ESKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLİM VE TEKNOLOJİ DERGİSİ
B- TEORİK BİLİMLER

Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoritical Sciences

2018, Cilt:6 - syf. 163 - 174, DOI: 10.20290/aubtdb.489450
4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Özel Sayısı

ÖZEL TASARLANMIŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN BETONARME YAPILARIN DEPREM PERFORMANSINA ETKİSİ

Hasan ÖZKAYNAK [1,*], Burak ADAK[2], Bayram Metehan AĞCA[2]

[1]İnşaat Müh. Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Beykent Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[2] Fen Bilimleri Enstitüsü, Beykent Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Deprem etkisi altındaki betonarme yapıların güçlendirilmesi ve deprem davranışlarının iyileştirilmesi için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Mevcut yapıya betonarme perdeler eklenmesi veya kolonların mantolanması klasik olarak önerilen bu yöntemlerden bazılarıdır. Bu tip dayanım esaslı güçlendirme yöntemleri yapıların deprem dayanımlarını ve yanal rijitliklerini önemli derecede artırmaktadır. Yapılarda yanal rijitliğin artışı, aynı zamanda deprem talebini de artıran bir durumdur. Günümüzde, yapıların güçlendirilmesi için deprem talebinde ciddi değişikliğe gidilmeden deprem enerjisinin sönümlendiği yöntemler ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada betonarme bir yapının ucuz maliyetli metal sönümleyici elemanlar ilave ederek tasarlanmış özel çaprazlar kullanmak suretiyle güçlendirilmesi konusu ele alınmıştır. Seçilmiş olan deprem kayıtları etkisinde mevcut yapının ve çelik çaprazlı güçlendirilmiş yapının lineer olmayan dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Betonarme yapının çeşitli gözlerine metal sönümleyiciler eklendiği güçlendirilmiş durumda deprem davranışı kırılganlık eğrileri kapsamında değerlendirilmiştir. Mevcut yapıya metal sönümleyici ilave edilmesiyle, yapının deprem enerjisi tüketebilme özelliklerinde ve hasar görebilme olasılıklarında önemli seviyede iyileşmeler gözlenmiştir. Yapılan analiz sonuçları; maliyeti düşük olan bu çapraz elemanların, yapıların göreli kat ötelemesi ve kesme kuvvetleri istemlerini sınırlandırdığını ve deprem performansını artırdığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Metal Sönümleyici, Deprem Performansı, Enerji Tüketimi, Göreli Kat Ötelemesi

THE EFFECT OF SPECIALLY DESIGNED BRACES ON THE EARTHQUAKE BEHAVIOUR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

ABSTRACT

Diverse methods exists in the literature for retrofitting and improving the earthquake behavior of reinforced concrete (RC) structures which are under the earthquake effects. Addition RC shear walls and jacketing of column elements of existing structure are among the conventionally proposed methods. Such forced based strengthening methods increase the lateral strength and stiffness of the structures significantly. The increase in lateral stiffness of structures is also the case which increase the earthquake demand as well. Currently, the methods which aims to dissipate the earthquake input energy come forward, instead of the ones which serioulsy changes the earthquake demand. In this study, retrofitting of RC structures by using cost effective and specially designed metallic damper added steel braces is considered. The nonlinear dynamic analysis of the bare and braced frames was carried out under the effect of selected earthquake records. The earthquake behaviour of the structure having metallic dampers in various bays is evaluated interms of fragility curves. Improvements in significant levels were observed in the earthquake energy dissipation properties and the vulnarability of the existing structure by adding a metallic dampers. Analytical results showed that application of cost effective steel braces; limited the drift values and shear force demands of structures and increase the earthquake performance.

Keywords: Metallic Dampers, Earthquake Performance, Energy Dissipation, Drift

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı kapsamında ülkemizdeki deprem dayanımı yetersiz ve güncel yönetmelik koşullarını sağlamayan yapıların güçlendirilmesi için etkin ve uygulanabilir yöntemlerin

*Sorumlu Yazar: hasanozkaynak@beykent.edu.tr
Geliş: 23.03.2018 Kabul: 01.08.2018

araştırılması deprem mühendisliği açısından son yılların en yaygın konuları arasında yer almaktadır. Güçlendirme yöntemleri arasında yapıların dayanım artışını sağlayan betonarme (B.A) perde ilavesi ve kolon mantolanması gibi yöntemlere ilave olarak sismik izolatörler ve sönümleyicilerin kullanıldığı maliyet açısından oldukça pahalı yöntemler bulunmaktadır. Sıvı esaslı sönümleyiciler cihazın içerisinde bulunan iki farklı odacıktan sıvı transferi yardımıyla enerji tüketimi sağlamaktadır. Sürtünme esaslı sönümleyicilerin çalışma prensibi ise iki farklı levhanın birbirine sürtünmesi sağlanarak deprem enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesidir. Bu tip sönümleyicilerin yüksek yerdeğiştirme istemleri bulunmaktadır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde bu tür sismik sönümleyicilerin sınırlı yerdeğiştirme yapabilme özelliği olan ülkemiz B.A yapılarına uygun olmadığı görülmektedir. Burkulması önlenmiş çaprazlar (BRB), beton içerisinde sürtünmeden çelik elemanın akma şekildeğiştirmesine ulaşmasıyla yapının hem enerji tüketim kapasitesini hem de yanal rijitliğini artıran cihazlar ülkemizdeki yapı profiline daha uygundur. Burkulması önlenmiş çaprazlar ile yaklaşık benzer prensipler ile çalışmayı hedefleyen metal sönümleyicilerin davranışlarının analitik ve deneysel olarak incelendiği sınırlı düzeyde çalışmalara literatürde rastlamak mümkündür. Metal sönümleyicilerin şekildeğiştirme özellikleri ile yapıların rijitlik, dayanım ve enerji tüketim özellikleri artırılabilmektedir.

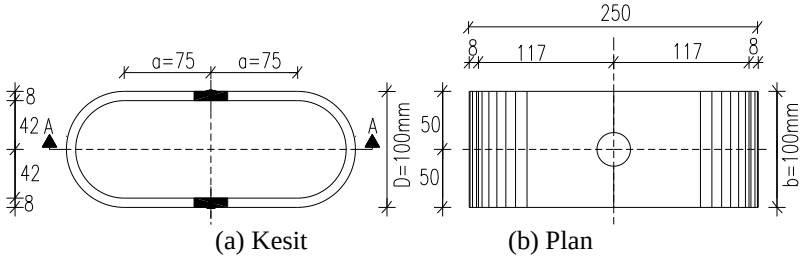
Deprem enerjisinin çelik levhalar kullanılarak tüketilebileceği fikri ilk olarak Kelly ve diğ. tarafından ortaya atılmıştır [1]. Shen ve diğ., 1/3 ölçekli B.A çerçeve sistem üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarında viskoelastik esaslı çalışan sönümleyicilerin %20'ye yakın oranda enerji sönümledikleri sonucuna ulaşmışlardır [2]. Bergman ve Goel, ve Tsai ve diğ. eğilme etkisindeki metal levhaların yüksek seviyede deformasyon yaparak enerji tüketebileceklerinin belirtmişlerdir [3,4]. Chan ve Albermani, gövdesinde delikler bulunan metal levhaların kayma davranışını deneysel olarak incelemiş olup, metal elemanların ileri yerdeğiştirme seviyelerine kadar kırılmadan yüksek enerji tüketim özelliklerine ve süneklik kapasitesine sahip oldukları sonucuna ulaşmışlardır [5]. Chan ve diğ. tarafından ince levha gövdeli metal elemanlar üzerinde yapılan deneyler, metal elemanların ileri yerdeğiştirme seviyelerinde %30 oranında eşdeğer sönüm oluşturduğunu göstermiştir [6]. Shultz ve Magana, duvarlar arasında kullanılabilecek metal elemanlar üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır [7]. Deneysel çalışmalar sonunda enerji tüketimi ve şekildeğiştirme özellikleri açısından en uygun formun "U" şekli olduğunu sonucuna ulaşılmıştır. F.M. Mazzolani, parçalara ayırdığı gerçek yapıda farklı tipte metal sönümleyi elemanlar kullanmış ve bu elemanların yapı içerisindeki çevrimsel performanslarını belirlemiştir [8]. Deneysel çalışmalar, metal elemanların yapı sisteminin dayanım, rijitlik ve yerdeğiştirme yapabilme kapasitesini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Alehashem ve diğ. tarafından gerçekleştirilen analitik çalışmalar, metal sönümleyicilerin bulunduğu yapıda inelastik şekildeğiştirmelerin bu metal elemanlar üzerinde toplandığı ve ana yapının güvenli bölgede kaldığı sonucuna varılmıştır [9]. Oh ve diğ., enerji tüketebilen metal sönümleyicileri kolon-kiriş birleşim bölgelerine yerleştirdiği numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır [10]. Metal elemanların bulunmadığı numunelerde yerel burkulmalar görülürken, sönümleyicilerin bulunduğu durumda çelik elemanlar enerjinin büyük bir bölümü tüketerek yapısal elemanlar üzerindeki hasarı önemli ölçüde azaltmıştır. Sahoo ve Rai, enerji tüketebilen alüminyum elemanların eklendiği B.A çerçevenin davranışını deneysel olarak incelemiştir [11]. Gerçekleştirilen deneyler, alüminyum elemanların çerçeve eşdeğer sönüm oranını % 8'den % 15'e çıktığını ve toplam enerjinin 2/3'nün bu elemanlar tarafından tüketildiğini göstermiştir. Deneyler sonucunda B.A çerçevenin yapısal elemanlarında ileri yerdeğiştirme seviyelerinde ciddi hasarın oluşmadığı gözlenmiştir. Maleki ve Bagheri, boru tipi içi beton dolu ve boş metal elemanların monotonik ve çevrimsel davranışlarını deneysel olarak incelemiştir [12]. Deneyler, içi beton dolu numunelerin betonun gevrek davranışının bütünsel davranışa yansıyarak sünek olmayan bir davranışa sebep olduğunu gösterirken, içi boş numunelerin sünek davranış sayesinde önemli ölçüde enerji tüketebildiğini göstermiştir. Maleki ve Mahjoubi, iki bağımsız borunun kaynaklanarak birleştirildiği ikili boru sisteminin çevrimsel davranışını deneysel olarak incelemiştir [13]. Deneyler boru sisteminin yüksekliğinin %36'sı kadar yatayda yerdeğiştirme yaparak iyi seviyede enerji tüketebildiğini göstermiştir. Karalis ve diğ., çelik bağlantı elemanını çelik çaprazlar ile tek katlı ve tek açıklıklı B.A çerçeve sisteme bağladığı numuneler üzerinde deneyler

gerçekleştirmişlerdir [14]. Bağlantı elemanları, çerçeve sistemin dayanımını, rijitliğini ve enerji tüketim özelliklerini iyileştirmiştir. Çalışmada B.A çerçevenin yapısal elemanlarında kayma hasarı gibi yerel hasarların oluşmasının engellenmesi için bağlantı elemanının boyutlarının seçimi sırasında özel özen gösterilmesinin gerekliliğine dikkat çekilmiştir.

Deprem etkilerinin oldukça yoğun olarak hissedildiği ülkemizde, mevcut yapıların deprem dayanımlarının artırılması ve performanslarının iyileştirilmesi amacıyla güçlendirilmesi veya yenilenmesi çalışmaları akademik ve endüstri düzleminde geniş kapsamda devam etmektedir. Daha önce yaşanmış depremler sonrası yapılan incelemeler; mevcut az katlı yapıların dayanım ve rijitlik açısından yetersiz olduklarını ve bu tip yapıların deprem enerjisini tüketemediklerinden dolayı yıkıldıklarını göstermektedir. Deprem enerjisinin sönümlenebildiği yapılarda ise kesitler yetersiz olmasına rağmen yapının ayakta kalmış olması, enerji esaslı tasarım ve değerlendirmenin önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın ana amacı enerji tüketim özellikleri SAFECLADDING isimli bir Avrupa Birliği Projesi kapsamında belirlenmiş çelik sönümleyici elemanların, altı katlı B.A çerçeve sistemin deprem davranışına etkisinin belirlenmesidir [15]. Bu çalışmada tipik bir B.A çerçeve sisteme çelik sönümleyici elemanlar yerleştirildikten sonra göreli kat ötelemeleri, kesme kuvvetleri ve enerji tüketim özelliklerine bağlı olarak deprem davranışındaki değişim sayısal olarak incelenmiştir. Söz konusu çerçeve sistem lif esasına dayalı olarak çalışan SeismoStruct isimli bir yazılım kullanılarak modellenmiş ve programın lineer olmayan dinamik analiz modülü kullanılarak deprem etkisi altında lineer olmayan dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları çelik sönümleyici elemanların kullanıldığı çerçeve sistemin göreli kat ötelemeleri, kesme kuvvetleri istemlerinde azalma ve yapısal elemanların daha düşük seviyede enerji tüketiminin sağlandığı sonucuna varılmıştır. Dinamik analizi sonuçları güçlendirilmiş kalınlığı 25 mm olan çelik elemanın kullanıldığı durumda B.A çerçeve sistemin birinci kat yapısal elemanlarının yalın duruma göre %20 daha az enerji tüketmek durumunda kaldıklarını göstermiştir. Bunun ötesinde aynı kalınlığa sahip çelik sönümleyici kullanılmasıyla B.A çerçeve sistemin göreli kat ötelemesi seviyesi TDY-07'de *can güvenliği* performans seviyesi olarak tanımlanan %1 değeri ile sınırlandırılmasını sağlamıştır [16].

2. ÇELİK SÖNÜMLEYİCİLERİN ANALİTİK MODELİ

Betonarme çerçeve sistemlerin güçlendirilmesi amacıyla kullanılan çelik sönümleyicilerin çevrimsel davranışları SAFECLADDING isimli bir Avrupa Birliği çalışması kapsamında deneysel olarak belirlenmiştir [15]. Deneyler *İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuarında* (STEELAB) gerçekleştirilmiştir. Kalınlığı 8 mm olan çelik sönümleyicinin geometrik boyutları Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Kalınlığı 8 mm olan çelik yastık boyutları [15].

Çelik yastık boyutları, proje kapsamında gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda, derinliği (D) 100 mm, yüksekliği (h) 250 mm ve genişliği (b) 100 mm olarak seçilmiştir. Sönümleyici yastıkların üretildiği çelik levhalardan kesilen kupon numuneler üzerinde yapılan malzeme deneyleri, çeliğin

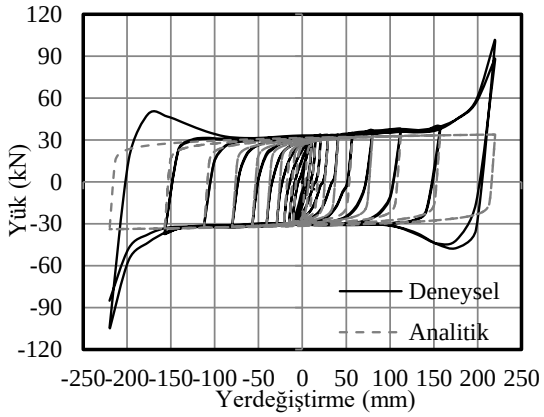
akma dayanımının 350 MPa, kopma dayanımının 430 MPa ve kopma şekildeğiştirmesinin %20 olduğunu göstermiştir.

Özkaynak, söz konusu çelik sönümleyiciler için analitik bir model önermiştir [17]. Analitik model, Seismo-Struct yapısal analiz programında bir bağlantı elemanı tanımı yapılarak ve ilgili serbestlik yönünde *Ramberg-Osgood* çevrimsel davranışını kullanılarak oluşturulmuştur. Çelik sönümleyici için önerilen model, çelik sönümleyici elemanın akma dayanımı (P_y) ve akma yerdeğiştirmesi (d_y) gibi akma parametreleri olarak adlandırılan iki farklı giriş bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Söz konusu akma parametreleri, sönümleyici elemanlar için Güllü ve diğ., çalışmasında önerilen kapalı formülasyonlar kullanılarak Tablo 1'de çelik yastıklar için akma parametreleri belirlenmiştir, [18].

Tablo 1. Çelik sönümleyiciler önerilen akma parametreleri

t(mm)	F_{yd} (N/mm^2)	b (mm)	E (N/mm^2)	P_y (N)	d_y (mm)
8	350	100	200000	24348	2,91
18	350	100	200000	138293	1,45
25	350	100	200000	291667	1,14

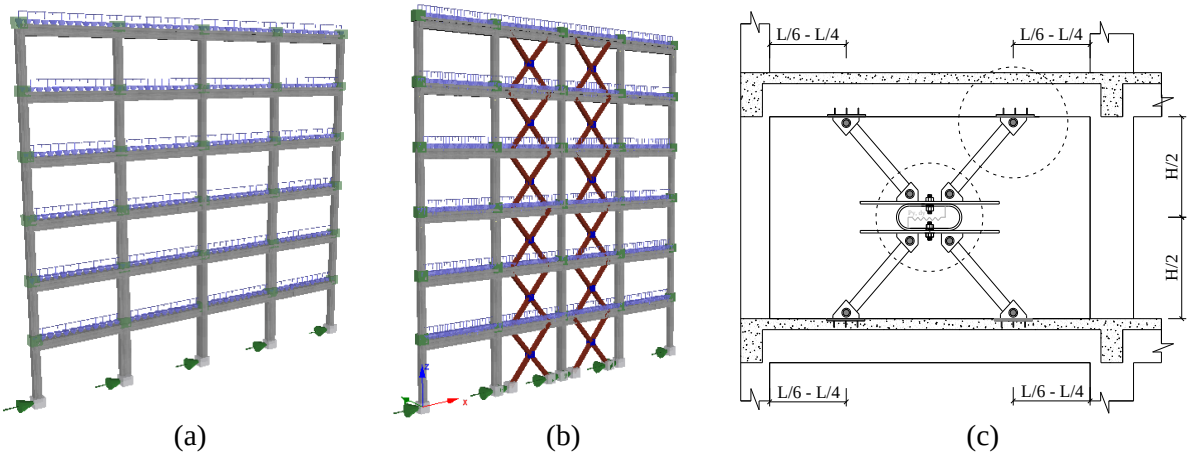
Kalınlığı 8 mm olan çelik sönümleyicilerin kayma deneylerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri ve analitik sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 2'de görülmektedir. Çelik sönümleyiciler için oluşturulmuş analitik model, deneysel sonuçları yeterli yaklaşımla tahmin edebilmektedir. Kayma etkisi altında 8 mm kalınlıklı numune üzerinde gerçekleştirilen deney sonucuna göre en büyük dayanım değeri olarak 40 kN kayma dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 2. Kalınlığı 8 mm olan çelik sönümleyicinin deneysel ve analitik sonuçlarının karşılaştırılması

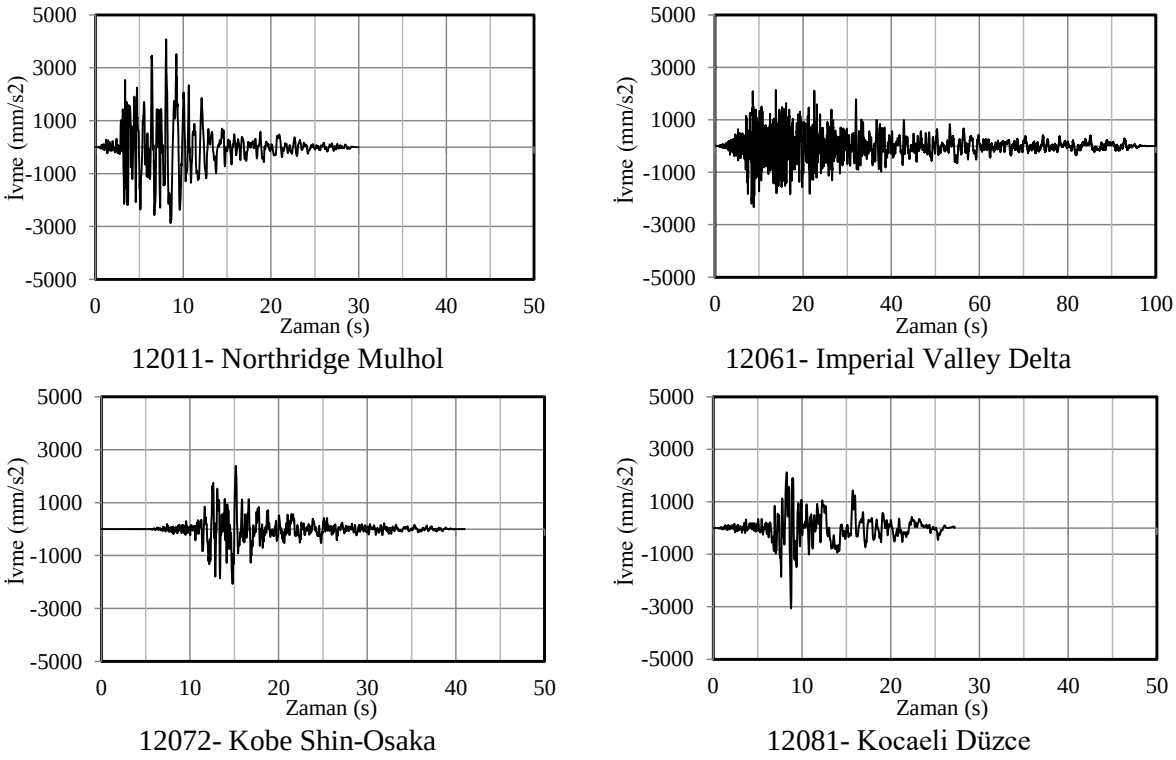
3. YALIN ve GÜÇLENDİRİLMİŞ B.A ÇERÇEVE MODELLERİ

Çalışmanın bu bölümünde, çelik sönümleyici elemanların B.A çerçeve davranışına etkisini görmek amacıyla 6 katlı 4 açıklıklı güçlendirilmiş ve yalın çerçeve sistem modeli oluşturulmuştur. Çalışmada esas alınan çerçeve modelleri ve çelik sönümleyicinin B.A çerçeve için öngörülen uygulama detayı Şekil 3'de görülmektedir, [19]. Betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi için 8, 18 ve 25 mm kalınlıklarında çelik sönümleyiciler tercih edilmiştir. Çerçevelerin analitik modeli oluşturulurken 15 cm kalınlığındaki döşemelerin kendi düzlemi içerisinde sonsuz rijitliğe sahip olduğu varsayımı yapılmıştır. Çerçeve sistemin yüksekliği 3.5 m ve açıklığı 5 m'dir. Çerçeve kolon elemanlarının en kesitleri 40×30, 30×40, 30×60 ve 50×30 cm olarak belirlenmiştir. Kolonların sargılanma bölgesinde ϕ10/100 sargı bölgesi dışında ise ϕ10/200 olarak etriyeler kullanılmıştır.



Şekil 3. (a) Yalın çerçeve, (b) güçlendirilmiş çerçeve (c) analitik modelleri

Analizlerde kullanılan deprem kayıtları FEMA'nın P695 metoduna göre içerisinde Türkiye'de gerçekleşmiş olan depremlerinde bulunduğu 22 depremden 4 adet deprem kaydı seçilmiştir [20]. Çalışmanın dinamik analizinde kullanılmak üzere seçilmiş olan deprem kayıtları Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. İvme kayıtları

Dinamik analiz için sonlu malzeme ve geometri açısından lineer olmama durumunu göz önüne alabilen SeismoStruct isimli bir program kullanılmıştır, [21]. Analitik modelin oluşturulmasında beton malzemesi için *Mander* modeli, donatı için iki doğrulu *elastoplastik* model kullanılmıştır. Yapı modelinin son kat dışındaki katlarının ağırlıkları 770 ile 790 kN arasında değişirken son katın ağırlığı 480 kN olarak belirlenmiştir. Kolon ve kiriş elemanlarının kapasite eğrileri programın kendi bünyesinde otomatik olarak oluşturulduğundan kesit analizi için ayrıca farklı bir işlem yapılmamıştır.

Eleman tipi seçimi konusunda yerdeğiştirmeye dayalı plastik mafsal elemanı (*infrmDBPH*) tercihi yapılmıştır.

4. ANALİZ SONUÇLARI

Çerçeve sistemlerin lineer olmayan dinamik analizleri, farklı deprem kayıtları etkisinde gerçekleştirilerek, elde edilen analiz sonuçları yalın ve güçlendirilmiş durumda göreli kat ötelemeleri, kesme kuvvetleri ve enerji tüketimi gibi yapısal parametreler ele alınmıştır.

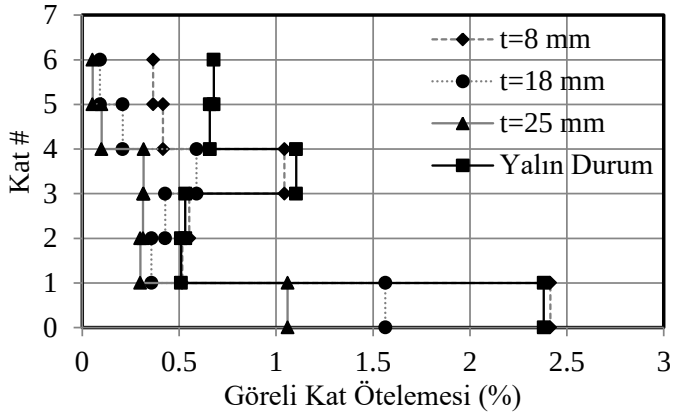
4.1. Göreli kat ötelemeleri

Göreli kat ötelemesi parametresi, yapısal performans seviyesini ilgilendiren yapısal hasarın önemli bir göstergesidir. Göreli kat ötelemelerinin %1, %3 ve %4 olması durumlarında ilgili performans seviyelerinin sırasıyla *hemen kullanım*, *can güvenliği* ve *göçmenin önlenmesi* olduğu *Türk Deprem Yönetmeliği-2007* (TDY07)'de belirtilmiştir. Tablo 2. Bu çalışmada çerçeve sistemin performans seviyesini belirlemek amacıyla yapının 1.katına ait göreli kat ötelemeleri esas alınmıştır.

Tablo 2. TDY 2007 Performans Hasar Seviyeleri (TDY-07)

Performans Seviyesi	***Göreli Kat Ötelenmesi***
Hemen Kullanım	%1
Can Güvenliği	%3
Göçmenin Önlenmesi	%4

Yalın ve güçlendirilmiş çerçevelerde farklı kalınlıklardaki çelik sönümleyiciler kullanılması durumunda analiz sonuçlarından elde edilen göreli kat ötelemelerinin ortalama değerleri Şekil 5'de görülmektedir. Kalınlığı 25 mm olan çelik sönümleyici eleman kullanımı ile B.A çerçeve *hemen kullanım* performans seviyesine getirilebilmektedir.



Şekil 5. Yalın ve güçlendirilmiş durumlarda ortalama göreli kat ötelemeleri (%)

Dinamik analiz sonuçları, yalın çerçevenin farklı kalınlıklardaki çelik sönümleyicilerle güçlendirilmesi durumunda; ortalama göreli kat ötelemeleri değerlerinin her kat için azaldığını göstermektedir. Kalınlık parametresi kendi içinde değerlendirildiğinde, 25 mm kalınlığındaki çelik sönümleyicinin birinci kattaki göreli kat öteleme seviyesini azaltma noktasındaki etkisi, 8 mm kalınlığındaki çelik sönümleyiciye göre iki katından daha fazla olmuştur. Birinci kat seviyesinde her deprem kaydı için elde edilen göreli kat ötelemeleri değerleri ve ortalamaları Tablo 3'de ayrıca gösterilmiştir. Northridge ve Kobe deprem kaydı dışındaki kayıtlarda çelik sönümleyicilerin kalınlığının artmasıyla göreli kat

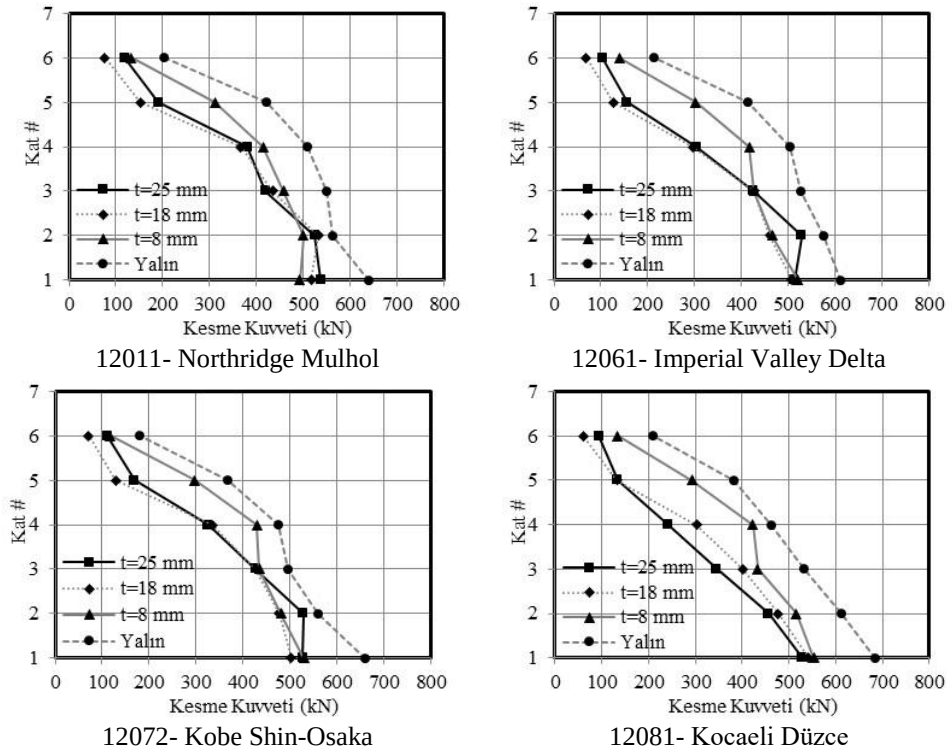
ötelemeleri seviyelerinde anlamlı azalmalar görülmüştür. Yapı sisteminin birinci katında elde edilen ortalama göreli kat ötelemeleri seviyeleri 25 mm kalınlığındaki sönümleyici kullanımı durumunda %1 seviyesinde tutulmasını sağlamıştır. Kalınlığı 8 mm olan çelik sönümleyici kullanımının birinci kat seviyesindeki göreli kat ötelemesini azaltılması söz konusu değildir.

Tablo 3. Birinci kat seviyesinde elde edilen göreli kat ötelemeleri (%)

	12011- Northridge	*12061- Imperial Valley*	*12072- Kobe*	*12081- Kocaeli*	*Ortalama*
Yalın Durum	2.73	1.93	2.87	1.99	2.38
t=8 mm	3.27	1.28	3.17	1.93	2.41
t=18 mm	2.66	1.01	1.83	0.75	1.56
t=25 mm	1.76	0.76	1.13	0.58	1.06

4.2. Kesme Kuvvetleri

Analizler sonucunda, yalın ve güçlendirilmiş çerçevelerde farklı deprem kayıtları ve farklı kalınlıklarda sönümleyiciler kullanılması durumları için kolon elemanların maruz kaldıkları kesme kuvveti değerleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kat bazında kesme kuvvetleri değişimleri

Analiz sonuçları, güçlendirilmiş durumda her katta yer alan kolonların maruz kaldıkları kesme kuvvetleri değerlerinin her deprem kaydı için çelik sönümleyicilerin kalınlıklarına bağlı olarak bir miktar azalmalar olduğunu göstermektedir. Birinci kat seviyesinde kat kesme kuvvetlerindeki azalma 100 ile 200 kN arasında değişmektedir. Bu durum yatay kuvvetlerin belirli bir bölümünün çelik sönümleyici elemanlar tarafından karşılandığına işaret etmektedir.

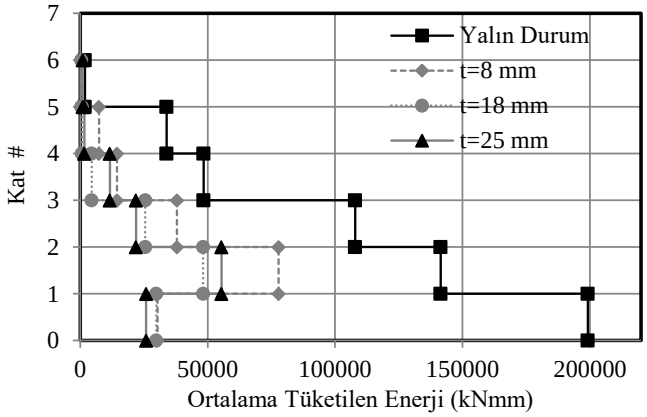
4. 3. Enerji Tüketimi

Yapıların deprem performanslarının belirlenmesi konusunda, yapısal elemanlar tarafından tüketilen enerji büyüklükleri, son derece önemli bir rol taşımaktadır. Yapı elemanları tarafından tüketilmeye zorlanan enerji, hasarın önemli bir göstergesidir. Çelik sönümleyici elemanlar, yapıya giren enerjinin belirli bir bölümünü tüketerek, yapısal elemanların daha az enerji tüketmesini sağlamaktadırlar. Kolon elemanlar tarafından tüketilmeye zorlanan enerji miktarları, birinci kat yatay yerdeğiştirmeleri ile aynı kat kolonlarının maruz kaldığı kesme kuvvetleri arasındaki çevrimsel ilişkinin alanları hesaplanarak belirlenmiştir [22]. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarından birinci kat kolonlarının tüketmeye zorlandıkları enerji büyüklükleri ve yalın çerçeve durumuyla karşılaştırıldığında bu değerlerdeki azalma oranları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Birinci kat seviyesinde tüketilen enerji büyüklükleri (kNmm)

Deprem Kayıtları	*Yalın Çerçeve*	*Güçlendirilmiş Çerçeve*		
		t=8 mm	t=18 mm	t=25 mm
12011 Northridge Mulhol	162000	16000	62000	63000
12061 Imperial Valley	260000	15000	45000	31000
12072 Kobe Shin Osaka	140000	25000	30000	41000
12081 Kocaeli Düzce	61000	9000	4500	3000
Ortalama	155750	16250	35375	34500
Azalma Oranı (%)		10	23	22

Analiz sonuçlarına göre her deprem kaydı için güçlendirilmiş durumda, yapısal elemanlar tarafından tüketilmeye zorlanan enerji büyüklüklerinin %10 ile %23 arasında değişen oranlarda azaldığı görülmektedir. Çelik sönümleyici elemanların kalınlıklarının 8 mm'den 25 mm'ye çıkması durumunda enerji tüketim miktarındaki azalma 2 kat artmaktadır. Yapısal elemanlar tarafından tüketilen ortalama enerji değerleri her kat için ayrı ayrı Şekil 7'de gösterilmiştir.

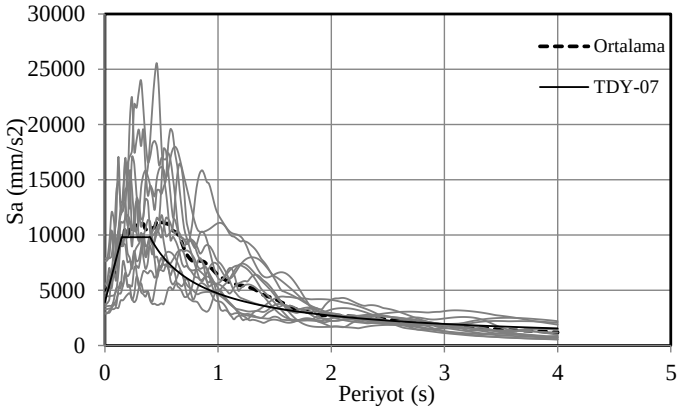


Şekil 7. Kat bazında ortalama enerji tüketimi değişimi

Çelik sönümleyici elemanların kullanımı sayesinde her kattaki yapısal elemanlar tarafından tüketilen enerji miktarı azalmıştır. Çelik elemanlar enerjinin belirli bölümünü kendi bünyelerinde tüketerek yapısal elemanların daha az hasar almasını sağlamışlarıdır. Çelik yastıkların chevron tipi bağlantı detayı ile uygulandığı durumda B.A çerçevelerin deprem performansı irdelemesi sonucunda 25 mm kalınlığındaki çelik yastık uygulamasının çerçeve davranışını *hemen kullanım* performans seviyesine getirdiğini göstermiştir, [23].

5. KIRILGANLIK EĞRİLERİ KAPSAMINDA DEĞERLENDİRME

Çalışmanın bu bölümünde yapısal davranışa etkinliği belirlenen 25 mm levha kalınlığına sahip sönümleyici elemanların çerçeve sistemin deprem davranışına etkisinin olasılıksal ifadelere dayandırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapı sisteminin öngörülen deprem senaryosu kapsamında kırılganlık eğrileri oluşturulmuştur. Kırılganlık eğrileri geniş perspektifte yapıların deprem etkilerinin belirli bir performans seviyesinde hasar görebilme olasılığının nicel olarak belirlenmesinde etkin olarak kullanılmaktadır, [24]. Hasar görebilirlik eğrileri, gerçekleştirilen bir seri lineer olmayan artımsal dinamik analiz sonuçları değerlendirilerek Jack Baker tarafından önerilen yöntem doğrultusunda oluşturulmuştur [25]. Bu çalışmada performans seviyelerinin ve hasar durumlarının belirlenmesi için Tablo 2'de verilen göreli kat ötelemeleri değerleri esas alınmıştır. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerde kullanılan deprem kayıtları FEMA'nın P695 metodu kapsamında verilen 22 deprem kaydı arasından seçilen 13 deprem kaydı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının spektral ivme grafikleri Şekil 8'de görülmektedir.

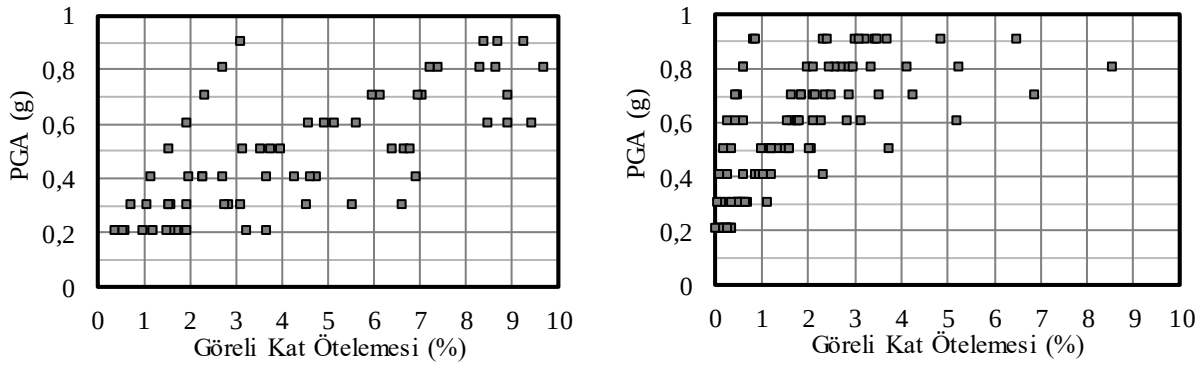


Şekil 8. Deprem kayıtları için oluşturulan spektral ivme grafikleri

Kırılganlık eğrilerinin oluşturulmasında zemin ivmesi (PGA) değerleri deprem kayıtlarının ölçüsü olarak esas alınmıştır. Seçilen deprem kayıtları 0.2g ve 0.9g aralığında; 0.1g artımlardaki hedef ivme seviyelerine lineer olarak ölçeklendirilmiştir. Lineer olmayan dinamik analizlerde her bir deprem kaydı için en büyük yer ivmesi 0.2g ile 0.9g arasında değişen toplam 8 deprem kaydı kullanılmıştır.

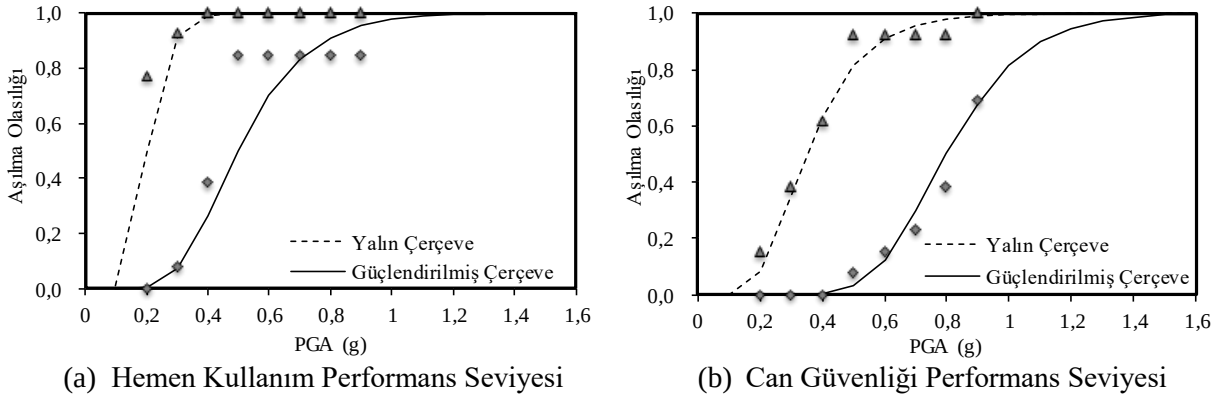
Yalın çerçeve ve 25 mm kalınlığında levhaların kullanıldığı güçlendirilmiş çerçevelerin artımsal dinamik analiz sonuçları göreli kat ötelemeleri kapsamında Şekil 9'da verilmiştir.

Lineer olmayan artımsal dinamik analiz sonuçları, yalın çerçeve durumunda her ivme şiddetinde göreli kat ötelemelerinin güçlendirilmiş çerçeveye göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Güçlendirilmiş çerçeve durumunda can güvenliği ve hemen kullanım performans seviyelerini aşan analiz sonuçlarının daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Artımsal dinamik analiz sonuçları

Analizlerden elde edilen en büyük göreli kat ötelemeleri değerleri, Tablo 2'de verilen performans seviyeleri kapsamında değerlendirilmiş olup kırılganlık eğrilerinin oluşturulmasında kullanılmıştır [24]. Hemen kullanım ve can güvenliği performans seviyeleri esas alınarak oluşturulan eğriler Şekil 10'da yalın ve güçlendirilmiş durumlar için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 10. Kırılganlık eğrileri

Güçlendirilmiş çerçevelerin kırılganlık eğrileri incelendiğinde, *hemen kullanım (HK)* ve *can güvenliği (CG)* performans seviyelerinde PGA=0.4g ve PGA=0.6g düzeyindeki depremlerin aşılma olasılıklarında yalın çerçeveye göre önemli seviyede azalmalar olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 6 katlı B.A çerçeve sisteme eklenen çelik sönümleyici elemanların etkisi sayısal olarak incelenmiş olup aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Yalın durum ile karşılaştırıldığında, güçlendirilmiş çerçevelerin göreli kat ötelemelerinde önemli azalmalar olduğu görülmüştür. Kalınlığı 25 mm olan çelik sönümleyicinin birinci kattaki göreli kat öteleme seviyesini azaltıcı etkisi, 8 mm kalınlığındaki çelik sönümleyiciye göre iki katından daha fazla olmuştur. Güçlendirilmiş çerçevenin birinci katında göreli kat ötelemesi değeri %1'e kadar indirilmiştir.

2. Analiz sonuçları, yalın ve güçlendirilmiş durumda kolon elemanların maruz kaldıkları kesme kuvvetlerinin her deprem kaydı için azaldığını göstermektedir. Kesme kuvvetlerin belirli bir bölümü çelik sönümleyici elemanlar tarafından karşılanmaktadır.

3. Çelik sönümleyiciler, kolon elemanlar tarafından tüketilmeye zorlanan enerji değerlerinde %10 ile %20 arasında değişen oranlarda azalma olmasını sağlamıştır. Çelik sönümleyici elemanların kalınlıklarının 8 mm'den 25 mm'ye çıkması ile enerji tüketim miktarındaki azalma 2 kat artmaktadır.

4. Güçlendirilmiş çerçevelerin kırılganlık eğrileri, PGA=0.4g ve PGA=0.6g düzeyindeki depremlerin *hemen kullanım (HK)* ve *can güvenliği (CG)* performans seviyelerinde bir değerlendirme yapıldığında aşılma olasılıklarında önemli azalmalar olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan çelik sönümleyici elemanlar, SAFECLADDING isimli bir Avrupa Birliği Projesi kapsamında tasarlanmıştır. Yazarlar, SAFECLADDING projesi yöneticileri Prof.Dr. Faruk KARADOĞAN'a ve Prof.Dr. Ercan YÜKSEL'e en içten teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

[1] Kelly JM, Skinner RI and Heine AJ. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering 1972; 5(3), 63-88.

[2] Shen K. L. and Soong T. T., Chang K. C., Lai M. L. Seismic behaviour of reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers. Engineering Structure 1995; 372-380.

[3] Bergman DM, and Goel SC. Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness. University of Michigan, Ann Arbor Michigan, USA, Rep. No. UMCE 87-10., 1987.

[4] Tsai KC, Chen HW, Hong CP and Su YF. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic resistant construction. Earthquake Spectra 1993; 19(3), 505-528.

[5] Chan RWK., Albermani F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. Engineering Structures 2008; 30, 1058–1066.

[6] Chan R, Albermani F, and Williams M. Evaluation of Yielding Shear Panel Device for Passive Energy Dissipation. Journal of Constructional Steel Research 2009; 65, 260–268.

[7] Shultz AE and Magana RA. Seismic Behavior of Connections in Precast Concrete Walls. Proceedings of Mete A. Sozen Symposium 1996; American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA: ACI SP 162, pp. 273-311

[8] Mazzolani FM.. Innovative metal systems for seismic upgrading of RC structures. Journal of Constructional Steel Research 2007; 64(2008), 882–895.

[9] Alehashem SMS, Keyhani A, and Pourmohammad H. Behavior and Performance of Structures Equipped With ADAS & TADAS Dampers (a Comparison with Conventional Structures). The 14th World Conference on Earthquake Engineering; 12-17 October 2008; Beijing, China.

[10] Oh SH, Kim YJ, Ryu HS. Seismic performance of steel structures with slit dampers. Engineering Structures 2009; 31, 1997-2008.

[11] Sahoo DR, Rai DC. Seismic strengthening of non-ductile reinforced concrete frames using aluminum shear links as energy-dissipation devices. Engineering Structures 2010; 32, 3548–3557.

[12] Maleki S, Bagheri, S. Pipe Damper, Part I. Experimental and Analytical Study. Journal of Constructional Steel Research 2010; 66, 1088-1095.

[13] Maleki S, Mahjoubi S. Dual-pipe damper. Journal of Constructional Steel Research, 2013; 85, 81–91.

[14] Karalis A, Georgiadi-Stefanidi KA, Salonikios TN, Stylianidis KC, Mistakidis ES. "Experimental and Numerical Study of the Behaviour of high Dissipation Metallic Devices for the Strengthening of Existing Structures". Proceedings of the III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2011, Corfu, Greece, May 2011.

[15] SAFECLADDING EU Project, Improved Fastening Systems of Cladding Panels for Pre-cast Buildings in Seismic Zones, 2012-2015.

[16] TDY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara 2007.

[17] Özkaynak H., Model proposal for steel cushions for use in Reinforced Concrete frames. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017; 21(7), 2717-2727

[18] Güllü A., Ozkaynak H., Khajehdehı A., Gökçe T., Azizisales F., Bal İ.E., Smyrou E., Yüksel E., Karadoğan F. Derivation Of The Closed Form Equatıons For The Energy Dissipative Steel Cushions 14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, San Diego, 9-11 September 2015, Ca USA.

[19] Özkaynak H. Enerji Tüketebilen Çelik Yastıkların Tipik Bir Betonarme Çerçeve Davranışına Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2017; 23(6), 637-645.

[20] FEMAP695 (2009), Recomended methodology for quantification of building systemperformance and response parameters, Federal Emergency Management Agency, Redwood City, California.

[21] SeismoStruct – A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures, SeismoSoft, 2014.

[22] Zahrah, T.F. Seismic energy absorption in simple structures. PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana Illinois, 1982.

[23] Özkaynak H. The effects of special metallic dampers on the seismic behavior of a vulnerable RC frame, Structural Engineering and Mechanics, An International Journal, 2017; 61(4), 483-496.

[24] Papailia A. Seismic fragility curves for reinforced concrete buildings. MSc, University of Patras, Patras, Greece, 2011.

[25] Jack W Baker. Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis. Earthquake Spectra: February 2015; 31(1), 579-599.