşturulmuş (REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M) ve her model, Perform-3D yazılımı [20] kullanılarak, 11 adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı, hem 0° hem de 90° döndürülerek uygulandığı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizine (NLTHA) tabi tutulmuştur. BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modelleri, BÖÇ yerleşim konfigürasyonlarına göre birbirinden ayrılmaktadır. Elde edilen yapısal analiz çıktıları, tescilli bir veri işleme yazılımı [21] aracılığıyla otomatik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, göreceli kat öteleme oranları, kesme kuvveti dağılımları, enerji tüketim yüzdeleri ve talep/kapasite oranları gibi temel performans göstergeleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. YÜKSEK BİNA MODELİ VE BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZ UYGULAMASI

Bu çalışma kapsamında ele alınan yapı, yüksek yapı kriterlerini sağladığından dolayı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'in (TBDY 2018) "Yüksek Binaların Tasarımı"na ilişkin esaslarını içeren Bölüm 13 kapsamında değerlendirilmiş ve ilgili koşullara uygun şekilde tasarlanmıştır. Yapı, 3 bodrum kat, 30 tip kat ve 1 çatı kat olmak üzere toplam 34 kattan oluşmaktadır (Şekil 1). Tüm kat yükseklikleri 3 m olarak belirlenmiştir. Bodrum katlar, dört kenarından 40 cm kalınlığındaki rijit bodrum perdeleri ile çevrelenmiş olup, bu katlarda 30 cm kalınlığında kirişsiz döşeme sistemi uygulanmıştır. Tip katlar ise çevresel kirişli kirişsiz döşeme sistemiyle düzenlenmiş ve döşeme kalınlığı yine 30 cm olarak tasarlanmıştır. Tüm katlarda çevre kirişler 60×75 cm boyutlarında olup yapı boyunca süreklilik arz etmektedir. Kat planı ve taşıyıcı sistem boyutları, yapısal davranışı etkileyebilecek plan düzensizlikleri ve ikincil parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisini en aza indirecek şekilde düzenli ve simetrik olarak seçilmiştir. Bu tercih, çalışmanın temel amacı olan burkulması önlenmiş çaprazların yapısal performans üzerindeki etkilerinin, başka değişkenlerden bağımsız olarak değerlendirilebilmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır.



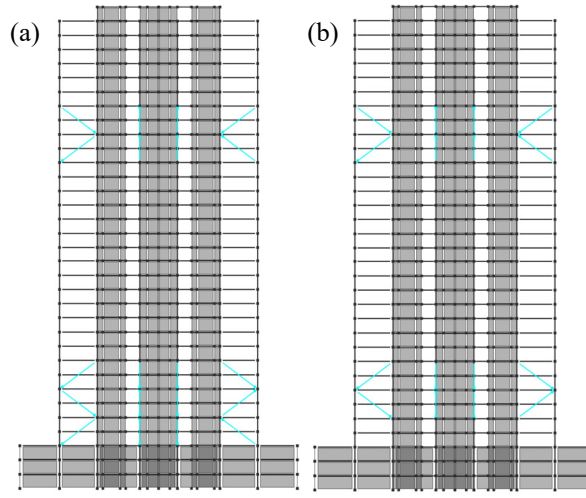
Şekil 1. (a) Tip kat planı (b) yapı modelinin üç boyutlu görünümü

Tip katlar, yapı yüksekliği boyunca her biri 3 m kat yüksekliğine sahip 10'ar katlık üç bölgeye ayrılmış ve bu bölgeler A, B ve C olarak adlandırılmıştır. Kolon boyutları bodrum katlarda, yükselen blok izi dışındaki bölgelerde 80×80 cm, blok izinde ise 120×120 cm'dir. Tip katlar için kolon boyutları A bölgesinde 100×100 cm, B bölgesinde 80×80 cm ve C bölgesinde 70×70 cm olarak belirlenmiştir. Çekirdek perde kalınlıkları, bodrum katlar ve A bölgesinde 60 cm, B bölgesinde 50 cm ve C bölgesinde ise 40 cm'dir. Çekirdek perdeler arasındaki bağ kirişleri, perde kalınlığına eşit genişlikte ve 60 cm yükseklikte düzenlenmiştir.

Yapının taşıyıcı sistemi C60 sınıfı beton ve B420C sınıfı donatı kullanılarak tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan analizler, Perform 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Betonarme elemanlar için doğrusal olmayan "Trilinear sargılı beton modeli" ve "Elastic Perfectly Plastic sargısız beton modeli" tanımlamaları yapılmıştır [22, 23]. Donatı için doğrusal olmayan "Trilinear optimizasyon modeli" kullanılmıştır [24]. Betonarme kolon ve kirişler çubuk eleman olarak modellenmiş, her iki uçlarına eleman boyutu ve donatı özelliklerine göre tanımlanan "Yayıllı Plastik Mafsallı (Fiber)" özellikleri atanmıştır. Perdeler ise doğrusal olmayan perde (inelastic shear wall) elemanlarla modellenmiş; başlık bölgelerinde sargılı beton modeline sahip fiber mafsallar, gövde bölgelerinde ise sargısız beton modeline sahip fiber mafsallar tanımlanmıştır. Döşeme kaplama yükü 2 kN/m², döşeme duvar yükü 2 kN/m² ve döşeme hareketli yükü 2 kN/m² olarak kabul edilmiştir. Döşemeler, Perform 3D modelinden çıkarılmış ve bu elemanlardan gelen tüm düşey yükler ilgili taşıyıcı sistem elemanlarına aktarılmıştır.

Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analizlerde (NLTHA), yapısal elemanların doğrusal olmayan deformasyonları nedeniyle sistem rijitliği her analiz adımında değişmektedir. Bu durum, her bir adımda yapı mod şekillerinin de değişmesine yol açmaktadır. Ancak her bir mod şeklinin tekrar tekrar hesaplanması, çözüm süresini önemli ölçüde artırdığından, doğrusal olmayan analizlerde mod bazlı sönümleme uygulaması pratik değildir [25]. Bu nedenle, analizlerde Rayleigh sönümü tercih edilmiştir. Rayleigh sönümleme yaklaşımında, sönüm oranı; yapının birinci mod periyodunun 0,2 ve 1,5 katı olan iki mod için %2,5 olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda belirlenen kütle orantılı ve rijitlik orantılı sönüm katsayıları ile elde edilen sönüm eğrisi, seçilen periyot aralığında sabit sönüm davranışına yakın bir dağılım göstererek doğrusal olmayan analizler için uygun bir sönümleme karakteristiği sunmuştur.

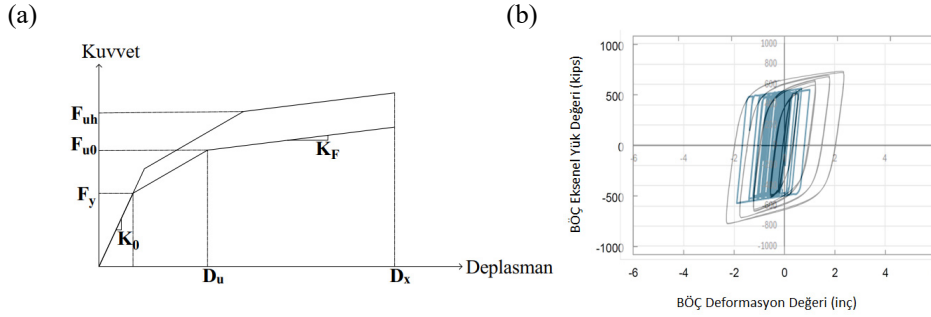
Bu çalışmada, burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) elemanların yapının sismik performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı yerleşim senaryoları geliştirilmiştir. Bu kapsamda, Şekil 1’de sunulan yalın yapı modeli esas alınarak, BÖÇ elemanlarının farklı konumlarda taşıyıcı sisteme entegre edilmesiyle iki yeni model geliştirilmiştir. Bu modeller, yerleştirilen BÖÇ konfigürasyonlarına bağlı olarak sırasıyla BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M olarak isimlendirilmiştir. Şekil 2a-b’de, BÖÇ elemanlarının farklı konfigürasyonlarına sahip bu iki modele ait kesit görünimleri sunulmaktadır.



Şekil 2. (a) BÖÇ1-M ve (b) BÖÇ2-M modelleri kesit görünimleri.

Bu çalışmada kullanılan burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ), Perform-3D yazılımında “İnelastik Bileşen (Inelastic Component)/BRB (Buckling Restrained Brace- Burkulması Önlenmiş Çapraz)” tanımı kullanılarak modellenmiştir. Her bir BÖÇ elemanı, enerji sönümleyici çekirdek çubuğu, bu çubuğu taşıyıcı elemanlara bağlayan elastik bağlantı elemanları ve uç başlıklardan oluşmaktadır. BÖÇ1-M modelinde, çekirdek perdeler ile kolonlar arasına yerleştirilen çapraz elemanlar 4-9 ve 24-27. katlar arasında konumlandırılmıştır. Bu elemanlar için belirlenen çekirdek uzunluğu 3352,8 mm’dir. BÖÇ2-M modelinde ise çaprazlar 6-9 ve 24-27. katlar arasında yer almakta olup, eşit çekirdek uzunluğu kullanılmıştır. Her iki modelde de BÖÇ elemanları için kesit alanı 7741,92 mm² (Core Brace-Specimen1G-12in²) olarak seçilmiştir. BÖÇ’lerin eksenel davranışının ilk çevrimsel yükleme durumu alttaki üçlü doğrusal modelle; tam şekil değiştirme sertleşmesi (full strain hardening) ise üstteki üçlü doğrusal (trilinear) modelle temsil edilmiştir (Şekil 3 (a)). Bu model ile elemanın çevrimsel yükleme altında dayanımının artmasını temsil eden izotropik pekleşme etkisi dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada, akma dayanımı, $F_y=1921,5$ kN olarak belirlenmiş ve bu değer elemanın elastik sınırdaki taşıma kapasitesini temsil etmektedir. İlk çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen dayanım F_{u0} olarak tanımlanmakta olup, bu değer çekme için $F_{u0}=1,04F_y$, basınç için ise $F_{u0}=1,04F_y$ ilişkisi ile ifade edilmektedir. Tam şekil değiştirme sertleşmesinden sonra ulaşılan nihai dayanım F_{uh} ise çekme yönünde $F_{uh}=1,62F_y$, basınç yönünde $F_{uh}=1,71F_y$ şeklinde tanımlanmaktadır. D_u , ilk çevrimsel yükleme dayanımı olan F_{u0} seviyesindeki yer değiştirme değerini ifade etmekte olup, hem çekme hem de basınç yönleri için aynı alınmıştır ($D_u=5,58$ mm). BÖÇ elemanının maksimum yer değiştirmesi ise D_x ile gösterilmekte olup, çekme ve basınç yönlerinde sırasıyla $D_x=0,04L_c$ olarak tanımlanmaktadır. Burada L_c çekirdek elemanın uzunluğunu temsil etmekte ve değeri 3352,8 mm’dir. Modellemede kullanılan idealize üçlü doğrusal histeretik davranış kapsamında, K_0 çekirdek çapraz elemanın elastik bölgede gösterdiği başlangıç rijitliğini ifade eder ve değeri 455,73 kN/mm’dir. Plastik şekil değişimi sonrası rijitlik seviyesini temsil eden üçüncü doğrunun eğimi

$K_f=0,015K_0$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, akma sonrası oluşan elastik olmayan yer değiştirme taleplerine karşılık olarak, F_{u0} ile F_{uh} arasındaki ortalama yer değiştirme değerinin 2,5 katı, F_{uh} noktasındaki yer değiştirme değeri ise 3,0 katı olarak tanımlanmıştır. NLTHA sonuçlarından elde edilen dış BÖÇ elemana ait tipik eksenel kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi de Şekil 3(b)'de sunulmuştur. Modelleme sonucunda elde edilen histeretik döngülerin, deneysel çalışmalarda elde edilen enerji sönümlleme karakteristikleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Burkulması önlenmiş çaprazlar için: (a) üçlü doğrusal eğri (b)eksenel kuvvet-eksenel deplasman ilişkisi grafiği

3. YÖNTEM

Çalışma kapsamında, yüksek binalarda BÖÇ uygulamasının yapısal performansa etkilerini değerlendirmek amacıyla üç farklı yapı modeli Perform-3D yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve REF-M (referans model), BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M olarak isimlendirilmiştir. Bu kapsamda, her bir model için on bir adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı, hem Referans Eksen-1 (0°) doğrultusunda hem de 90° döndürülerek Referans Eksen-2 doğrultusunda uygulanarak toplamda yirmi iki doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi (NLTHA) gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz çıktıları, özel geliştirilmiş ve tescilli (STB P. Kodu 102970) bir veri işleme aracı [21] ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, göreceli kat öteleme oranları, kesme kuvveti dağılımları, enerji tüketim yüzdeleri ve talep/kapasite oranları üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

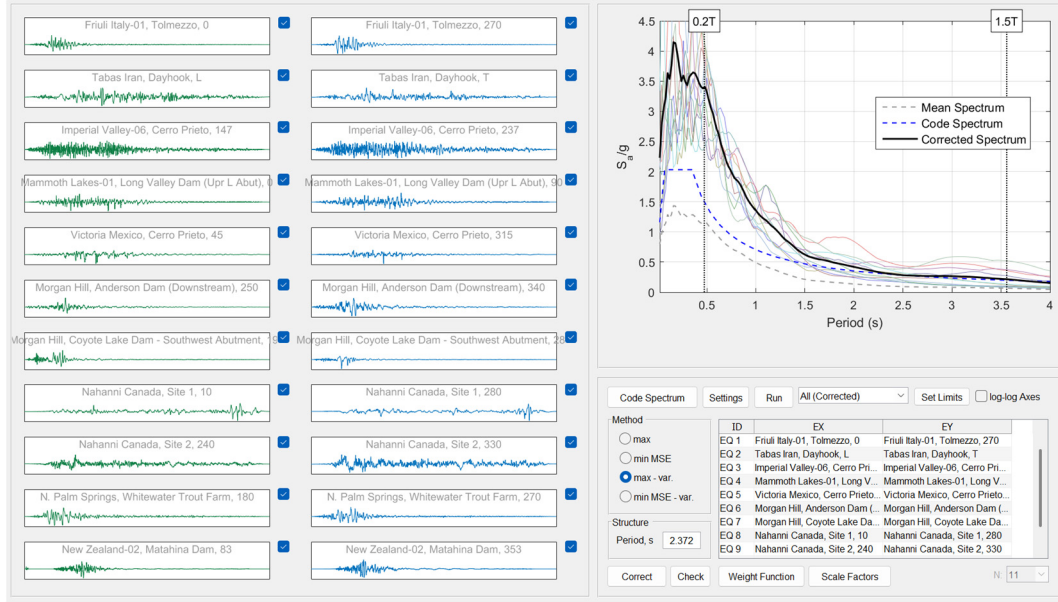
3.1. Deprem Kayıtları

Deprem kayıtları, TBDY 2018'de tanımlanan hedef ivme spektrumuna uygun şekilde Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) NGA-West2 veri tabanından seçilmiştir. ZC zemin sınıfına karşılık gelen kayma dalgası hızı aralığı olan $V_{s30} = 360-760$ m/s dikkate alınarak, moment büyüklüğü (M_w) 6 ile 8 arasında olan ve fay yüzeyine en yakın noktaya olan kısa yatay uzaklığı $R_{jb} < 20$ km olan depremlere ait yer hareketleri tercih edilmiştir. Kayıtlar, analizlerin gerçekleştirildiği bölgeyi temsil etmesi amacıyla $41,096604^\circ$ enlem ve $29,015661^\circ$ boylam koordinatları esas alınarak belirlenmiştir. Seçilen yer hareketlerine ilişkin temel bilgiler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Seçilen yer hareketi kayıtlarına ait özellikler

RSN	Ölçek faktörü	Deprem	Yıl	İstasyon	M_w	Mekanizma	R_{jb} (km)
125	2,8170	"Friuli_ Italy-01"	1976	"Tolmezzo"	6,5	Reverse	14,97
139	4,1612	"Tabas_ Iran"	1978	"Dayhook"	7,35	Reverse	0
164	4,2602	"Imperial Valley-06"	1979	"Cerro Prieto"	6,53	Strike Slip	15,19
231	4,0081	"Mammoth Lakes-01"	1980	"Long Valley Dam (Upr L Abut)"	6,06	Normal Oblique	12,56
265	2,5325	"Victoria_ Mexico"	1980	"Cerro Prieto"	6,33	Strike Slip	13,8
448	2,9008	"Morgan Hill"	1984	"Anderson Dam (Downstream)"	6,19	Strike Slip	3,22
451	1,2884	"Morgan Hill"	1984	"Coyote Lake Dam - Southwest Abutment"	6,19	Strike Slip	0,18
495	2,6824	"Nahanni_ Canada"	1985	"Site 1"	6,76	Reverse	2,48
496	3,6453	"Nahanni_ Canada"	1985	"Site 2"	6,76	Reverse	0
540	2,4839	"N. Palm Springs"	1986	"Whitewater Trout Farm"	6,06	Reverse Oblique	0
587	3,9586	"New Zealand-02"	1987	"Matahina Dam"	6,6	Normal	16,09

TBDY-2018 kapsamında, Çizelge 1’de verilen yer hareketlerinin basit ölçekleme işlemleri de söz konusu tescilli yazılım [21] aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Referans bina hâkim periyodu $T_p = 2,72$ s dikkate alınarak, $0,2T_p$ ile $1,5T_p$ aralığında basit ölçekleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçeklenmiş ivme spektrumları ile bunların ortalama spektrumu ve hedef spektrumla karşılaştırmaları Şekil 4’te sunulmuştur.



Şekil 4. Seçilen yer hareketlerinin basit ölçekleme yöntemine göre ölçeklenmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

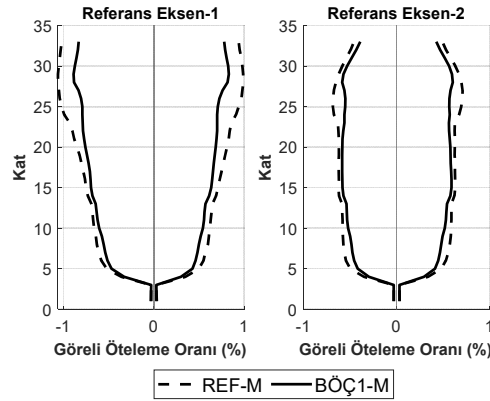
Çalışma kapsamında, I. Aşama’da ön tasarımı tamamlanan ve II. Aşama’da Sınırlı Hasar (SH) performans hedefini sağladığı doğrulanan yüksek bina taşıyıcı sisteminin, DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans hedeflerini sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir. Değerlendirmelerde, TBDY-2018’de yüksek binalar için tanımlanan performans esasları ile betonarme elemanlara ilişkin plastik şekil değiştirme sınırları esas alınmış; sargılı ve sargısız beton için birim şekil değiştirme limitleri ile kiriş ve kolon plastik dönme sınırları belirlenmiştir. BÖÇ elemanlarının akma yerdeğiştirmesine ilişkin limit değerler, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan modelleme yaklaşımı kapsamında tanımlanmış olup, SH performans düzeyi için sıfır kabul edilen plastik talepler yazılımın sayısal gereklilikleri nedeniyle ihmal edilebilir büyüklükte değerlerle temsil edilmiştir. Tüm bu sınır değerler analizde kullanılmak üzere Çizelge 2’de derlenerek sunulmuştur.

Çizelge 2. Performans düzeylerine göre şekil değiştirme limitleri

Eleman/Durum	SH	KH	GÖ
Sargılı beton/Eksenel basınç birim şekil değiştirme	0,001	0,001	0,001
Sargılı beton/Eksenel çekme birim şekil değiştirme	0,0025	0,0129	0,0172
Sargısız beton/Eksenel basınç birim şekil değiştirme	0,001	0,001	0,001
Sargısız beton/Eksenel çekme birim şekil değiştirme	0,001	0,002625	0,0035
Kiriş/Plastik dönme (rad)	0,001	0,009375	0,0125
Kolon/Plastik dönme (rad)	0,001	0,009375	0,0125
BÖÇ/Akma yer değiştirmesi (mm)	0,001	41,15	54,86

Yapılan analizler sonucunda, tüm modeller (REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M) için göreceli kat öteleme oranları, perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı, yapı elemanlarında meydana gelen enerji tüketim değerleri ile uç dönme ve eksenel şekil değiştirmelerine ait Talep/Kapasite (D/C) oranları detaylı biçimde [21] aracılığıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modelleri arasında oluşan yapısal tepki farklılıklarını belirleyebilmek amacıyla, sadece kolon, kiriş ve perde elemanlarına ait ortalama D/C oranları ile eleman bazında enerji tüketim dağılımları karşılaştırılmıştır.

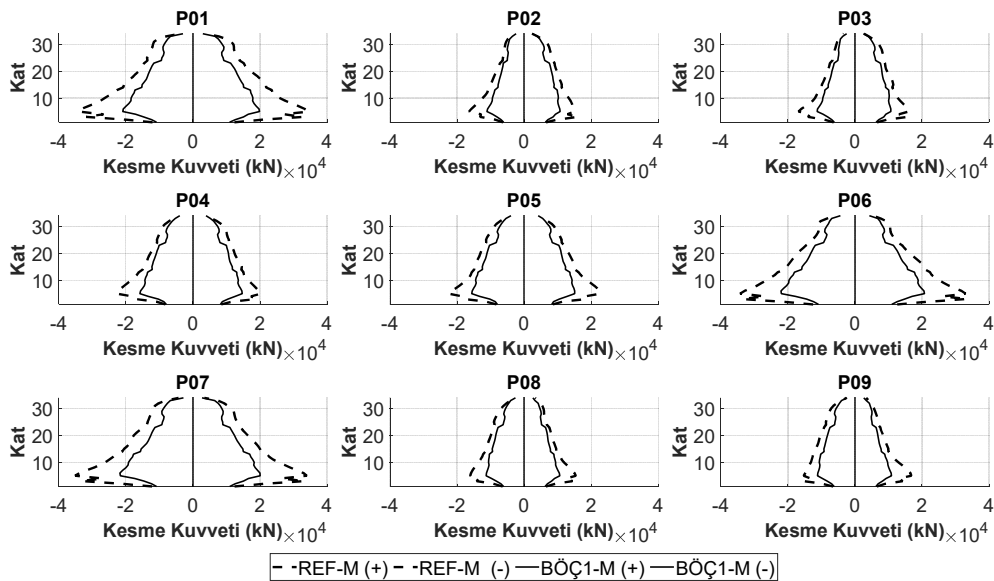
REF-M ve BÖÇ1-M yapı modelleri (Şekil 2) için Referans Eksen-1 ve Referans Eksen-2 NLTHA'dan elde edilen pozitif ve negatif görel kat öteleme oranlarının kat seviyelerine göre dağılımı sunulmuştur.



Şekil 5. REF-M ve BÖÇ1-M yapı modelleri için Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında elde edilen görel kat öteleme oranlarının katlara göre dağılımı

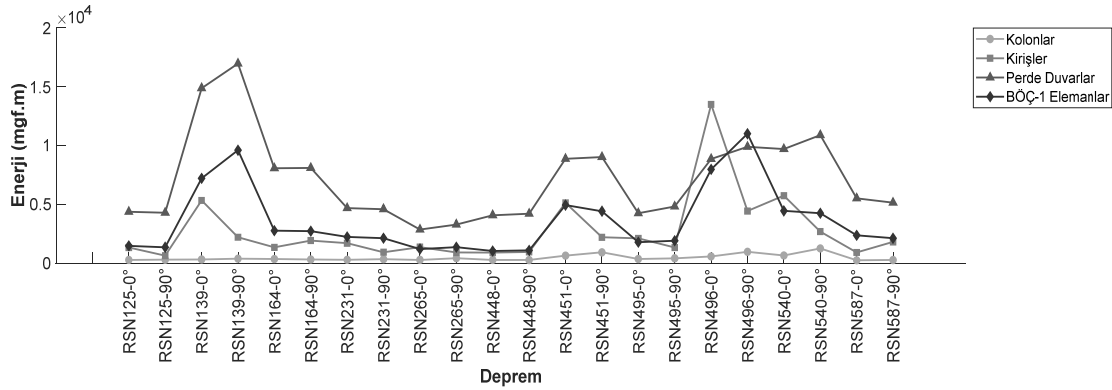
Şekil 5'te sunulan görel kat ötelenmesi sonuçlarına göre, BÖÇ1-M modelinde belirli kat aralıklarında görel kat ötelenmesi taleplerini REF-M modeline göre tüm deprem doğrultuları için önemli ölçüde azaltmıştır. REF-M modeli için her kat için $2 \times 11 = 22$ yer hareketinden elde edilen ortalama görel kat ötelenmesi oranının pik değeri, %3 limit değerinin (TBDY-2018 Bölüm 13) altındadır. Ayrıca, herhangi bir tek kayıttan elde edilen maksimum görel kat ötelenmesi oranı ise %4.5 limitinin altında kalmıştır. REF-M modelinde maksimum görel kat ötelenme oranı yaklaşık %1, BÖÇ1-M modelinde ise yaklaşık %0,83 seviyesinde kalmıştır. Bu, yaklaşık %17 oranında bir görel kat ötelenmesi indirgenmesine karşılık gelmektedir. BÖÇ elemanların yerleştirildiği 4-9. katlar ile 24-27. katlar arasında ötelenme eğrisinde bariz kırılmalar ve ötelenme eğiminin yavaşladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, BÖÇ elemanların yerel rijitlik artışı sağladığını ve bu katlarda görel kat ötelenmesi kontrolü sağladığını göstermektedir. Öte yandan, BÖÇ elemanların bulunmadığı orta kat aralığında (örneğin 10-23. katlar), REF-M ve BÖÇ1-M modelleri arasındaki ötelenme farkı daha azdır. Ancak üst katlarda, ikinci BÖÇ grubu (24-27. katlar) sayesinde görel kat ötelenmesi eğrisi yeniden bastırılmış ve yapının tepe deplasmanı sınırlanmıştır.

Perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında yirmi iki ölçekli deprem kaydı için pozitif ve negatif yönlerdeki ortalama $\pm 1\sigma$ değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. REF-M ve BÖÇ1-M yapı modelleri için, Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı

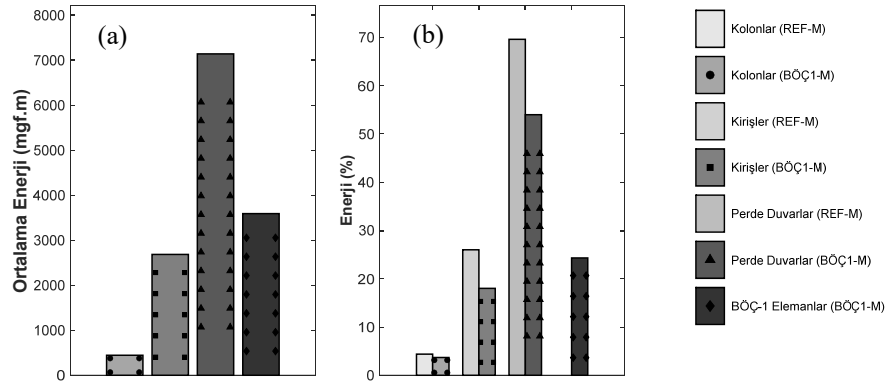
Şekil 6 incelendiğinde, BÖÇ elemanların bulunduğu 4-9. ve 24-27. kat aralıklarında, özellikle bazı perdelerde (örneğin P05, P08, P09), kesme kuvvetlerinde ani bir düşüş gözlenmiştir. Bu da BÖÇ elemanların yatay yük taşıma sistemine aktif katılım sağladığını göstermektedir. REF-M modelinde bu kat aralıklarında, örneğin P05 perde kesme kuvveti 18102 kN'ye kadar ulaşırken, BÖÇ1-M modelinde aynı aralıklarda bu değerler 16995 kN seviyelerine düşmüştür. Bu da yaklaşık %6 oranında bir azalmayı işaret etmektedir. BÖÇ yerleşimi dışında kalan katlarda (özellikle 10-23 arası), iki model arasındaki fark daha sınırlıdır. Bu da BÖÇ elemanların etkisinin yerel olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, BÖÇ elemanlar genel kesme dağılımını da bazı katlarda bir miktar azaltırken bazı katlarda bir miktar artırdığını da göstermektedir.



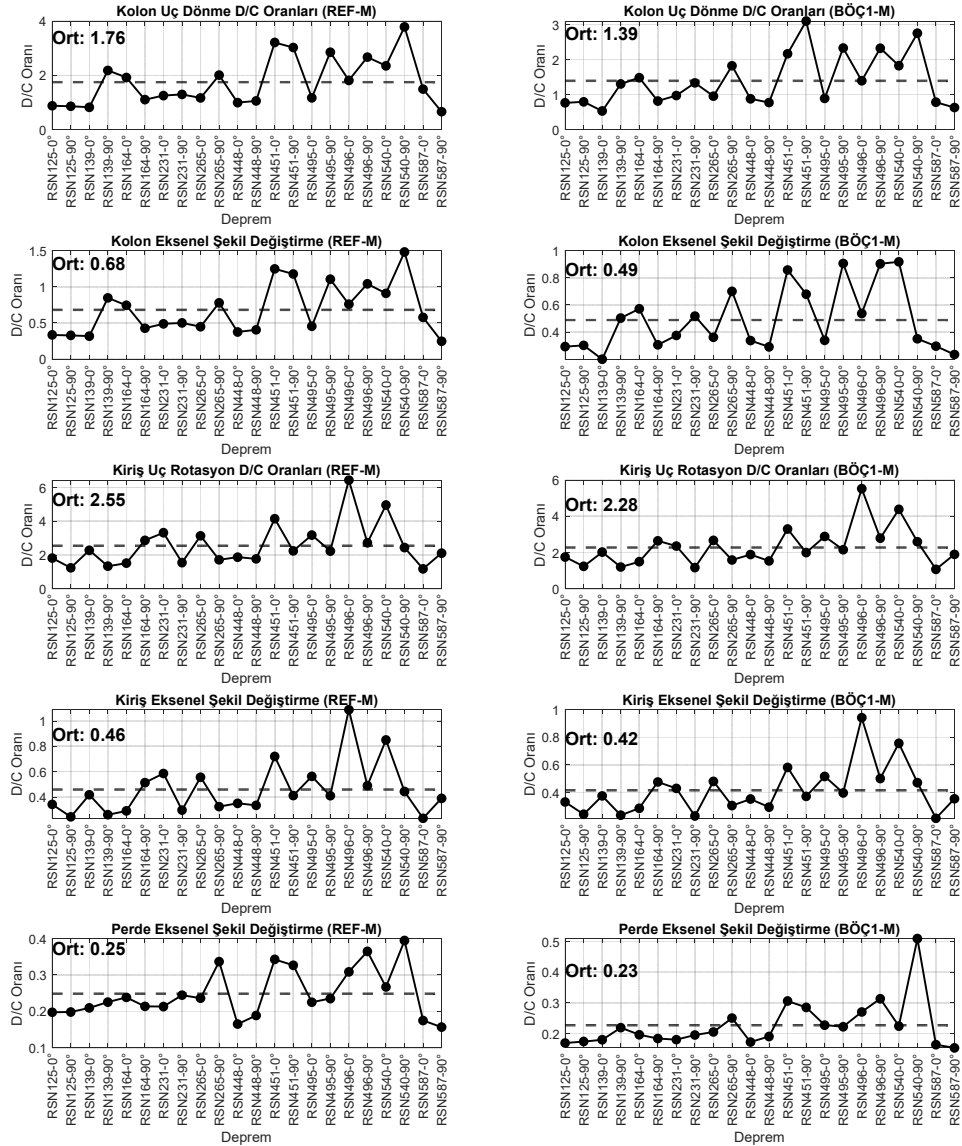
Şekil 7. Deprem kayıtlarının Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) yönlerinde uygulanması sonucunda, yapı elemanlarının enerji tüketim dağılımları

Enerji tüketim dağılımları incelendiğinde (Şekil 7), perde duvarların hemen hemen tüm deprem kayıtları altında en yüksek enerji tüketimini gerçekleştiren başlıca taşıyıcı elemanlar olduğu görülmektedir. Örneğin, pik değer açısından RSN 139 deprem kaydının her iki doğrultusu için perde duvarlar tarafından karşılanan enerjinin 147099,75 kN·m değerini aştığı görülmüştür. Kirişler, perde duvarlara kıyasla daha düşük enerji tüketimi göstermekte olup, genel olarak 51955,25 kN·m seviyelerinde kalmaktadır. Bu durum, plastik şekil değiştirmenin perde duvarlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Kolonlar, diğer eleman türlerine kıyasla daha sınırlı enerji tüketmiştir. Değerler genellikle 24516,63 kN·m düzeyindedir ve bu da kolonların sınırlı plastikleşmeye uğradığını işaret etmektedir. BÖÇ elemanların enerji tüketimi, birçok deprem kaydı altında 9806,65 ile 99235,22 kN·m aralığında gerçekleşmiş ve bu değerler, kolon ve kiriş taşıyıcı sistem elemanlarının oldukça üzerindedir. BÖÇ elemanlarının enerji tüketiminde gösterdiği bu yüksek performans, sistemin sismik enerjisinin önemli bir kısmının bu elemanlar tarafından sünek davranışla sönmüldüğünü ve böylece diğer taşıyıcı sistem elemanlarının daha az plastik deformasyona maruz kaldığını göstermektedir.

Şekil 8 (a)'da, BÖÇ1-M modeline ait kolon, kiriş, perde duvar ve BÖÇ elemanlarının tükettiği toplam plastik enerji miktarını göstermektedir. Şekil 8 (b)'de ise, BÖÇ1-M modelindeki yapısal elemanların enerji tüketim oranlarındaki göreceli değişim yüzdeleri referans modele (REF-M) göre karşılaştırılmıştır. Buna göre, BÖÇ1-M modelinde BÖÇ (burkulması önlenmiş çapraz) elemanları sistemin toplam plastik enerji tüketiminin yaklaşık %24'ünü karşılamaktadır. Ayrıca, REF-M modeline kıyasla BÖÇ1-M modelinde perde duvarların enerji tüketiminde yaklaşık %22 azalma gözlenmiştir. Bu, perde duvarların plastikleşme gereksiniminin büyük ölçüde azaldığını ve yapının rijitliğinin BÖÇ'ler tarafından artırıldığını göstermektedir. Kirişlerin enerji tüketimi ise yaklaşık %31 azalmıştır. Bu durum, yatay yük dağılımının bir kısmının BÖÇ elemanlara aktarılmasıyla kirişlerin sünek davranış gereksiniminin azaldığını ifade etmektedir. Kolonlarda ise enerji tüketimi diğer taşıyıcı elemanlara göre minimum düzeyde, yaklaşık %16 azalma göstermiştir. Bu sonuçlar, BÖÇ elemanların başarılı bir şekilde enerji tüketimini sağlama potansiyelini ve aynı zamanda sistemin diğer elemanlarının plastikleşme düzeylerini düşürerek yapısal hasarı indirgediğini ortaya koymaktadır.



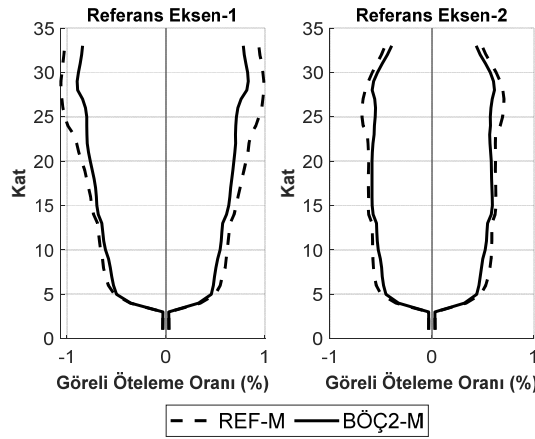
Şekil 8. Yapı elemanlarının enerji tüketim profilleri: (a) Eleman bazında ortalama enerji dağılımı, (b) Enerji yüzdesi



Şekil 9. BÖÇ1-M ve REF-M sistemleri için, Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında uygulanan deprem etkileri altında, kolon, kiriş ve perde elemanlarında oluşan uç dönme ve eksenel şekil değiştirme taleplerine ait D/C (Talep/Kapasite) oranları

BÖÇ1-M ve REF-M sistemlerinin kolon, kiriş ve perde elemanlarında meydana gelen uç dönme ve eksenel şekil değiştirme taleplerine ilişkin Talep/Kapasite (D/C) oranlarının karşılaştırmalı dağılımı ölçekli yirmi iki adet deprem kaydı için Şekil 9’da gösterilmektedir. Her bir grafik, ilgili eleman türü için iki modelde oluşan D/C oranlarını ayrı ayrı sunarak, BÖÇ uygulamasının yapısal talepler üzerindeki etkisini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Buna göre, kolonlar için uç plastik dönme D/C ortalama değeri REF-M için 1,76 iken; BÖÇ1-M için 1,39’dur. BÖÇ elemanların dâhil edilmesiyle kolon uçlarında meydana gelen plastik dönmelerin kapasiteye oranı %21 azalmıştır. Bu azalma, kolonların plastikleşme eğilimlerinin sınırlandırıldığını ve daha kontrollü dönme taleplerine maruz kaldığını göstermektedir. Kolon eksenel şekil değiştirme D/C ortalama değerlerinin BÖÇ elemanı ilave edilmesi ile %28 oranında azalarak 0,68’den 0,49’a düştüğü görülmüştür. BÖÇ1-M modeli REF-M’e göre kiriş uçlarında plastik dönme D/C değeri yaklaşık %11 oranında düşerken; kirişlerdeki eksenel deformasyon D/C değerinde %9 civarında bir azalma gözlenmiştir. Perde duvarlardaki eksenel şekil değiştirme D/C değerinde yaklaşık %8 oranında azalma mevcuttur.

Şekil 10’da REF-M ve BÖÇ2-M modellerinin tüm katları için sunulan görel kat öteleme oranlarının ortalamaları Referans Eksen-1 ve Referans Eksen-2 için sunulmuştur. REF-M ve BÖÇ2-M modelleri için sırasıyla %0,70 ve %0,62 olarak belirlenmiştir. BÖÇ2-M modelinde ortalama öteleme oranı REF-M modeline göre %6,3 oranında bir azalırken; BÖÇ1-M modelinde REF-M modeline kıyasla yaklaşık %7,8 oranında bir azalma sağlanmıştır.



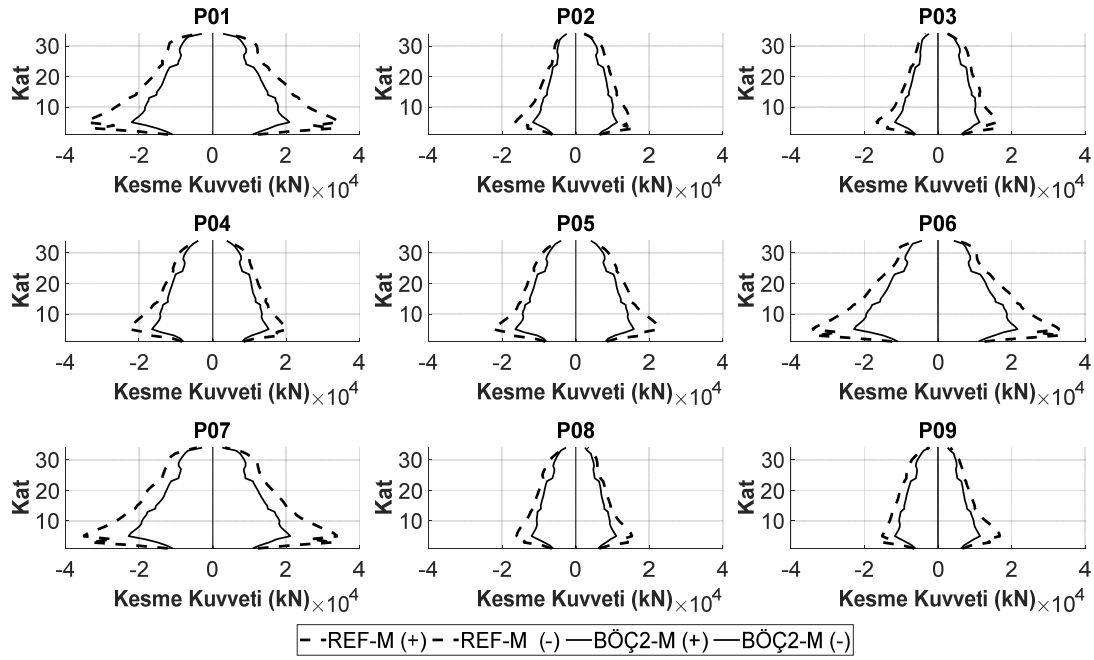
Şekil 10. REF-M ve BÖÇ2-M yapı modelleri için Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında elde edilen görel kat öteleme oranlarının katlara göre dağılımı

Çizelge 3’te REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M yapı modelleri için pozitif maksimum görel kat öteleme oranlarının bazı katlardaki değerleri ve bu değerlere göre BÖÇ bulunan modellerin referans modele göre farkları (REF-M ile BÖÇ1-M; REF-M ile BÖÇ2-M) sunulmuştur. Buna göre, BÖÇ1-M modeli, maksimum görel kat ötelemesi oranı bakımından daha özellikle ilk katlarda daha başarılı sonuçlar üretmiştir. BÖÇ2-M modeli ise üst katlarda ve maksimum öteleme değerleri açısından BÖÇ1-M ile çok yakın performans göstermiştir. Maksimum görel kat ötelemesi oranlarının indirgenmesi açısından, özellikle 25.-30. katlar arasında, her iki model REF-M modeline göre %15-25 arasında iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 3. REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerinin maksimum görel kat ötelemesi oranı yüzde farkları

Kat	REF-M (%)	BÖÇ1-M (%)	BÖÇ2-M (%)	REF-M ile BÖÇ1-M fark (%)	REF-M ile BÖÇ2-M fark (%)
5	0,50	0,43	0,46	14,4	8,10
15	0,71	0,64	0,64	10,4	10,5
25	0,94	0,71	0,71	24,6	24,1
30	0,98	0,82	0,83	16,0	15,7

Şekil 11, REF-M ve BÖÇ2-M yapı modellerine ait perde duvarlarda meydana gelen kat kesme kuvvetlerinin pozitif ve negatif yönlerdeki ortalama $\pm 1\sigma$ değerlerini sunmaktadır. Buna göre, BÖÇ2-M modeli REF-M modeline göre olumlu katkı sağlasa da, kesme kuvvetinin indirgenmesi bakımından BÖÇ1-M modeline göre (Şekil 6) daha düşük etkinlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 11. REF-M ve BÖÇ2-M yapı modelleri için, Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı

REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M yapı modellerinde farklı taşıyıcı eleman türlerine ait toplam enerji tüketim yüzdelerini ve BÖÇ uygulamasının, referans modele göre enerji dağılımında sağladığı değişim oranları Çizelge 4'te özetlenmektedir. BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modelinde BÖÇ elemanları toplam enerjinin sırasıyla %24 ve %21'ini karşılamıştır. Kolonlar için REF-M modelinde %4,40 olan enerji tüketim oranı, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerinde sırasıyla %3,70 ve %3,80'e düşmüştür. Enerji tüketimi kirişler açısından değerlendirildiğinde, REF-M modelinde oldukça yüksek olan %26'lık enerji tüketiminin, BÖÇ elemanlarıyla yaklaşık %18 düşürüldüğü görülmektedir. Her iki modelde de yaklaşık %30'a varan enerji azalması, kirişlerin daha az plastikleştiğini ve yatay yüklerin bir kısmının BÖÇ elemanlar tarafından karşılandığını göstermektedir. REF-M modelinde enerji büyük oranda (%69) perdeler duvarlar ile tüketilmiştir. BÖÇ uygulaması bu oranı BÖÇ1-M modelinde %22 düşürerek %54,0'e, BÖÇ2-M'de ise %18,7 düşürerek %56'ya indirmiştir.

Çizelge 4. REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerinin eleman bazında plastik enerji tüketimi ve karşılaştırılması

Eleman türü	REF-M (%)	BÖÇ1-M (%)	BÖÇ2-M (%)	REF-M ile BÖÇ1-M fark (%)	REF-M ile BÖÇ2-M fark (%)
Kolonlar	4,40	3,70	3,80	15,9	13,6
Kirişler	26,0	18,0	18,4	30,8	29,2
Perde duvarlar	69,6	54,0	56,6	22,4	18,7
BÖÇ	0,00	24,3	21,2	24,3	21,2

Çizelge 5, REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerine ait Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında uygulanan yirmi iki adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı altında, kolon, kiriş ve perde elemanlarında meydana gelen plastik dönme ve eksenel şekil değiştirme taleplerine ilişkin ortalama D/C oranlarını sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, her iki BÖÇ modelinin performansı REF-M modeli ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, kolon uç dönme talepleri BÖÇ1-M modelinde %21, BÖÇ2-M modelinde ise %18,2 oranında azalmıştır. Kolon eksenel şekil değiştirme taleplerinde her iki modelde de REF-M modeline kıyasla %27,9 oranında azalma elde edilmiştir. Kiriş uç dönme talepleri, BÖÇ1-M modelinde %10,6; BÖÇ2-M modelinde ise %10,2 oranında azaltılmıştır. Kiriş eksenel şekil değiştirme talepleri her iki modelde de REF-M modeline göre %8,7 oranında düşürülmüştür. Benzer şekilde, perde eksenel şekil değiştirme taleplerinde her iki BÖÇ modelinde %8 oranında azalma sağlanmıştır.

Çizelge 5. REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerine ait ortalama D/C oranları ve REF-M modeline göre yüzde azalma oranları

Eleman tipi/ Davranış	REF-M	BÖÇ1-M	REF-M ile BÖÇ1-M fark (%)	BÖÇ2-M	REF-M ile BÖÇ2-M fark (%)
Kolon/Plastik Dönme	1,76	1,39	21	1,44	18,2
Kolon/Eksenel Şekildeğiştirme	0,68	0,49	27,9	0,49	27,9
Kiriş/Plastik Dönme	2,55	2,28	10,6	2,29	10,2
Kiriş/Eksenel Şekildeğiştirme	0,46	0,42	8,7	0,42	8,7
Perde Eksenel Şekildeğiştirme	0,25	0,23	8	0,23	8

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki farklı BÖÇ (Burkulması Önlenmiş Çapraz) konfigürasyonlarının yüksek binalarda deprem etkisi altındaki sismik performansa olan katkısı kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. NLTHA sonuçları, göreceli kat ötelemesi, D/C (talep/kapasite) oranları, kat kesme kuvveti dağılımları ve enerji tüketim yüzdeleri bakımından incelenmiştir. Buna göre;

- BÖÇ uygulaması, tüm katlarda göreceli öteleme oranlarını azaltarak yapısal deplasman taleplerini sınırlamıştır. Özellikle 25. ile 30. kat aralığında elde edilen %15-25'lik azalmalar, BÖÇ sistemlerinin üst katlardaki yatay deplasman kontrolünde etkili olduğunu ortaya koymuştur. BÖÇ içeren her iki model benzer genel eğilimler sergilese de, BÖÇ1-M modelinde özellikle alt katlardaki göreceli öteleme taleplerinin biraz daha etkin şekilde sınırlandığı görülmüştür.
- BÖÇ sistemlerinin taşıyıcı sisteme dâhil edilmesiyle, tüm eleman türlerinde talep/kapasite oranlarında düşüş gözlemlenmiştir. En yüksek oransal azalma kolon eksenel deformasyonlarında (%28), ardından kolon uç dönmelerinde (%18-21) ve perde eksenel deformasyonlarında (%8) meydana gelmiştir. BÖÇ1-M modeli, kolon uç dönmelerinde BÖÇ2-M modeline göre daha yüksek azalma sağlamıştır. Her iki konfigürasyon da yapısal talepleri azaltarak deprem performansının iyileştirilmesine önemli katkı sağlamıştır.
- Bu sonuçlar, BÖÇ elemanlarının yapının enerji tüketiminden bir pay üstlenerek sünek elemanlar üzerindeki plastik şekil değiştirme taleplerini azalttığını göstermektedir. Ayrıca, BÖÇ elemanlarının çerçeve sistemdeki giriş ve kolonların hem dönme hem de eksenel taleplerini azaltarak daha dengeli bir deformasyon dağılımı sağladığı söylenebilir.
- Kesme kuvvetleri dağılımı açısından, BÖÇ1-M modeli kesme kuvvetlerinin indirgenmesi bakımından daha etkin bir performans sergilemiş; perde elemanlarının deprem taleplerini sınırlamada BÖÇ2-M modeline kıyasla daha verimli bir çözüm ortaya koymuştur.
- Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, BÖÇ uygulamasının perdeler ve girişler arasında daha dengeli bir enerji dağılımı sağladığı ve bu elemanlardaki plastikleşme taleplerini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. BÖÇ içeren modellerde toplam enerjinin yaklaşık dörtte biri bu elemanlar tarafından tüketilmiştir. Bu durum, BÖÇ elemanı içeren her iki modelin yatay yük aktarımı üzerindeki etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.
- Tüm bu bulgular, BÖÇ sistemlerinin yapının enerji sönümleme kapasitesini artırarak taşıyıcı elemanlardaki plastik talepleri azalttığını ve yapının sismik performansını artırmada başarı sağladığını göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmed, A.A., Öztürk, H. ve Aslan, T.A. (2025). Farklı kat yüksekliklerindeki binaların TBDY-2018 ve Eurocode-8'e göre karşılaştırmalı analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(2), 265-272.
- Nomanoğlu, Y.Z., Aslan, T.A. ve Temel, B. (2024). Farklı özelliklere sahip çok katlı binalarda deprem düzensizliklerinin irdelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 647-666.
- Ünsal, İ. ve Şahan, M.F. (2022). Bodrum katlarda rijit bodrum perde tasarımının yapı davranışı üzerindeki etkisi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 305-307.

4. Ünsal, İ., Balca, N. ve Şahan, M.F. (2022). Orta yükseklikteki binalar için TBDY 2018 yönetmeliğinde verilen taşıyıcı sistem tiplerinin doğrusal analiz yöntemi ile karşılaştırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 431-446.
5. Xu, G., Guo, T., Ni, X.Y., Zhi, G.L., Zhang, H.Y. & Dang, L.J. (2024). Breakthroughs in seismic isolation technologies for engineering structures. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2650062.
6. Symans, M.D. & Constantinou, M.C. (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21(6), 469-487.
7. Saaed, T.E., Nikolakopoulos, G., Papadopoulos, E. & Tzes, A. (2015). A review of the state of the art in structural control. *Journal of Vibration and Control*, 21(5), 919-937.
8. Javidan, M., Assefa, J.D. & Kim, J. (2023). Seismic retrofit of low-rise structures using rotational viscoelastic dampers. *Structures*, 58, 105403.
9. Li, T., Shu, S., Atasever, K., Dai, K., Çelik, O.C. & Tang, X. (2025). Seismic performance and fragility assessment of BRBFs subjected to earthquake main shock-aftershock sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 199, 109672.
10. Mochizuki, N., Murata, Y., Andou, N. & Takahashi, S. (1980). Studies on steel braces with hysteretic damper (in Japanese). *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Kinki Area*, 3, 1913-1914.
11. Rezazadeh, F. & Talatahari, S. (2020). Seismic energy-based design of BRB frames using multi-objective vibrating particles system optimization. *Structures*, 24, 227-239.
12. Kumar, N.K., Kumuda, V., Sunny, K. & Pravin, G. (2021). Comparative study of conventional steel braces and buckling restrained braces in a high-rise RC building. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 9(7), 3363-3370.
13. Zhai, Z., Liu, Y., Mercan, O., Zou, S. & Zhou, F. (2024). A hybrid buckling-restrained brace for enhancing the seismic performance of steel moment resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, 108464.
14. Binzet, R., Tüzün, C. & Erdik, M. (2014). Buckling-restrained braced frames for cost-effective retrofit: A case study. *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES)*, İstanbul, Türkiye.
15. Ahmed, M., Tayyaba, S. & Ashraf, M.W. (2016). Effect of buckling restrained braces locations on seismic responses of high-rise RC core wall buildings. *Shock and Vibration*, 2016(1), 6808137.
16. Sy, J.A., Anwar, N., Aung, T.H. & Rayamajhi, D. (2014). Application of buckling restrained braces in a 50-storey building. *International Journal of High-Rise Buildings*, 3(1), 81-87.
17. Kaveh, A., Mahdipour Moghanni, R. & Javadi, S.M. (2021). Optimal design of 3D special steel buckling-restrained braced structures. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 30(17), e1893.
18. Hoseini, S.M., Parastesh, H., Hajirasouliha, I. & Ferdowsi, A. (2021). Structural design optimization of all-steel buckling-restrained braces using intelligent optimizers. *International Journal of Steel Structures*, 21(6), 2055-2070.
19. Tunca, O. (2022). Design of buckling restrained steel braces using application programming interface between simulation and discrete optimization. *Structures*, 43, 752-766.
20. Meshaly, M.E. & Abou-Elfath, H. (2022). Seismic response of RC frames equipped with buckling-restrained braces having different yielding lengths. *AIMS Materials Science*, 9(3), 359-381.
21. Computers and Structures, Inc. (2006). *PERFORM-3D: Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures-User guide*. Version 4. Walnut Creek, CA.
22. T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (t.y.). *Yapı analiz süreçlerine yönelik yüksek performanslı veri işleme ve rapor görselleştirme sistemi (Faz-1) [Bilgisayar yazılımı]*. STB P. Kodu 102970.
23. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
24. Kent, D.C. & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division*, 97(7), 1969-1990.
25. Park, R. & Paulay, T. (1991). *Reinforced concrete structures* (Cilt 1). John Wiley & Sons, New York, 769.
26. Powell, G.H. (2006). Nonlinear dynamic analysis capabilities and limitations. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 15(5), 547-552.

