Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 23(6), 637-645, 2017

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Enerji tüketebilen çelik yastıkların tipik bir betonarme çerçeve davranışına etkisi

The effect of energy dissipating steel cushions on the behaviour of a typical reinforced concrete frame

Hasan ÖZKAYNAK[1*]

[1]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Beykent Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
hasanozkaynak@beykent.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 29.03.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 06.06.2016
doi: 10.5505/pajes.2016.57701
* Yazışılan yazar/Corresponding author
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Betonarme çerçeve tipi yapıların deprem davranışları, enerji tüketebilen metal elemanlar kullanılarak iyileştirilebilmektedir. Metal elemanlar, yapının çerçeve gözlerine yerleştirildiğinde yapıya giren deprem enerjisini plastik deformasyon yaparak tüketebilmektedir. Yeni nesil yapı tasarımı, plastik şekil değiştirmelerin yapısal elemanlardan çok, deprem sonrasında yenisiyle değiştirilebilen metal elemanlarda yoğunlaşması sağlanarak hasarının azaltılması eğilimindedir. Bu çalışmada enerji tüketme özelliği olan farklı kalınlıklardaki yastık görünümlü metal elemanların çevrimsel davranışı, deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Farklı kalınlıklardaki çelik yastıkların kayma deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEELAB) gerçekleştirilmiştir. Çelik yastıklar için analitik model geliştirilmiş ve gerçek betonarme yapıdan çıkartılmış bir çerçevenin lineer olmayan analizinde kullanılmıştır. Analiz sonuçları, levha kalınlığına bağlı olarak çelik yastıkların betonarme çerçeve dayanımını %5 ile %20 arasında değişen oranlarda artırdığını göstermektedir. Kalınlığı 18 mm olarak seçilen çelik yastığın kullanıldığı betonarme çerçeve yalın çerçeveden 5 kat daha fazla enerji tüketmiştir. Aynı kalınlıktaki çelik yastık, çerçeve sistemin toplam enerjisinin %55'ini tüketmiştir.

Anahtar kelimeler: Çelik yastık, Lineer olmayan analiz, Dayanım enerji tüketimi, Çevrimsel davranış, Metal histeretik sönümleyici

Abstract

Seismic behavior of reinforced concrete frame type structures can be improved by adding energy dissipating metallic devices. Metal devices can dissipate the earthquake input energy by means of plastic deformation when they are located within the bays of the structure. New generation structural design methods tend to concentrate the plastic deformations accumulated on replaceable steel elements rather than on structural members and therefore decrease the damage level. In this study, experimental and analytical investigation was conducted in order to determine the hysteretic behaviour of energy dissipative steel cushion shaped metal elements with variable thicknesses. Shear tests of energy dissipative steel cushions were performed in the Structural and Earthquake Engineering Laboratory (STEELAB) of ITU. Analytical model was developed for the steel cushions and the model was used in the nonlinear analysis of a frame system that was extracted from an actual model structure. The analysis results showed that depending on the thickness, steel cushions increase the strength of the structure in the range of 5% to 20%. 18 mm thick steel cushion instrumented frame dissipates 5 times more energy than the bare frame. Steel cushion having the same thickness dissipated 55% of the total energy of the frame system.

Keywords: Steel cushion, Non-linear analysis, Strength, Energy dissipation, Cyclic behaviour, Metallic hysteretic damper

1 Giriş

Mevcut betonarme yapıların deprem etkilerine karşı güçlendirilmesi, eleman boyutlarının artırılması veya çerçeve gözlerine betonarme perdeler ilave edilmesi gibi yöntemler ile sağlanabilmektedir. Ancak, bu tip geleneksel yöntemlerde yapıya dayanım artışı sağlanırken aynı zamanda yapının deprem istemi de arttırıldığı için şiddetli depremlerde yapısal hasar, kaçınılmaz olmaktadır. Bu noktada, yeni nesil güçlendirme yöntemleri olarak, sismik izolatörler ve pasif enerji sönümleyici cihazlar öne çıkmaktadır. Yapının temel seviyesinde kullanılan ve yatay rijitliği yapıya göre çok küçük olan sismik izolatörler deprem enerjisinin üst yapıya doğrudan aktarılmasını engellemekte, pasif sönümleyiciler ise yapıya aktarılan deprem enerjisini kendi bünyesinde tüketmektedir. Deprem enerjisinin tüketildiği, bu tip teknolojiler sayesinde yapısal elemanların lineer olmayan deformasyon istemleri ve elemanlarda gözlenen hasar seviyesi, önemli ölçüde azalmaktadır.

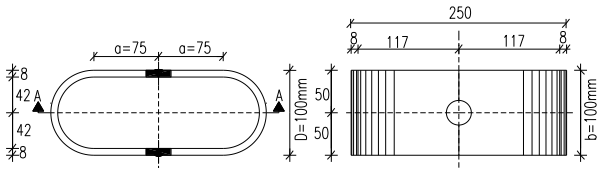
Bu çalışmada, pasif enerji sönümleyici cihazlara alternatif olarak deprem enerjisini tüketebilen ekonomik ve kolay uygulanabilir çelik yastık tipi metal elemanlar geliştirilmiş ve betonarme çerçevelerin çevrimsel davranışına etkisi incelenmiştir. Metal elemanların şekil değiştirmesi ile yapıya aktarılan deprem enerjisinin tüketilmesi konusu birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Deprem enerjisinin, çelik plakalar kullanılarak soğurulması fikri ilk kez Kelly ve Skinner tarafından ortaya atılmıştır [1],[2]. Bergman ve Goel, Tsai ve diğ. metal levhaların eğilme etkisindeki şekil değiştirmesi ile enerji tüketebilen çelik aparatlar geliştirmişlerdir [3],[4]. Chan ve Albermani gövdesi delikli metal elemanların kayma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir [5]. Çalışmada, metal elemanların ancak ileri yerdeğiştirme seviyelerinde kırıldığı, yüksek enerji tüketim özelliklerine ve süneklik kapasitesine sahip oldukları belirtilmiştir. Chan ve diğ. ince levha gövdeli metal elemanlar üzerinde deneyler yapmışlardır [6]. Çalışmaya göre, metal elemanlar, ileri yapısal yerdeğiştirme seviyelerinde %30 oranında eşdeğer sönüm oluşturmuştur. Priestley tarafından yürütülen PRESS araştırma programı çerçevesinde Shultz ve Magana duvarlar arasında kullanılmak üzere alternatif metal bağlantı elemanları üzerinde deneyler yapmışlardır [7],[8]. Yapılan deneylerde enerji tüketimi ve şekil değiştirme kapasitesi açısından en uygun bağlantı aparatının "U" şeklinde çelik

plakalar olduğu sonucuna ulaşılmıştır. FM. Mazzolani alt bölümlere ayırdığı mevcut yapıda farklı tipte metal sönümleyici elemanlar kullanarak performanslarını test etmiştir [9]. Test sonuçları, metal elemanların yapı sisteminin dayanım, rijitlik ve sünekliğini olumlu yönde artırdığını göstermiştir. Alehashem ve diğ., metal sönümleyicilerin yer aldığı ve sadece çelik çaprazların bulunduğu yapıda doğrusal olmayan dinamik analiz çalışmaları yapmışlardır [10]. Çalışma sonucunda inelastik şekil değiştirmelerin metal sönümleyici elemanlar üzerinde yoğunlaştığı ve ana yapının güvenli bölgede kaldığı sonucuna varılmıştır. Oh ve diğ. kolon-kiriş birleşim bölgelerinde enerji tüketebilen metal elemanların takıldığı numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır [11]. Metal elemanların bulunmadığı numunelerde yerel burkulmalar görülürken, bulunduğu durumda hasarın büyük bir bölümü bu elemanlar üzerinde yoğunlaşmış ve elemanlar önemli ölçüde enerji tüketmiştir. Sahoo ve Rai kayma doğrultusunda enerji tüketebilen alüminyum elemanların, sünek olmayan betonarme çerçevenin davranışına katkısını deneysel olarak incelemişlerdir [12]. Deneyler, alüminyum elemanların; çerçeve eşdeğer sönüm oranını %7.9'dan %15.5'e çıkarttığını, toplam enerjinin 2/3'nü tükettiğini, çerçeve rijitliğini ve dayanımını, artırdığını göstermiştir. Deneyler sırasında yapısal elemanlarda %3.5 göreli kat ötelemesine kadar ciddi hasarın oluşmadığı ve hasarın büyük bir bölümünün alüminyum sönümleyicilerde toplandığı gözlenmiştir. Maleki ve Bagheri içi beton dolu ve içi boş olan çelik boruları tek yönlü ve tersinir tekrarlı yükler etkisinde test etmişlerdir [13]. Yapılan çalışmalarda, içi beton dolu numunelerin betonun dağılmasından dolayı sünek olmayan bir davranış gösterdiği, içi boş boruların ise oldukça stabil çevrimsel davranış ile önemli ölçüde enerji tüketebildiği belirlenmiştir. Maleki ve Mahjoubi iki ayrı borunun kaynaklanarak birleşiminden oluşan ikili boru sistemi geliştirmişlerdir [14]. Boru sisteminin avantajları, borunun ağırlığına oranla iyi bir enerji tüketebilmesi ve boru yüksekliğinin %36'sı kadar yatayda yerdeğiştirme yapabilmesidir. Ozkaynak ve diğ. malzeme kalınlığının, malzeme kalitesinin çelik yastıklarda çevrimsel davranışa etkisini ve çelik yastıklarda en iyi davranış gösteren kaynak lokasyonunu araştıran statik deneyler yapmıştır [15]. Deney sonuçları, yumuşak çeliğin paslanmaz çeliğe göre daha sünek davrandığını ve kaynak lokasyonunun bulon merkezinde yeralması gerektiğini göstermiştir. Gullu ve diğ. çelik yastıkların sonlu elemanlar modelini oluşturmuş ve deneysel sonuçlara yakın analitik sonuçlar elde etmiştir [16]. Karalis ve diğ., I kesitli çelik bağlantı elemanını tek katlı ve tek açıklıklı betonarme çerçeveye adapte ederek deneyler yapmışlardır [17]. Yapılan deneyler bağlantı elemanının, çerçeve davranışına dayanım, rijitlik ve enerji tüketimi açılarından önemli katkıları olduğunu göstermiştir. Çalışmada kolon ve kirişlerde yerel hasarın oluşmaması için bağlantı elemanının boyutlarının dikkatli seçilmesi, gerektiği vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, çelik yastıkların çevrimsel davranışları deneysel ve analitik olarak belirlenmiş olup, betonarme çerçeve sistemde uygulandığında çerçevenin dayanımına ve enerji tüketme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Farklı kalınlıklardaki çelik yastık numuneleri üzerinde bir seri tersinir tekrarlı statik deneyler yapılmıştır. Çelik yastıkların deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri, yastıkların önemli düzeyde enerji tüketme kapasitelerinin olduğunu göstermektedir. Çalışmanın analitik bölümünde, çelik yastıkların çevrimsel davranışını tahmin edebilen bir model önerisi, çelik yastıklı betonarme çerçevede lineer olmayan statik analiz sonuçları ve çelik yastıkların betonarme çerçevede kullanımı için uygulama detayları yer almaktadır. Analiz sonuçları, çelik yastık uygulamasının çerçeve dayanımını ve enerji tüketim kapasitesini önemli düzeyde artırdığını göstermiştir.

2 Çelik yastık kayma deneyleri

Çelik yastıklar üzerinde yumuşak çelikten imal edilen 3, 5 ve 8 mm kalınlıklarda yastıkların her birinden 3'er adet olmak üzere toplamda 9 adet kayma deneyi yapılmıştır. Çelik yastıklar için öngörülen geometrik büyüklükler Şekil 1'de verilmiştir. Çelik yastık boyutları, SAFECLADDING isimli bir Avrupa birliği projesi kapsamında gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda, derinliği (D) 100 mm, yüksekliği (h) 250 mm ve genişliği (b) 100 mm olarak seçilmiştir [18].



(a): Kesit. (b): Plan.

Şekil 1: Kalınlığı 8 mm olan çelik yastık boyutları.

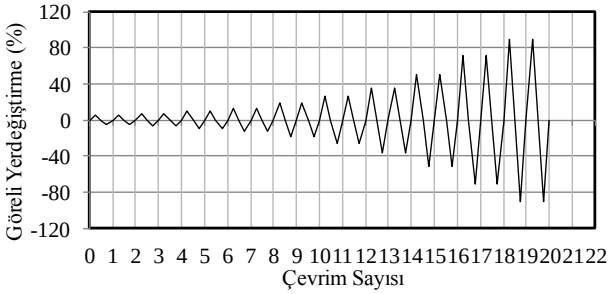
Çelik yastık, çelik levha dilimlerinin kıvrılması ile oluşan iki yarım daire ve düz levha şeklindeki bölümlerden oluşmaktadır. Kıvrılan levhalar yastığın montajı için bırakılan delik civarında kaynaklanmıştır. Kalınlıkları 3 ve 5 mm olan numunelerde 20 mm, kalınlığı 8 mm olan numunelerde ise 29 mm delik çapı bırakılmıştır. Deney numunelerinin üretildiği çelik levhalardan kesilen kupon numunelerde yapılan malzeme deneylerine göre, çeliğin akma dayanımı 350 MPa, kopma dayanımı 430 MPa ve kopma şekil değiştirmesi %20 olarak belirlenmiştir. Kayma deneyleri için özel olarak üretilmiş olan deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Deney düzeneği.

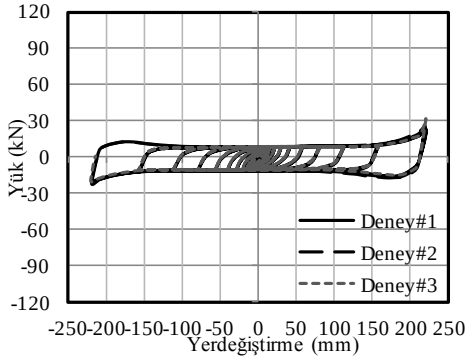
Çelik yastık numunesi, deney düzeneğinin sol tarafında yer alan ankastre mesnetli yatay kısa kiriş ile sağ tarafında yer alan düşeyde kayıcı mesnetli hidrolik verene bağlı yatay kiriş arasına bulonlanarak bağlanmıştır. Kayıcı mesnetli kirişin düzlem dışı hareketi ve deney düzeneğinin istenmeyen düzlem içi deformasyonu ilave profiller kaynatılarak engellenmiştir. Statik karakterli deneyler, tersinir tekrarlı olarak uygulanan yerdeğiştirme protokolünün deney numunesine etkitilmesi

suretiyle tamamlanmıştır, Şekil 3'te Yerdeğiştirme protokolü deney numunesinin yüksekliği ve genişliği arasındaki orana bağlı olarak ve 2 tam çevrim uygulanarak FEMA461 yönetmeliği gereğince belirlenmiştir [19].

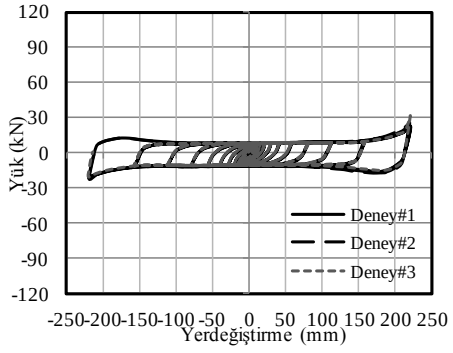


Şekil 3: Göreli yerdeğiştirme protokolü.

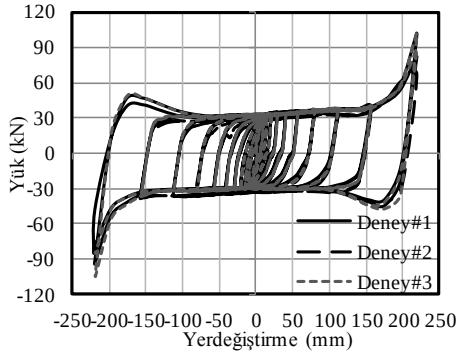
Kalınlıkları 3, 5 ve 8 mm olan çelik yastıkların kayma deneylerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 4'te verilmiştir.



t=3 mm.



t=5 mm.

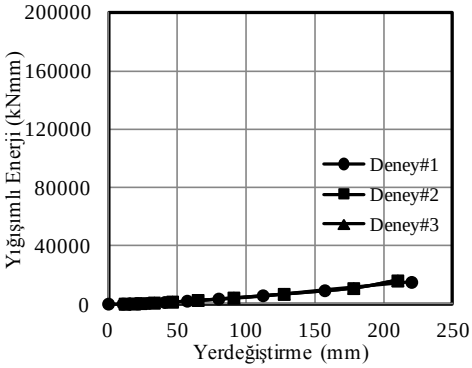


t=8 mm.

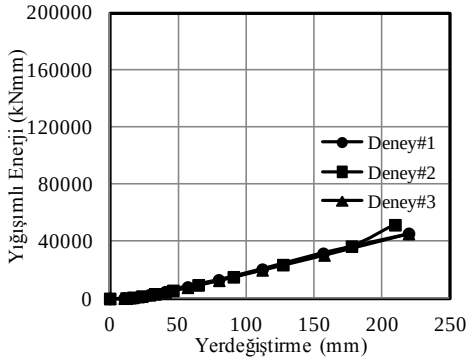
Şekil 4: Çelik yastıkların yük-yerdeğiştirme ilişkileri.

Kalınlığı 8 mm olan çelik yastığın ortalama dayanımı 33 kN, yerdeğiştirme kapasitesi 220 mm olarak belirlenmiştir. Kalınlıkları 5 mm ve 3 mm olan numunelerin yük dayanımları sırasıyla 10 kN ve 3 kN'dur. Bütün numuneler tersinir tekrarlı yükler etkisinde simetrik bir davranış göstermiştir. İleri düzey yerdeğiştirmelerde deney numunesinin montaj bulonuna teması, rijitlik artışına sebep olmuştur. Bu çalışma SAFECLADDING isimli Avrupa Birliği Projesinin parçası olup, deneysel çalışma ile ilgili diğer bazı detaylar, Ozkaynak ve diğ. tarafından yapılan çalışmada bulunmaktadır [15].

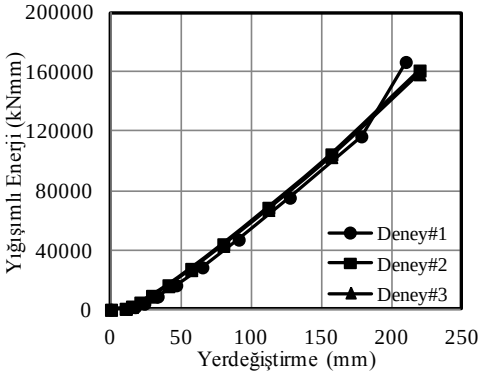
Çelik yastıkların yığışımlı enerji-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 5'te verilmiştir.



t=3 mm.



t=5 mm.



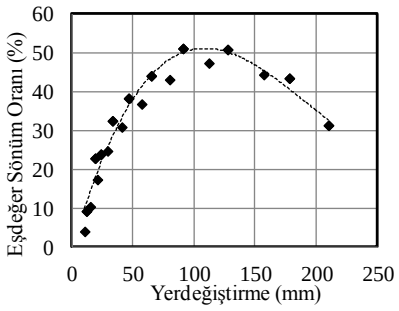
t=8 mm.

Şekil 5: Yığışımlı enerji-yerdeğiştirme ilişkileri.

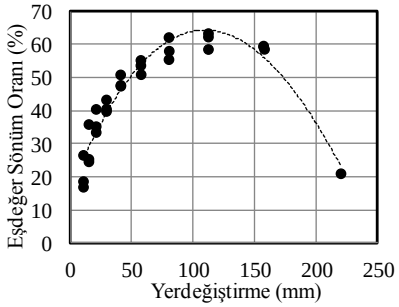
Enerji tüketme kapasiteleri, yük-yerdeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanların hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Kayma deneyleri, çelik yastıkların özel olarak seçilen geometrisinden dolayı önemli ölçüde enerji tüketim özelliğine sahip olduğunu göstermiştir. Kalınlığı 8 mm olan çelik yastık, 120 mm

yerdeğiştirme seviyesinde kalınlığı 3 mm olan çelik yastığa göre 10 kat fazla enerji tüketmiştir.

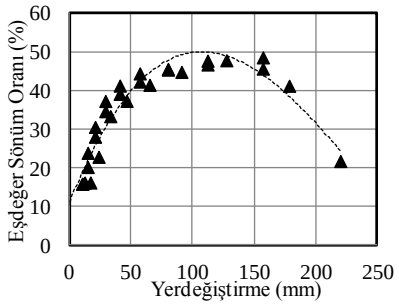
Farklı kalınlıktaki çelik yastık deneylerinden eşdeğer sönüm oranları hesaplanarak Şekil 6'da verilmiştir.



t=3 mm.



t=5 mm.



t=8 mm.

Şekil 6: Eşdeğer sönüm katsayıları yerdeğiştirme ilişkileri.

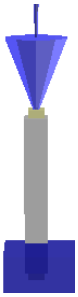
Eşdeğer sönüm oranı Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. Bir kapalı çevrimde harcanan enerji E_D ile gösterilmektedir. En büyük şekil değiştirme enerjisi, E_{S0} olarak adlandırılmaktadır [20].

$$\xi eq = \left(\frac{1}{4\pi}\right)\left(\frac{E_D}{Eso}\right) \quad (1)$$

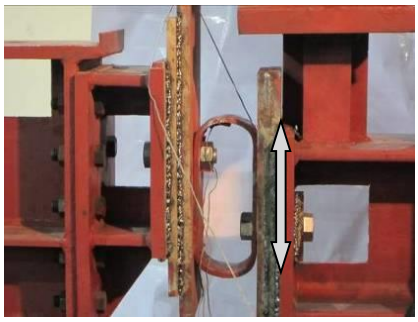
Kalınlık parametresinden bağımsız olarak çelik yastıkların 100 mm hedef yerdeğiştirme seviyesinde %45-%65 aralığında değişen oranlarda eşdeğer sönüm oluşturabildikleri görülmektedir.

3 Çelik yastık analitik modeli

Çelik yastıkların lineer olmayan çevrimsel analizi için Seismo-Struct [21] programında tanımlı, bir bağlantı elemanı modeli kullanılmıştır, Şekil 7'de bağlantı elemanı modelinde 6 farklı serbestlik doğrultusunda çeşitli davranış biçimleri tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada sadece baskın doğrultu olan kayma yönündeki serbestlikte Ramberg-Osgood davranış modeli tanımlanmıştır.



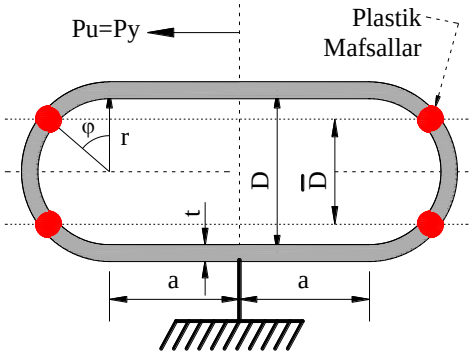
Bağlantı elemanı modeli.



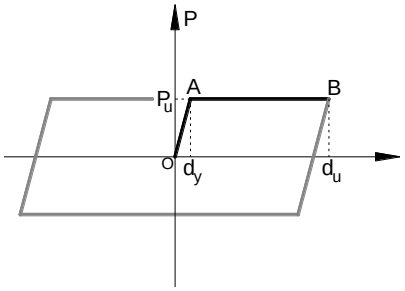
Gerçek şekil değiştirme durumu.

Şekil 7: Çelik yastık analitik modeli ve deneysel gözlem.

Çelik yastık analitik modelinin oluşturulması iki temel aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada, kapalı formulasyonlarla akma parametreleri (P_y, d_y) hesaplanmıştır [22]. İkinci aşamada ise akma parametreleri kullanılarak oluşturulan zarf eğrisinin içinde kalan alan tanımlanan çevrimsel kurallar ile doldurulmuştur. "Çelik yastığın doğrusal olmayan çevrimsel modelinin oluşturulması için Şekil 8(b)'de görülen pekleşmesiz elastoplastik yük-yer değiştirme zarfı eğrisi ve Denklem (6)'da verilen Ramberg-Osgood çevrimsel kuralları kullanılmıştır.



(a): Plastik mafsal yerleri.



(b): Yük-yerdeğiştirme zarfı.

Şekil 8: Plastik mafsal yerleri ve yük-yerdeğiştirme zarfı.

Deneyler sırasında pekleşme davranışı gözlenmediği için çelik yastığın, nihai dayanımının (Pu) akma dayanımına (Py) eşit olduğu varsayılmıştır. Modelin tanımlanabilmesi için akma dayanımı (P_y) ve akma yerdeğiştirmesi (d_y) gibi iki önemli parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerin hesaplanması için Şekil 8(a)'da görülen hiperstatik sistemde klasik kuvvet yöntemi uygulanmış ve elde edilen kapalı ifadeler Denklem (2)-(5)'de verilmiştir [22]. Çelik yastığın nihai dayanımı (P_u), yastıkta oluşan dört plastik mafsalın yük taşıma kapasitelerinin toplamına eşittir. Çelik yastığın akma dayanımı (P_y) hesabı için, çelik malzemenin akma dayanımına (f_{yd}), yastığın genişliğine (b), çelik levhanın kalınlığına (t) ve yastığın derinliğine (D) ihtiyaç duyulmaktadır. Akma yerdeğiştirmesi (d_y) hesaplanması için çeliğin elastisite modülü (E) 200.000 MPa, kıvrılmamış düz kısmın yarı uzunluğu (a), kıvrılmış kısmın yarı çapı (r) ve levha kesitinin atalet momenti (I) kullanılmaktadır.

$$M_u = (f_{yd}.b.t^2)/4 \quad (2)$$

$$P_y = (4M_u)/D \quad (3)$$

$$P_y = (f_{yd}.b.t^2)/D \quad (4)$$

$$dy = \frac{Pur^3}{4EI}\left(\frac{2\pi^2a^2 + 8ar + (3\pi^2 - 16)r^2}{2\pi a^2 + 8ar + \pi r^2}\right) \quad (5)$$

Kalınlıkları 3 mm, 5 mm ve 8 mm olan çelik yastıkların akma dayanımları deneysel olarak 3 kN, 9 kN ve 27 kN olarak belirlenmiştir. Çelik yastıklar için verilen ilgili kapalı ifadeler kullanılarak hesaplanan akma parametreleri (P_y, d_y) değerleri ile deneysel olarak elde edilen akma dayanımları arasındaki farklar Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlar arasında görülen en büyük fark %11 düzeyinde olmuştur. Çalışmanın analitik bölümünde kullanılmak üzere kalınlıkları 8 mm ve 18 mm olarak seçilen çelik yastıkların akma parametreleri aynı tabloda görülmektedir. Akma parametreleri (P_y, d_y) yük-yerdeğiştirme zarf eğrisinin oluşturulmasında ve aynı zamanda çevrimsel kuralların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Çevrimsel kurallar, Ramberg-Osgood modeline dayalı olarak Denklem (6)'da verilen kapalı ifade ile tanımlanmıştır. Burada Ramberg-Osgood parametresi "γ" 50 olarak alınmıştır.

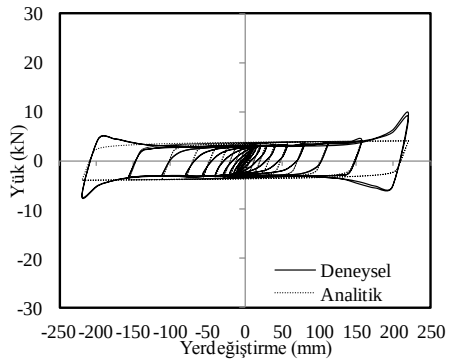
$$\frac{d}{d_y} = \frac{P}{P_y}\left\{1 + \left|\frac{P}{P_y}\right|^{\gamma-1}\right\} \quad (6)$$

Tablo 1: Akma parametreleri ve deneysel farklar.

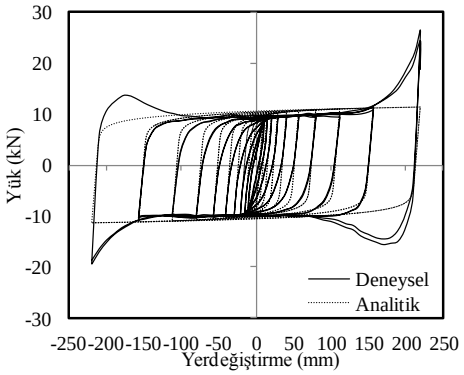
t (mm)	f_{yd} (N/mm²)	b (mm)	P_y(N)	d_y (mm)	Fark (%)
3	350	100	3351	7.6	10
5	350	100	9210	4.51	2
8	350	100	24348	2.91	11
18	350	100	138290	1.45	-

Analitik ve deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 9'da verilmiştir.

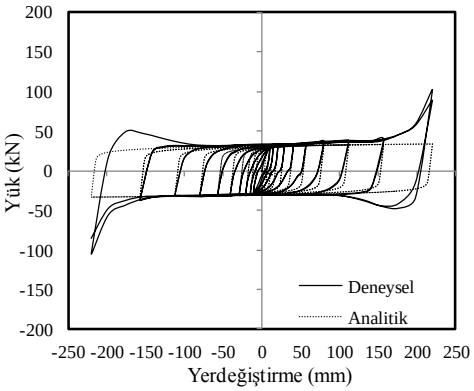
Her kalınlıktaki çelik yastıklar için deneysel ve analitik sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Çalışmanın analitik bölümünde kalınlığı 8 ve 18 mm olan çelik yastıkların modelleri kullanılmıştır. Genel olarak çelik yastık için geliştirilen analitik model, ulaşılan en büyük dayanım, rijitlik ve yerdeğiştirme kapasitelerini başarı ile tahmin edebilmektedir. Deney sırasında bulonun yastığa temasından kaynaklanan rijitlik artışı analitik modele dâhil edilmemiştir.



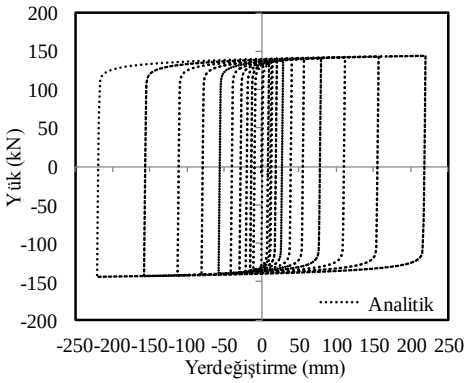
(a): t=3 mm.



(b): t=5 mm.



(c): t=8 mm.

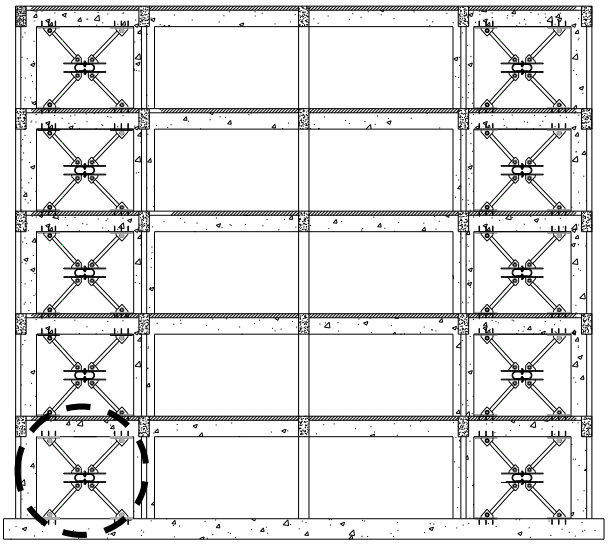


(d): t=18 mm.

Şekil 9: Çelik yastıkların analitik ve deneysel sonuçları.

4 Çelik yastıkların betonarme çerçeve davranışına etkisi

Çalışmanın bu bölümünde çelik yastıkların, beş katlı tipik bir betonarme sistemden çıkartılan, tek katlı çerçevenin çevrimsel davranışına etkisi incelenmiştir. Çelik yastıkların konumu yatay doğrultuda kayma deformasyonu yapacak şekilde öngörülmüştür (Şekil 10).

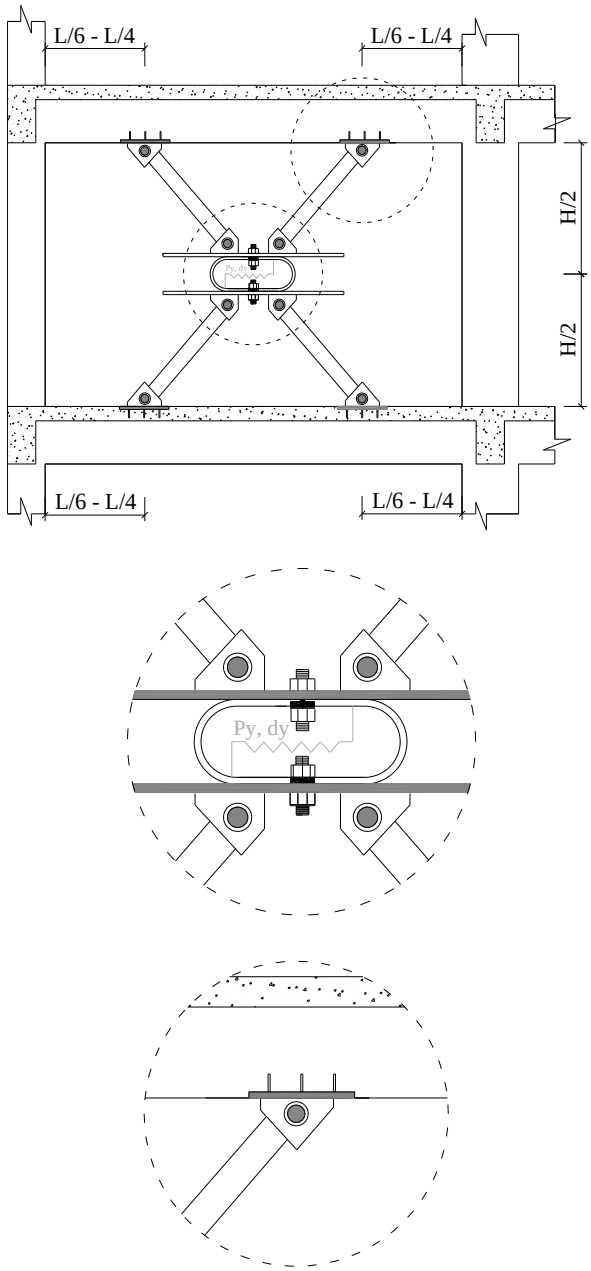


Şekil 10: Tipik betonarme çerçevede çelik yastık uygulaması.

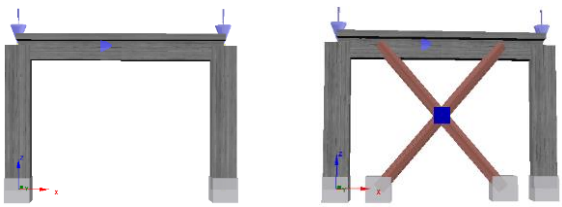
Çelik yastıklar, akma parametreleri (P_y, d_y) olan bağlantı elemanı olarak modellenmiştir. Çelik yastıklar, betonarme çerçeveye rijit boru elemanlar ile uçları mafsallı olarak bağlanmıştır. Boru elemanların rijit olmasının en önemli sebebi, tüm plastik şekil değiştirmelerin çelik yastık elemanda toplanmasının sağlanmasıdır. Boru elemanlar betonarme çerçevenin düşey yükler etkisindeki yaklaşık moment sıfır noktalarına mafsallı olarak bağlanmıştır, Şekil 11. Borularda ek eğilme etkisi oluşmaması ve betonarme elemanlara ilave moment aktarmaması için analitik modelde mafsalları temsilen boruların her iki ucuna moment serbestliği atanmıştır.

Yalın çerçeveye ve çelik yastıklı çerçeveye ait model görüntüleri Şekil 12'de verilmiştir.

Yalın ve çelik yastıklı çerçevelerin analitik modelleri Seismo-Struct programında oluşturulmuştur. Çerçeve açıklığı 3400 mm ve kolon yüksekliği 3000 mm olup, kolonlar 300×600 mm ve 300×400 mm boyutlarındadır. Tablalı kiriş yüksekliği 600 mm genişliği 300 mm olarak tasarlanmıştır. Kolon ve kiriş elemanlarda, boyuna donatı oranı %1.5, paspayı 40 mm olarak esas alınmıştır. Kolonlarda etriyeler; sıklaştırma bölgelerinde ϕ10/100, orta bölgelerde ϕ10/200; kirişlerde ise orta bölgelerde ϕ10/200, sıklaştırma bölgelerinde ϕ10/150 olarak dağıtılmıştır. Betonarme çerçeve analitik modelinde beton için dayanımı 20 MPa olan Mander sargılanmış modeli kullanılmıştır. En büyük dayanım değerinde 0.003 şekil değiştirme öngörülmektedir. Çelik modelinde 420 MPa akma dayanımlı, %3.0 negatif izotropik pekleşmeli Manegetto-Pinto çevrimsel modeli kullanılmıştır. Kesit davranışı SeismoStruct programında lif esasına dayalı olarak belirlenmekte olup lineer olmayan hesap için ilave kesit analizi yapılmamıştır [19]. Analitik çalışma kapsamında betonarme çerçevede kullanılacak çelik yastık kalınlıkları, 8 mm ve 18 mm olarak seçilmiştir. Bu kalınlıklar belirlenirken, kolon ve kiriş elemanlarda kayma zafiyeti oluşmaması için çelik yastıkların nihai dayanımının düşük seviyede kalmasına dikkat edilmiştir. Analitik hesapta, kalınlıkları 8 mm ve 18 mm olan çelik yastıklar için Şekil 9'da belirtilmiş olan davranış modelleri kullanılmıştır.



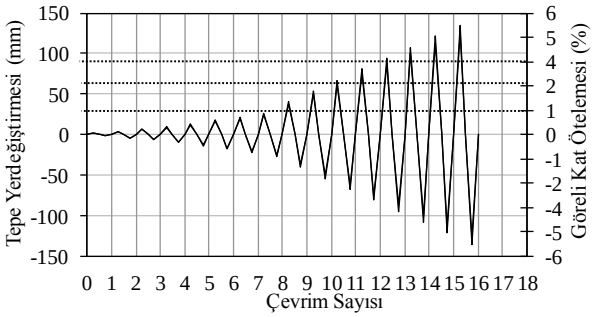
Şekil 11: Çelik yastık montaj detayları.



(a): Yalın çerçeve. (b): Çelik yastıklı çerçeve.

Şekil 12: Yalın ve çelik yastıklı çerçevenin model görüntüleri.

Yalın ve çelik yastıklı çerçeve sistemin çevrimsel davranışın incelenebilmesi için programın, lineer olmayan statik analiz modülü kullanılmıştır. Kolon elemanların her birine gerçek yapı modelinden aktarılan 882 kN şiddetinde eksenel yükler etkitilmiştir. Çerçeveye tepe noktasından etkitilen tersinir tekrarlı yerdeğiştirme protokolü Şekil 13'te verilmiştir. Yerdeğiştirme protokolü, TDY-2007'de belirtilen hasar sınırlarını izleyecek şekilde oluşturulmuştur [23].



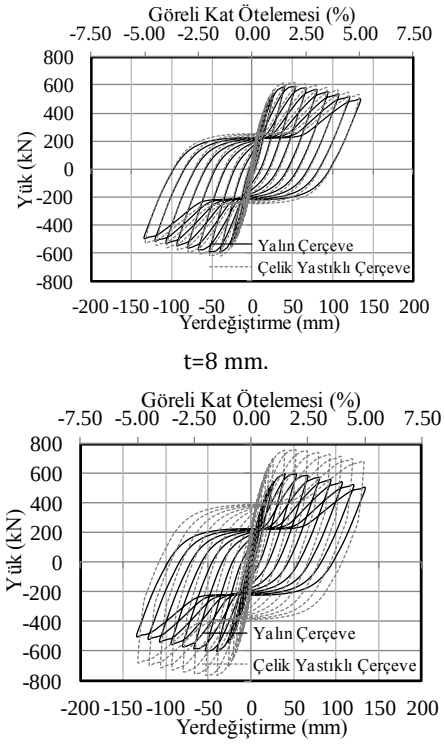
Şekil 13: Tersinir tekrarlı yerdeğiştirme protokolü.

Hasar sınırları, binanın herhangi bir katındaki kolon veya perdelerin göreli kat ötelemelerine karşılık gelen minimum hasar sınırı (MN), güvenlik sınırı (GV) ve göçme sınırı (GÇ) olarak tanımlanmış olup, Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2: Göreli kat ötelemesi sınırları [23].

Hasar Sınırı	Göreli Kat Ötelemesi
Minimum Hasar Sınırı (MN)	%1
Güvenlik Sınırı (GV)	%3
Göçme Sınırı (GÇ)	%4

Yalın ve çelik yastıklı çerçevenin analiz sonuçlarından elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 14'te verilmiştir.



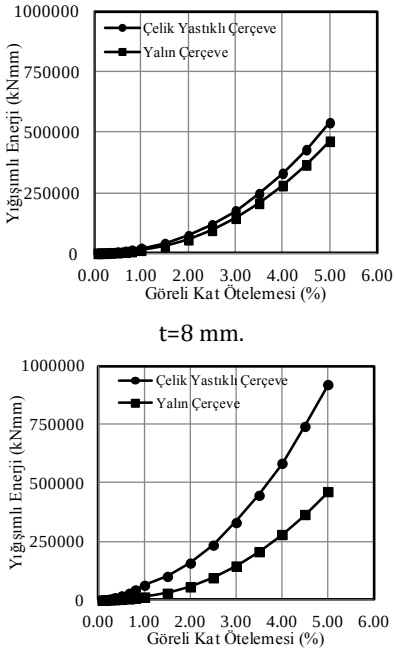
Şekil 14: Çelik yastıklı çerçevelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.

Kolonlarda kayma hasarı oluşmaması ve kolonun en büyük kayma dayanımının aşılmaması amacıyla çelik yastık kalınlığı en fazla 18 mm olarak seçilmiştir. Bu sayede kolonlar henüz kayma dayanımına ulaşmadığı için çelik yastıklar çevrimsel hareket sırasında şekildeğiştirme yapabilmiştir. Boyutları 300×600 mm, beton kalitesi C20, çelik kaitesi S420 olan kolon elemanın beton katkısı ihmal edildiği ve etriyenin en seyrek olduğu (ϕ10/200) durumda kayma dayanımı (V_r) Denklem (7) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemde yer alan ifadeler, etriye toplam kesit alanı (A_{sw}) 157 mm^2, etriye çeliğinin hesap akma dayanımı (f_{ywd}) 365 MPa, kolon kesiti eğilme yönündeki faydalı yüksekliği (d) 560 mm, etriye adım aralığı (s) 200 mm olmak üzere kolon kayma dayanımı Vr = 160.45 kN olarak hesaplanmıştır. Kalınlığı 18 mm olarak seçilen çelik yastığın en büyük dayanımı 150 kN olup, kolon elemanın kayma dayanımı aşılmamıştır.

$$V_r = \frac{A_{sw} \times f_{ywd} \times d}{s} \quad (7)$$

Analiz sonuçlarına göre; çelik yastıklar kalınlıklarına bağlı olarak çerçeve dayanımlarını artırmıştır. Çelik yastık kullanılan çerçevelerin yük-yerdeğiştirme eğrilerinin kapladığı alanlar yalın çerçeveye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kalınlığı 8 mm olan çelik yastık, minimum hasar sınırında (MN) betonarme çerçevenin dayanımını %5, kalınlığı 18 mm olan çelik yastık ise %20 oranında artırmıştır.

Yalın ve çelik yastıklı çerçevenin yığışımlı enerji tüketme kapasiteleri karşılaştırmalı olarak Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15: Çelik yastıklı çerçevelerin enerji tüketme kapasiteleri.

Kalınlığı 18 mm olan çelik yastığın kullanıldığı çerçevenin enerji tüketme kapasitesi, yalın çerçeveye göre; minimum hasar sınırı için 5 kat, güvenlik sınırı için 2 kat daha büyük olmuştur. Kalınlığı 8 mm olan çelik yastığın kullanıldığı çerçevede minimum hasar sınırında yalın çerçeveye göre ancak 1.6 kat daha fazla enerji tüketilebilmiştir. Çelik yastıklı çerçevelerin yalın çerçeveye göre tükettikleri enerjiler ve oransal değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Yalın çerçeve ve çelik yastıklı çerçevelerin enerji oranları.

		Hasar Sınırı	MN(%1)	GV(%3)	GÇ(%4)
Yalın Çerçeve		$E_{YÇ}$ (kNmm)	12910	145360	280190
Çelik Yastıklı Çerçeve		$E_{ÇYÇ-8}$ (kNmm)	20640	175890	330890
		$E_{ÇYÇ-18}$ (kNmm)	63190	331270	584510
Oran		$E_{ÇYÇ-8}/E_{YÇ}$	1.6	1.2	1.2
		$E_{ÇYÇ-18}/E_{YÇ}$	4.9	2.3	2.1

Çerçeve sistemin analiz sonuçlarından, bağlantı elemanlarının yük-yerdeğiştirme ilişkileri ve betonarme çerçeve sistemin taban kesme kuvvveti-yerdeğiştirme ilişkilerinden tüketilen enerjiler hesaplanmıştır. Kalınlıkları 8 mm ve 18 mm olan çelik yastıkların betonarme çerçeve içerisinde tüketmiş oldukları enerjiler ($E_{ÇY-8}$ ve $E_{ÇY-18}$) ve çelik yastıklı çerçevelerde tüketilen toplam enerjiler ($E_{ÇYÇ-8}$ ve $E_{ÇYÇ-18}$) hasar sınırlarına göre hesaplanarak Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4: Enerji oranları.

		Hasar Sınırı	MN(%1)	GV(%3)	GÇ(%4)
Yalın Çerçeve		$E_{ÇYÇ-8}$ (kNmm)	20640	175890	330890
		$E_{ÇYÇ-18}$(kNmm)	63190	331270	584510
Çelik Yastklı Çerceve		$E_{ÇY-8}$ (kNmm)	7326	30026	50293
		$E_{ÇY-18}$ (kNmm)	47787	182521	301098
Oran		$E_{ÇY-8}/E_{ÇYÇ-8}$	%35	%17	%15
		$E_{ÇY-18}/E_{ÇYÇ-18}$	%75	%55	%51

Kalınlığı 18 mm olan çelik yastık minimum hasar sınırında toplam enerjinin %75'ini, güvenlik sınırında %55'ini tüketmiştir. Kalınlığı 8 mm olan çelik yastık minimum hasar sınırında toplam enerjinin %35'ini, güvenlik sınırında %17'sini tüketmiştir. Çelik yastıklar betonarme çerçeveye yerleştirildiğinde, betonarme çerçevenin enerji tüketim kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır.

5 Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

1. Tekil çelik yastık deneyleri, yastıkların kalınlığa bağlı olarak yüksek enerji tüketme kapasiteleri olduğunu ve %45 ile %65 arasında değişen oranlarda eşdeğer sönüm oluşturabileceğini göstermektedir,
2. Çelik yastık için geliştirilen analitik model, deneysel olarak elde edilen en büyük dayanım, rijitlik ve yerdeğiştirme kapasitelerini başarı ile tahmin edebilmektedir,
3. Kalınlığı 18 mm olan çelik yastık, yalın betonarme çerçevenin dayanımını minimum hasar sınırında %20, kalınlığı 8 mm olan çelik yastık ise %5 oranında arttırmaktadır,
4. Kalınlığı 18 mm olan çelik yastık minimum hasar sınırında toplam enerjinin %75'ini güvenlik sınırında %55'ini tüketmiştir.

6 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*, 5(3), 63-88, 1972.

[2] Skinner RI, Kelly JM, Heine AJ. "Hysteresis dampers for earthquake-resistant structures". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 287-296, 1975.

[3] Bergman DM, 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, Su YF. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic resistant construction". *Earthquake Spectra*, 19(3), 505-528, 1993.

[5] Chan RWK, Albermani F. "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation". *Engineering Structures*, 30(2008), 1058-1066, 2007.

[6] Chan R, Albermani F, Williams M. "Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation". *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 260-268, 2009.

[7] Priestley MJN. "Overview of PRESSS research program". *Journal of Precast Concrete Institute*, 36(4), 50-57, 1991.

[8] Shultz A.E., Magana R.A. "Seismic behavior of connections in precast concrete walls". *Proceedings of Mete A. Sozen Symposium,* Michigan, USA, 1996.

[9] Mazzolani FM. "Innovative metal systems for seismic upgrading of RC structures". *Journal of Constructional Steel Research*, 64(2008), 882-895, 2007.

[10] Alehashem SMS, Keyhani A, Pourmohammad H. "Behavior and performance of structures equipped with ADAS & TADAS dampers (a Comparison with Conventional Structures)". *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12-17 October 2008.

[11] Oh SH, Kim YJ, Ryu HS. "Seismic performance of steel structures with slit dampers". *Engineering Structures*, 31(9), 1997-2008, 2009.

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

[13] Maleki S, Bagheri, S. "Pipe damper, Part I. experimental and analytical study". *Journal of Constructional Steel Research*, 66(8-9), 1088-1095, 2010.

[14] Maleki S, Mahjoubi S. "Dual-pipe damper". *Journal of Constructional Steel Research*, 85, 81-91, 2013.

[15] Ozkaynak H, Gullu A, Gokse T, Khajehdei A, Mahdavi M, Azizisales F, Smyrou E, Bal IE, Yuksel E, Karadogan F. "Energy dissipater steel cushions". *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, 25-29 August 2014.

[16] Gullu A, Yuksel E, Karadogan F. "Experimental and analytical evaluation of special energy dissipater cushions". *7th Abaqus Users Meeting*, Istanbul, Turkey, 6-7 November 2014.

[17] 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*, Corfu, Greece, 26-28 May 2011.

[18] Colombo A, Lamperti M, Negro P, Toniolo G. "Design Guidelines for Wall Panel Connections". Joint Research Center (JRC), Ispra, Italy, Technical Report, EUR 27934 EN, 2016.

[19] FEMA-461. "Federal Management Emergency Agency, Interim Testing Protocols For Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Non-structural Components". FEMA 461, Washington, DC, 2007.

[20] Jacobsen LS. "Damping in composite structures". *2nd World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, 11-18 July 1960.

[21] SeismoStruct-A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures. "Standard Search". www.seismosoft.com.

[22] Güllü A, Ozkaynak H, Khajehdehı A, Gökçe T, Azizisales F, Bal İE, Smyrou E, Yüksel E, Karadoğan F. "Derivation of the closed form equations for the energy dissipative steel cushions". *14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, San Diego, Ca USA, 9-11 September 2015.

[23] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007". İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, Türkiye, 2009.