



TBDY 2018 ile Tasarlanan Kompozit Binaların Ana ve Artçı Depremlerde Davranışı

Behaviour of Composite Buildings Designed with TBDY 2018 in Main and Aftershocks

Serkan ETLİ¹ , Melek AKGÜL^{2*} 

¹Munzur Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, 62000, Tunceli, TÜRKİYE

^{2,*}Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO, 62000, Tunceli, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/01/2023

Kabul / Accepted: 27/02/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 06/06/2023

Son Versiyon/Final Version: xx/xx/xxxx

Özet

Çalışma kapsamında 5, 10, 15 ve 20 katlı moment aktaran kompozit çerçevelerden oluşan yapıların TBDY 2018 tasarım koşulları ile ZA grubu zeminler için tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapıların zaman tanım alanında dinamik analiz kullanılarak davranışları değerlendirilmiştir. Kullanılan depremler ana deprem ve artçı depremlerden oluşan seriler halinde seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar çatı katı yer değiştirmeleri, taban kesme oranları, katlar arası ötelenme ve taban ivmeleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen yapıların söz konusu ana ve artçı depremler etkisi altında incelenen parametreler açısından yeterli bir davranış sergilediği ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Ana ve artçı depremler, Kompozit moment aktaran çerçeve, TBDY 2018, Zaman tanım alanında dinamik analiz”

Abstract

Within the scope of the study, the designs of the structures consisting of 5, 10, 15 and 20 story moment resisting composite frames were carried out for TBDY 2018 and ZA group soils. The behavior of the designed structures was evaluated by using dynamic analysis in the time history domain. The earthquakes used were selected in series consisting of the main earthquake and aftershocks. The results obtained were evaluated in terms of roof displacements, base shear coefficients, interstory drift and base accelerations. The structures examined within the scope of the study show excellent behavior under the influence of the main and aftershocks.

Key Words

“Main and aftershocks, Composite moment resisting frame, TBDY 2018, Dynamic analysis in time history”

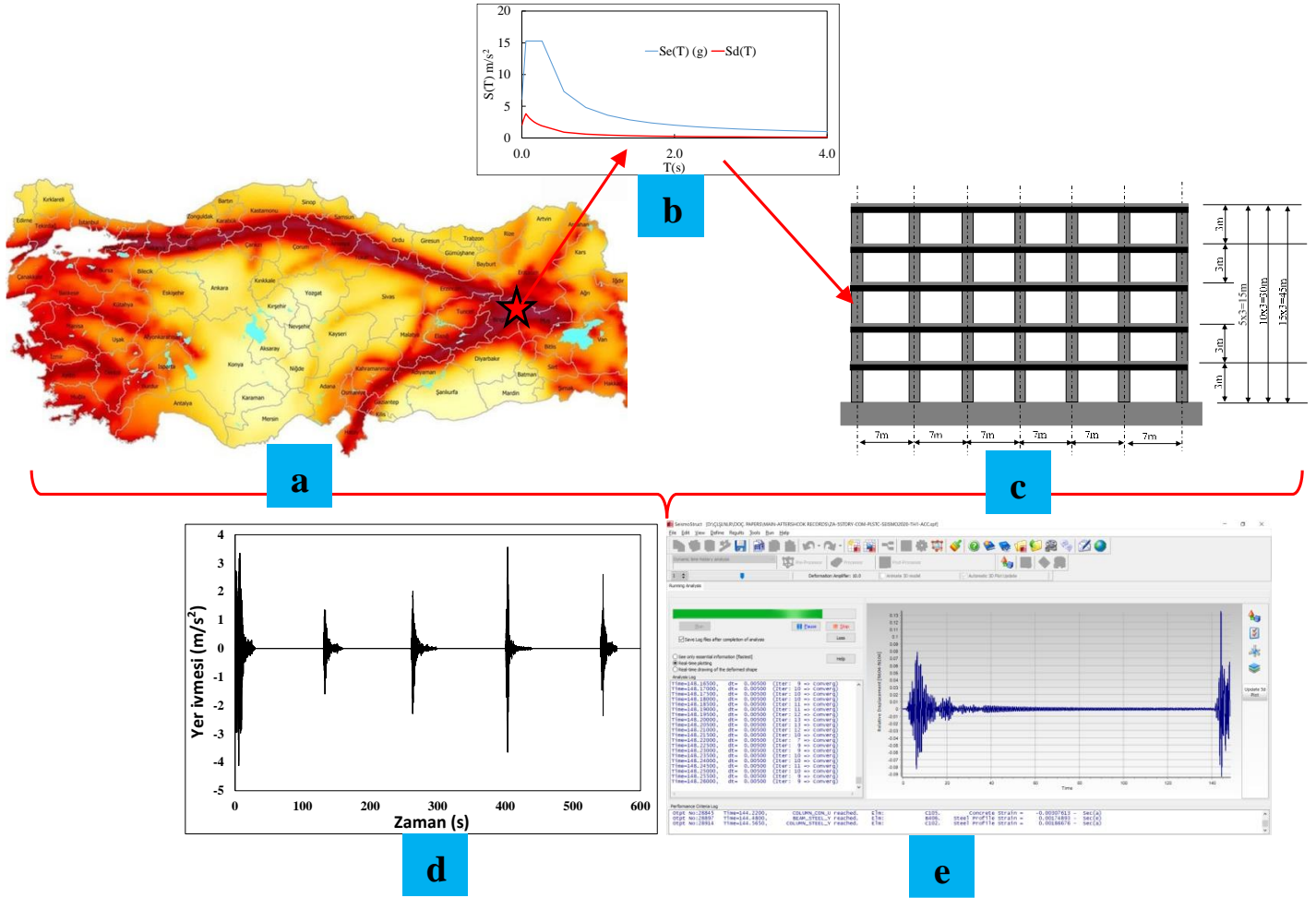
1. Giriş

Ana depremi takiben aynı fay düzleminde, ana deprem merkezine yakın olarak meydana gelen daha düşük şiddetteki depremlere artçı sarsıntılar denir. Ana depremden daha düşük şiddete sahip olmalarına rağmen, ana depremin hasar etkisine bağlı olarak taşıma gücü zayıflamış yapılarda çoğu zaman göçmeye neden olurlar (Coburn ve Spence, 2002). Artçı şokların yapılar üzerindeki yıpratıcı etkisi ve yapının davranışı hakkında yapılan çalışmalar depremlerin gündeme geldiği birçok ülkede önemli bir araştırma sorunsalıdır. Birçok fonksiyona bağlı olan bu araştırma konusu, tamamen açıklığa kavuşturulamamış kabul edilmektedir ve halen önemli bir inceleme konusudur. Depreme dayanıklı tasarım bağlamında ardışık depremlerin etkisi, yalnızca çerçevesel yapılar ve köprüler için değil; aynı zamanda anıtsal ve antik yapılar içinde hayati öneme sahiptir (Xie vd., 2012; Papaloizou vd., 2016). İtalya (Friuli, 1976; Umbria-Marche, 1997), Yunanistan (1986, 1988), Türkiye (1999) ve Meksika (1993, 1994, 1995) dahil olmak üzere dünyanın farklı noktalarında karşılaşılan muhtemel şiddette artçı şokların meydana geldiği sismik olay örneklerini içeren çalışmalar vardır (Li ve Ellingwood, 2007; Pirooz vd., 2021). Artçı şokların farklı taşıyıcı sistem ve tasarıma sahip yapılar üzerindeki etkisi betonarme (RC) çerçeveler (Jalayer vd., 2011; Raghunandan vd., 2012, Raghunandan vd., 2015; Hosseinpour ve Abdelnaby, 2017; Jalayer ve Ebrahimian, 2017), ahşap çerçeveler (Goda ve Salami, 2014), çelik çerçeveler (Ruiz-García vd., 2018) ve RC perde duvar çerçeveler (Jamnani vd., 2018) gibi alt fonksiyonlara bağlı olarak değerlendirilmiştir. Deprem sonrası yapıların hasar tespiti ve kullanılabilirlik karar durumu; bireysel ve bölgesel yapı hasar tahminine dayanır. Tüm bunların yansısı, bir ana ve artçı deprem dizisine maruz kalan binalarda meydana gelmesi muhtemel bölgesel hasarların tahminine ait kabul gören çözümler mevcut değildir.

Yapısal modelleme yetkinliğinin çok daha belirgin ilerlemeler kaydettiği günümüz teknolojilerinde, gerilmeler, yer değiştirmeler, sınır yükleri ve hasar mekanizmaları gibi kriterlere bağlı daha iyi tahminler veren analizler mümkündür (Hatzigeorgiou ve Liolios, 2010). Gelişen üretim teknolojileri ve yapı sistemi üretim teknikleri ile depremlerin dinamik etkileri karşısında yüksek enerji sönmüleme kapasitesine sahip yapı tasarımları öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, çelik ve betonun üstün özellikleri bir araya getirilerek tasarlanan kompozit yapılar, tasarım aşamasında tasarımcıya etkin çözümler sunmaktadır. Beton yapılar masiftir ve bu nedenle daha fazla sismik ağırlık ve dolayısıyla daha az yanal yer değiştirme sergiler, çelik yapılar yapıya daha fazla yanal yer değiştirme ve süneklik katar, bu da beton/betonarme yapıların deprem ve rüzgâr gibi yan etkilere tepkisi ile kıyaslandığında daha üstündür. Beton ve çelikten oluşan kompozit yapı sistemleri ise hem çeliğin hem de betonun üstün özelliklerini kullanarak daha az maliyetle, daha hızlı imalat ve artan yangın direnci gibi önemli avantajlar sağlar. Bu nedenle, yapısal davranış, mukavemet ve yalıtım özellikleri göz önüne alındığında moment aktaran kompozit çerçeveler (MAKÇ) en ekonomik tasarım olarak kabul edilmektedir. Bu tür bir ekonomi, deprem yüklerinin etkisi altında hizmet ömrünü tamamlamakta olan binalarda önemlidir. Kompozit yapıların tasarımında çelik ve betonun birleşiminden kaynaklanan süneklik ve deprem yüklerine karşı enerji absorbe etme performansının yüksek olması, bu yapıların deprem riski fazla olan bölgelerde uygulanabilirliğini artırmaktadır. Moment aktaran çerçeve (MAÇ) olarak tasarlanan yapılarda, yanal deprem kuvvetlerine dayanım, esas olarak kiriş ve kolon elemanlarının eğilme dayanımları ve kapasitelerine bağlıdır. Bu tür yapıların tasarımı sırasında karşılaşılan en büyük zorluk kolon elemanlarının kompozit eleman olarak tasarlanmasıdır. Literatürde Eurocode (EN 1993-1-1, 2002; EN 1994-1-1, 2004; EN 1998-1-1, 2004; EN 1992-1-1, 2004) normları kullanılarak ZC sınıfı zeminlerde MAKÇ olarak tasarlanan çerçevelerin performansına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca çerçevesel düzenli-düzensiz yapılara ait davranışlar ve çelik çaprazlı sistemler de performansları açısından ZC sınıfı zeminlerde tasarım koşulları açısından incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmaların genelinde de ZC sınıfı zeminlerde, yüksek narinlik oranına (bir binanın yüksekliği ve genişliği arasındaki oran) sahip yapısal sistemler değerlendirilmiştir (Etili ve Güneyisi, 2020; Doğan ve Kalaylı, 2019; Etili ve Güneyisi, 2021; Etili ve Güneyisi, 2022). Ancak daha düşük narinlik oranına sahip yapıların zemine mesnetlenme durumunun ZC zemin sınıfından daha iyi zemin yapısına sahip zemin sınıflarında incelendiği çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışma kapsamında şiddetli deprem etkilerinin yer aldığı narinliği düşük yani daha masif yapıların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında beton dolgulu çelik tüp (BDÇT) kolonlara ve kompozit kirişlere sahip 5 ila 20 katlı MAKÇ binalarının ana ve artçı depremler altındaki sismik davranışları incelenmiştir. Literatürde BDÇT ile tasarlanan yapılara ait analitik incelemeler araştırmacılar tarafından detaylı olarak sunulmuştur. Analitik ve deneysel modellerin karşılaştırmalı olarak incelenmesi araştırmacılar ve tasarımcılar açısından büyük bir önem arz etmektedir. BDÇT analitik modellemelerdeki yakınsama oranının doğrudan yapısal davranışı etkilemiş olduğu araştırmacılarca gösterilmiştir (Etili, 2021). Ayrıca BDÇT elemanlarda beton çekirdek üretiminde geri dönüşüm malzemesi kullanılarak üretilen elemanların yapısal sistemdeki davranışları da incelenmiştir. Bu bağlamda literatürde yakın zamanda yapılan özellikle atık araç lastiği katkılı kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinin yansısı üretilen elemanlarda boyut etkisinin çekirdek beton davranışına katkısının yer aldığı çalışmalar önem kazanmıştır (Akgül vd., 2020; Cemalgil ve Etili, 2020; Etili, 2021; Etili vd., 2018).

MAKÇ'ler, Kuzey Anadolu Fay (KAF) ile Doğu Anadolu Fay (DAF) hattının birleştiği Karlıova ilçe merkezinde inşa edileceği varsayılarak modellenmiştir (Şekil 1a). Yapıların tasarım ve analizinde SeismoStruct (SeismoSoft, 2018) yazılımı kullanılmıştır. Yapıların tasarım sınıflarına esas tasarım spektrumları belirlenirken ilgili lokasyondan alınan zemin ve deprem parametreleri ve sistemin yüksek süneklik sınıfı baz alınarak elde edilmiştir (Şekil 1b). Hesaplanan tasarım spektrumu ile ilgili yapıların taşıyıcı elemanlarının kesitleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) temel alınarak tamamlanmıştır (Şekil 1c). Literatürde yapıların esnek olmayan tepkilerinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan zaman tanım alanında dinamik analizler tercih edilmiştir. Analizler ana deprem ve artçılarından oluşan seri depremler olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1d). Ayrıca, MAKÇ yapılarının daha gerçekçi davranışlarını elde etmek için doğrusal olmayan malzeme ve modelleme teknikleri kullanılarak modelleme ve analizler tamamlanmıştır (Şekil 1e). Analiz esnasına ait SeismoStruct yazılımından elde edilen sonuçlar değerlendirilerek sonuçlar tartışılmıştır. MAKÇ yapıları için katlar arası ötelenme, taban kesme kuvvetleri ve eleman deformasyon durumları incelenmiştir. Ayrıca araştırma metodolojisinin detaylı Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma metodolojisi (a) Türkiye deprem haritası; (b) Tasarım spektrumu örneği; (c) Tasarımı yapılan binaların yükseklik görünümleri; (d) Ana ve Artçı Sarsıntı örneği; (e) SeismoStruct yazılımı analiz ara yüzü.

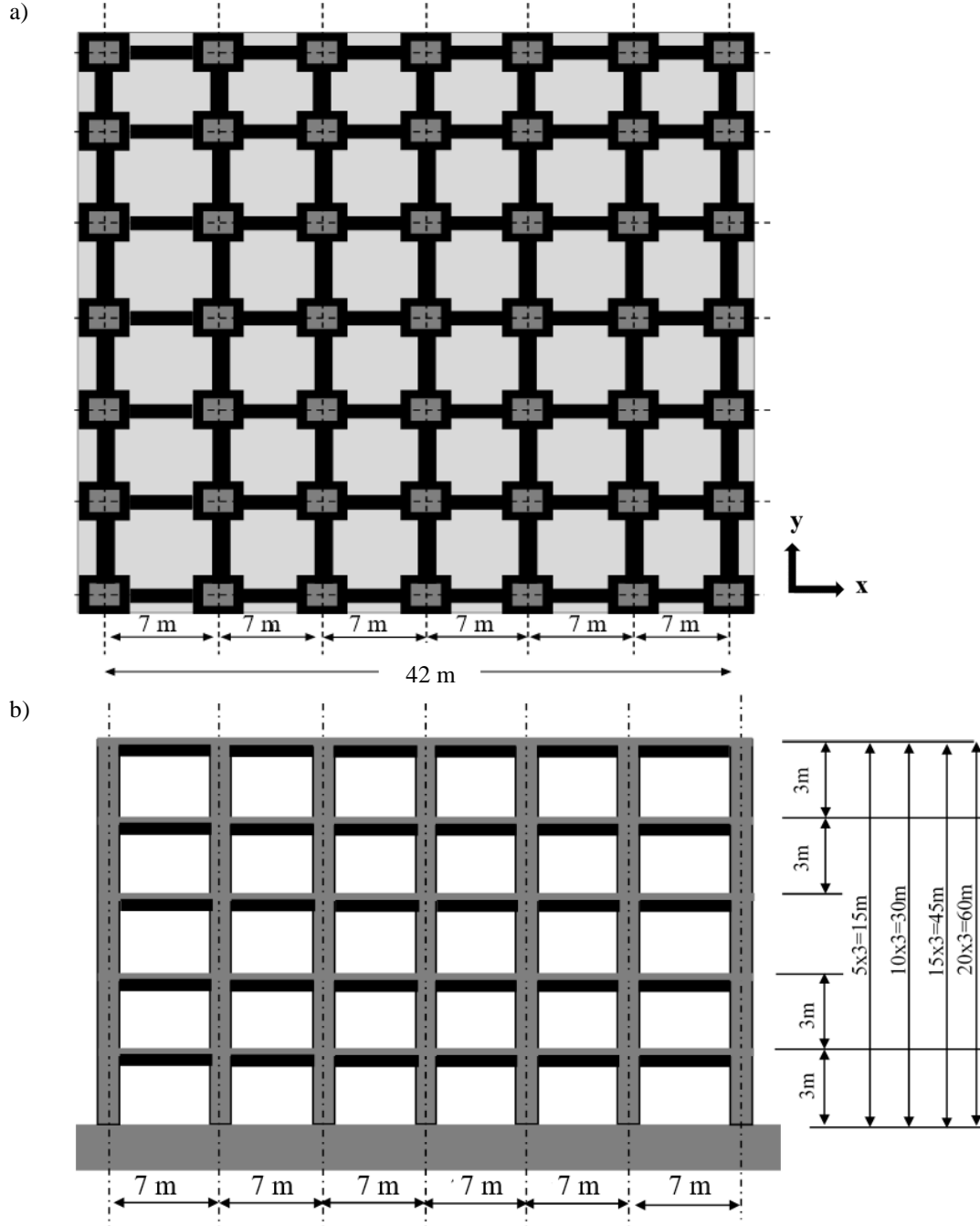
2. Materyal ve Metot

2.1. Yapısal Konfigürasyon ve Tasarım Prosedürleri

Çalışma kapsamında incelenen 5, 10, 15 ve 20 katlı kompozit çerçeveler, yüksek süneklilikte ve TBDY 2018 temel alınarak sismik olarak tasarlanmıştır. Tüm çok katlı ve çok açıklıklı yapıların plan geometrileri aynı seçilmiştir. Tasarlanan yapıların plan ve ceph görünüşleri Şekil 2'de verilmiştir. BDÇT kolonları planda x ve y doğrultusunda 7 m ara ile yerleştirilmiştir. Döşemelerdeki döşeme kalınlıkları, tasarım özelliklerine ve tasarım kodu gereksinimlerine göre boyutlandırılmıştır. BDÇT kompozit kolon elemanları için içi boş kare çelik profiller ve kompozit kirişler için I çelik profiller (IPE), MAKÇ'lerin tasarımında kullanılmak üzere Avrupalı çelik üreticilerinin kataloglarından seçilmiştir. Kompozit kirişlerin davranışının tasarım aşamasında elverişsiz koşullardan kaçınmak için, çelik kiriş ile betonarme döşeme arasında tam bir kesme etkileşimi olduğu varsayılarak tamamlanmıştır. Yapının tasarımında, döşeme ölü yükü döşeme ağırlığına ek olarak döşeme kaplamaları ve bölmeler için 2 kN/m^2 seçilirken hareketli yük 3 kN/m^2 olarak seçilmiştir. Yerçekimi yükleri altında yapılan analizler sonucunda, MAKÇ'ler, yeterli dayanıma sahip en kesit özellikleri ön tasarım olarak modellenmiştir. Daha sonra ön tasarımda elde edilen kesit özellikleri ile üretilen MAKÇ'ler TBDY 2018 koşullarında deprem yük etkileri açısından değerlendirilerek tasarımlara son şekli verilmiştir (Etlı,2022). Kullanım amacı bakımından konut türü yapılar model olarak tasarlanmıştır. Yapı servis amacına uygun olarak gerekli tasarım parametreleri TBDY 2018'den alınmıştır. İlgili parametreler çalışma kapsamında detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, MAKÇ'lerin modal analizi için tepki spektrumlarında Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) ve interaktif deprem tehlike haritasından alınan konuma bağlı parametreler kullanılarak spektrumlar üretilmiştir. Zemin sınıfı olarak ZA sınıfı zemin kullanılmıştır. Ayrıca yapıların sünekliliği de dikkate alınarak süneklilik sınıfına uygun eleman kesitlerinin kullanılmasına özen gösterilmiştir. TBDY 2018'de kompozit kolonlu sistemlerde, çelik taşıyıcı sistemler için verilen Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R) ve Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) kullanılmıştır. "Süneklilik düzeyi yüksek taşıyıcı sistem olarak modellenen çelik yapılarda deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklilik düzeyi yüksek çelik çerçevelerle karşılandığı durumlarda R ve D katsayısı sırasıyla 8 ve 3 olarak alınmaktadır" ibaresine dayanılarak binalar yüksek süneklilik düzeyine sahip MAKÇ tasarımlarında R ve D katsayısı sırasıyla 8 ve 3 olarak kabul edilmiştir.

2.2. Sayısal Modelleme

Bu çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi veri tabanı sekiz gerçek sismik diziden oluşmaktadır. Bu sismik diziler Chalfant Valley (Temmuz 1986-2 olay), Coalinga (Temmuz 1983-2 olay), Imperial Valley (Ekim 1979-2 olay), Mammoth Lakes (Mayıs 1980-5 olay), Whittier Narrows (Ekim 1987-2 olay), Irpinia (Kasım 1980-2 olay) ve Chi-Chi (Eylül 1999-4 olay), depremleri olarak seçilmiştir. Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma (PEER (The Pacific Earthquake Engineering Research Center)) Merkezi'nin (PEER, 2014) kuvvetli yer hareket veri tabanından indirilen bu depremlerin tam listesi Tablo 1'de verilmiştir. PEER veri tabanındaki her ardışık yer hareketi kaydı, birbirini izleyen iki sismik olay arasında 100 s'ye eşit bir zaman aralığının uygulandığı tek bir yer hareketi kaydı (seri dizi) haline getirilerek kullanılmıştır (Şekil 3). Bu zaman aralığı sıfır ivme koordinatlarına sahiptir ve herhangi bir yapının sönümlenme nedeniyle hareketini durdurmak için kesinlikle yeterli olduğu görülmüştür. SeismoStruct yazılımı, fiber elemanlarla modellenen kompozit kolon ve kiriş kesitleri ile tasarlanan MAKÇ'lerin doğrusal olmayan analizini yapmak için kullanılmıştır.



Şekil 2. Bina özellikleri (a) Kat planı; (b) Cephe görünüşü.

Tablo 1. Deprem kayıtlarının özellikleri.

Kod	Kayıt Sırası	Olay	Yıl	Bileşen	İstasyon	PGA (g)	M	R _{jb} (km)	R _{rup} (km)
TH-1	547	Chalfant Valley-01	1986	270	Zack Brothers Ranch	0.272	5.77	6.07	6.39
	558	Chalfant Valley-02	1986			0.447	6.19	6.44	7.58
TH-2	547	Chalfant Valley-01	1986	360	Zack Brothers Ranch	0.236	5.77	6.07	6.39
	558	Chalfant Valley-02	1986			0.401	6.19	6.44	7.58
TH-3	406	Coalinga-05	1983	0	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	0.341	5.77	7.02	10.78
	418	Coalinga-07	1983			0.481	5.21	7.31	10.89
TH-4	406	Coalinga-05	1983	90	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	0.519	5.77	7.02	10.78
	418	Coalinga-07	1983			0.580	5.21	7.31	10.89
TH-5	181	Imperial Valley-06	1979	140	El Centro Array #6	0.447	6.53	0	1.35
	204	Imperial Valley-07	1979			0.160	5.01	7.4	10.37
TH-6	181	Imperial Valley-06	1979	230	El Centro Array #6	0.449	6.53	0	1.35
	204	Imperial Valley-07	1979			0.274	5.01	7.4	10.37
TH-7	230	Mammoth Lakes-01	1980	90	Convict Creek	0.419	6.06	1.1	6.63
	233	Mammoth Lakes-02	1980			0.163	5.69	2.91	9.46
	236	Mammoth Lakes-03	1980			0.233	5.91	2.67	12.43
	240	Mammoth Lakes-04	1980			0.371	5.7	1.37	5.32
	248	Mammoth Lakes-06	1980			0.266	5.94	6.44	12.39
TH-8	230	Mammoth Lakes-01	1980	90	Convict Creek	0.442	6.06	1.1	6.63
	233	Mammoth Lakes-02	1980			0.183	5.69	2.91	9.46
	236	Mammoth Lakes-03	1980			0.175	5.91	2.67	12.43
	240	Mammoth Lakes-04	1980			0.485	5.7	1.37	5.32
	248	Mammoth Lakes-06	1980			0.314	5.94	6.44	12.39
TH-9	691	Whittier Narrows-01	1987	270	San Marino-SW Academy	0.147	5.99	1.57	15.94
	716	Whittier Narrows-02	1987			0.138	5.27	4.42	12
TH-10	691	Whittier Narrows-01	1987	360	San Marino-SW Academy	0.194	5.99	1.57	15.94
	716	Whittier Narrows-02	1987			0.206	5.27	4.42	12
TH-11	291	Irpinia, Italy-01	1980	0	Rionero In Vulture	0.096	6.9	27.49	30.07
	302	Irpinia, Italy-02	1980			0.099	6.2	22.68	22.69
TH-12	291	Irpinia, Italy-01	1980	270	Rionero In Vulture	0.099	6.9	27.49	30.07
	302	Irpinia, Italy-02	1980			0.096	6.2	22.68	22.69
TH-13	1512	Chi-Chi, Taiwan	1999	E	TCU078	0.447	7.62	0	8.2
	2390	Chi-Chi, Taiwan-02	1999			0.052	5.9	13.94	15.36
	2628	Chi-Chi, Taiwan-03	1999			0.448	6.2	0	7.62
	3473	Chi-Chi, Taiwan-06	1999			0.266	6.3	5.72	11.52
TH-14	1512	Chi-Chi, Taiwan	1999	N	TCU078	0.310	7.62	0	8.2
	2390	Chi-Chi, Taiwan-02	1999			0.042	5.9	13.94	15.36
	2628	Chi-Chi, Taiwan-03	1999			0.271	6.2	0	7.62
	3473	Chi-Chi, Taiwan-06	1999			0.387	6.3	5.72	11.52

TH-: Deprem kaydı

PGA: Maksimum yer ivmelenmesi

M: Moment magnitud değeri

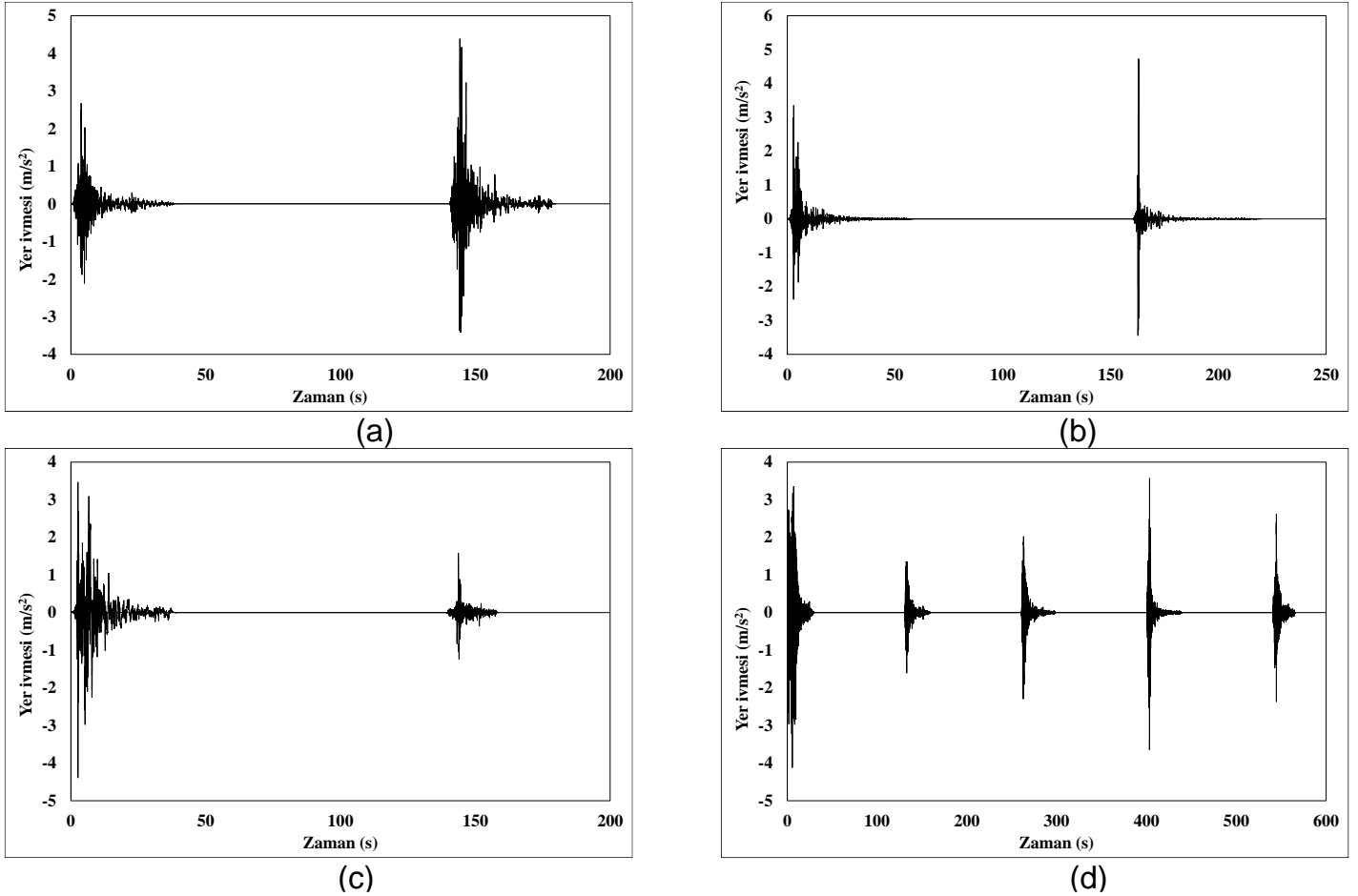
R_{jb} (km): Joyner-Boore mesafe birimi

R_{rup} (km): Kırılma düzleminde en yakın noktaya olan eğik mesafe

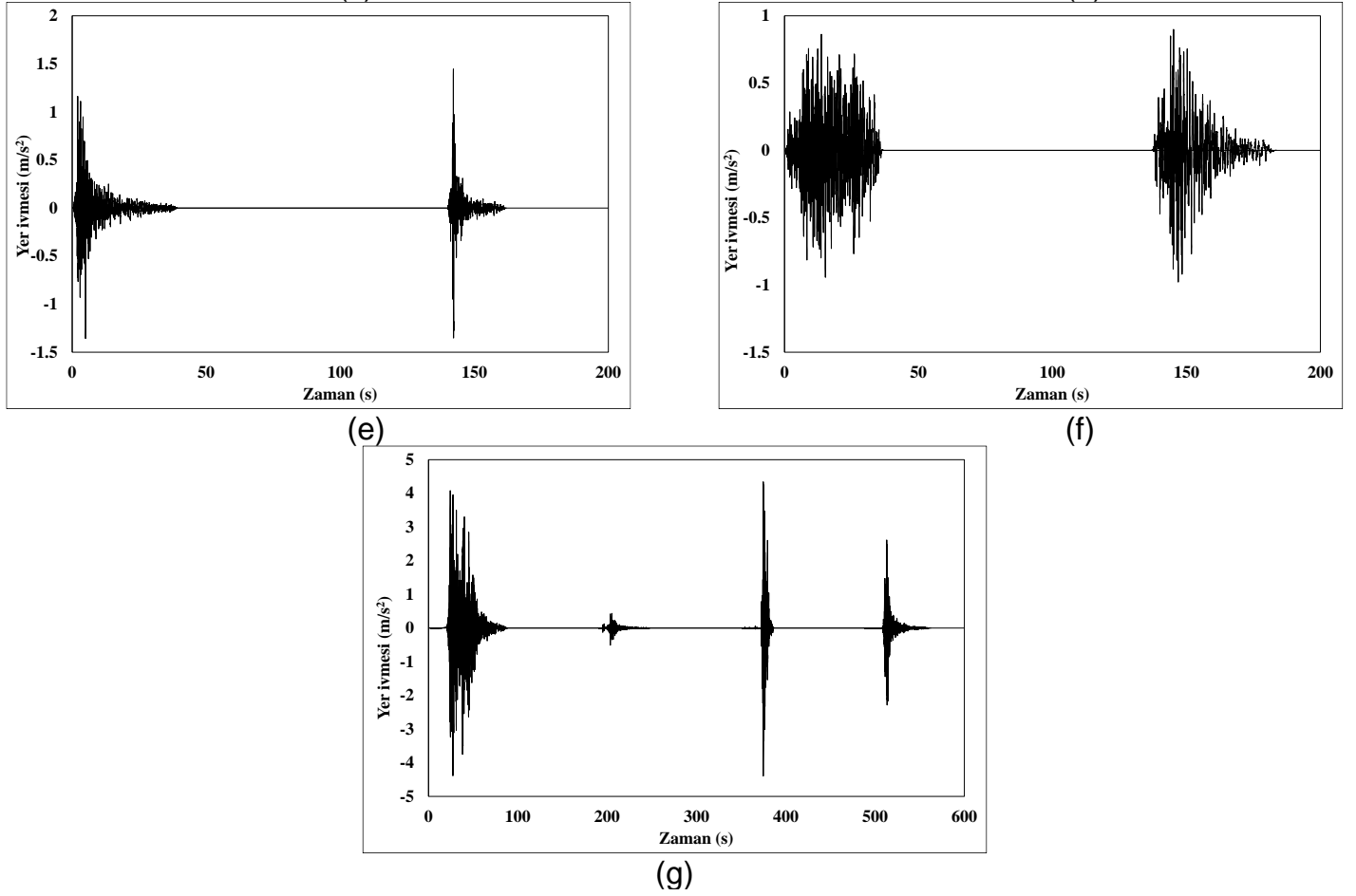
Çalışmanın analiz sürecinde, kompozit kiriş elemanlarda çelik ve betonarme döşeme arasındaki kesme bağlantıları, benzer çalışmalarda olduğu gibi, tam etkileşimli olarak modellenme varsayımına dayanır (Elghazouli vd., 2008). Ayrıca, çelik kirişin ağırlık merkezi ile beton döşemenin ağırlık merkezi arasındaki fark dikkate alınarak kompozit kiriş çerçeve modeli kullanılmıştır.

Kompozit kirişlerin modellenmesine dayalı literatür çalışmalarında kullanılan efektif döşeme genişliği teorik modelleme ve deneysel çalışma verilerinin karşılaştırılması esasına dayanır (Andre Plumier, 2001; Castro vd., 2007). Bu çalışmalara göre; etkin döşeme

genişliğine bağlı elde edilen teorik modellerin kabul edilebilir doğruluk düzeyinde olduğu ve davranışı yeterince yansıttığı vurgulanmıştır (Andre Plumier, 2001; Castro vd., 2007). Eleman modellerinde kullanılan malzemelerin çelik elastisite modülü (E_s), poisson oranı (ν) ve sertleşme katsayısı (μ) değerleri sırasıyla 210×10^3 N/mm², 0,3 ve 0,005 olarak alınmıştır. Tasarımda kullanılan malzeme sınıfları ekonomik ve kapsamlı çalışmalarda fazlaca tercih imkanı bulmasına bağlı olarak; çelik elemanlar için S235 (St 37), beton ise C30 olarak seçilmiştir. (Etili, 2021; Etili ve Güneyisi, 2020; Etili ve Güneyisi, 2021; Etili ve Güneyisi, 2022; Hauke, 2008). Ayrıca 5, 10, 15 ve 20 katlı binalarda kullanılan kolon kesitleri [($b \times t$), (kesit ebatı x et kalınlıkları)] sırasıyla 450x12 mm, 500x32 mm, 600x40 mm ve 700x50 mm olarak detaylandırılmıştır. Tüm bina ve katlarda ise kompozit kirişlerde IPE360 kesiti ile 150 mm döşeme kalınlığı hesaplanmıştır. Ayrıca modelleme ile deneysel çalışmalar arasındaki yakınsama daha önce değerlendirilmiştir (Etili, 2021). Teorik ile deneysel modeller arasında genele bakıldığında en yüksek oranda yakınsamaya sahip çift doğrusal (bilinear) çelik malzeme modeli kullanılmıştır (Etili, 2021). Kullanılan deprem kayıtlarının bileşenleri birleştirilmiştir. Her depremin ana ve artçı olmak üzere serileri birleştirilmiştir. Toplamda $7 \times 2 = 14$ adet ana ve artçı depremden oluşan seri kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan ana ve artçı kayıtlarına ilişkin örnekler Şekil 3'te gösterilmiştir.



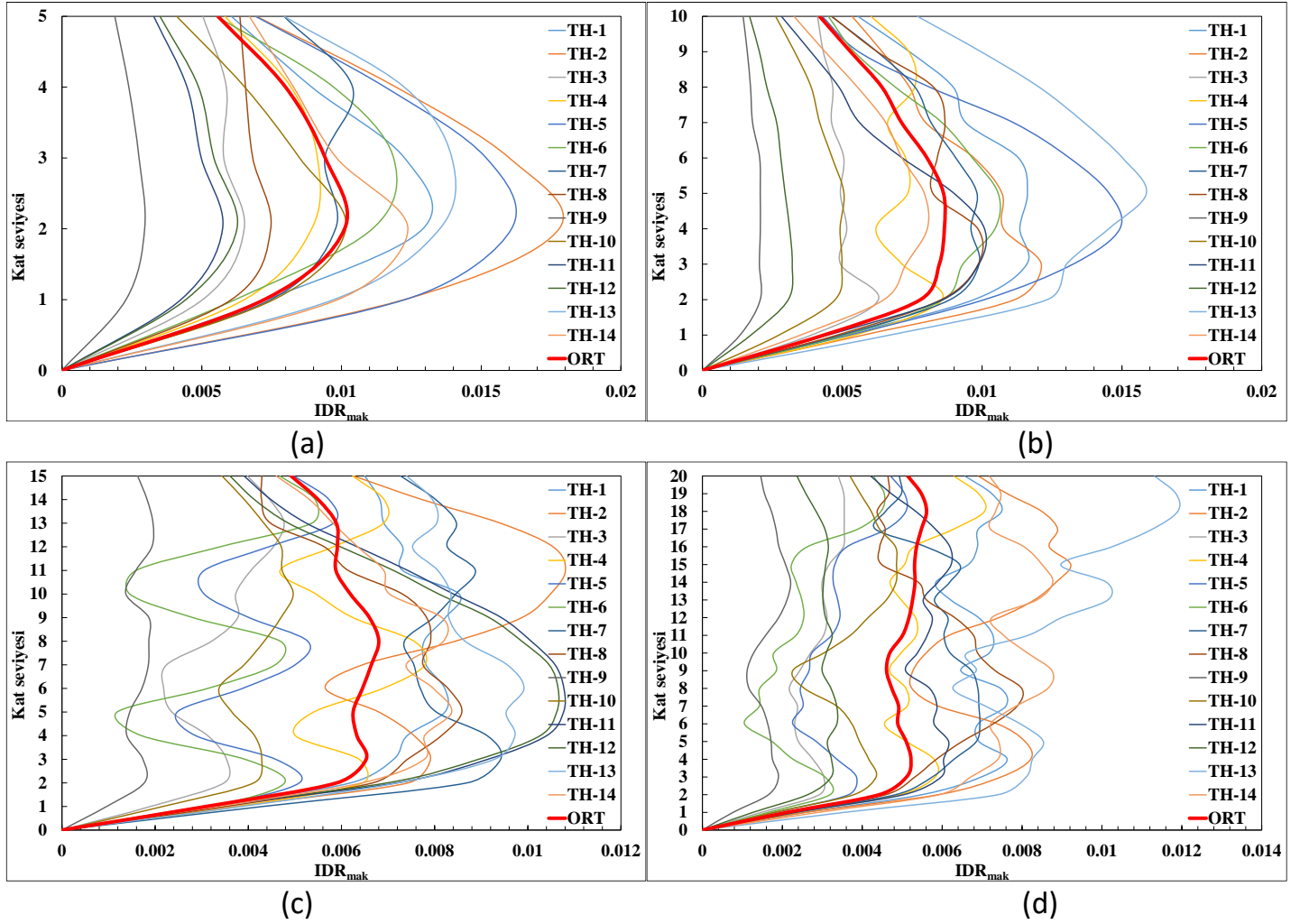
Şekil 3. Örnek ana ve artçı deprem kayıtları senkronizasyonu (a) Chalfant Valley; (b) Coalinga; (c) Imperial Valley; (d) Mammoth Lakes; (e) Whittier Narrows; (f) Irpinia, Italy; (g) Chi-Chi, Taiwan.



Şekil 3. (Devamı) Örnek ana ve artçı deprem kayıtları senkronizasyonu (a) Chalfant Valley; (b) Coalinga; (c) Imperial Valley; (d) Mammoth Lakes; (e) Whittier Narrows; (f) Irpinia, Italy; (g) Chi-Chi, Taiwan.

3. Bulgular ve Tartışma

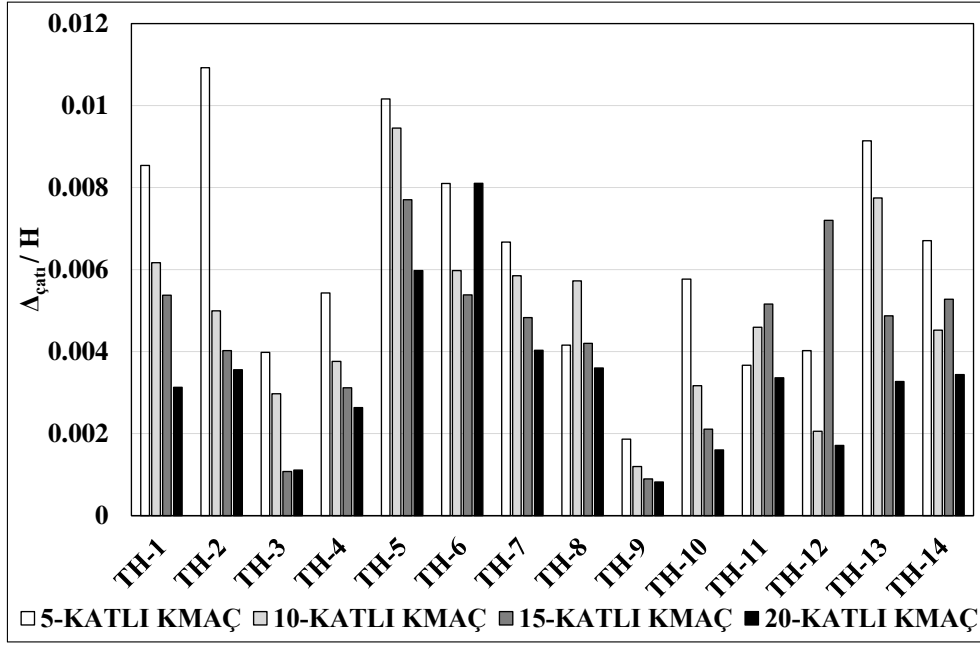
Yapıların performans analizlerinde önemli bir parametre olan katlar arası görelî ötelenme değerine (IDR) ait veriler çalışma kapsamında incelenmiştir. Ana ve artçı depremler sonrasında yapıda katlar arasında oluşan maksimum IDR değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Şekil 4'te gösterilmiştir. Yatay eksen kat deplasmanını ve düşey eksen ise kat seviyesi gösterecek şekilde verilmiştir. Depremlere ilişkin isimlerde kısaltma olarak "TH-X" sembolü kullanılmıştır. TH sembolü deprem kaydını nitelendirmiş ve sonrasında kullanılan "X" ise kayıt numarasını sembolize etmektedir. İlgili detaylar Tablo 1'de verilmiştir. Deprem kayıtlarının bileşenleri ayrı ayrı birleştirilmiştir. Seçilen çerçevelerden elde edilen ana ve artçı depremler x-x doğrultusunda TH-1'den TH-14'e kadar uygulanarak sonuçlar detaylandırılmıştır.



Şekil 4. Binaların TH sonuçları için IDR maksimum değerleri. (a) 5; (b) 10; (c) 15; (d) 20 katlı MAKÇ.

3.1. Çatı Katı Ötelenme Oranları

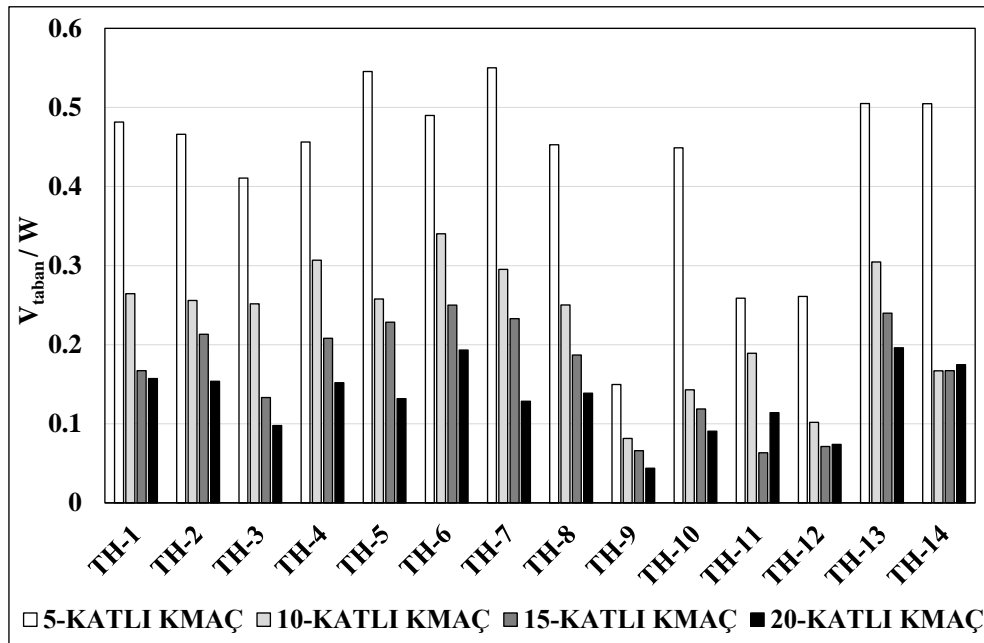
Çalışma kapsamında elde edilen çatı katı yatay deplasman değerlerinin toplam yapı yüksekliğine oranı ($\Delta_{çatı}/H$) grafiklerde her ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu için TH-1’den TH-14’e kadar değerlendirilmiş ve Şekil 5’te sunulmuştur. Ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri 16 deprem durumu için sayısal ortalama olarak, kat bazında elde edilmiş ve Şekil 4’te sunulan grafikte “ORT” olarak verilmiştir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda olduğu üzere; yapısal performansların elde edilmesi esnasında enerji sönmüleme kapasitesini temel alan parametre olarak kabul edilen $\Delta_{çatı}/H$ oranı bu çalışma kapsamında da değerlendirilmiştir (Etili ve Güneyisi, 2020, 2021, 2022). Elde edilen veriler incelendiğinde 5-MAKÇ için $\Delta_{çatı}/H$ sonuçları 0.00186 ile 0.0109 arasında değişmekte iken ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri 0.00637 olarak elde edilmiştir. $\Delta_{çatı}/H$ değerlerinin değişim aralığı 10- MAKÇ için 5- MAKÇ’a göre alt ve üst limitlerde sırasıyla %36 ve %13 azalma ile elde edilmiştir. Diğer taraftan bu yapıda ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri yine 5- MAKÇ’a göre %23.5 oranında azalmaktadır. 15- MAKÇ ve 20- MAKÇ’da ise $\Delta_{çatı}/H$ değeri 5- MAKÇ’a göre ortalama alt ve üst $\Delta_{çatı}/H$ limit değerleri için sırasıyla %54 ve %28 azalmaktadır. Diğer taraftan, 15- MAKÇ ve 20- MAKÇ için ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri sırasıyla %31 ve %48 azalmıştır (Şekil 5). Literatürde yer alan diğer çalışmalarda (Etili ve Güneyisi, 2020; Etili ve Güneyisi, 2021; Etili ve Güneyisi, 2022) elde edilen performans eğrilerine bakıldığında $\Delta_{çatı}/H$ değeri ortalama 0.01 değerine ulaştığında taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Yapısal sistemlerin tasarımında özellikle eşdeğer deprem yükü yöntemi gibi yöntemlerde doğal titreşim periyotları önemli bir yere sahiptir. Elde edilen tasarım spektrumlarından alınan ivme değerleri hesaplanan doğal titreşim periyodu kullanılarak elde edilmektedir. Elastik hesaplarda yapısal sistemde yer alan elemanların elastik düzeyde yaptığı kabul edilen davranış, bu tür yaklaşıma uygun olabilir. Diğer taraftan, şiddetli depremler esnasında ya da sonrasında elemanlarda meydana gelen plastik deformasyonlar bu davranıştan dolayısıyla elastik tasarım yönteminden uzaklaşmaya neden olabilmektedir. Bu durum özellikle şiddetli depremlerde etkin olarak ortaya çıkabilir çünkü sistemde yoğun plastik deformasyonlar oluşma ihtimali çok yüksektir. Bu değerlendirmeden yola çıkarak bakıldığında Şekil 5’te TH-6 için 20 katlı binanın, TH-8 için 10 katlı binanın, TH-11 için 10 ve 15 katlı binaların, TH-12 için 15 katlı binanın çatı katı ötelenme oranlarının maksimum değeri 5 katlı binadan daha yüksek olarak hesaplandığı görülmektedir. 5-kattan yüksek binaların diğerlerine göre daha düşük doğal titreşim periyoduna sahip olduğu bilinmektedir. Sonuç olarak SeismoStruct yazılımında kullanılan plastik deformasyonların dikkate alındığı bu analizlerde benzer sonuçların öne çıktığı görülmektedir. Bu durum plastikleşen eleman davranışlarının özellikle şiddetli depremlerde egemen davranış olabileceği ve sistem davranışına hakimiyetini desteklemektedir.



Şekil 5. Binaların TH sonuçları için çatı katı ötelenme oranları maksimum değerleri

3.2. Taban Kesme Kuvveti

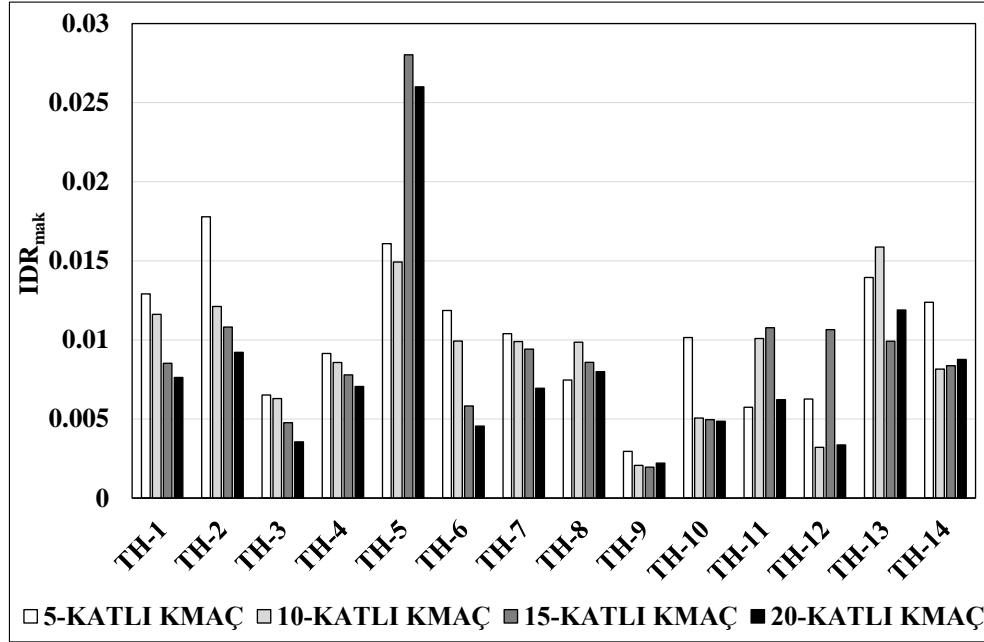
Literatürde yer alan çalışmalarda yapısal performansların elde edilmesi esnasında enerji sönmüleme kapasitesini temel alan diğer bir parametre olan taban kesme kuvveti değerlerinin yapı ağırlığına oranları (V_{taban}/W) bu çalışma kapsamında da değerlendirilmiştir (Etili ve Güneyisi, 2020; Etili ve Güneyisi, 2021; Etili ve Güneyisi, 2022). Çalışma kapsamında elde edilen ana ve artçı depremler etkisi altında MAKÇ'lerin V_{taban}/W incelenmiştir. V_{taban}/W değerlerinin grafiklerde her ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu için TH-1'den TH-14'e kadar Şekil 6'da sunulmuştur. Ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde; 5-MAKÇ için V_{taban}/W sonuçlarının değişim aralığı 0.15 ile 0.55'tir. Ayrıca V_{taban}/W için ortalama değer 0.43 olarak elde edilmiştir. 10-MAKÇ de ise V_{taban}/W değerlerinin değişim aralık değerleri 5-MAKÇ'a göre alt ve üst limitler için sırasıyla %45 ve %38 oranında azalmaktadır. Diğer taraftan ortalama V_{taban}/W değeri 5-MAKÇ'a göre %46 azalma ile kaydedilmiştir. 15-MAKÇ için V_{taban}/W değeri 5-MAKÇ yapıya göre ortalama alt ve üst V_{taban}/W limit değerleri için sırasıyla %58 ve %55 azalmaktadır. Diğer taraftan, 20-MAKÇ'da V_{taban}/W değeri alt ve üst limit değerleri sırasıyla %71 ve %64 azalmıştır (Şekil-6). 10-MAKÇ, 15-MAKÇ ve 20-MAKÇ için ortalama V_{taban}/W değerleri 5-MAKÇ'a göre sırasıyla %46, %61 ve %69 azalma ile kaydedilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Binaların TH sonuçları için taban kesme katsayıları maksimum değerleri.

3.3. Katlar Arası Görelî Ötelenme Oranları (IDR)

Ana ve artçı depremler etkisi altında MAKÇ'lerin katlar arası görelî ötelenme oranları (IDR (interstory drift ratio)) çalışma kapsamında incelenmiştir. *IDR* değerlerinin katlar arasındaki değişim kat seviyeleri üzerinde grafiklerde her ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu için *TH-1*'den *TH-14*'e kadar Şekil 7'de sunulmuştur. *IDR* değeri, literatürde yer alan çalışmalarda yapısal performans seviyelerinin belirlenmesi için (Etili ve Güneyisi, 2020; Etili ve Güneyisi, 2021; Etili ve Güneyisi, 2022) kullanılırken ulusal ve uluslararası standartlarda (EN 1993-1-1, 2002; EN 1994-1-1, 2004; EN 1998-1-1, 2004; EN1992-1-1, 2004; TBDY, 2018) yapısal hasar seviyesinin de belirlenmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 7. Binaların TH sonuçları için IDR_{mak} değerleri.

Yapıların servis ömürlerine devamlılığı açısından sınırları genellikle bir binanın karşılık gelen yük seviyelerinde performansının bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır (FEMA-750, 2009). Uluslararası standartlarda genel bir kabul ile dört bina performansı seviyesi vardır. Bunlar; kesintisiz kullanım; sınırlı hasar; can güvenliği seviyesi ve göçme öncesi seviyesidir (ASCE-41-17, 2017; ATC-58-2, 2017; FEMA-750, 2009). Çok düşük şiddetli depremler sonrası bir çok yapı kesintisiz kullanım performans limitlerini karşılayabilirken bu limitlerin aşıldığı durumlarda söz konusu olabilir (El-Metwally ve Sheta, 2017).

5-MAKÇ için ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde IDR_{mak} sonuçlarının değişim aralığı 0.003 ile 0.018 arasında değişmiştir. 5-MAKÇ için IDR_{mak} için ortalama değer 0.010 olarak elde edilmektedir. 10-MAKÇ için IDR_{mak} değerlerinin değişimi 5-MAKÇ'a göre alt ve üst limitler için incelendiğinde sırasıyla %30 ve %11 oranında azalmaktadır. 15-MAKÇ için IDR_{mak} değeri 5-MAKÇ'a göre alt limit değerinde %33 oranında azalma ile; üst limit değerlerinde %58 oranında bir artış ile kaydedilmiştir. Çalışma verileri ışığında 20-MAKÇ için IDR_{mak} alt limit değerinde 5-MAKÇ'a göre %25 azalma ve üst limit değerinde %46 artış söz konusudur. 10-MAKÇ, 15-MAKÇ ve 20-MAKÇ için ortalama IDR_{mak} değerleri 5-MAKÇ'a göre sırasıyla %11, %9 ve %23 oranında azalma ile edilmiştir (Şekil 7). Diğer taraftan, incelenen yapısal sistemlerde özellikle çok katlı yapılarda alt katlarda meydana gelen plastik deformasyonların ara katlarda oluşan görelî kat ötelenmelerini arttırabileceği öngörülmektedir. Bu açıdan bakıldığında Şekil 7'de TH-5 için 15 ve 20 katlı binalarda diğerlerinden farklı olarak görelî kat ötelenmesi daha yüksek gerçekleşmesinde ana etken olabilir. Dahası, önceki çalışmalar değerlendirildiğinde literatürde yüksek mod katlarının yüksek yapılarda bu tür etkilerinin olabileceği de gösterilmektedir (Vamvatsikos ve Cornell, 2005; Castro vd., 2008; Ferraioli vd., 2014)

4. Sonuçlar

Bu çalışmanın analiz sonuçlarına göre aşağıdaki veriler elde edilmiştir;

- MAKÇ ile tasarlanan binalar için ortalama Δ_{cat}/H sonuçlarına göre yapıların hemen hepsi göçme durumuna ulaşmadan yeterli miktarda enerji sönmüleyebilmiştir.
- Ana ve artçı depremlerden elde edilen 5, 10, 15 ve 20 katlı MAKÇ'ler için V_{taban}/W faktörlerinin değerleri artan yapı kat adedi ile azalmaktadır. Bu, özellikle çok katlı çerçeve yapılarının daha yüksek mod etkisine duyarlılığından kaynaklanmaktadır.
- IDR ortalama değeri tüm yapılar için genelde %1 değerinden küçük olmakla birlikte, sonuç olarak hemen kullanım performans seviyesini sağlamaktadırlar. Nadir olmakla birlikte sadece TH-5 için yapı kapasitesini zorlamıştır.
- MAKÇ sistemlerin çalışma kapsamında incelenen tarihi olarak şiddetli ana ve artçı depremlerden oluşan serilerde dahi neredeyse sınırlı hasar durumu ile depremleri atlatabileceği öngörülmüştür.

- Özellikle çerçeve sistemlerde normal kat yüksekliğinin iki katından daha uzun kiriş düzenlemelerinde eleman kesitlerindeki oluşacak plastik deformasyonlar baskın hale gelebilmektedir.
- Elastik tasarım sonrası yapılacak olan performans analizleri (statik itme gibi) olası limit durumların belirlenmesinde faydalı olacaktır.
- Yüksek katlı yapılarda tasarımcının kesit hesaplarında bir miktar daha esnek davranması tekrarlı yükler altındaki davranışa pozitif etkide bulunabilir.

Kısaltmalar

BDÇT:	Beton dolgulu çelik tüp
<i>bxt</i> :	Kolon kesiti
D:	Dayanım Fazlalığı Katsayısı
DAF:	Doğu Anadolu Fay
DD-2:	Düzeyi-2
<i>Es</i> :	Çelik elastisite modülü
<i>IDR</i> :	Katlar arası görelî ötelenme değeri
<i>IDR_{mak}</i> :	Katlar arası maksimum görelî ötelenme değeri
IPE:	I çelik profil
KAF:	Kuzey Anadolu Fay
M:	Moment magnitud değeri
MAÇ:	Moment aktaran çerçeve
MAKÇ:	Moment aktaran kompozit çerçeve
PGA:	Maksimum yer ivmelenmesi
R:	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı
RC:	Betonarme
<i>R_{jb}</i> :	Joyner-Boore mesafe (km)
<i>R_{rup}</i> :	Kırılma düzleminde en yakın noktaya olan eğik mesafe (km)
TBDY 2018:	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
<i>TH</i> :	Deprem kaydı
<i>v</i> :	Poisson oranı
<i>V_{taban}/W</i> :	Taban kesme kuvveti değerlerinin yapı ağırlığına oranı
<i>Δ_{çatı}/H</i> :	Çatı katı yatay deplasman değerlerinin toplam yapı yüksekliğine oranı
<i>μ</i> :	Sertleşme katsayısı

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazar bu çalışmada herhangi bir şekilde çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yazar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

KAYNAKLAR

- Akgül, M., Doğan, O., Etili, S. (2020). Investigation of Mechanical Properties of Granulated Waste Rubber Aggregates Substituted Self-Compacting Concrete Mortar Produced with Different Cement. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 787-798. <https://doi.org/10.29137/umagd.734614>
- ASCE-41-17. (2017). Seismic rehabilitation of existing buildings. ASCE Standard, 41–6. <https://doi.org/10.1201/9781439804810-c7>
- ATC-58-2. (2017). ATC-58-2: Probabilistic Performance-based Seismic Assessment and Design Guidelines. SEAOC Convention Proceedings, 1–10.
- Castro, J. M., Elghazouli, A. Y., Izzuddin, B. A. (2007). Assessment of effective slab widths in composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(10), 1317–1327. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.018>
- Castro, J.M., Elghazouli, A.Y., Izzuddin, B.A., (2008). Performance assessment of composite moment-resisting frames. 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.
- Cemalgil, S., Etili, S. (2020). Effects of Specimen Size on The Compressive Strength of Rubber Modified Self-Compacting Concrete. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 118-129. <https://doi.org/10.29132/ijpas.789480>
- Coburn, A., Spence, R., (2002). *Earthquake Protection*, John Wiley&Sons, England.

- Doğan, O., Kalaylı, M.A. (2019). Binalarda Yükseklik/Genişlik Oranı Ve Zemin Yatak Katsayısına Bağlı Devrilme Analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5 (3), 300-314.
- Elghazouli, A. Y. Y., Castro, J. M. M., Izzuddin, B. A. A. (2008). Seismic performance of composite moment-resisting frames. *Engineering Structures*, 30(7), 1802-1819. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.004>
- El-Metwally, S. E., Sheta, A. M. (2017). Performance Based Design of Steel Frames via Practical Advanced Analysis. 2017 International Annual Conference of the American Society for Engineering Management.
- EN 1993-1-1. (2002). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 3(BS EN 1993-1-1:2005). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- EN 1994-1-1. (2004). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, 3(February), 33–38. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD009305.pub2>
- EN 1998-1-1. (2004). Eurocode 8 :Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Normalization, Brussels, 2005. [https://doi.org/\[Authority: The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC\]](https://doi.org/[Authority: The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC])
- EN 1992-1-1. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1–1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, 1(Brussels, Belgium), 225. <https://doi.org/978 0 580 73752 7>
- Etili, S. (2021). Analytical Evaluation of Behavior of Composite Columns Under Axial Load. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(3), 526-536. <https://doi.org/10.29132/ijpas.991166>
- Etili, S., Güneysisi, E. M. (2020). Seismic performance evaluation of regular and irregular composite moment resisting frames. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 17(7), 1-22. <https://doi.org/10.1590/1679-78255969>
- Etili, S., Güneysisi, E. M. (2021). Assessment of Seismic Behavior Factor of Code-Designed Steel–Concrete Composite Buildings. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(5), 4271-4292. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04913-9>
- Etili, S., Güneysisi, E. M. (2022). Effect of nonlinear modeling approaches used for composite elements on seismic behavior of composite framed buildings. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 47(2). <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01871-w>
- Etili, S., (2022). Parametric Analysis Of The Performance Of Steel-Concrete Composite Structures Designed With TBDY 2018. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(1), <https://doi.org/10.46460/ijiea.1029942>
- Etili, S., Cemalgil, S., Onat, O. (2018). Mid-Temperature Thermal Effects on Properties of Mortar Produced with Waste Rubber as Fine Aggregate. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 4(1), 10-22. <https://doi.org/10.29132/ijpas.341413>
- FEMA-750. (2009). *Nehrp Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. NEHRP Seismic Design Technical Brief, 2, 37. <http://www.nehrp.nist.gov/pdf/nistgcr9-917-3.pdf>
- Ferraioli, M., Lavino, A., Mandara, A., (2014). Behaviour factor of code-designed steel moment-resisting frames. *International Journal of Steel Structures* 14,243-254.
- Goda, K., Salami, M. R. (2014). Inelastic seismic demand estimation of wood-frame houses subjected to mainshock-aftershock sequences. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(2), 855–874. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9534-4>
- Hatzigeorgiou, G. D., Liolios, A. A. (2010). Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 1010–1025. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.013>
- Hauke, B. (2008). Economic Application of Composite Beams With Moderate High Strength Materials. In 5th European Conference on Steel and Composite Structures, September, 3-5, September 2008, Graz, Austria
- Hosseinpour, F., Abdelnaby, A. E. (2017). Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 706-725. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.006>
- Jalayer, F., Ebrahimian, H. (2017). Seismic risk assessment considering cumulative damage due to aftershocks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(3), 369-389. <https://doi.org/10.1002/eqe.2792>
- Jalayer, F., Asprone, D., Prota, A., Manfredi, G. (2011). A decision support system for post-earthquake reliability assessment of structures subjected to aftershocks: An application to L’Aquila earthquake, 2009. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 997-1014. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9230-6>
- Jamnani, H. H., Amiri, J. V., Rajabnejad, H. (2018). Energy distribution in RC shear wall-frame structures subject to repeated earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.010>
- Li, Q., Ellingwood, B. R. (2007). Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock-aftershock earthquake sequences. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(3), 405-427. <https://doi.org/10.1002/eqe.667>

- Papaloizou, L., Polycarpou, P., Komodromos, P., Hatzigeorgiou, G. D., Beskos, D. E. (2016). Two-dimensional numerical investigation of the effects of multiple sequential earthquake excitations on ancient multidrum columns. *Earthquake and Structures*, 10(3), 495-521. <https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.3.495>
- PEER. (2014). Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Pacific Earthquake Engineering Research Center. <https://ngawest2.berkeley.edu>
- Pirooz, R. M., Habashi, S., Massumi, A. (2021). Required time gap between mainshock and aftershock for dynamic analysis of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(6), 2643-2670. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01087-z>
- Plumier, A., Doneux, C., Sanchez-Ricart L., Agatino, R., Plumier, C., Elnashai, A.S.E., Tsujii, M., Pinho, R., Bouwkamp, J., Parung, H., Broderick, B., Elghazouli, A., Cosenza, E., Manfredi, G. (2001). *Seismic Behaviour and Design of Composite Steel Concrete Structures*. Ecoest & Icons, Report No, 198. <https://doi.org/10.13140/2.1.1951.1361>
- Raghunandan, M, Liel, A. B., Ryu, H., Luco, N., Uma, S. R. (2012). Aftershock Fragility Curves and Tagging Assessments for a Mainshock-Damaged Building. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering - WCEE*, 10.
- Raghunandan, Meera, Liel, A. B., Luco, N. (2015). Aftershock collapse vulnerability assessment of reinforced concrete frame structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(3), 419-439. <https://doi.org/10.1002/eqe.2478>
- Ruiz-García, J., Yaghmaei-Sabegh, S., Bojórquez, E. (2018). Three-dimensional response of steel moment-resisting buildings under seismic sequences. *Engineering Structures*, 175, 399-414. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.050>
- SeismoSoft. (2018). SeismoStruct: A computer software for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. www.seismosoft.com
- TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 416. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf>
- Vamvatsikos, D., Cornell, C.A., (2005). Direct estimation of the seismic demand and capacity of MDOF systems through Incremental Dynamic Analysis of an SDOF approximation. *Journal of Structural Engineering*, 131, 589-599.
- Xie, X., Lin, G., Duan, Y. F., Zhao, J. L., Wang, R. Z. (2012). Seismic damage of long span steel tower suspension bridge considering strong aftershocks. *Earthquake and Structures*, 3(5), 767-781. <https://doi.org/10.12989/eas.2012.3.5.767>