GÜFBED/GUSTIJ (2015) 5 (2): 101-113
Research/Araştırma

Farklı Deprem Düzeyleri İçin Betonarme Çerçevelerin Plastik Enerji İstemlerinin Belirlenmesi

Taner UÇAR[1*], Onur MERTER[2]
[1]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye*
[2]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye*

Geliş tarihi/*Received* 04.05.2015
Düzeltilerek geliş tarihi/*Received in revised form* 01.07.2015
Kabul tarihi/*Accepted* 10.07.2015

Özet
Betonarme kesitlerin kısmi veya toptan göçme mekanizmaları oluşmaksızın elastik ötesi şekil değiştirme yapabilmeleri ve buna bağlı olarak plastik enerji tüketebilme yetenekleri şiddetli depremlerin daha az hasarla atlatılması bakımından önemlidir. Bu çalışmada betonarme çerçevelerde doğrusal olmayan davranış sonucu tüketilen plastik enerjinin hesaplanması araştırılmıştır. Türk Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak boyutlandırılan üç, dört ve beş katlı betonarme çerçevelerin statik artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiş ve her itme adımında oluşan plastik kesitler dikkate alınarak plastik enerji diyagramları oluşturulmuştur. Çerçevelerin farklı deprem düzeyleri için doğrusal olmayan modal yerdeğiştirme istemi ve buna karşılık gelen plastik enerji istemi belirlenmiştir. Böylece yönetmelik kuralları çerçevesinde boyutlandırılan betonarme çerçevelerin plastik enerji tüketebilme yetenekleri irdelenmiştir. Deprem düzeyine bağlı olarak çerçevelerin plastik enerji isteminin değiştiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: *Artımsal İtme Analizi, Deprem Düzeyleri, Türk Deprem Yönetmeliği, Plastik Enerji İstemi, Tepe Yerdeğiştirme İstemi*

Determination of Plastic Energy Demands of Reinforced Concrete Frames under Code Specific Earthquake Levels

Abstract
Inelastic deformation and plastic energy dissipation capabilities of reinforced concrete sections without any local and total collapse have an importance for earthquake safety in order to achieve limiting damage. Calculation of plastic energy dissipation of reinforced concrete frames due to nonlinear behavior is investigated. Nonlinear static pushover analyses of three, four and five-story reinforced concrete frames designed according to requirements of Turkish Seismic Design Code are conducted and then plastic energy diagrams are generated by considering the plastic sections formed at each load increment step of pushover analysis. Modal displacement demands and corresponding plastic energy demands of the frames are determined for different earthquake levels. Therefore, the energy dissipation capabilities of reinforced concrete frames designed according to Turkish Seismic Design Code are examined. Plastic energy demand of frames vary with earthquake level.

Keywords: *Nonlinear Pushover Analysis, Specific Earthquake Levels, Turkish Seismic Design Code, Plastic Energy Demand, Lateral Roof Displacement Demand*

[*] Taner UÇAR, taner.ucar@deu.edu.tr, Tel: (0232) 301 84 10

1. Giriş

Deprem yükleri altında yapıların doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesi yapı mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Deprem gibi tekrarlı dinamik yüklerle birlikte genellikle doğrusal olmayan davranış gösteren yapı sistemlerine doğrudan bir enerji girişi olmaktadır. Enerji girişinin büyük çoğunluğu doğrusal elastik ötesi davranan yapı sisteminin taşıyıcı sistem elemanlarının çevrimsel davranışı ile tüketilmektedir. Deprem yükleri altında enerji tüketen yapıların doğrusal olmayan davranışları farklı analiz yöntemlerinin kullanılması ile belirlenebilmektedir. Bu yöntemler arasından en sık kullanılanlar, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ve doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemidir. En güvenilen analiz yöntemi olmasına rağmen; deprem ivme kayıtlarının seçimi, hangi depremin yapıya etkiyeceğinin bilinmemesi, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen analizlerin genellikle uzun zaman gerektirmesi ve karmaşık yapıda olması gibi bazı olumsuzluk ve belirsizliklerden ötürü zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi pratik mühendislik uygulamalarında genellikle pek tercih edilmemektedir.

Yapının belirli yatay yükler altında artımsal olarak adım adım itilmesi esasına dayanan statik artımsal itme analizinde, yapının doğrusal olmayan davranışı daha pratik bir şekilde belirlenebilmektedir (Jiang vd., 2010; Reyes ve Chopra, 2011; Sucuoğlu ve Günay, 2011; Mortezaei vd., 2011; Kreslin ve Fajfar, 2012; Camara ve Astiz, 2012; Alıcı vd. 2013; Kaatsız ve Sucuoğlu, 2014). Dikkate alınan belirli bir yatay yükleme biçimi için, doğrusal olmayan davranış yatay yük – yer değiştirme kapasite eğrisi şeklinde tanımlanmaktadır. Plastik şekil değiştirmelerin plastik mafsal adı verilen belirli bölgelerde toplandığı ve bunun dışındaki bölgelerin lineer-elastik davrandığı kabul edilmektedir. Yapının artımsal itme analizi modelinde, potansiyel plastik kesitlere ait iç kuvvet - plastik şekil değiştirme bağıntıları tanımlanmakta ve eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitlikleri esas alınmaktadır. Hedeflenen bir yer değiştirmeye kadar statik olarak adım adım itilen yapı sistemindeki plastikleşen kesitler belirlenmekte ve her adımdaki plastik mafsal dönmeleri elde edilebilmektedir.

Davranışın lineer elastik olduğu veya plastikleşmenin olmadığı yapı sistemi bölgelerinde, kalıcı olarak depolanmayan ve elastik enerji olarak adlandırılan enerji türünün oluştuğu kabul edilebilir. Elastik davranan tek serbestlik dereceli bir sisteme depremle birlikte giren enerji ilk kez Housner (1956) tarafından şu şekilde tanımlanmıştır:

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot S_V^2 \qquad (1)$$

Burada; S_V: elastik spektral hız ve M: sistemin kütlesidir. Deprem etkisi altında doğrusal olmayan davranış gösteren yapı sistemlerine depremle birlikte giren enerji, geçmişte birçok araştırmacı tarafından geniş bir şekilde incelenmiştir. Zahrah ve Hall (1984), Akiyama (1985), Fajfar vd. (1989), Kuwamura ve Galambos (1989) ve Uang ve Bertero (1990) deprem enerji girişini inceleyerek formüle etmiş olan önemli araştırmacılardandır. Depremle birlikte giren enerjinin büyük bir kısmı, yapı taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan çevrimsel (histeretik) davranışı sonucu tüketilmektedir. Histeretik enerji tüketimi geçmişte birçok analitik ve deneysel çalışmada detaylıca incelenmiş olup, yapı mühendisliğinde yapısal hasarla ilişkilendirilmiş olan en önemli enerji türüdür. Manfredi (2001), Lee ve Goel (2001), Riddell ve Garcia (2001), Akbaş ve Shen (2003), Kunnath ve Chai (2004), Kunnath ve Hu (2004), Kalkan ve Kunnath (2008), Leelataviwat vd. (2008), Liao ve Goel (2012) ve Banihashemi vd. (2014, 2015) doğrusal olmayan davranışta sismik enerji talebi, yapıların sismik değerlendirilmesinde enerji kavramının kullanımı, enerji kavramını esas alan performansa dayalı plastik tasarım, histeretik enerji tüketimi ve yapısal hasarla ilişkilendirilmesi gibi konular üzerinde çalışmış başlıca araştırmacılar arasındadır.

Doğrusal olmayan statik artımsal itme analizlerinde, yapı sisteminin doğrusal olmayan davranışta plastikleşen kesitlerinde tükettiği kabul edilen enerji türü plastik enerji olarak adlandırılabilmektedir. Plastik enerji kavramı, yapı ve deprem mühendisliği alanında birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Leelataviwat vd. (2002) çalışmalarında, yapı sistemleri için plastik enerji kavramını kullanmış ve kat plastik mafsallarındaki plastik enerjinin yatay kuvvetlerin yapmış olduğu dış işe eşitliğinden faydalanarak tasarım taban kesme kuvveti türetmişlerdir. Lee vd. (2004), çelik çerçeveler için hedef yer değiştirme ve ideal göçme mekanizması kabul ederek, yapıların performans esaslı sismik tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, doğrusal olmayan davranıştaki plastik enerji ifadesi türetilmiş ve enerji dengesi kullanılmıştır. Liao ve Goel (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; çok katlı betonarme çerçevelerde enerji dengesi kullanılarak çerçevelerin performans esaslı plastik tasarımı yapılmıştır. Bai ve Ou (2012), güçlü kolon - zayıf kiriş göçme mekanizmasına sahip betonarme çerçeve yapılarda plastik enerji dengesini kullanarak çerçevelerin plastik tasarımını gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmada, Türk Deprem Yönetmeliği'ne (DBYBHY, 2007) ve TS500'e (2000) göre boyutlandırılmış olan çok katlı betonarme çerçeve yapıların doğrusal olmayan modellemeleri gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan statik artımsal itme analizleri yapılmıştır. Farklı deprem düzeyleri için yer değiştirme istemleri Türk Deprem Yönetmeliği'nde (DBYBHY, 2007) verilen yöntemle belirlenmiştir. Çerçevelerin statik artımsal itme analizlerinde, her bir adımda oluşan plastik mafsallarda klasik iş – enerji bağıntısının kullanılması ile plastik enerji hesaplanmış ve yapılara ait plastik enerji tüketimi – yer değiştirme ilişkileri grafiksel olarak elde edilmiştir. Grafiklerden, farklı deprem düzeyleri için betonarme çerçevelerin plastik enerji istemleri belirlenebilmektedir. Oluşturulan bu enerji grafikleri, yapıların doğrusal olmayan davranışında plastik mafsal bölgelerinde tüketilen toplam plastik enerji hakkında bilgi vermektedir.

2. Doğrusal Olmayan Davranış ve Enerji

Dış yükler altında doğrusal elastik ötesi davranış gösteren yapı sistemleri kalıcı (plastik) yer değiştirmeler yapabilmekte ve bu yer değiştirmeler sistem üzerinde bir iş yapmış olmaktadır. Yapılan bu dış iş, yapı sisteminde iş – enerji dengesinden plastikleşen kesitlerde (plastik mafsallarda) tüketilen plastik enerjiye eşit olmaktadır. Şekil 1'de; doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi sonucu plastikleşen kesitleri belirlenmiş çok katlı bir çerçeve yapı sistemi görülmektedir. Şekilde aynı zamanda, plastik mafsalın temsili moment-plastik dönme (M_i – θ_{pi}) ilişkisi de verilmekte ve θ_{pi}: itme analizinin bir *i.* adımında oluşmuş olan plastik mafsalın o adımdaki plastik dönme değerini ifade etmektedir. Klasik iş– enerji ifadesinden yararlanılarak, herhangi bir plastik mafsaldaki plastik enerji en basit halde;

$$E_{pi} = \left| M_{pi} \cdot \theta_{pi} \right| \qquad (2)$$

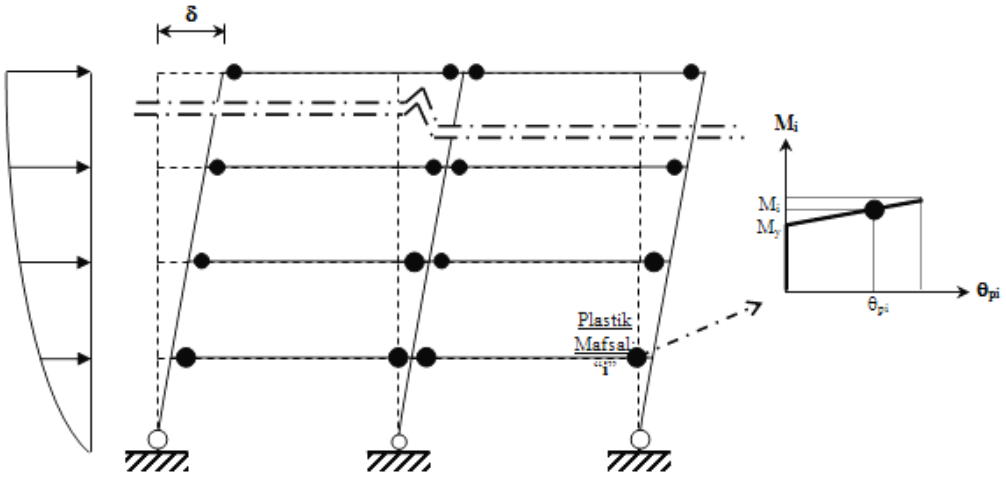
şeklinde ifade edilebilir. M_{pi}: taşıyıcı sistem elemanında oluşan teorik plastik mafsal uzunluğundaki bölgenin plastik moment değerini ve E_{pi}: plastik mafsalda tüketilen plastik enerjiyi göstermektedir. Plastik dönme θ_{pi};

$$\theta_{pi} = \theta_i - \theta_{yi} \qquad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada θ_i: *i.* plastik mafsaldaki toplam dönme değerini ve θ_{yi}: elastik akma dönmesi değerini ifade etmektedir.

3. Plastik Enerji – Yer Değiştirme Grafiğinin Belirlenmesi

Doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemi ile belirlenen yer değiştirmeye (veya göçmeye) dek adım adım itilen bir çerçeve yapı sisteminde elde edilen plastik mafsalların plastik enerjisinden hareketle tüm çerçevenin plastik enerjisi belirlenebilmektedir.



Şekil 1. Artımsal itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar.

Belirlenen plastik enerjiye karşılık gelen tepe yer değiştirmesinin grafiksel olarak işlenmesi ile yapı plastik enerji – tepe yer değiştirmesi (E_p – δ) grafiği elde edilir. Bir betonarme çerçeveye ait plastik enerji – yer değiştirme grafiği örneği Şekil 2'de sunulmaktadır.

Statik artımsal itme analizinin *i.* bir adımında oluşan bir plastik mafsaldaki plastik enerjinin (E_{pi}) (2) nolu ifade ile hesaplanması ile, *i.* adımda oluşan tüm plastik mafsallardaki plastik enerji;

$$E_n = \sum_{i=1}^{n} E_{pi} \text{(Plastik Mafsal)} \qquad (4)$$

şeklinde hesaplanabilir. E_n: itme analizinin i. adımında oluşan tüm plastik mafsallarda hesaplanmış plastik enerjilerin toplamını ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan itme analizlerinin ilk adımlarında henüz elastik davranan sistemde, plastik yer değiştirmeler olmamakta ve kesitler plastikleşmemektedir. Bu kısım yapı taban kesme kuvveti – yer değiştirme kapasite eğrisinde akma yer değiştirmesine kadar olan bölümdür. Plastik enerji – yer değiştirme grafiğinde ise, belirli bir yer değiştirmeye (akma sınırına) kadar plastik enerji tüketimi olmamakta ve dolayısıyla toplam plastik enerji sıfır olmaktadır. Şekil 2'de gösterilen bu elastik bölge, enerjinin de elastik olduğu bölgeye karşılık gelmektedir. Plastik bölge ile gösterilen kısım ise, yapıdaki kesitlerde plastikleşmenin başladığı daha ileri itme analizi adımlarını ifade etmekte olup; bu kısımlarda yapıda kalıcı şekil değiştirmeler oluşmakta ve plastik enerji tüketimleri meydana gelmektedir.

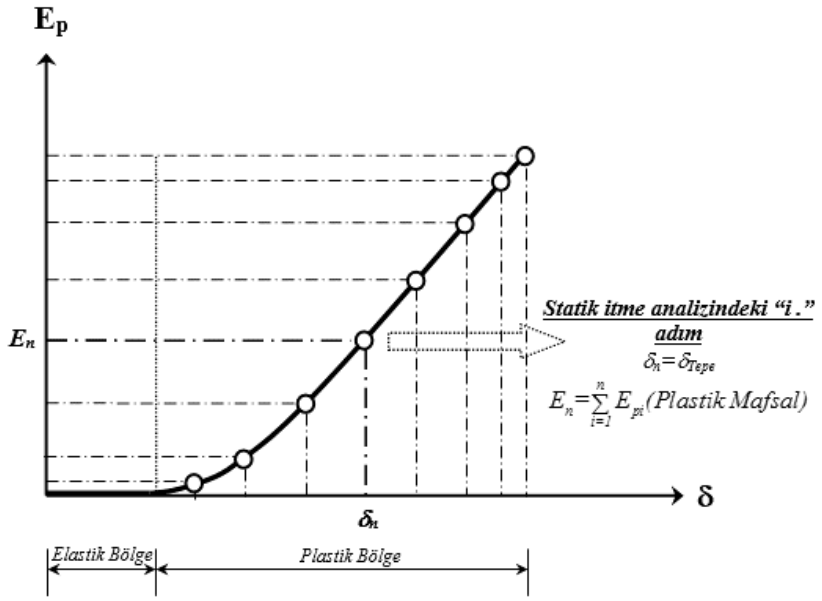
4. Sayısal Uygulama

Çalışmada, betonarme çerçeve türü yapılarda doğrusal olmayan davranış sonucunda tüketilen plastik enerjinin hesaplanması ve farklı deprem düzeyleri için bu tür yapıların plastik enerji isteminin belinlenebilmesi amacıyla kat sayıları farklı üç adet betonarme çerçeve kullanılmıştır. Çerçeveler planda her iki doğrultuda 5 m'lik üç açıklığa sahip üç boyutlu bir yapının iç akslarından çıkarılmıştır. Kat sayısı 3, 4 ve 5 olarak belirlenen çerçeveler çalışma kapsamında BAÇ_3, BAÇ_4 ve BAÇ_5 olarak isimlendirilmiştir.

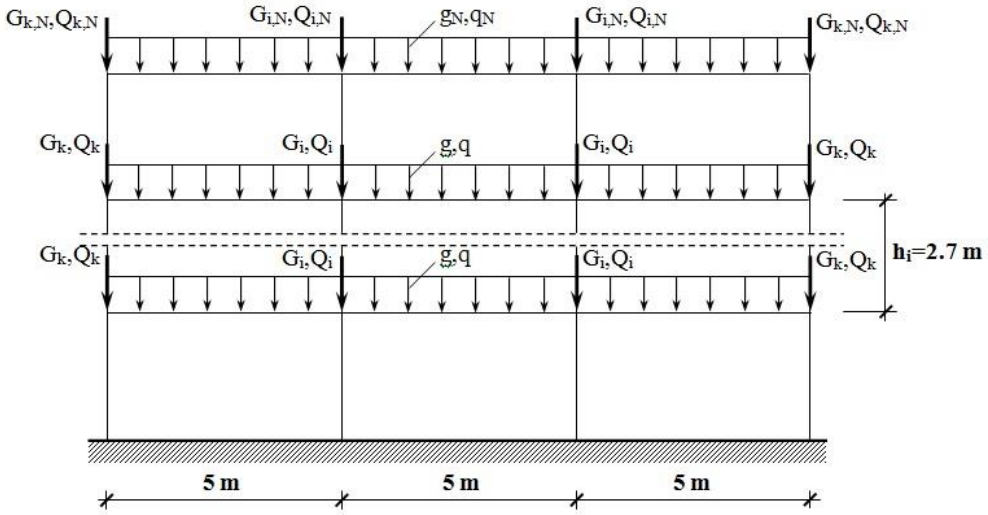
4.1. Çerçevelerin Boyutlandırılması

Seçilen düzlem çerçeveler öncelikle TS500 (2000) ve DBYBHY (2007) koşullarını sağlayacak şekilde boyutlandırılmıştır. Düşey yükler üç boyutlu yapı üzerinden hesaplanmış ve çerçevelere paylaştırılmıştır. Boyutlandırmada esas alınan düşey yükler tipik bir çerçeve üzerinde Şekil 3'de gösterilmiştir. Kirişler üzerindeki düzgün yayılı yükler *g* ve *q* olarak belirtilmiştir. Çerçeveye dik doğrultudaki kirişlerden dikkate alınan çerçeve kolonlarına aktarılan

sabit ve hareketli tekil yükler ise kenar kolonlar için G_k, Q_k ve iç kolonlar için ise G_i,Q_i olarak gösterilmiştir. Aynı yüklerin son kat (N) için azaltılmış değerleri dikkate alınmıştır. Yüklerin sayısal değerleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Plastik enerji – yerdeğiştirme (E_p-δ) grafiği.



Şekil 3. Çerçevelerin geometrik özellikleri ve düşey yükleri.

Tablo 1. Boyutlandırmada esas alınan düşey yükler

Düzgün Yayılı Yükler (kN/m)							
g		**q**		**g_N**		**q_n**	
20.50		6.67		15.50		5.00	
Tekil Yükler (kN)							
G_k	**Q_k**	**G_i**	**Q_i**	**$G_{k,N}$**	**$Q_{k,N}$**	**$G_{i,N}$**	**$Q_{i,N}$**
71.00	16.65	102.63	33.33	52.50	12.50	77.45	25.00

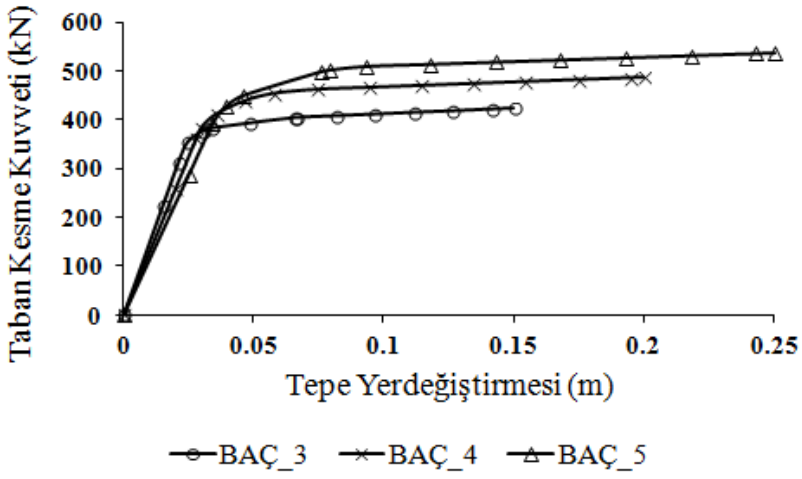
Yapı önem katsayısı I=1.0 olarak belirlenen çerçevelerin birinci derece deprem bölgesinde bulunduğu (etkin yer ivmesi katsayısı A_0=0.40), zemin sınıfının Z2 (spektrum karakteristik periyotları T_A=0.15 saniye ve T_B=0.40 saniye) olduğu ve yüksek süneklik düzeyine sahip olduğu (taşıyıcı sistem davranış katsayısı R=8) kabul edilmiştir. Tipik kat yüksekliği h_i=2.70 m olarak alınmıştır. Çerçevelerin kat kütleleri ölü yükler ile hareketli yüklerin %30'unun (hareketli yük katılım katsayısı, n=0.30) toplamından hesaplanmıştır. Çerçevelerin boyutlandırılması aşamasında doğrusal elastik deprem hesabı Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi (DBYBHY, 2007) kullanılarak yapılmıştır. Beton sınıfı C20, enine ve boyuna donatı ise S420 olarak öngörülmüştür.

Çerçevelerin doğrusal elastik hesap modelleri SAP2000 (CSI, 2014) yapısal analiz programında oluşturulmuş ve TS500 (2000)'de verilen farklı yük birleşimleri dikkate alınarak boyutlandırması gerçekleştirilmiştir. Boyutlandırma sonucunda çerçevelerdeki tüm kirişler 25x50 cm olarak belirlenmiştir. Kare olarak tasarlanan kolon kesitlerinin boyutları BAÇ_3'de 40x40 cm, BAÇ_4'de 45x45 cm ve BAÇ_5'de 50x50 cm olarak belirlenmiştir. Kiriş ve kolon elemanlardaki boyuna ve enine donatılara ait ayrıntılara burada yer verilmemiştir.

4.2. Doğrusal Olmayan Modelleme ve İtme Analizi

Malzeme bakımından doğrusal elastik olmayan davranış basit eğilmede plastik mafsal hipotezine karşılık gelen yığılı plastik davranış modeli esas alınarak idealleştirilmiştir. Plastik şekildeğiştirme bölgesinin uzunluğu (L_p) çalışan doğrultudaki kesit boyutunun (h) yarısına eşit alınmıştır. Plastik mafsalların kiriş ve kolonların net açıklıklarının uçlarında oluştukları kabul edilmiştir. Düşey yüklerden dolayı kiriş açıklıklarında plastik mafsal oluşmamaktadır. Plastik kesitlerin iç kuvvet (plastik moment)-plastik şekildeğiştirme (plastik dönme) özellikleri SAP2000 (CSI, 2014) ortamında otomatik olarak oluşturulmuştur. Kiriş ve kolon elemanlarda çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitlikleri için DBYBHY (2007)'de verilen değerler kullanılmıştır.

Çerçevelerin itme analizi Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi kullanılarak SAP2000 (CSI, 2014) analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. Deprem yükü dağılımının, taşıyıcı sistemdeki plastik kesit oluşumlarından bağımsız biçimde sabit kaldığı varsayımı (DBYBHY, 2007) ile yapılan itme analizi sonucunda elde edilen itme eğrileri tüm çerçeveler için Şekil 4'de gösterilmiştir.

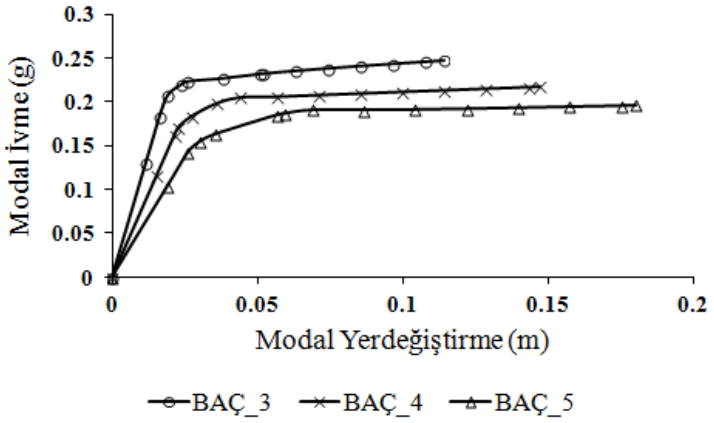


Şekil 4. Çerçevelerin itme eğrileri.

Çerçevelerin doğrusal olmayan modal yerdeğiştirme isteminin belirlenmesinde kullanılmak üzere itme eğrileri DBYBHY (2007)'de verilen koordinat dönüşümleri kullanılarak apsisi modal yerdeğiştirme, ordinatı ise modal ivme olan modal kapasite diyagramına dönüştürülmüştür. Bu dönüştürme işleminde kullanılan modal parametrelerin hesaplanan değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de M_{x1}, γ_{x1}, Γ_{x1} ve Φ_{xN1} x deprem doğrultusunda doğrusal elastik davranış için tanımlanan birinci moda ait etkin kütle, etkin kütle oranı, katkı çarpanı ve çerçevenin tepesinde mod sekli genliği, $L_{x1}=\phi_1^T m1$, M_1 birinci titreşim moduna ait modal kütle, $\sum m_i$ ise toplam kütledir. $T_{1x}^{(1)}$ itme analizinin ilk adımında, doğrusal elastik davranış esas alınarak hesaplanan birinci moda ait doğal titreşim periyodudur. Çalışmada kullanılan çerçevelere ait modal kapasite diyagramları Şekil 5'de verilmiştir.

Tablo 2. Modal parametreler

	$T_{1x}^{(1)}$ (s)	$\sum m_i$ (ton)	L_{x1} (ton)	M_1 (ton)	M_{x1} (ton)	γ_{x1}	Φ_{xN1}	Γ_{x1}
BAÇ_3	0.595	200.50	135.53	105.57	173.99	86.8	1.000	1.284
BAÇ_4	0.726	273.36	175.88	135.27	228.68	83.7	1.000	1.300
BAÇ_5	0.853	346.22	216.15	165.32	282.61	81.6	1.000	1.307



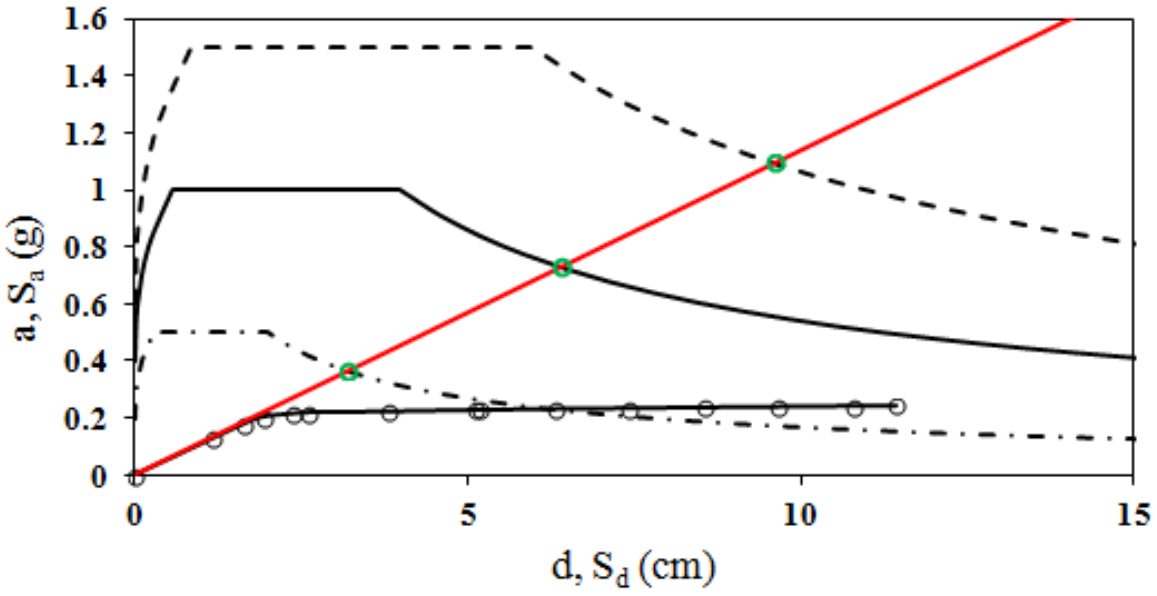
Şekil 5. Çerçevelerin modal kapasite diyagramları.

4.3. Doğrusal Olmayan Modal Yerdeğiştirme İsteminin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan çerçevelerin modal yerdeğiştirme isteminin hesaplanmasında, DBYBHY (2007)'de bina önem katsayısı I=1 olan binalar için 50 yıllık bir süre içinde farklı aşılma olasılıklarına sahip üç farklı deprem düzeyi (Orta Şiddetli Deprem, Tasarım Depremi ve Çok Şiddetli Deprem) dikkate alınmıştır. DBYBHY (2007)'de tanımlanan elastik ivme spektrumu şiddetli depreme karşılık gelen ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan Tasarım Depremi'ne aittir. Orta Şiddetli Deprem 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan deprem olup, bu depreme ait ivme spektrum değerleri Tasarım Depremi'ne ait spektrumun ordinatlarının yarısı olarak ele alınmıştır. Çok Şiddetli Deprem için ise, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem esas alınmıştır. Çok Şiddetli Deprem'in ivme spektrum değerleri ise, Tasarım Depremi'ne ait spektrumun ordinatlarının 1.5 katı olarak kabul edilmiştir (DBYBHY, 2007). Elastik spektral ivme $S_{ae}(T)$'nin hesaplanmasında, etkin yer ivmesi katsayısı A_0=0.40 alınmıştır.

Oluşturulan elastik ivme spektrumları, binalara ait modal kapasite diyagramları ile birlikte kullanılarak çerçevelerin modal

yerdeğiştirme istemleri DBYBHY (2007)'de açıklandığı gibi belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan tüm çerçevelerin itme analizinin ilk adımında, doğrusal elastik davranış esas alınarak hesaplanan birinci moda ait $T_{1x}^{(1)}$ başlangıç periyodları tanımlanan ivme spektrumundaki karakteristik periyod T_B=0.40 s'den daha uzundur (Tablo 2). Bu nedenle spektral yerdeğiştirme oranı C_{R1}=1 olarak alınmış ve modal yerdeğiştirme istemi ($d_1^{(p)}$) (doğrusal elastik olmayan spektral yerdeğistirme (S_{di1})), eşit yerdeğiştirme kuralı gereğince aynı periyoda sahip eşlenik doğrusal elastik sisteme ait lineer elastik spektral yerdeğiştirmeye (S_{de1}) eşit olarak belirlenmiştir. Şekil 6'da farklı deprem düzeyleri için BAÇ_3'ün doğrusal olmayan modal yerdeğiştirme isteminin belirlenmesi gösterilmiştir. Eğimi itme analizinin ilk adımındaki birinci moda ait özdeğere $(\omega_1^{(1)})^2$ eşit kırmızı doğrunun farklı aşılma olasılıklarına ait spektrumların kestiği yeşil noktanın apsisi modal yerdeğiştirme istemine karşılık gelmektedir.



Şekil 6. Farklı deprem düzeyleri için BAÇ_3'ün modal yerdeğiştirme isteminin belirlenmesi.

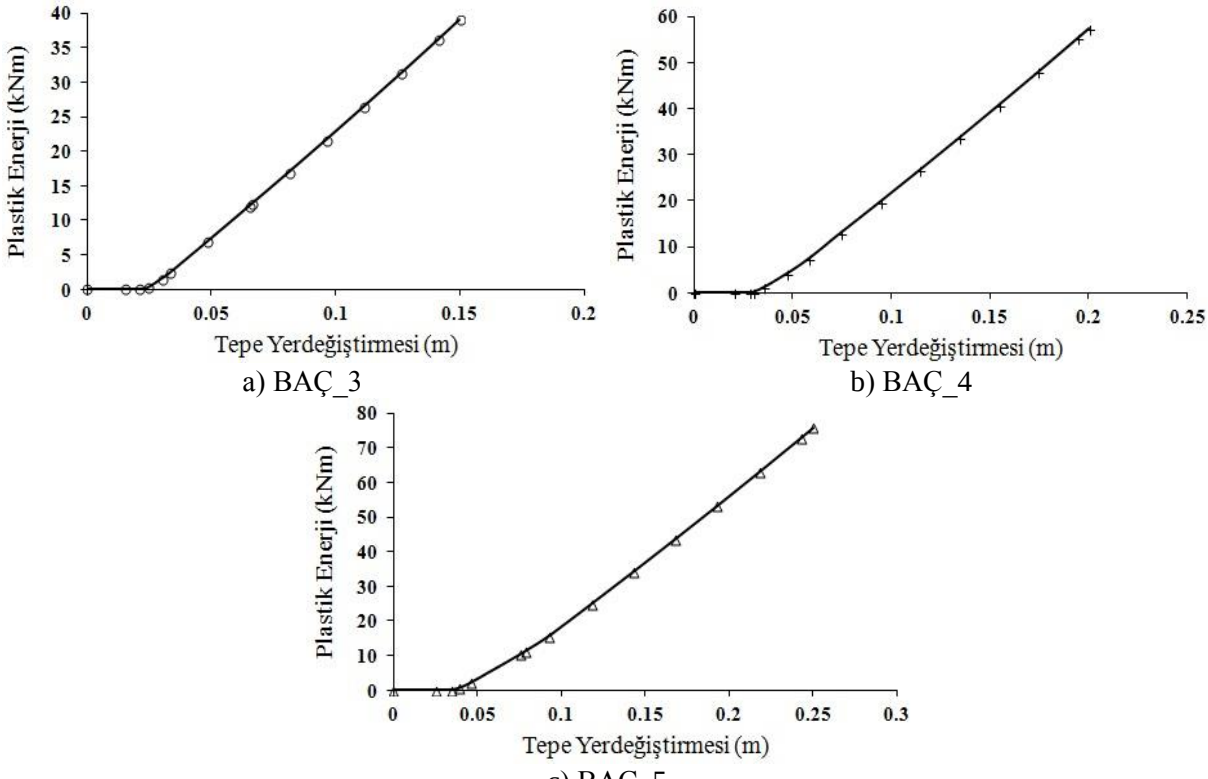
Farklı deprem düzeyleri için belirlenen modal yerdeğiştirme istemleri kullanılarak çerçevelerin x deprem doğrultusundaki tepe yerdeğiştirme istemi ($U_{xN1}^{(p)}$) elde edilmiştir. Çerçevelerin modal yerdeğiştirme istemi ($d_1^{(p)}$) ve tepe yerdeğiştirme istemi ($U_{xN1}^{(p)}$) ile bunlara karşılık gelen modal ivme ($a_1^{(p)}$) ve taban kesme kuvveti ($V_{x1}^{(p)}$) değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Aynı tabloda tepe yerdeğiştirme istemine karşılık gelen taban kesme kuvvetinin boyutlandırmada esas alınan taban kesme kuvvetine (V_{xt}) oranı da belirtilmiştir.

4.4. Plastik Enerji İsteminin Belirlenmesi

Çerçevelerde doğrusal olmayan davranış sonucu tüketilen plastik enerji değerleri, her itme adımında oluşan plastik kesitlerin enerjileri toplamından elde edilmiştir. Plastik kesitlerdeki enerji değerleri ise her itme adımı için bu kesitlerdeki plastik moment (M_p) – plastik dönme (θ_p) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Yatay ekseni tepe yerdeğiştirmesi, düşey ekseni ise plastik enerji olan diyagramlar çalışmada kullanılan tüm çerçeveler için Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 3. Yerdeğiştirme isteminin belirlenmesine ait büyüklükler

	$d_1^{(p)}$ (cm)	$a_1^{(p)}$ (m/s^2)	$U_{xN1}^{(p)}$ (cm)	$V_{x1}^{(p)}$ (kN)	$V_{x1}^{(p)}/V_{xt}$
Orta Şiddetli Deprem					
BAÇ_3	3.201	2.225	4.111	387.179	1.575
BAÇ_4	4.065	1.957	5.284	447.546	1.542
BAÇ_5	4.932	1.707	6.447	482.491	1.492
Tasarım Depremi					
	$d_1^{(p)}$ (cm)	$a_1^{(p)}$ (m/s^2)	$U_{xN1}^{(p)}$ (cm)	$V_{x1}^{(p)}$ (kN)	$V_{x1}^{(p)}/V_{xt}$
BAÇ_3	6.403	2.342	8.221	407.421	1.657
BAÇ_4	8.130	2.045	10.569	467.747	1.611
BAÇ_5	9.865	1.825	12.894	515.777	1.595
Çok Şiddetli Deprem					
	$d_1^{(p)}$ (cm)	$a_1^{(p)}$ (m/s^2)	$U_{xN1}^{(p)}$ (cm)	$V_{x1}^{(p)}$ (kN)	$V_{x1}^{(p)}/V_{xt}$
BAÇ_3	9.604	2.395	12.332	416.701	1.695
BAÇ_4	12.195	2.091	15.853	478.178	1.648
BAÇ_5	14.797	1.864	19.340	527.153	1.630



a) BAÇ_3 b) BAÇ_4

c) BAÇ_5

Şekil 7. Çerçevelerin plastik enerji diyagramları.

Farklı deprem düzeyleri için çerçevelerin plastik enerji istemi ise Tablo 3'de verilen tepe yerdeğiştirmesi istemi esas alınarak hesaplanan plastik enerji değeri olarak belirlenmiştir. Çerçevelerin tepe yerdeğiştirmesi istemine ulaşılıncaya kadar statik artımsal itme analizi yeniden yapılmış ve bu noktada analiz sonlandırılarak oluşan plastik mafsalların plastik enerjileri tek tek hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin toplamı plastik enerji istemine karşılık gelmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Çerçevelerin plastik enerji istemleri

	E_p (kNm)		
	Orta Şiddetli Deprem	**Tasarım Depremi**	**Çok Şiddetli Deprem**
BAÇ_3	4.658	17.209	30.226
BAÇ_4	5.688	23.546	42.122
BAÇ_5	7.136	28.882	53.375

Dikkate alınan deprem düzeyinin büyümesiyle birlikte çerçevelerin doğrusal olmayan tepe yerdeğiştirme istemi de büyümektedir. Buna bağlı olarak daha çok kesitin plastikleşme olasılığı ortaya çıktığı gibi, plastikleşen kesitlerdeki dönmeler de artacaktır. Dolayısıyla, deprem etki düzeyinin büyümesiyle birlikte tüketilen plastik enerjide de artış beklenmektedir. Tablo 4'deki plastik enerji istemleri bunu doğrular niteliktedir.

Çalışma kapsamında Tasarım Depremi'ne göre boyutlandırılan çerçevelerin plastikleşen kiriş ve kolon kesitlerindeki en büyük dönme değerleri farklı deprem düzeyleri için Tablo 5'de verilmiştir. Aynı tabloda bu değerlerin kesitin göçme sınırındaki (GÇ) plastik dönme kapasitesine oranı da verilmektedir. Orta Şiddetli Deprem düzeyi için BAÇ_5'in kolonlarında plastik kesit oluşmamıştır.

Tablo 5. Kiriş ve kolon elemanlarda hesaplanan en büyük plastik dönme değerleri

	Orta Şiddetli Deprem					
	Kiriş				**Kolon**	
	$+\theta_p$ (rad)	**$+\theta_p/\theta_{p,max}$**	**$-\theta_p$ (rad)**	**$-\theta_p/\theta_{p,max}$**	**θ_p (rad)**	**$\theta_p/\theta_{p,max}$**
BAÇ_3	0.003951	0.158	0.003266	0.142	0.002103	0.140
BAÇ_4	0.003549	0.142	0.003223	0.140	0.003675	0.245
BAÇ_5	0.004043	0.162	0.003095	0.134	-	-
	Tasarım Depremi					
BAÇ_3	0.01	0.400	0.009339	0.406	0.007886	0.526
BAÇ_4	0.009206	0.368	0.008624	0.375	0.005432	0.362
BAÇ_5	0.009675	0.387	0.008744	0.376	0.003234	0.216
	Çok Şiddetli Deprem					
BAÇ_3	0.0155	0.620	0.0148	0.643	0.0129	0.860
BAÇ_4	0.0146	0.584	0.0138	0.600	0.0102	0.68
BAÇ_5	0.015	0.600	0.0139	0.602	0.007821	0.521

Oluşan plastik mafsallarda eğilme momentinin sabit olduğu düşünülürse (veya pekleşme etkisiyle bir miktar artış da olabilir) tüketilen plastik enerjinin büyük oranda plastikleşen kesitlerdeki dönmeler (θ_p) ile orantılı olacağı açıktır. Başka bir deyişle; plastik mafsalın enerji tüketme kapasitesini plastik dönme kapasitesi belirlemektedir. Tablo 5'deki oranlar incelendiğinde, DBYBHY (2007)'ye uygun olarak boyutlandırılan betonarme çerçevelerin Çok Şiddetli Deprem etkisi altında bile göçme sınırındaki dönme kapasitesine erişmediği görülmektedir. Dolayısıyla, plastik kesitler en elverişsiz olarak kabul edilebilecek bu durumda bile plastik dönme yapabilmekte ve plastik enerji tüketebilmektedir.

5. Sonuçlar

Çalışma kapsamında betonarme düzlem çerçevelerde doğrusal olmayan davranış sonucu tüketilen plastik enerjinin hesaplanması araştırılmıştır. Ayrıca Türk Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak boyutlandırılan betonarme çerçevelerin farklı

deprem düzeyleri etkisinde plastikleşen kesitlerinde tüketilen enerjilerden hareketle plastik enerji istemi belirlenmiştir. Elde edilen somut bulgular aşağıdaki gibidir.

- Yönetmeliğe uygun olarak boyutlandırılan bu çerçevelerde plastik kesitlerin kiriş uçlarında ve alt kat kolon uçlarında oluştukları görülmüştür. Dolayısıyla bu tür çerçevelerde plastikleşen kesitlerdeki moment ve dönme değerleri esas alınarak hesaplanan plastik enerjinin önemli kısmı kiriş plastik mafsallarından sağlanmaktadır.

- Her itme adımı için plastikleşen kesit sayısı artmakta ve oluşan plastik mafsallardaki dönmeler büyümektedir. Buna bağlı olarak plastik enerji tüketimi de artmaktadır. Plastik enerji diyagramlarında, çerçevelerin tepe yerdeğiştirmesi ile plastik enerjileri arasında doğrusala yakın bir ilişki elde edilmiştir.

- Çerçevelerin dikkate alınan farklı deprem düzeyleri için belirlenen doğrusal olmayan modal yerdeğiştirme isteminin artmasıyla plastik enerji istemleri de artmaktadır. Dolayısıyla, şiddetli depremler etkisinde kesitlerin kapasitelerinde önemli bir azalma olmaksızın doğrusal olmayan şekildeğiştirme yapabilmeleri ve plastik enerji tüketebilmeleri önem kazanmaktadır.

- Sabit moment veya pekleşme etkisiyle küçük moment artışları etkisinde dönme hareketi yapan plastik mafsallarda tüketilen enerji miktarı plastik dönme değerleriyle orantılıdır. Bu nedenle kesitlerin göçme kapasitesine ulaşmadan plastik dönme yapabilmesi enerji tüketimi açısından önemlidir.

- Tasarım Depremi dikkate alınarak boyutlandırılan çerçevelerde aynı deprem etkisi artında kiriş uçlarında oluşan plastik mafsallardaki en büyük dönme değerleri bu kesitlerin göçme sınırındaki plastik dönme değerinin yaklaşık %40'ı kadardır. Aynı oran Orta Şiddetli Deprem için yaklaşık %15 ve Çok Şiddetli Deprem için ise yaklaşık %60'dır. Kolon plastik mafsallarındaki en büyük plastik dönme değerinin de Çok Şiddetli Deprem etkisi altında dahi göçme sınırındaki dönme kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür.

Çalışmadan elde edilen bulgular dikkate alındığında, Türk Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak tasarlanan betonarme çerçevelerin yeterli plastik enerji tüketme potansiyeline sahip oldukları görülmektedir. Kesitlerin sünekliğinin artırılmasına yönelik alınabilecek tüm önlemlerin bu kesitlerin plastik enerji tüketebilme kabiliyetini artıracağı açıktır.

Kaynaklar

Akbaş, B. ve Shen, J., 2003. Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Enerji Kavramı, İMO Teknik Dergi, Yazı 192, 2877-2901.

Akiyama, H., 1985. Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings, Tokyo Üniversitesi Basısı, Japonya.

Alıcı, F.S., Kaatsız, K. ve Sucuoğlu, H., 2013. Genel İtme Analizinin Pratik Uygulaması, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eylül 25-27, Hatay, Türkiye.

Bai, J. ve Ou, J., 2012. Plastic Limit-State Design of Frame Structures Based on the Strong-Column Weak-Beam Failure Mechanism, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon.

Banihashemi, M. R., Mirzagoltabar, A. R. ve Tavakoli, H., 2014. Development Seismic Design of Steel Moment Frames and the Evaluation by Energy Spectrum Method, Indian Journal of Science and Technology, 7, 10, 1699-1711.

Banihashemi, M. R., Mirzagoltabar, A. R. ve Tavakoli, H. R., 2015. Development of the Performance Based Plastic Design for Steel Moment Resistant

Frame, International Journal of Steel Structures, 15, 1, 51-62.

Camara, A. ve Astiz, M.A., 2012. Pushover Analysis for the Seismic Response Prediction of Cable-Stayed Bridges Under Multi-Directional Excitation, Engineering Structures, 41, 444-455.

Deprem Yönetmeliği – DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Fajfar, P., Vidic, T. ve Fischinger, M., 1989. Seismic Design in Medium- and Long-Period Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 8, 1133-1144.

Housner, G.W., 1956. Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, 5, 1-13, Oakland, California.

Jiang, Y., Gang, L. ve Yang, D., 2010. A Modified Approach of Energy Balance Concept Based Multimode Pushover Analysis to Estimate Seismic Demands for Buildings, Engineering Structures, 32, 5, 1272-1283.

Kaatsız, K. ve Sucuoğlu, H., 2014. Generalized Force Vectors for Multi-Mode Pushover Analysis of Torsionally Coupled Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 43, 13, 2015-2033.

Kalkan, E. ve Kunnath, S.K., 2008. Relevance of Absolute and Relative Energy Content in Seismic Evaluation of Structures, Advances in Structural Engineering, 11, 1, 17-34.

Kreslin, M. ve Fajfar, P., 2012. The Extended N2 Method Considering Higher Mode Effects in Both Plan and Elevation, Bulletin of Earthquake Engineering, 10, 2, 695-715.

Kunnath, S.K. ve Chai, Y.H., 2004. Cumulative Damage-Based Inelastic Cyclic Demand Spectrum, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33, 4, 499-520.

Kunnath, S.K. ve Hu, Q., 2004. Evaluation of Cyclic Demand in Ductile RC Structures, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No: 290, August 1-6, Canada.

Kuwamura, H. ve Galambos, T.V., 1989. Earthquake Load for Structural Reliability, Journal of Structural Engineering, 115, 6, 1446-1462.

Lee, S.-S., ve Goel, S.C., 2001. Performance-Based Design of Steel Moment Frames Using a Target Drift and Yield Mechanism, Research Report No. UMCEE 01-17, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

Lee, S.-S., Goel, S.C. ve Chao, S.-H., 2004. Performance-Based Seismic Design of Steel Moment Frames Using Target Drift and Yield Mechanism, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No: 266, August 1-6, Canada.

Leelataviwat, S., Goel, S.C. ve Stojadinovic, B., 2002. Energy-Based Seismic Design of Structures Using Yield Mechanism and Target Drift, Journal of Structural Engineering, 128, 8, 1046-1054.

Leelataviwat, S., Saewon, W. ve Goel, S.C., 2008. An Energy Based Method for Seismic Evaluation of Structures, 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Bejing, China.

Liao, W.-C. ve Goel, S.C., 2012. Performance-Based Plastic Design and Energy-Based Evaluation of Seismic Resistant RC Moment Frame, Journal of Marine Science and Technology, 20, 3, 304-310.

Liao, W-C. ve Goel, S. C., 2012. An Energy Spectrum Method for Collapse Evaluation of RC Moment Frame Structures, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon.

Manfredi, G., 2001. Evaluation of Seismic Energy Demand, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 4, 485-499.

Mortezaei, A., Ronagh, H.R., Kheyroddin, A. ve Amiri, G.G., 2011. Effectiveness of Modified Pushover Analysis Procedure for the Estimation of Seismic Demands of Buildings Subjected to Near-Fault Earthquakes Having Forward Directivity, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 20, 6, 679-699.

Reyes, J.C. ve Chopra, A.K., 2011. Three-Dimensional Modal Pushover Analysis of Buildings Subjected to Two Components of Ground Motion, Including Its Evaluation for Tall Buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40, 7, 789-806.

Riddell, R. ve Garcia, J.E., 2001. Hysteretic Energy Spectrum and Damage Control, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 12, 1791-1816.

SAP2000, 2014. Integrated Structural Analysis and Design Software, Version 16.1.0, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA.

Sucuoğlu, H. ve Günay, M.S., 2011. Generalized Force Vectors for Multi-Mode Pushover Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40, 1, 55-74.

TS500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uang, C.-M. ve Bertero, V.V., 1990. Evaluation of Seismic Energy in Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 1, 77-90.

Zahrah, T.F. ve Hall, W.J, 1984. Earthquake Energy Absorbtion in SDOF Structures, Journal of Structural Engineering, 110, 8, 1757-1773.