

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanmış Çelik Binada Kalıcı Ötelemeleri İçeren Performans Değerlendirmesi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 10.11.2023

Kabul/Accepted: 12.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Performance Evaluation Including Residual Drifts on a Steel Building Designed Building Earthquake Code of Türkiye

Kaan TÜRKER^{1*}, Aykut SAYILIR²

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

²Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Depremlerden sonraki gözlemler ve sayısal/deneysel çalışmalar, yapılarda deprem sonrası oluşan kalıcı yanal ötelemelerin belirli sınırları aşması durumunda, yapının kullanılabilir hale gelerek toptan kaybına sebep olabileceğini göstermiştir. Bu bağlamda, ekonomik kayıpları azaltmak için kalıcı yanal ötelemelerin de performans değerlendirmelerinde gözönüne alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY) göre tasarlanmış çelik bir bina için, yönetmelikte yer alan temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler bakımından yeterlilikleri değerlendirilmiştir. İncelenen bina dört katlı ve taşıyıcı sistemi kenar akslara yerleştirilen bir doğrultuda Moment Aktaran Çerçeve (MAÇ)'ler, diğer asal doğrultuda Merkezi Çaprazlı Çerçeve (MÇÇ)'lerden oluşmaktadır. Bina, tasarım depremi düzeyini ve maksimum deprem düzeyini temsil eden iki grup deprem yer hareketi için çift doğrultulu doğrusal olmayan dinamik analiz ile incelenmiştir. Bina tasarım deprem düzeyi için TBDY'de öngörülen performans hedeflerini sağlamıştır. MAÇ sistemindeki performans değerlendirmeleri çok düşük düzeyde hasara işaret etmesine rağmen, kalıcı ötelemeler binanın deprem sonrası kullanılamaz hale gelme potansiyeli bulunduğunu göstermiştir. MÇÇ sistemindeki performans değerlendirmeleri ise daha büyük hasar düzeylerini işaret etmiş, ancak kalıcı öteleme davranışı bakımından çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Elde edilen kalıcı öteleme sonuçlarında narin çaprazların burkulma sonrası çevrimsel davranışı etkili olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çelik bina; Moment aktaran çerçeve; Merkezi çaprazlı çerçeve; Deprem performansı; Kalıcı yanal öteleme.

Abstract

Post-earthquake observations and numerical/experimental studies show that if the residual drifts in buildings exceed certain limits, buildings may become unusable and cause total loss of building. In this context, residual drifts should also be included in performance evaluations to reduce economic losses. In this study, on a steel building designed to Building Earthquake Code of Türkiye (BECT), the adequacy of the basic performance levels included in BECT was evaluated in terms of residual drifts. Investigated building is four-story and its structural system consists of Moment Resisting Frames (MRF) and Concentrically Braced Frames (CBF) located around the perimeter of the building. The building was investigated by bi-directional nonlinear dynamic analysis for two ground motions set representing the design level earthquake and the maximum earthquake level. The building has achieved the performance level stipulated in the BECT for the design level earthquake. Although the performance evaluations of the MRF system indicated very low levels of damage (limited damage), the residual drifts of MRF system shown that the building had the potential to become unusable after the earthquake. The performance evaluations in the CBF system indicated greater damage levels compared to the MRF system, but gave much better results in terms of residual drifts. The post-buckling cyclic behavior of slender braces was effective in the residual drift results.

Keywords: Steel building; Moment resisting frame; Concentrically braced frame; Seismic performance; Residual drift.

1. Giriş

Günümüz deprem yönetmeliklerinde, ekonomik sebeplerle deprem etkisi altında genellikle sünek davranış öngörülerek tasarım yapılmakta, bu da deprem sonrası yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda önemli ölçüde hasarın göze alınması anlamına gelmektedir. Özel amaçlı binalar dışında konut, işyeri gibi yaygın kullanılan bina türlerinde temel hedef, tasarım depremi altında can güvenliğinin sağlanması ve deprem sonrası hasarın onarılabilir düzeyde tutulmasıdır. Tasarım depreminden

daha büyük depremlerde ise binanın kısmen veya tamamen göçmesinin engellenmesi hedeflenmektedir. Geleneksel dayanım esaslı tasarım yaklaşımlarında bu hedefler tasarımda uygulanan çeşitli kontroller (kapasite tasarımı vb.) ve sınırlamalar (öteleme oranı vb.) ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Son dönemde deprem kodlarında geniş yer alan performans dayalı yaklaşımların kullanılması durumunda ise performans hedefleri daha detaylı tanımlanmakta ve deprem sonrası oluşması beklenen hasar düzeyleri ileri yöntemler ile

kontrol edilmektedir (SEOAC 1995, ATC 1996, FEMA 1997, ASCE 2017, AFAD 2018). Bu yaklaşımların tasarımda veya değerlendirmede kullanılması sayesinde, eleman (kolon, kiriş vb.) ölçeğindeki kalıcı deformasyonlar (plastik dönme, kısalma vb.) belirli güvenlikle kontrol altında tutulabilmekte ve yapılarda kısmi veya toptan göçme durumlarının oluşması önlenmektedir. Bununla birlikte, depremlerden sonraki gözlemler ve sayısal/deneysel çalışmalar, yapılarda deprem sonrası oluşan kalıcı yanal ötelemelerin belirli sınırları aşması durumunda, yapının kullanılmaz hale gelerek toptan kaybına ve dolayısıyla büyük ekonomik kayıplara sebep olabildiğini göstermiştir. (Comartin et al. 1995, Eguchi et al. 1998, Pampanin et al. 2003, Wu et al. 2004, McCormick et al. 2008, Christopoulos and Pampanin 2004, Anderson and Fillipou 1995, Ramirez and Miranda 2012). İlgili çalışmalarda; deprem sonrası binanın onarılabilirliği ve dolayısıyla kullanılabilirliği için önemli bir gösterge olan kalıcı yanal öteleme kriterinin de performans değerlendirmelerinde kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Performansa dayalı yaklaşımlar ile ilgili SEOAC (1995) tarafından hazırlanan ilk dokümanda, "Can Güvenliği" olarak tanımlanan performans düzeyi için kalıcı öteleme oranının %0.5 ile sınırlandırılması öngörülmüştür. Ancak kalıcı ötelemeler hesaplarının ileri analizler gerektirmesi ve bu konudaki araçların yetersizliği nedeniyle daha sonra hazırlanan standartlarda, kalıcı ötelemeler ile ilgili herhangi bir kriter ve kontrole yer verilmemiştir. Bugün için sadece, ABD'de yüksek binaların performans esaslı tasarımı için hazırlanan bir kılavuzda (PEER 2017) kalıcı öteleme ile ilgili kriterler yer almaktadır. Bu kılavuza göre, binanın bulunduğu bölgedeki maksimum deprem düzeyi için yeterli sayıda doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilecek maksimum kalıcı öteleme oranı %1.5, ortalama kalıcı öteleme oranı ise %1 ile sınırlandırılmıştır.

McCormick vd. (2008) tarafından, binalarda izin verilebilir kalıcı deformasyon (yanal ve düşey) sınırlarını tespit etmek amacıyla bina fonksiyonelliği, yapım hatası toleransları ve güvenlik olmak üzere üç kategoride geniş kapsamlı bir değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonellik kapsamında, kalıcı deformasyonların ikamet edenler üzerinde yaratacağı fiziksel ve psikolojik etkilerin de gözönüne alındığı çalışmada, kabul edilebilir kalıcı yanal öteleme kriteri olarak maksimum % 0,5'lik sınır önerilmiştir. Ayrıca, bu sınırın onarım maliyetleri nedeniyle yapının ekonomik olarak tamamen kaybı için referans alınabileceği belirtilmiştir.

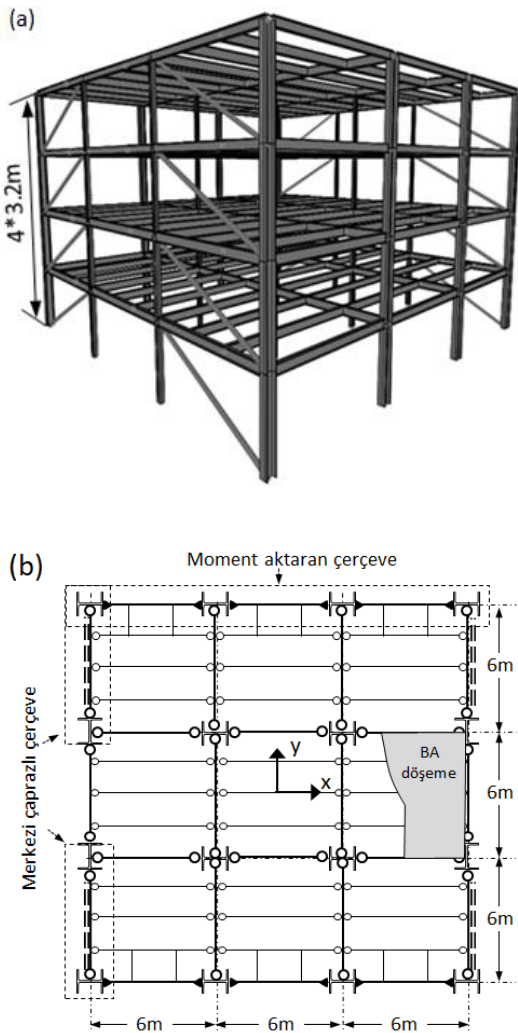
Tek serbestlik dereceli sistemler ve çok serbestlik dereceli bina modelleri için yapılan çalışmalar, yapısal elemanların deprem etkisi altındaki çevrimsel (tersinir tekrarlı)

davranışının, akma sonrası rijitliğinin, II. mertebe etkilerinin, deprem karakteristiğinin ve faya olan uzaklığın kalıcı ötelemeler üzerinde etkili olduğunu göstermiştir (Christopoulos et al. 2003, Pampanin et al. 2003, Ruiz-Garcia and Miranda 2006a, Ruiz-Garcia and Miranda 2006b). Söz konusu çalışmalarda çevrimsel davranıştaki rijitlik azalmalarının dolayısıyla sönmülenen enerjinin diğer parametrelere göre çok daha etkili olduğu belirlenmiştir. Buna göre rijitlik azalması oluşmayan yani çevrimsel sönmü yüksek olan elemanlarda, rijitlik azalması bulunanlara göre daha fazla kalıcı öteleme oluştuğu rapor edilmiştir.

Çelik taşıyıcı sistemlerde kullanılan kolon, kiriş, bağ kirişi, burkulması önlenmiş veya çok düşük narinlikli çapraz elemanlar, genel olarak deprem etkisi altında önemli bir rijitlik azalması oluşmadan elasto-plastik davranış göstermeleri nedeniyle kalıcı öteleme potansiyeli yüksek elemanlardır. Özellikle moment aktaran çerçeve ve burkulması önlenmiş çaprazlı çerçeve sistemler üzerinde yapılan bazı çalışmalarda, tasarım depremi altında oluşan kalıcı ötelemelerin McCormick vd. (2008) tarafından önerilen 0.005'lik sınırı aşabildiği görülmektedir (Pettinga et al. 2007, Erochko et al. 2011, Asgarkhani et al. 2020). Ayrıca çeşitli çalışmalarda, ana deprem yer hareketi sonrasında oluşan artçı şokların da kalıcı yanal ötelemeleri önemli ölçüde artırdığı rapor edilmektedir (Basim et al. 2022, Narayan et al. 2023). Bu bağlamda özellikle burkulması önlenmiş çelik çaprazlı sistemlerde ve moment aktaran çelik çerçeve sistemlerde oluşması beklenen kalıcı deformasyonları azaltmak amacıyla büyük deformasyonlarda elastik kalarak kendi kendini merkezleyen (self centering) çeşitli uygulamalara (ön/ard germeli çapraz/kolon-kiriş birleşimi vb.) ihtiyaç duyulmaktadır (Garlock et al. 2005, Kim and Christopoulos 2008, Tremblay et al. 2008, Hu et al. 2020, Kamaris et al. 2022). Buna karşılık, yüksek narinlikli elemanların kullanıldığı merkezi çaprazlı çerçeve sistemler ise özellikle basınç altında burkulma sonrası önemli rijitlik kayıplarına uğradıkları için kalıcı ötelemeler bakımından avantajlı olabilecek sistemlerdir. Daha önce yönetmeliklerde kullanımına izin verilmeyen bu tür yüksek narinlikli çaprazlar, mevcut yönetmeliklerde özel birleşim detaylarının uygulanması koşuluyla sünelik düzeyi yüksek sistemler olarak kullanılabilir (AISC 2010, AFAD 2018).

Kalıcı yanal ötelemelerin deprem sonrası ekonomik kayıplara olan etkisi gözönünde bulundurulduğunda, mevcut yönetmeliklerdeki temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler ile birlikte farklı taşıyıcı sistem tipleri ve boyutları için değerlendirmesi gerektiği görülmektedir. Bu çalışmada, 2018 Türkiye Bina Deprem

Yönetmeliğine (TBDY) göre tasarlanmış çelik bir binanın tasarım depremi ve maksimum deprem düzeyi için performans seviyeleri ve kalıcı yanal ötelemeleri belirlenerek, yönetmelikte yer alan temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler bakımından yeterlilikleri değerlendirilmiştir. Çelik binanın taşıyıcı sistemi için bir doğrultuda Moment Aktaran Çerçeve (MAÇ) sistem, diğer asal doğrultuda narin çaprazlar içeren Merkezi Çaprazlı Çerçeve (MÇÇ) sistem kullanılmış, böylece kalıcı yanal öteleme davranışları farklı olan iki sistem birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca MÇÇ sistemdeki çapraz elemanlarda, narinlikle ilişkili olan burkulma sonrası çevrimsel davranışın kalıcı ötelemeler üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Bina taşıyıcı sistemine ait (a) üç boyutlu görünüm, (b) tipik kat planı

2. Materyal ve Metot / Materials and Methods

2.1 Bina özellikleri ve tasarımı

İncelenen binanın taşıyıcı sistem geometrik özellikleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bina taşıyıcı sistemi iki dış aksa yerleştirilen Moment Aktaran Çerçeve (MAÇ) sistem ve diğer doğrultuda iki dış aksa yerleştirilen Merkezi Çaprazlı

(diyagonal tip) Çerçeve (MÇÇ) sistem ve iç akslarda sadece düşey yük taşıyacak şekilde mafsallı kolon-kiriş bağlantıları ile oluşturulan çerçevelerden oluşmaktadır. Eğilme momentine maruz kirişlerde yanal burkulmayı önlemek amacıyla döşeme kirişlerine bağlanan yeterli sayıda destek elemanları oluşturulmuştur. Merdiven vb. boşluklar ihmal edilmiştir. Dolgu duvarların taşıyıcı elemanlar ile izolasyon yoluyla ayrıldığı kabul edilmiş ve yanal ötelenme kriteri buna göre belirlenmiştir. Betonarme döşemenin kiriş kapasitelerine katkısı ihmal edilmiş, rijit diyafram etkisini tam olarak sağladığı kabul edilmiştir. Binanın tasarımı Çelik Yapılar Yönetmeliği ve TBDY'ye göre yapılmıştır (ÇŞİ 2016, AFAD 2018). Döşemelerde çatı katı için 3.5kN/m²'lik, diğer katlar için 3.1 kN/m²'lik sabit yük, tüm katlarda 2.1kN/m²'lik hareketli yük ve dış kirişlerde 3.0 kN/m²'lik duvar yükü esas alınmıştır. Bina kullanım amacı konut, zemin sınıfı ZB, zemin karakteristik periyotları TA=0.10, TB=0.30, kısa periyot spektral ivme katsayısı SDS=1.0 olarak gözönüne alınmıştır. Tüm elemanlar için S275 sınıfı çelik kullanılmıştır. Moment aktaran çerçeveler ve merkezi çaprazlı çerçeveler süneklik düzeyi yüksek sistem olarak tasarlanmıştır. Tasarım modelinde, eğilme elemanlarında rijit uç bölgeleri gözönüne alınmıştır.

Çaprazlar, emniyetli tarafta kalmak amacıyla iki ucu mafsallı ve düğüm noktaları arasında tanımlanan etkin burkulma boyu ile tasarlanmıştır. Deprem etkileri Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY) ile belirlenmiştir (AFAD 2018). Binaların analiz ve tasarımında SAP2000 yapısal analiz programından yararlanılmıştır (CSI, 2008). Binanın her iki doğrultudaki modal özellikleri ve elde edilen tasarım taban kesme kuvvetleri Çizelge 1'de verilmiştir. TBDY'de yeni getirilen periyot üst sınır koşulu MAÇ sistemin periyodunu sınırlamış, bu nedenle taban kesme kuvvetlerini önemli ölçüde artırmıştır (Çizelge 1) (AFAD 2018). Tasarım sonucunda MAÇ ve MÇÇ için elde edilen eleman boyutları Şekil 2'de verilmiştir. Sadece düşey yük etkisindeki iç aks kolonları için HE220B, mafsallı kirişler için IPE360 profilleri kullanılmıştır. Beklendiği gibi MAÇ elemanlarının tasarımında görece öteleme oranı, MÇÇ sistem çaprazlarında talep/kapasite oranları belirleyici olmuştur.

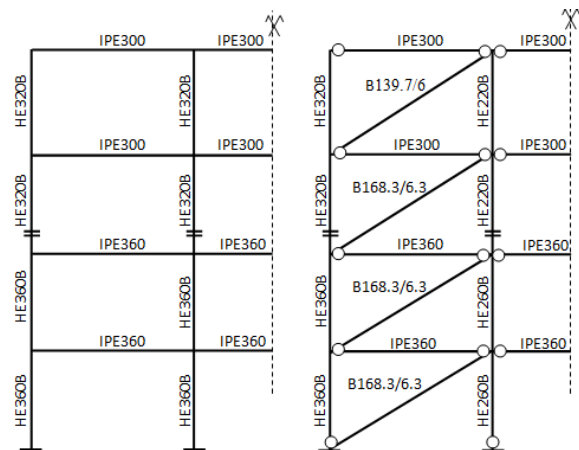
Çizelge 1. Bina modal özellikleri ve taban kesme kuvvetleri

Parametre	Taşıyıcı sistem (deprem doğ.)	
	MAÇ (x doğ)	MÇÇ (y doğ)
Periyot (T_1) (s)	1.142	0.478
Periyot üst sınırı (TBDY)		0.758
1. Mod kütle kat. Oranı (%)	77.4	85.7
Elastik spek. ivme (S_{ae}) (g)	0.491	0.799
Taban kesme kuv. (V_t) (kN)	390	1015
Bina deprem ağırlığı (kN)		6352

Tüm elemanlarda süneklik düzeyi yüksek enkesit narinlikleri (kompakt kesitler) sağlanmış, böylece lokal stabilite sorunları engellenmiştir (AFAD 2018).

2.2 Doğrusal olmayan dinamik analiz özellikleri

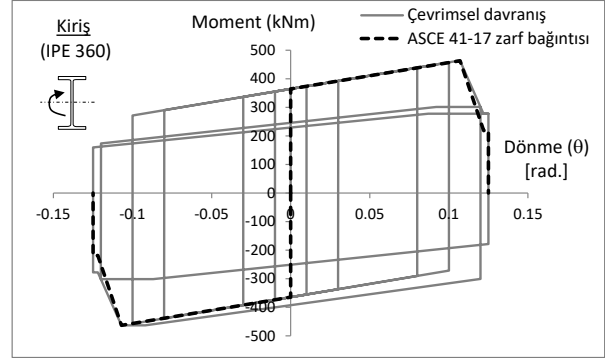
Binanın doğrusal olmayan dinamik analizi için PERFORM-3D (CSI 2023) programı kullanılmış ve hesap modelinin oluşturulmasında ASCE/SEI 41-17 (ASCE 2017) standardından yararlanılmıştır. Buna göre kolon ve kirişlerde rijit-plastik moment-dönme bağıntıları ve çapraz elemanlar için ise normal kuvvet-kısalma/uzama bağıntıları kullanılmıştır. Çaprazların basınç kapasitelerinin ve birim şekil değiştirmelerinin belirlenmesinde, düğüm noktaları arasındaki boyun %90'ı etkin boy olarak alınmıştır (ASCE 2017). MAÇ kolonlarında bileşik eğilme etkisi gözönüne alınmıştır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin ve kolon-temel birleşimlerinin tam rijit olduğu ve doğrusal olmayan davranış göstermediği kabul edilmiştir. ASCE 41-17 standardında verilen modelleme parametreleri, çevrimsel (tersinir tekrarlı) test sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesine dayanmakta ve dayanım azalmalarını da içermektedir (ASCE 2017). Ancak gerekli durumlarda, kalıcı ötelemeler için de belirleyici olan çevrimsel davranıştan kaynaklı rijitlik azalmalarının ayrıca modellenmesi gerekmektedir. Çalışmada, çelik kolon ve kirişlerde, kompakt kesitler kullanılması ve yanal burkulma ile ilgili önlemlerin alınması nedeniyle pekleşmeli-ideal elastoplastik davranış modeli esas alınmış ve rijitlik azalması gözönüne alınmamıştır. Kirişler için kullanılan çevrimsel model ve ASCE 41-17 zarf bağıntısı IPE 360 kiriş elemanı için örnek olarak Şekil 3'de gösterilmiştir (ASCE 2017).



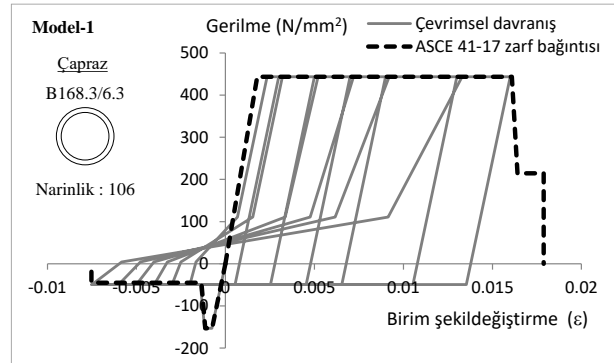
Şekil 2. MAÇ ve MÇÇ sistem için eleman boyutları

Çapraz elemanların çevrimsel davranışı kiriş ve kolonlardan farklı olarak, basınç altında burkulma sonrası önemli ölçüde rijitlik azalmaları içermektedir (Bruneau et al. 2011). Bu etkiyi gözönüne almak amacıyla çaprazlar için PERFORM-3D (CSI 2023) programında bulunan

“burkulma esaslı doğrusal olmayan çelik malzeme” bileşeni kullanılmıştır. Bu bileşende, çapraz elemanın basınç altında burkulma sonrası gerilme-şekil değiştirme davranışı çeşitli parametreler ile gözönüne alınmaktadır (CSI 2023). Söz konusu parametreler çapraz elemanın narinliğine bağlı olarak değişim göstermektedir (Bruneau et al. 2011).



Şekil 3. Kiriş için çevrimsel davranış modeli



Şekil 4. Çapraz eleman için çevrimsel davranış modeli (Model-1)

Narinlik azaldıkça, burkulma sonrası sönümlenen çevrimsel enerji azalmaktadır. Çalışmada incelenen binada kullanılan çaprazlarla ilgili test verileri bulunmadığı için modellemede, literatürdeki çapraz deney sonuçlarından yaklaşık olarak belirlenen parametreler kullanılmış, ancak ilgili parametrelerin değişiminin kalıcı yanal ötelemeler üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Çaprazlar için kullanılan çevrimsel hesap modeli (Model-1) ve ilgili ASCE 41-17 zarf bağıntısı Şekil 4'de gösterilmiştir (ASCE 2017). İki doğrultulu deprem yüklemesi altında, MAÇ ve MÇÇ sistemin ortak elemanı olan köşe kolonları ve diğer MÇÇ kolonlarında, normal kuvvet değişimleri izlenerek burkulma yüklerinin aşılmadığı ayrıca kontrol edilmiştir.

Doğrusal olmayan dinamik analizde Rayleigh sönüm metodu esas alınmış ve dolgu duvarların taşıyıcı sistemden ayrık olduğu gözönünde bulundurularak %3'lük sönüm oranı kabul edilmiştir (ASCE 2017). Rayleigh sönüm modeline ait karakteristik periyotlar, MÇÇ hakim periyodunun 0.2 katı (0.2T_{1y}) ve MAÇ hakim periyodunun 1.5 katı (1.5T_{1x}) alınarak belirlenmiştir. Böylece dinamik

analizde plastikleşme ile oluşacak periyot büyümelerinin ve her iki doğrultudaki yüksek mod etkilerinin gözönüne alınması amaçlanmıştır. Dinamik analizde kullanılan deprem kayıtlarının seçiminde PEER (İnt. Kyn. 1) veri tabanından yararlanılmıştır. Çalışmada farklı fay mekanizmalarını içeren ve uzak fay özelliğine sahip 15 güçlü deprem hareketi kaydı (çift bileşen) gözönüne alınmıştır. Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler Çizelge 2’de verilmiştir. Deprem performansı ve kalıcı öteleme değerlendirmeleri iki farklı deprem yer hareketi düzeyi için yapılmıştır. Bunlar, binanın tasarımında esas alınan DD2 (50 yılda aşılma olasılığı %10) deprem düzeyi ve en büyük depremi temsil eden DD1 (50 yılda aşılma olasılığı % 2) deprem düzeyidir. Tasarım depreminin spektral olarak 1.5 katı DD1 deprem düzeyi olarak gözönüne alınmıştır. Değerlendirme için seçilen deprem kayıtları, hedef spektruma spektral uyum sağlanacak şekilde ölçeklenmiştir. Bunun için SeismoMatch (2023) programı kullanılmıştır. Spektral uyum tekniği ile hedef spektruma oldukça uyumlu spektrumlar elde edilebilmekte böylece, seçilen depremlerde zemin karakteristiklerine bağımlılık ortadan kalkmakta ve basit ölçeklemedeki gibi yüksek güvenlik katsayıları kullanımına gerek kalmamaktadır (Hancock et al. 2008, Al-Atik and Abrahamson 2010). TBDY’ye göre spektrum uyumlu kayıtların kullanılması durumunda kayıtlar için elde edilen ortalama spektrumun tüm periyotlar için hedef spektrumun ordinatlarından küçük olmaması şartı bulunmaktadır (AFAD 2018). Ancak TBDY’ye göre yapılması zorunlu olan iki doğrultulu dinamik analizde, spektral uyumun hangi spektral büyüklükle (maksimum bileşen, geometrik ortalama vb.) sağlanacağı açıklanmamıştır. Bu konuda literatürde genel olarak bir eksiklik bulunmakla birlikte, ASCE/SEI 7-2022 standardında bazı önerilere yer verilmiştir (ASCE 2022). Bu çalışmada, her bir deprem kaydına ait iki dik bileşenin ayrı ayrı hedef spektrum ile uyumlu olacak şekilde ölçeklenmesi yaklaşımı esas alınmıştır (ASCE 2022). Deprem ivme kayıtlarından birine ait orijinal ve DD1 düzeyi için ölçeklenmiş yer ivmesi–zaman grafiği ile aynı deprem kaydının ölçeklenmiş iki bileşeni (x,y) için yer ivmesi–zaman grafiği Şekil 5’de örnek olarak gösterilmiştir. Spektral uyum sonucu tüm deprem kayıtları için elde edilen DD1 düzeyi ivme spektrumları, bunların ortalaması, hedef spektrum ile birlikte Şekil 6’da gösterilmiştir.

Binanın her iki doğrultudaki hakim periyotları göz önünde bulundurularak (0.2T_{1y}) ve (1.5T_{1x})’e karşılık gelen periyotlar arasında spektral uyum sağlanması yeterli görülmüştür. Şekil 6’dan görüleceği gibi, spektral uyum esaslı ölçekleme yaklaşımı istenilen bölgede hedef

spektrum ile oldukça uyumlu sonuçlar vermiş ve tüm bileşenlerin (15 çift) ortalaması, hedef spektrum ordinatlarının üzerinde ve ona çok yakın olarak elde edilmiştir.

3. Analiz sonuçları / Analysis results

DD1 ve DD2 deprem düzeylerine ait hedef spektrumlara göre ölçeklenmiş 15’er çift deprem kaydı, bileşen çifti 90o döndürülmek suretiyle ikiye kez binaya uygulanmıştır. Buna göre binanın 60 kez iki doğrultulu doğrusal olmayan dinamik analizi gerçekleştirilmiştir.

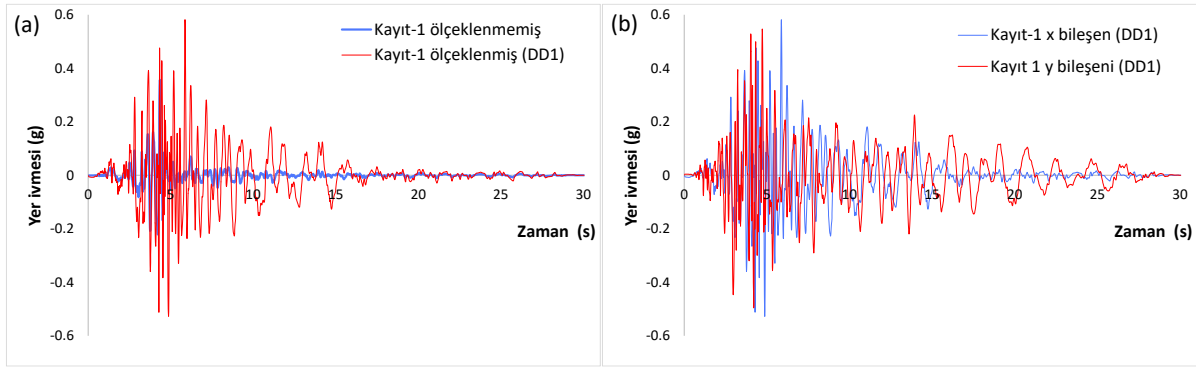
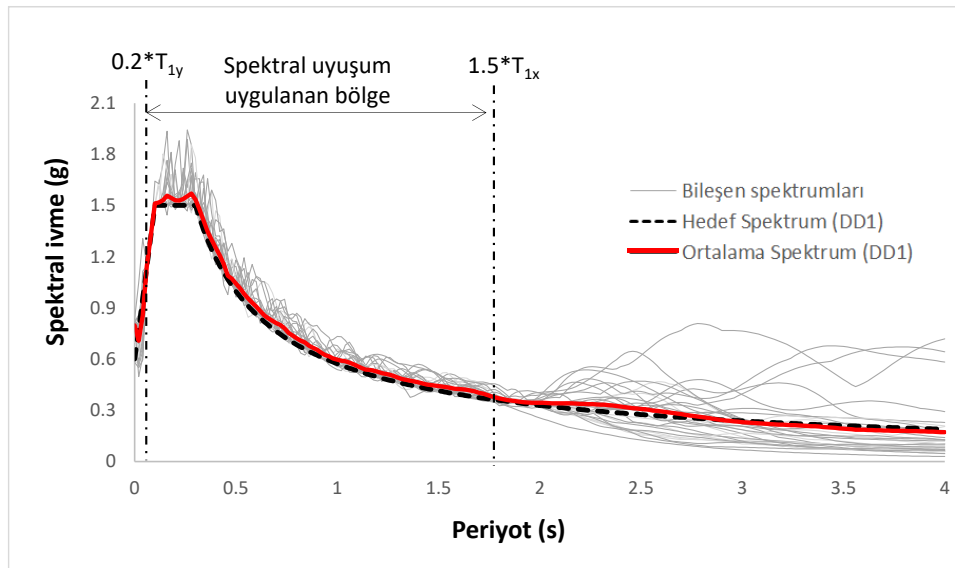
3.1 Performans Düzeyleri

Taşıyıcı sistem elemanlarının performans düzeylerinin belirlenmesinde TBDY’de verilen performans kriterleri esas alınmıştır (AFAD 2018). Buna göre kolon ve kirişlerde plastik dönmeler için, çaprazlarda plastik sekildeğiştirmeler (kısılma/uzama) için 30 analizden elde edilen maksimum değerlerin aritmetik ortalaması alınarak, yönetmelikte verilen performans sınırları (Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), Göçmenin Önlenmesi (GÖ)) ile karşılaştırılmıştır. DD1 deprem düzeyinde, kayıtların üçünde MÇÇ sistemin bazı çapraz elemanlarında basınç altında yönetmelikte verilen “Göçmenin Önlenmesi” sınırı bir miktar aşılmıştır. Sınırın en fazla aşıldığı eleman için elde edilen Normal kuvvet-zaman grafiği ve çevrimsel davranış Şekil 7’de gösterilmiştir. Çevrimsel davranış üzerinde ilgili çapraz elemana ait TBDY performans düzeyleri (SH, KH, GÖ) de gösterilmiştir (AFAD 2018). GÖ sınırı aşılma elemanlar için şekil değiştirme kapasitesinin devam ettiği kabul edilerek talepler belirlenmiş ve bunlar ortalama talep hesabında göz önüne alınmıştır.

DD1 düzeyi için yapılan analizlerde; MAÇ’nin sadece 1.kat kolonlarının alt uçlarında plastikleşmeler oluşmuş, 30 analiz içinde maksimum plastik dönme 0.007 rad, en büyük ortalama plastik dönme ise 0.001 rad olarak elde edilmiştir. Buna göre tüm kolonlar Sınırlı Hasar düzeyinin çok altında kalmıştır. DD2 düzeyinde ise MAÇ kolonlarında plastikleşme oluşmamıştır. DD1 ve DD2 düzeyleri için gerçekleştirilen dinamik analizlerde kirişler için elde edilen ortalama plastik dönme talepleri ve ilgili Sınırlı Hasar performans düzeyleri Şekil 8’de verilmiştir. DD1 düzeyinde; MAÇ kirişlerinin tümü plastikleşmiştir. 30 analiz içinde maksimum plastik dönme 0.05 rad olarak elde edilmiş, ancak ortalama plastik dönme talepleri hiçbir kirişte sınırlı hasar performans düzeyini aşmamıştır (Şekil 8). DD2 düzeyi depremlerde, maksimum giriş plastik dönme talebi 0.013 rad olarak elde edilmiş, ortalama plastik dönme talepleri Sınırlı Hasar performans düzeyinin oldukça altında kalmıştır (Şekil 8).

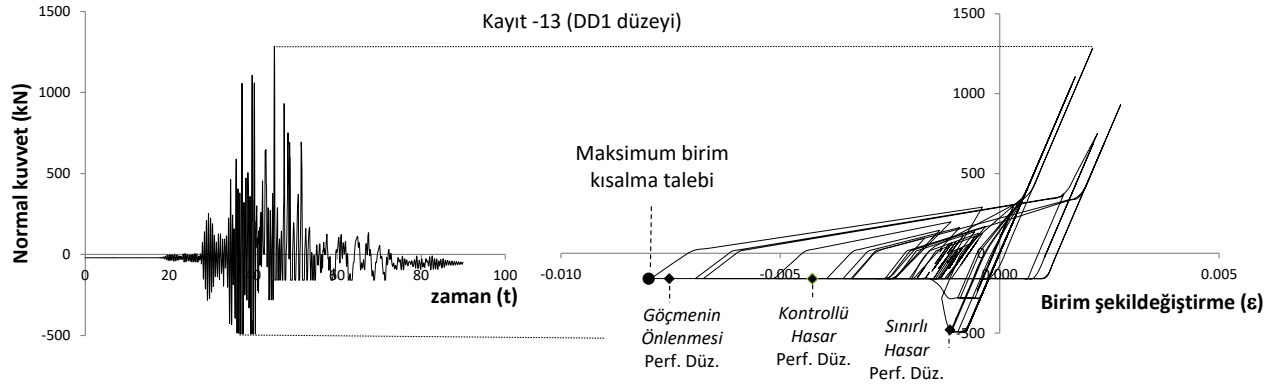
Çizelge 2. Deprem kayıtlarına ait karakteristikler

Kayıt no	Deprem adı	Büyükölç	Mekanizma tipi	Faya uzaklık (km)	Vs30 (m/s)	Maks. yer ivmesi (g)	
						Bileşen-x	Bileşen-y
1	Parkfield	6.19	Yanal atımlı fay	15.96	527.92	0.35652	0.27274
2	San Fernando	6.61	Eğim atımlı ters fay	19.3	602.1	0.38215	0.28217
3	Friuli_Italy-01	6.5	Eğim atımlı ters fay	15.82	505.23	0.35713	0.31512
4	Imperial Valley-06	6.53	Yanal atımlı fay	22.03	242.05	0.2357	0.3497
5	Coalinga-01	6.36	Eğim atımlı ters fay	24.02	274.73	0.22538	0.28846
6	Loma Prieta	6.93	Yanal ve eğim atımlı fay	15.23	288.62	0.51113	0.4386
7	Loma Prieta	6.93	Yanal ve eğim atımlı fay	17.47	388.33	0.37318	0.65397
8	Landers	7.28	Yanal atımlı fay	19.74	352.98	0.28368	0.4172
9	Northridge-01	6.69	Eğim atımlı ters fay	17.15	355.81	0.44341	0.48796
10	Northridge-01	6.69	Eğim atımlı ters fay	15.6	257.21	1.77942	0.99024
11	Kocaeli_Turkey	7.51	Yanal atımlı fay	15.37	281.86	0.31191	0.36418
12	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Yanal ve eğim atımlı fay	16.04	233.14	0.27255	0.2037
13	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Yanal ve eğim atımlı fay	26	704.64	0.47308	0.50682
14	Cape Mendocino	7.01	Eğim atımlı ters fay	18.31	459.04	0.31808	0.47764
15	El Mayor-Cucapah_Mexico	7.2	Yanal atımlı fay	15.91	242.05	0.53762	0.40816

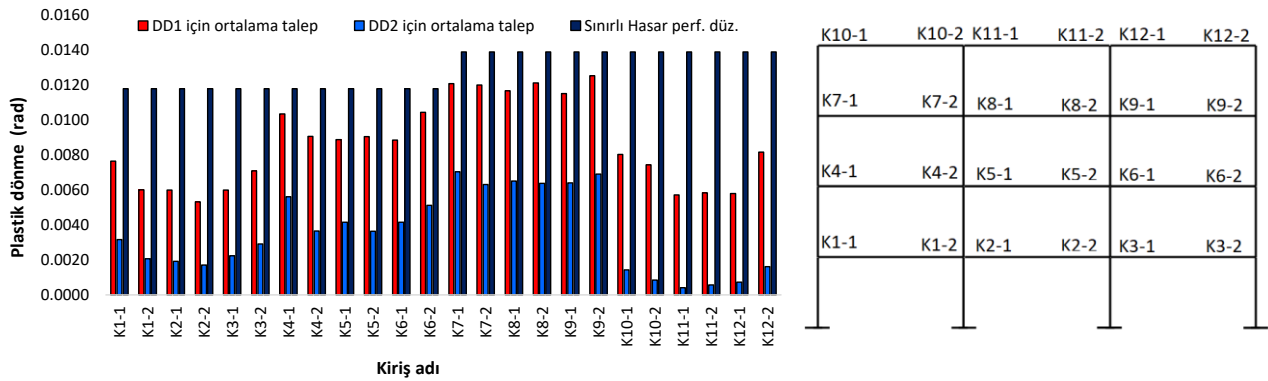
**Şekil 5.** Kayıt 1'e ait ivme-zaman grafikleri (a) orijinal ve ölçeklenmiş (DD1 için), (b) Ölçeklenmiş x ve y bileşenleri**Şekil 6.** Spektral uyuşum sonucu elde edilen ivme spektrumları (DD1 düzeyi için)

MÇÇ çapraz elemanları için elde edilen ortalama plastik uzama/kısılma talepleri ve ilgili performans düzeyleri Şekil 9'da verilmiştir. DD1 düzeyi için yapılan analizlerde; çapraz elemanlarda maksimum 0.049 m'lik kısılma, 0.048 m'lik uzama gerçekleşmiştir. Ortalama değerler üzerinden yapılan değerlendirmede tüm çaprazlar, basınç ve çekme altında Kontrollü Hasar performans düzeyinin

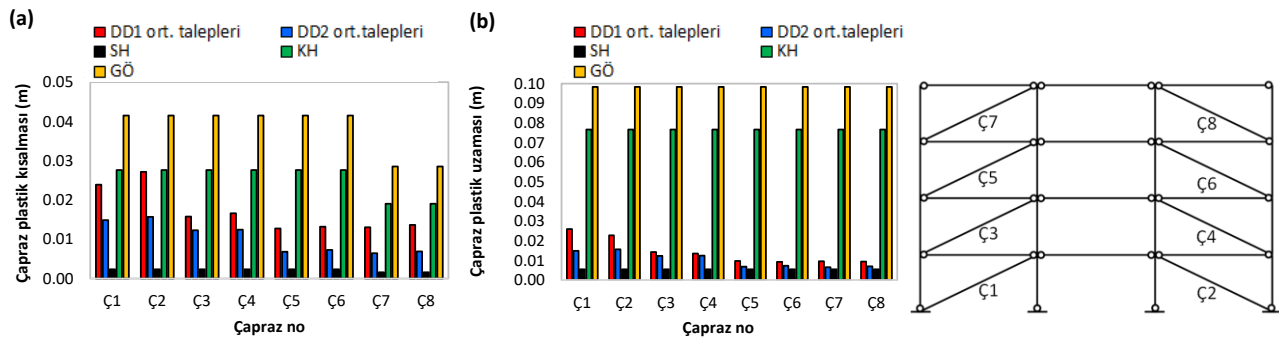
altında kalmıştır. Şekil 9'dan görüldüğü gibi, basınç altındaki plastik şekil değiştirmeler çekmeye göre çok daha yüksek elde edilmiştir. DD2 düzeyi için yapılan analizlerde; çapraz elemanlarda maksimum 0.023 m'lik kısılma, 0.022 m'lik uzama gerçekleşmiştir. DD2 düzeyinde plastik şekil değiştirmeler önemli ölçüde azalmakla birlikte performans düzeyi bakımından değişiklik olmamıştır.



Şekil 7. En büyük kısılma talebinin elde edildiği 1. Kat çaprazında normal kuvvet ve şekil değiştirme davranışı



Şekil 8. Kiriş ortalama plastik dönme talepleri ve Sınırlı Hasar performans düzeyleri



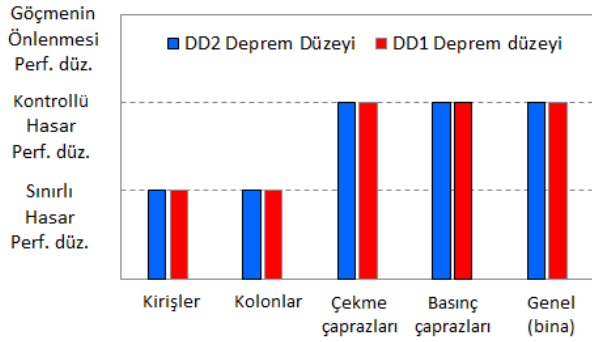
Şekil 9. Çapraz ortalama plastik talepleri ve performans sınırları (a) Kısılma talepleri (b) Uzama talepleri

Yönetmelikte verilen performans sınırlarına göre değerlendirildiğinde; MAÇ kirişleri ve kolonları için Sınırlı Hasar performans düzeyi, çekme ve basınç etkisindeki çaprazlar için Kontrollü Hasar performans düzeyinin sağlandığı görülmüştür (Şekil 10). İki doğrultulu analizler sonucunda binanın genel performans düzeyi her iki

deprem düzeyi için de Kontrollü Hasar olarak elde edilmiştir. Buna göre yönetmelikte tasarım deprem düzeyi DD2 için öngörülen hedef sağlanmıştır.

Tasarım depreminin spektral olarak 1.5 katı olan DD1 deprem düzeyinde de depremlerden elde edilen ortalama

büyükliklere göre Kontrollü Hasar performans düzeyi sağlanmıştır.



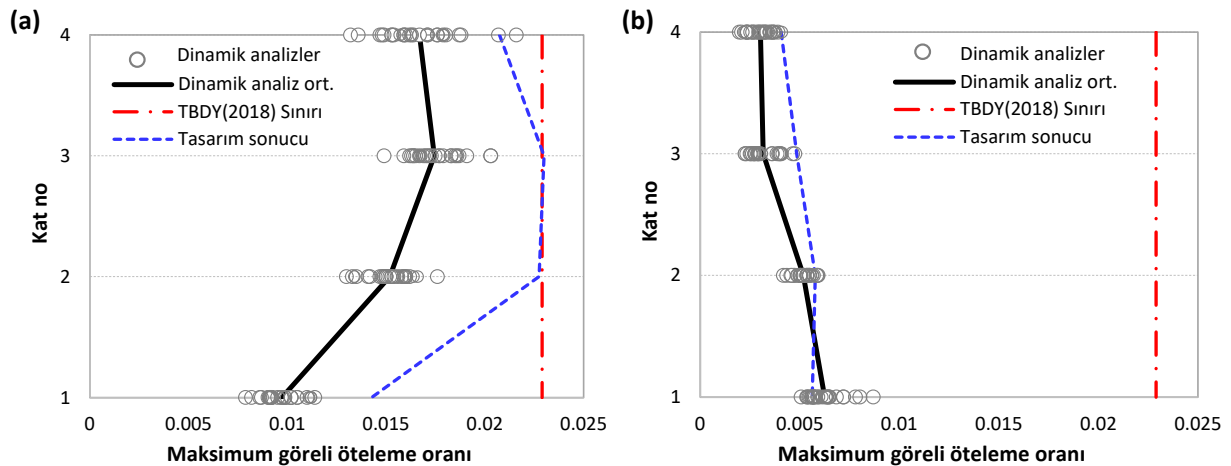
Şekil 10. Eleman ölçeğinde ve genel performans düzeyleri

Bununla birlikte, özellikle basınç altındaki bazı çapraz plastik şekil değiştirmelerinin maksimum değerleri Göçmenin Önlenmesi sınırını bir miktar aşmıştır. Çalışmada, söz konusu sınırın önemli ölçüde aşılmaması nedeniyle bu elemanlarda şekildeğiştirme kapasitesinin devam ettiği kabulü yapılmış ve değerlendirmeler ortalama şekil değiştirmeler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu özel durumda değerlendirmelerin nasıl yapılacağına ayrıca incelenmesi gerektiği düşünülmektedir. Binada iki asal doğrultuda farklı özellikte taşıyıcılar kullanıldığı için önemli ölçüde farklı performans düzeyleri elde edilmiştir. MAÇ sistemin tasarımında, elemanların dayanımından ziyade görelî öteleme kriterinin etkili olması ve ayrıca yönetmelikte periyot üst sınırının deprem yüklerini artırması nedeniyle öngörülen performansın çok üzerine çıktığı görülmektedir. MÇÇ sistemde ise çapraz tasarımlarında dayanımların etkili olması nedeniyle, beklendiği gibi

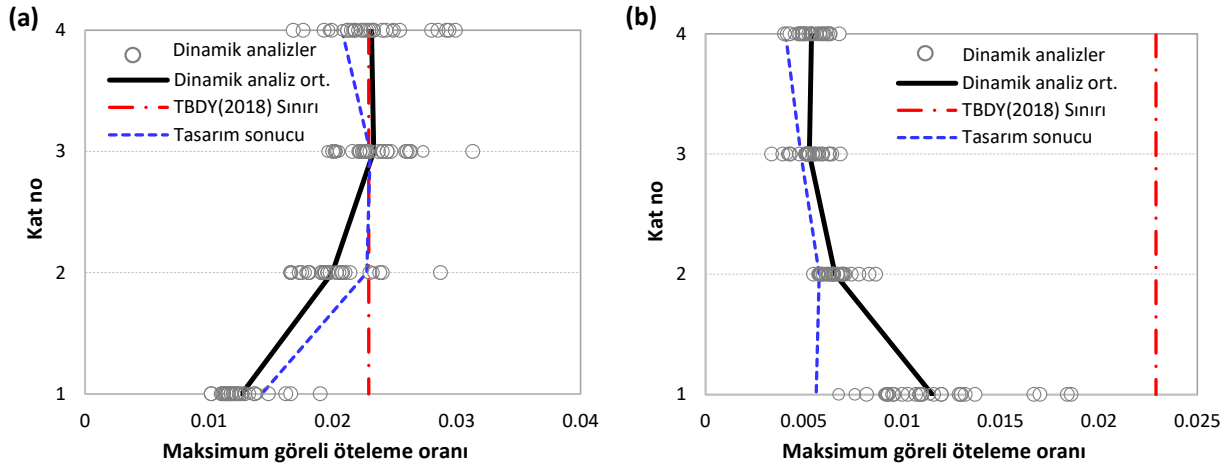
çaprazlarda büyük ölçüde plastikleşmeler oluşmuş ve MÇÇ performans düzeyi, binanın genel performans düzeyini belirleyici olmuştur.

3.2 Maksimum görelî kat ötelemesi oranları

DD2 ve DD1 düzeyi depremler için yapılan analizlerden her iki doğrultudaki maksimum görelî kat ötelemesi oranları belirlenmiş ve bunlar tasarımda elde edilen değerler ve TBDY sınırı ile birlikte Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Çalışmada her bir deprem yer hareketi için elde edilen görelî ötelemeler "maksimum görelî öteleme", tüm yer hareketlerine ait maksimum değerlerin aritmetik ortalaması ise "ortalama görelî öteleme" olarak ifade edilmiştir. MAÇ'de DD2 düzeyini temsil eden depremlerden elde edilen ortalama görelî öteleme oranları tasarımda öngörülen değerlerin ve yönetmelik sınırının çok altında kalmıştır (Şekil11). Depremlerden elde edilen maksimum görelî öteleme oranları dahi sadece iki deprem için en üst kat ötelemeleri hariç olmak üzere, tasarım değerlerinin oldukça altında kalmıştır. DD1 düzeyi depremlerde ise ortalama görelî ötelemeler alt katlarda tasarım değerlerinin altında kalmış, en üst katta tasarım değerlerini bir miktar aşmış, ancak TBDY'de verilen sınır aşılmamıştır (Şekil 12). MAÇ sistemin görelî kat ötelemelerinin yönetmelikte öngörülen sınırlara göre çok güvenli olduğu ve bunun da eleman performans düzeyleri için elde edilen sonuçlara paralel olduğu görülmektedir. MAÇ görelî öteleme oranlarındaki bu aşırı emniyetli durumun, deprem etkilerinin belirlenmesinde kullanılan EDDY yöntemindeki yaklaşıklık ve periyot üst sınırı koşulu nedeniyle oluştuğu söylenebilmektedir.



Şekil 11. DD2 deprem düzeyi için maksimum görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ



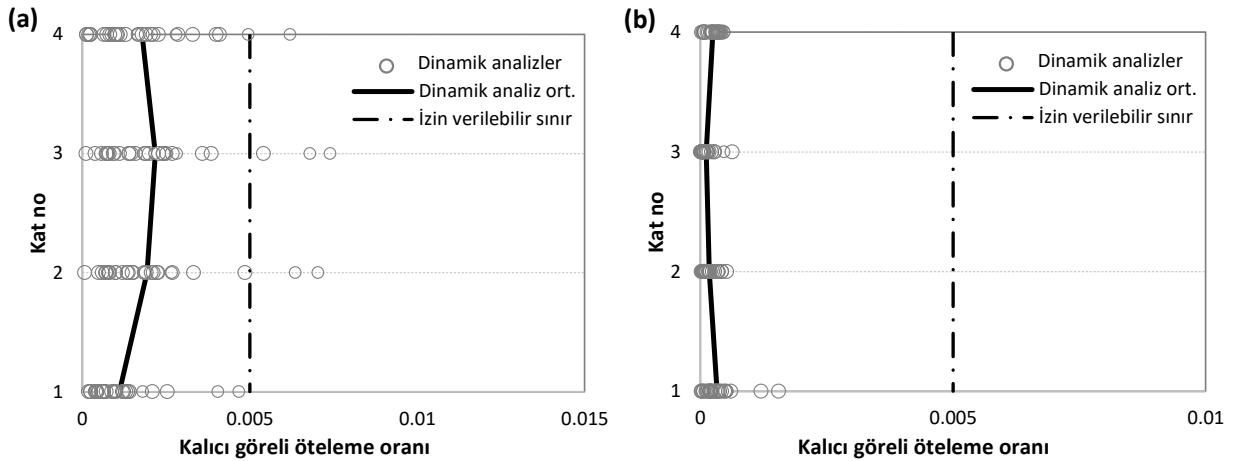
Şekil 12. DD1 deprem düzeyi için maksimum görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ

Periyot üst sınırının ve görelî ötelemelerin tasarımda etkili olmadığı MÇÇ’de, DD2 düzeyi depremlerde tasarım değerlerine çok yakın görelî öteleme değerleri elde edilirken, DD1 düzeyi depremlerde ortalama öteleme oranları tüm katlarda tasarım değerlerini aşmıştır (Şekil 11,12). Hatta 30 analizden elde edilen maksimum değerlerin en küçüğü dahi birinci kattaki tasarım değerini aşmıştır (Şekil 12). MÇÇ’de üst katlarda MAÇ’ye göre beklendiği gibi çok daha düşük öteleme oranları elde edilirken, birinci kattaki ötelemeler MAÇ ile aynı mertebeye ulaşmıştır (Şekil 12).

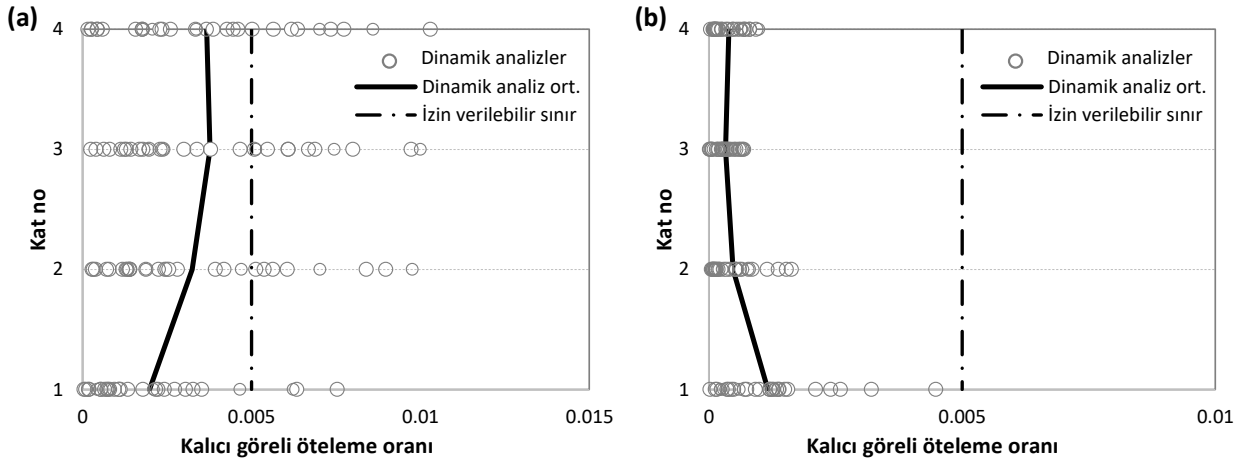
3.3 Kalıcı görelî öteleme oranları

DD2 ve DD1 deprem düzeylerine ait yer hareketleri için MAÇ ve MÇÇ’de elde edilen kalıcı yanal öteleme oranları Şekil 13 ve 14’de verilmiştir. Kalıcı öteleme değerleri, McCornik (2008) tarafından çeşitli kriterlere göre binanın deprem sonrası kullanılabilirliğinde üst sınır olarak önerilen 0.005’lik öteleme oranı esas alınarak değerlendirilmiştir. DD2 ve DD1 deprem düzeylerinin her

ikisi için de MAÇ ve MÇÇ sistem ortalama kalıcı öteleme oranları 0.005’lik sınırın altında kalmıştır. Elde edilen maksimum kalıcı ötelemeler bakımından değerlendirildiğinde; MÇÇ’de hiçbir deprem için 0.005’lik aşılmazken, MAÇ’de DD2 düzeyinde 3 deprem için, DD1 düzeyinde ise 8 deprem için 0.005’lik sınır önemli ölçüde aşılmıştır. Hatta DD1 düzeyinde birkaç deprem için kalıcı ötelemeler 0.01’lik değere ulaşmıştır (Şekil 14a). MAÇ’de en büyük ortalama kalıcı öteleme oranı DD2 ve DD1 düzeyi depremlerde sırasıyla 0.0022 ve 0.0038 olarak elde edilmiştir. MÇÇ’de ise en büyük ortalama kalıcı öteleme oranı sırasıyla 0.0003 ve 0.0012 olarak elde edilmiştir. MÇÇ sistemde çevrimsel davranışına ait gerçek test verisi bulunmayan çaprazlarda, burkulma sonrası davranışın kalıcı ötelemeler üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, ilk kullanılan model (Şekil 4, Model-1), burkulma sonrası sönmülenen enerji önemli oranda artırılacak şekilde revize edilmiş ve yeni bir model (Model-2) oluşturulmuştur (Şekil 15). Böylece burkulma sonrası karşılaşılabilecek farklı çevrimsel davranışlara ait bir zarfın göz önüne alınması amaçlanmıştır.



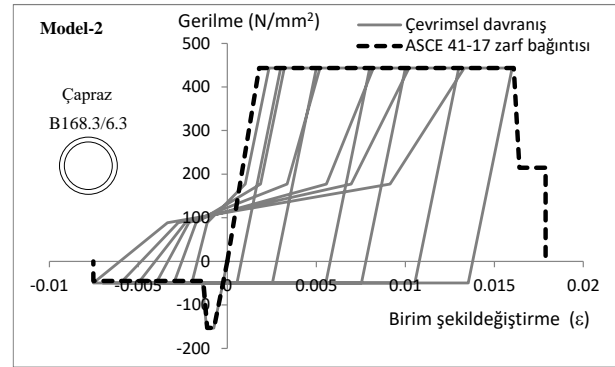
Şekil 13. DD2 düzeyi depremler için kalıcı görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ



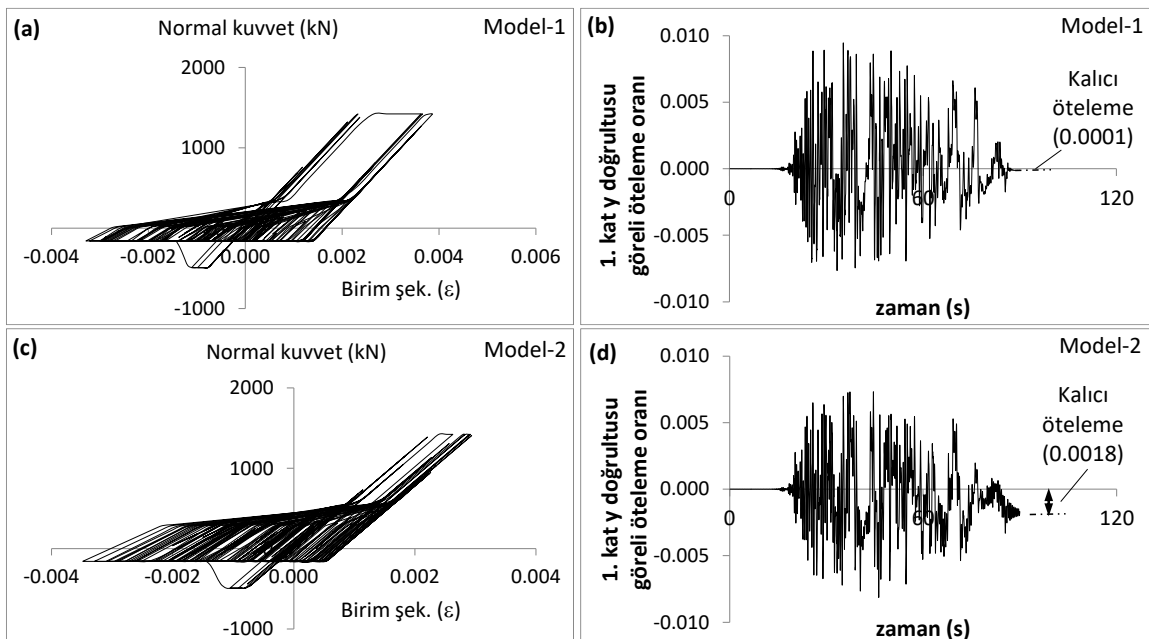
Şekil 14. DD1 düzeyi depremler için kalıcı görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ

Buna göre tüm analizler tekrarlanarak MÇÇ doğrultusundaki (y doğ.) kalıcı öteleme oranları, bir önceki kalıcı öteleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kayıt-1 için her iki modelden elde edilen 1. Kat y doğrultusundaki öteleme oranının değişimi örnek olarak Şekil 16'da gösterilmiştir. Düşük çevrimsel sönümlü çapraz davranışını temsil eden Model-1'de önemli bir kalıcı öteleme oluşmazken, yüksek çevrimsel sönümlü Model-2'de kalıcı öteleme artmıştır (Şekil 16d). Ortalama kalıcı ötelemelerde iki model farkının sebep olduğu değişimler, tüm depremler için Şekil 17'de gösterilmiştir. Model-2'nin kullanılması, tüm katlardaki kalıcı ötelemelerde yaklaşık iki kat artışa sebep olmuş, ancak ortalama kalıcı ötelemeler her iki deprem düzeyi için de izin verilebilir 0.005'lik sınırın oldukça altında kalmıştır (Şekil 17). DD1 düzeyi depremlerde, sadece bir deprem için maksimum kalıcı öteleme değeri 0.005'lik sınıra ulaşmıştır (Şekil 17b).

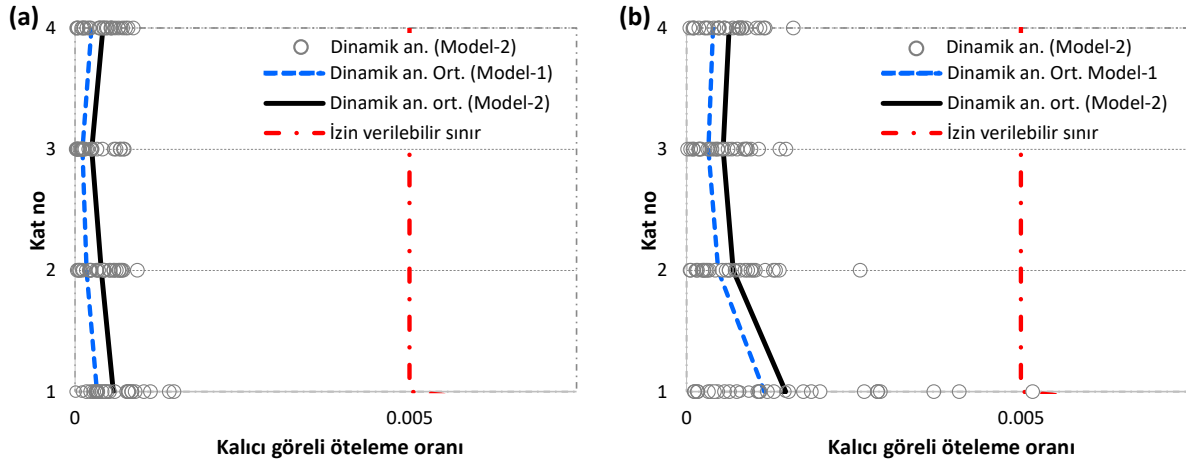
Buna göre, MÇÇ sistemde çaprazların narinliğine bağlı olan çevrimsel sönüm arttıkça kalıcı ötelemelerin de arttığı gözlenmektedir, ancak bu artışa rağmen kalıcı ötelemelerin MAÇ'ye göre çok düşük düzeyde kaldığı görülmektedir (Şekil 13a, 14a, 17).



Şekil 15. Çapraz çevrimsel davranışı için Model-2



Şekil 16. Çapraz çevrimsel davranışları (a) Model-1 (c) Model-2 ve öteleme oranı değişimi (b) Model-1 (c) Model-2



Şekil 17. MÇÇ’de iki farklı çapraz modeli için elde edilen kalıcı ötelemelerin karşılaştırılması (a) DD2 için (b) DD1 için

4. Sonuçlar / Conclusions

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY) göre tasarlanmış çelik bir bina üzerinde, yönetmelikte yer alan temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler bakımından yeterlilikleri değerlendirilmiştir. Kalıcı öteleme potansiyelleri farklı olan MAÇ ve MÇÇ sistemlerinin kullanıldığı bina, tasarım depremini (DD2) ve maksimum depremi (DD1) temsil eden iki deprem yer hareketi grubu için incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Binanın deprem performansı TBDY’deki temel yaklaşım çerçevesinde değerlendirildiğinde; MAÇ doğrultusunda her iki deprem düzeyi için de yönetmelikte öngörülenin çok üzerinde olan Sınırlı Hasar performans düzeyi elde edilmiştir. Doğrusal olmayan dinamik analizlerden elde edilen maksimum görelî ötelemeler de buna paralel sonuçlar vermiştir. Bu aşırı emniyetli durumun oluşmasında, tasarımda kullanılan Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemindeki yaklaşıklığın, periyot üst sınırı uygulamasının ve görelî öteleme kriterinin önemli ölçüde etkili olduğu söylenebilmektedir. Buna göre, tasarımda mod birleştirme veya diğer dinamik yöntemlerin kullanılması veya periyot üst sınırının uygulanmaması halinde performans düzeyinin değişebileceği görülmektedir.

Binanın MÇÇ doğrultusundaki deprem performansı DD2 deprem düzeyi için Kontrollü Hasar elde edilerek yönetmelikte öngörülen hedefi sağlamıştır. DD1 düzeyi depremlerde ise bazı kayıtlar için göçmenin önlenmesi sınırı bir miktar aşılmakla birlikte, ortalama şekil değiştirmeler üzerinden yapılan değerlendirmede Kontrollü Hasar performans düzeyi elde edilmiştir. Yönetmelikte doğrudan belirtilmemekle birlikte, DD1 düzeyi için öngörülenin (Göçmenin Önlenmesi) üzerinde

performans elde edildiği belirlenmiştir. Ancak, DD1 düzeyi için elde edilen bu sonuç, Göçmenin Önlenmesi sınırı aşıl原因 bazı basınç çaprazlarında şekildeğiştirme kapasitesinin devam ettiği kabulüne dayanmaktadır. Bu gibi durumlarda değerlendirmenin nasıl yapılacağı konusunun ayrıca incelenmesinin ve TBDY’de yönlendirici kriterlere yer verilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

Binanın deprem sonrası kullanılabilirliği için referans alınan 0.005’lik kalıcı görelî öteleme sınırına göre yapılan değerlendirmelerde; binanın her iki taşıyıcı sisteminde de her iki deprem düzeyine ait ortalama değerler için sınırın sağlandığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, depremlerden elde edilen maksimum kalıcı ötelemeler MAÇ ve MÇÇ için karşılaştırıldığında; MAÇ sistemde bazı deprem kayıtları için 0.005’lik sınırın önemli ölçüde aşılabildiği, yani binanın deprem sonrası kullanılamaz hale gelme potansiyeli bulunduğu görülmüştür. Buna karşılık MÇÇ sistemde, DD1 düzeyinde dahi hiçbir depremde 0.005’lik sınırın aşılmadığı belirlenmiştir.

Taşıyıcı sistemlerin performans düzeyleri ve kalıcı öteleme oranları birlikte değerlendirildiğinde MAÇ ve MÇÇ sistem sonuçları arasında önemli farklılıklar görülmüştür. MAÇ sistemde, eleman hasar düzeylerine göre yapılan değerlendirmede aşırı güvenli sonuçlar elde edilmesine rağmen kalıcı öteleme oranları bakımından kabul edilebilir sınırların aşılabildiği belirlenmiştir. Buna karşılık, MÇÇ sistemde eleman hasar düzeyleri bakımından kritik sınırlara yaklaşıırken, kalıcı öteleme oranı kabul edilebilir sınırların çok altında kalmıştır. MAÇ ve MÇÇ sistemlerin kalıcı öteleme davranışları arasındaki farkın oluşmasında, MAÇ sistemlerin yanal ötelemeye duyarlılığının yanısıra elemanların çevrimsel davranış farklılıkları etkili olmuştur. MAÇ sistemdeki giriş ve kolonlar rijitlik azalması içermeyen tam çevrimsel davranış gösterirken, MÇÇ

sistemdeki çaprazlar, basınç altında burkulmalı çevrimsel davranış göstermektedir. MÇÇ'de, basınç etkisindeki çapraz elemanların ortasında burkulma sonrası oluşan plastik mafsallar nedeniyle çevrimsel davranışta önemli rijitlik azalmaları oluşmakta, bu da kalıcı ötelemelerin düşük düzeyde kalmasını sağlamaktadır. Çalışmada, çaprazların çevrimsel davranışını temsil eden modelin kalıcı ötelemeler üzerindeki etkisi de kısmen incelenmiş ve modelde önemli değişiklik yapılmasına rağmen MÇÇ sistemdeki kalıcı ötelemelerin çok düşük düzeyde kaldığı gösterilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, incelenen bina özellikleri ve yapılan varsayımlar çerçevesinde geçerlidir. Bununla birlikte sonuçlar, yönetmeliğe uygun olarak tasarlanan ve mevcut performans değerlendirme yaklaşımına (eleman hasar düzeylerine dayanan) göre incelenen binada, kalıcı yanal ötelemelerin kabul edilebilir sınırları aşma potansiyeli bulunduğunu göstermiştir. Kalıcı ötelemelerin, deprem karakteristiklerine ve bina taşıyıcı sistem özelliklerine duyarlı olması nedeniyle farklı bina modelleri ve deprem yer hareketleri için çok sayıda benzer çalışmanın yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ihmal edilen bileşenlerin (kompozit döşeme etkisi, basit birleşimlerin çevrimsel davranışları vb.) etkileri de ayrıca incelenmelidir. Yapılacak çalışmaların mevcut performans esaslı yaklaşımların geliştirilmesine ve deprem sonrası ekonomik kayıpların azaltılmasına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi/ Declaration of Ethical Standards

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı/ Credit Authorship Contribution Statement

Yazar 1: Araştırma, Metodoloji, Yorumlama, Yazma-orijinal taslak.

Yazar 2: Araştırma, Analiz, Grafikleme, Yorumlama, Yazma.

Çıkar Çatışması Beyanı/Declaration of Competing Interest

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability Statement

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar / References

AFAD, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

AISC, 2010. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.

Al-Atik L., Abrahamson N.A., 2010. An improved method for nonstationary spectral matching, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, 6, 601-617.
<https://doi.org/10.1193/1.3459159>

Anderson JC, Fillipou FC, 1995. Dynamic response analysis of the 17-story canoga building, *SAC technical report 95-04*, 12-1-12-53.

ASCE, 2017. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings: ASCE Standard ASCE/SEI 41-17, American Society of Civil Engineers Reston, VA, USA.

ASCE, 2022. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers ASCE/SEI 7-2022, Reston, VA, USA.

Asgarkhani, N., Yakhchalian, M. and Mohebi, B., 2020. Evaluation of approximate methods for estimating residual drift demands in BRBFs. *Engineering Structures*, **224**, 110849.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110849>

ATC, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings: ATC 40, Vol. 1, Applied Technology Council, Washington DC., USA.

Basim, M.C, Pourreza, F., Mousazadeh, M. and Hamed, A.A., 2022. The effects of modeling uncertainties on the residual drift of steel structures under mainshock-aftershock sequences. *Structures*, **36**, 912-926.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.050>

Bruneau, M., Uang, C.M. and Sabelli, R. 2011, Ductile design of steel structures, Second edition, McGraw-Hill, 499-563.

Christopoulos, C., Pampanin, S. and Priestley, M. J. N., 2003. Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations. Part I: Single degree of freedom systems, *Journal of Earthquake Engineering*, **7**, 1, 97-118.
<https://doi.org/10.1080/13632460309350443>

Christopoulos, C. and Pampanin, S., 2004. Towards performance-based design of MDOF structures with explicit consideration on residual deformations. *ISET Journal of Earthquake Technology*, **41**, 1, 53-73.

Comartin, C., Green, M., and Tubbesing, S., 1995. The Hyogoken-Nanbu Earthquake. Preliminary

- Reconnaissance Report, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland CA, USA.
- CSI, 2008. SAP2000 Structural Analysis Programs - User's Manual, Computers and Structures Berkeley California, USA.
- CSI, 2023. PERFORM-3D Computer Software. Computers and Structures, Berkeley, California, USA.
- ÇŞB, 2016. Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYDE), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Ankara.
- Eguchi R.T., Goltz J.D. and Taylor C.E., 1998. Direct economic losses in the Northridge Earthquake: A Three-Year Post-Event Perspective. *Earthquake Spectra*, 14, 2, 245-264.
<https://doi.org/10.1193/1.1585998>
- Erochko J., Christopoulos C., Tremblay R. and Choi H., 2011. Residual drift response of SMRFs and BRB frames in steel buildings designed according to ASCE 7-05. *Journal of Structural Engineering*, 137, 5, 589-599.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000296)
- FEMA, 1997. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings: FEMA 273, Federal Emergency Management Agency Washington, D.C., USA.
- Garlock, M., Ricles, J. and Sause, R., 2005. Experimental studies of full scale posttensioned steel connections. *Journal of Structural Engineering*, 131, 3, 438-448.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:3\(438](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(438)
- Hancock J., Bommer J.J. and Stafford P.J., 2008. Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 1585-1607.
<https://doi.org/10.1002/eqe.827>
- Hu, S., Wang, W. and Qu, B., 2020. Seismic economic losses in mid-rise steel buildings with conventional and emerging lateral force resisting systems. *Engineering Structures*, 204, 110021.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110021>
- Kamaris, G.S., Papavasileiou, G.S., Kamperidis, V.C. and Vasdravellis, G., 2022. Residual drift risk of self-centering steel MRFs with novel steel column bases in near-fault regions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 162, 107391.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107391>
- Kim, H.-J. and Christopoulos, C., 2008. Friction damped posttensioned self-centering steel moment-resisting frames. *Journal of Structural Engineering*, 134, 11, 1768-1779.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:11\(1768](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:11(1768)
- McCormick, J., Aburano, H., Ikenaga, M., and Nakashima, M., 2008. Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements. Proc. 14th World Conf. Earthquake Engineering, Seismological Press of China, Beijing, 05-06-0071.
- Narayan, S., Shrimali, M., Bharti, S.D. and Datta, T.K., 2023. Effects of aftershocks on the performance of steel building frames. *Structures*, 56, 104959.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104959>
- Pampanin, S., Christopoulos, C., and Priestley, M. J. N., 2003. Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations. Part II: Multi-degree of freedom systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 7, 1, 119-147.
<https://doi.org/10.1080/13632460309350444>
- PEER, 2009. Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings, prepared by the Tall Buildings Initiative Guidelines Working Group for the Pacific Earthquake Engineering Research Center, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Pettinga, D., Christopoulos, C., Pampanin, S., and Priestley, N. 2007. Effectiveness of simple approaches in mitigating residual deformations in buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36, 12, 1763-1783.
<https://doi.org/10.1002/eqe.717>
- Ramirez C.M. and Miranda E., 2012. Significance of residual drifts in building earthquake loss estimation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41, 11, 1477-1493

<https://doi.org/10.1002/eqe.2217>

Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E., 2006a. Evaluation of residual drift demands in regular multi-story frames for performance-based seismic assessment. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**, 1609–1629.

<https://doi.org/10.1002/eqe.593>

Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E., 2006b. Residual displacement ratios for assessment of existing structures." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**, 315–336.

<https://doi.org/10.1002/eqe.523>

SeismoMatch, 2023. A program for spectral matching of earthquake records, Seismosoft-Earthquake Engineering Software Solutions.

SEOAC, 1995. Performance Based Seismic Engineering of Buildings: Vision 2000, Structural Engineers Association of California, USA.

Tremblay, R., Lacerte, M. and Christopoulos, C. (2008). Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces. *Journal of Structural Engineering*, **134**, **1**, 108–120.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(108\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(108))

Wu, C.-L., Loh, C.-H., Yang, Y.-S. and Lin, C. H., 2004. Consideration of collapse and residual deformation in reliability-based performance evaluation of buildings. Proc. 13th World Conf. on Earthquake Engineering, Canadian Association for Earthquake Engineering (CAEE), Vancouver, Canada, 716.

İnternet kaynakları

1-<https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases> (05.01.2023)