

Çelik çerçevelerin enerjiye dayalı tasarımında kat yatay yer değiştirmelerinin etkisi

Onur MERTER^{*1}, Taner UÇAR² ve Mustafa DÜZGÜN³

^{1,3}Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35160, İzmir

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 35160, İzmir

Özet

Günümüzde depreme dayanıklı yapı tasarımı genellikle dayanım ve yer değiştirme esaslı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Dayanım esaslı tasarım yöntemlerinde, dış yükler altında taşıyıcı sistem elemanlarında oluşacak iç kuvvetlerin elemanların taşıma gücünü aşmaması gerekmektedir. Yer değiştirme esaslı yöntemlerde, deprem etkisi altındaki yapının aşırı yatay yer değiştirme yapmasının önlenmesi amaçlanmaktadır. Enerji esaslı yöntemlerde ise hedeflenen durum; depremle birlikte yapı sistemine giren toplam enerjinin, taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan davranışı sonucu tüketilebilmesi ve yapının toptan göçme yapmadan ayakta kalabilmesidir.

Çalışmada, yapı kat seviyelerinde yazılan enerji denklemlerinden yola çıkılarak, 2007 Türk Deprem Yönetmeliğine göre ön boyutlandırması yapılan çok katlı çelik çerçeve yapıların, seçilen göçme mekanizmasına ve öngörülen farklı kat yatay yer değiştirmelerine göre tasarımı yapılmıştır. Enerji esaslı çelik çerçeve tasarımında kat yatay yer değiştirmelerinin etkisi araştırılmıştır. Farklı performans seviyelerine karşılık gelen farklı göreceli kat ötelenmesi oranlarının, dolayısıyla farklı kat yatay yer değiştirmelerinin seçilmesi ile çelik taşıyıcı sistem boyutlarındaki değişim gözlenmiştir. Tasarımda hedeflenen kat yatay yer değiştirmeleri, doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi ve seçilen deprem kayıtları için gerçekleştirilen zaman tanım alanında dinamik analizlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hedeflenen kat yatay yer değiştirmesinin artması ile birlikte, taşıyıcı sistemi oluşturan çelik profillerin boyutlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Beş katlı çelik çerçevelerin doğrusal olmayan statik analizi ve zaman tanım alanında dinamik analizleri sonucunda elde edilen kat yatay yer değiştirmesi değerlerinin, enerjiye dayalı tasarım yönteminin başlangıcında öngörülen değerleri aşmadığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji esaslı tasarım, Kat yatay yer değiştirmesi, Göçme mekanizması, Doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi, Zaman tanım alanında dinamik analiz

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Onur MERTER. onur.merter@deu.edu.tr; Tel: (232) 412 70 02

The effect of sway displacements on the energy-based design of steel frames

Extended abstract

Earthquake-resistant design methods for the structures are generally force-based and displacement-based. In the force-based methods; internal forces must not exceed the bearing capacity of the structural members under external forces. It is aimed that excessive displacement of the structure under earthquake effects must be prevented in the displacement-based design methods. In the energy-based methods; earthquake input energy must be consumed in the structural members with the nonlinear behavior and as a result the structure must remain stable without collapsing.

In the study, multi-story steel frames, which are pre-designed by considering the Turkish Seismic Design Code (2007), are redesigned according to the different predefined sway displacements and selected yield mechanism using the energy equations which are written at each story level. The effect of sway displacements on the energy-based design of steel frame is studied. The variations in the dimensions of the steel structural systems are searched by choosing different interstory drift ratios in connection with the different sway displacements which correspond to different performance levels. The sway target displacements in the design are compared with the displacement results of the nonlinear static pushover analysis and dynamic time history analyses for chosen earthquake records. Dimensions of the steel profiles that constitute the structural system of the frames decrease with increasing target displacement of the story. It is observed that the sway displacement results of the nonlinear static pushover analyses and dynamic time history analyses do not exceed the target displacement limits which are defined at the beginning of the energy-based design.

The design method in the study is for the design of new structures. It is accepted in the study that the stored energy to the steel structures under the effect of an earthquake is calculated using Housner's input energy equation. Housner's total input energy is expressed as the sum of the elastic and plastic energies assuming the total energy is consumed by the linear elastic and nonlinear behavior of the structural system. The elastic energy of the system is defined by Akiyama's elastic energy equation. The

plastic energy of the system is obtained from Housner's total input energy and Akiyama's elastic energy. The plastic energy equation is obtained by subtracting the elastic energy from the total input energy of the system. Then the plastic energy is obtained again by equating the external and internal works of the plastic hinges of the system. Plastic energies which are defined by different approaches are equated to each other. Energy-based base shear force of the system is obtained from the equation of the plastic energies. Energy-based base shear force expression that is obtained within the study depends on the properties such as yield mechanism, story displacements, period of vibration and story heights, story numbers and story weights of the structures. The effect of story displacements in the energy-based base shear force equation is expressed in terms of interstory drift ratios. After calculating the energy-based base shear, beam and column design are performed according to the plastic design concept. Beams are designed writing energy balance equation in the story beam levels. Then columns are designed according to combined both the axial force and bending moment values. In the study, European Norm Profiles are chosen for the steel structural system. Five-story regular steel frames with two bays and three meters story heights are designed taking 1.5%, 2% and 3.5% interstory drift ratios. It is assumed that there is a 30 kN/m total uniformly distributed load in all spans.

As a conclusion, the effect of story displacements on the energy-based structural design is searched within the study. Taking different interstory drift ratios or indirectly different story displacements, different base shears are calculated in the design. So; different steel profile dimensions are obtained for different story displacements. Steel profile dimensions decrease with increasing the story displacement values. Nonlinear static pushover analyses and dynamic time history analyses are used to check the results of the energy-based design method. It is seen from the results of nonlinear static analyses and time history analyses for the chosen earthquake effects that the predefined story displacements or interstory drift ratios at the beginning of the energy-based design are not exceeded.

Keywords: Energy-based design, Story displacement, Yield mechanism, Nonlinear static pushover analysis, Dynamic time history analysis

Giriş

Deprem etkisi altındaki yapı sistemleri genellikle doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Yatay yükler işletme yükü sınırını aşarak yapıların yatay yük taşıma kapasitesine ulaştıkça, taşıyıcı sistem elemanlarındaki gerilmeler elastik sınırları aşmakta ve yer değiştirmeler büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu nedenle, yapıların doğrusal olmayan davranışlarında göçme mekanizmaları büyük önem taşımaktadır.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı günümüzde dayanım esaslı, yer değiştirme esaslı ve enerji esaslı çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Dayanım veya kuvvete dayalı tasarımlarda yapı sistemi için belirli bir süneklik kabulü yapılarak, bu sünekliğe karşılık gelen dayanım hesaplanmaktadır. Bu şekilde gerçekleştirilen analizlerde yapı sisteminin doğrusal elastik davranışı esas alınmaktadır. Kuvvete dayalı tasarımlarda doğrusal olmayan davranış, bir dayanım azaltma katsayısının kullanılması ile dikkate alınmaktadır. Yer değiştirme esaslı yöntemler, doğrusal olmayan analizlere dayanan ve yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerdir. Son yıllardaki büyük depremlerden dolayı bu yöntemler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Birçok kaynakta ve teknik raporda “Kapasite Spektrumu” ve “Deplasman Katsayıları” yöntemleri üzerinde durulmuş ve yöntemlerin yapı sistemlerinde uygulanması sonucu yapı performans noktaları belirlenmiştir.

Deprem mühendisliği alanındaki çalışmalarda kullanılan “enerji” kavramı ile esas vurgulanmak istenilen “deprem enerjisi” olmuştur. Enerji esaslı çalışmalarda, depremle birlikte yapı sistemlerine giren enerji ve bu enerjinin taşıyıcı sistem elemanlarındaki dağılımı gibi konular araştırılmaktadır. Giren deprem enerjisinin yapının doğrusal elastik ötesi davranışı sonucu taşıyıcı sistem elemanlarında tüketilmesi ve taşıyıcı sistem elemanlarının enerji tüketme kapasitelerinin aşılmasının gerekliliği gibi konular enerjiye dayalı yapı tasarımında oldukça önemlidir.

Enerjiye dayalı yapı tasarımı ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Depreme dayanıklı yapı tasarımında enerji esaslı analiz yöntemlerinin kullanılması, ilk defa Housner tarafından yapılan çalışmada önerilmiştir (Housner, 1956). Housner tarafından, çok serbestlik dereceli sistemlere depremle birlikte giren enerji ifade edilmiş ve bu enerji ifadesi daha sonraki birçok çalışmaya temel oluşturmuştur. Tek ve çok serbestlik dereceli sistemlere enerji girişi Akiyama (1985), Kuwamura ve Galambos (1989), Uang ve Bertero (1990) ve Fajfar vd., (1991) gibi bilim adamları tarafından genişçe araştırılmıştır. Akbaş ve Shen (2001) tarafından, çok katlı eğilme çerçevelerinin performansa dayalı tasarımı enerji esaslı yaklaşımlarla gerçekleştirilmiştir. Leelataviwat (1998) ve Leelataviwat vd., (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda ise, yapılara etkileyen taban kesme kuvveti denklemi yapı sistemlerinin doğrusal elastik ötesi davranışının dikkate alınması ile, enerjiye dayalı yaklaşımlarla geliştirilmiştir. Enerjiye dayalı çalışmalarda, öngörülen bir göçme mekanizması üzerinde enerji denklemlerinin yazılması ile yeni bir yapı tasarımı yöntemi ortaya konulmuştur. Tasarım yöntemi kapsamında elde edilen taban kesme kuvveti denkleminde yapıya ait görelî kat ötelenmesi oranları yer almakta olup, tasarım başlangıcında bu değerler farklı performans seviyeleri için öngörülmüştür.

Bu çalışmada, Türk Deprem Yönetmeliğine göre (DBYBHY, 2007) ön boyutlandırılmış olan beş katlı, düzenli çelik çerçeve yapı sisteminin farklı kat yatay yer değiştirmelerine göre enerji esaslı tasarımı yapılmıştır. Tasarımda kullanılan yöntem, Leelataviwat (1998) tarafından geliştirilmiş olan yöntemin Türk Deprem Yönetmeliğine uyarlanması ile elde edilen enerjiye dayalı yöntemdir (Merter, 2008). Çalışmada enerji esaslı tasarım yöntemine, farklı performans seviyeleri için seçilmiş olan kat yatay yer değiştirmelerinin etkisi araştırılmıştır. Tasarım başlangıcında öngörülen hedef yer değiştirme değerleri, doğrusal olmayan statik itme analizlerinin ve seçilen deprem kayıtları altında gerçekleştirilen

dinamik analizlerin verdiği sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Enerji Esaslı Tasarım Yöntemi

Yeni yapılacak yapıların tasarımına yönelik olan enerji esaslı yöntemde, yapı sistemlerine depremle birlikte giren enerjinin hesaplanması için Housner'in önermiş olduğu denklem dikkate alınmaktadır (Housner, 1956). Housner'in enerji girişi denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

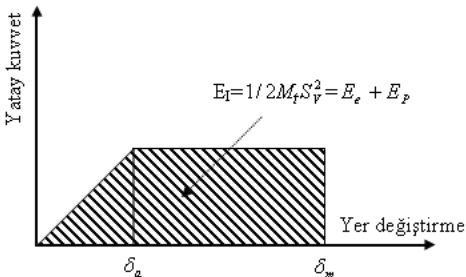
$$E_I = \frac{1}{2} M_t S_V^2 \quad (1)$$

Burada; E_I : Çok serbestlik dereceli sisteme depremle birlikte giren toplam enerji, M_t : Sistemin toplam kütlesi ve S_V : Elastik spektral hız değeridir.

(1) nolu denklemdeki giren enerji ifadesi, bu enerjinin sistemin elastik ve elastik ötesi (plastik) davranışı sonucu tüketildiğinin varsayılması ile şu şekilde yazılabilir:

$$E_I = E_e + E_p \quad (2)$$

Burada; E_e : Sistem tarafından tüketilen elastik enerji ve E_p : Sistemin doğrusal olmayan davranışı sonucu tüketilen enerjidir (Şekil 1).



Şekil 1. Elastik ve plastik enerjiyi tanımlayan "yer değiştirme-yatay kuvvet" grafiği (ideal elastoplastik davranış)

Sisteme depremle birlikte giren enerji, Şekil 1'de ideal elastoplastik davranışı temsil eden yatay kuvvet – yer değiştirme grafiği üzerinde

gösterilmiştir. Burada; δ_a : Akma durumuna karşılık gelen yer değiştirme ve δ_m : Maksimum yer değiştirme değeridir.

Elastik enerji Akiyama (1985) tarafından, tüm yapı sisteminin tek serbestlik dereceli sisteme indirgenebileceği varsayımı ile şu şekilde tanımlanmıştır:

$$E_e = \frac{1}{2} M_t \left(\frac{T}{2\pi W} V_t g \right)^2 \quad (3)$$

Burada; V_t : Yapıya etkiyen toplam taban kesme kuvveti, W : Toplam yapı ağırlığı ve g : yer çekimi ivmesidir.

Çok katlı çerçeve sistemlerde, seçilen bir göçme mekanizmasının kabulü ile ve göçme limit durumunda yapının tabandan itibaren θ_p kadar plastik dönme yapacağı varsayılarak plastik enerji ifadesi klasik iş-enerji bağıntısıyla elde edilebilir. Çalışma kapsamındaki tasarım yönteminde güçlü kolon – zayıf kiriş göçme mekanizması dikkate alınmış ve kolon kiriş birleşim bölgelerinin kiriş uçlarının ve zemin kat kolon diplerinin mafsallaştığı kabul edilmiştir. Tasarlanacak çerçeve yapı sisteminin bir katındaki kiriş sayısı "n", toplam kat sayısı "N", zemin kattaki toplam kolon sayısı "M", i. kattaki kirişlerin plastik momentleri M_{pbi} ve j. bir akstaki zemin kat kolonunun taban plastik moment değeri M_{pcj} ile ifade edilirse, öngörülen göçme mekanizması için limit durumda yapı sisteminde tüketilecek plastik enerji şu şekilde yazılabilir:

$$E_p = \left(\sum_{i=1}^N 2n M_{pbi} + \sum_{j=1}^M M_{pcj} \right) \theta_p \quad (4)$$

Tasarımda kabul edilen göçme mekanizmasında, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin sistemin plastik mafsal noktalarında toplandığı ve diğer kesitlerin doğrusal elastik davrandığı kabul edilmektedir. Çerçeve sistemde i. kat seviyesine etkiyen deprem yükü " F_i " ve " ΔF_N " ise binanın tepesine etkiyen ek eşdeğer deprem yükü olmak üzere (DBYBHY, 2007); plastik mafsallarda yapılan iç iş ile sistemde yapılan dış işin birbirine

eşitlenmesi ve gerekli sadeleştirmeler ile şu enerji eşitliği yazılabilir:

$$\sum_{i=1}^N 2nM_{pbi} + \sum_{j=1}^M M_{pcj} = \sum_{i=1}^N F_i h_i + \Delta F_N h_N \quad (5)$$

Burada; h_i ve h_N : i. ve N. katın zeminden olan yükseklikleridir. (5) nolu eşitliğin, (4) nolu plastik enerji denkleminde yerine konulmasıyla E_p plastik enerji denkleminin yeniden şu şekilde yazılabilir:

$$E_p = \left(\sum_{i=1}^N F_i h_i + \Delta F_N h_N \right) \theta_p \quad (6)$$

(5) ve (6) nolu eşitliklerde; ΔF_N : Ek eşdeğer deprem yükü ve F_i : Kat seviyelerine etkileyen deprem kuvveti ifadesi, Deprem Yönetmeliği Bölüm 2.7.2.2 ve 2.7.2.3'teki eşitliklerde verildiği gibidir (DBYBHY, 2007). Bu ifadelerin yerine yazılması ile (6) nolu plastik enerji ifadesi genişletilebilir. Bununla birlikte plastik enerji ifadesi teorik olarak, (1) nolu toplam giren enerjiden (3) nolu elastik enerjinin çıkarılması ile de elde edilebilir. Bu iki plastik enerji ifadesinin eşitlenmesinden taban kesme kuvveti denkleminin türetilebilir (Leelataviwat, 1998, 2002). Taban kesme kuvveti ifadesi, plastik enerji denklemlerinin kullanılması ile türetildiğinden, çalışma kapsamında "Enerji esaslı taban kesme kuvveti" olarak adlandırılmaktadır. Çalışma kapsamındaki enerji eşitliklerinde Türk Deprem Yönetmeliğindeki ifadelerin de kullanılmasıyla, Leelataviwat (1998) tarafından geliştirilen enerji esaslı taban kesme kuvveti denkleminin (7) nolu denklemindeki gibi yeniden elde edilmiştir (Merter, 2008).

$$\frac{V_t}{W} = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4a^2}}{2} \quad (7)$$

Burada; V_t : Yapıya etkileyen toplam taban kesme kuvveti, W : Toplam yapı ağırlığı, a : Elastik spektral ivme katsayısı ve α : Yapının göçme mekanizması, birinci doğal titreşim periyodu, kat yükseklikleri, kat adedi ve kat ağırlıkları

gibi özelliklerine bağlı olan boyutsuz parametredir. α katsayısı eşitlik (8) de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha = d - e + f \quad (8)$$

α katsayısının hesaplanmasında kullanılan d , e ve f katsayıları denklem (9), (10) ve (11)'de verilmiştir.

$$d = \left(\frac{\sum_{i=1}^N w_i h_i^2}{\sum_{i=1}^N w_i h_i} \right) \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \quad (9)$$

$$e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N w_i h_i^2}{\sum_{i=1}^N w_i h_i} \right) \frac{0,06\theta_p N\pi^2}{T^2 g} \quad (10)$$

$$f = \frac{0,06\theta_p N h_N \pi^2}{T^2 g} \quad (11)$$

d , e ve f eşitliklerindeki θ_p yapının öngörülen plastik dönme değeridir. Öngörülen toplam hedef dönme değeri θ_T ise, elastik akma dönmesi değeri θ_y ile plastik hedef dönmesi θ_p 'nin toplamı olarak ifade edilmektedir. Çalışma kapsamında yapılar için seçilen ideal göçme mekanizmasının dikkate alınması ile, göçme limit durumunda yapının tabandan itibaren θ_p kadar plastik dönme yapacağı kabul edilmiştir. Tasarım başlangıcında seçilen göçme mekanizması için elde edilen enerji esaslı taban kesme kuvveti ifadesinin θ_p plastik dönmesine bağlı olması, taban kesme kuvvetinin aynı zamanda kat yatay yer değiştirmelerine de bağlı olduğunu göstermektedir. Göçme durumunda kolon-kiriş birleşim bölgelerinin kiriş uçlarının ve zemin kat kolon tabanlarının mafsallaştığı varsayılan bir düzenli çerçeve sistemde, en üst katın plastik yer değiştirme değeri " δ_p " ve tüm yapı yüksekliği " H " ile gösterilirse, 1. mod etkisindeki yapının tabandan itibaren yaptığı θ_p plastik dönmesi şu şekilde yazılabilir:

$$\theta_p = \frac{\delta_p}{H} \quad (12)$$

Limit durumda görelî kat ötelenmesi oranlarının bütün katlarda aynı olacağından dolayı, tasarımdaki toplam hedef dönme değeri belirlenmesinde görelî kat ötelenmesi oranları kriter olarak kullanılabilir. ATC-13’de (1985) görelî kat ötelenmesi oranlarına bağılı olarak, yapıda oluşacak hasarı tanımlamak üzere Tablo 1 verilmiştir. Çalışma kapsamında, tasarımda hedeflenen hasar durumlarına karşı gelen görelî kat ötelenmesi oranları Tablo 1’in (ATC-13, 1985) kullanılması ile seçilmiştir.

Tablo 1. Görelî kat ötelenmesi oranlarına göre yapı performans seviyeleri [ATC-13 (1985)]

Performans Seviyesi	Hasar Durumu	Görelî Kat Ötelenmesi Oranı (%)
I	Hasarsız	$\Delta < 0.2$
II	Çok Hafif Hasar	$0.2 < \Delta < 0.5$
III	Hafif Hasar	$0.5 < \Delta < 0.7$
IV	Orta Hasar	$0.7 < \Delta < 1.5$
V	Ağır Hasar	$1.5 < \Delta < 2.5$
VI	Çok Ağır Hasar	$2.5 < \Delta < 5$
VII	Göçme	$\Delta > 5$

Yapıya etkiyecek tasarım taban kesme kuvvetinin (7) nolu denklemin kullanılması ile enerjiye dayalı olarak hesaplanmasının ardından, kolon ve kiriş taşıyıcı sistem elemanları plastik tasarım esaslarına göre belirlenir. Tasarımda plastikleşen kesitlerin kiriş uçlarında ve kolonların mesnetle birleşim bölgelerinde oluşacağı kabul edilmektedir. Plastikleşen kesitler, yığılı plastisite yaklaşımı kullanılarak plastik mafsallarla modellenmiştir. Yapıda ideal göçme mekanizmasının oluştuğu limit durumda plastik mafsallarda yapılan iç iş ile sistemde yapılan dış işin eşitlenmesi ile kurulan enerji dengesinden (5 nolu denklem) kat kirişlerinin plastik momenti olan “ M_{pbi} ” elde edilir. Kat kirişlerinin plastik momenti her bir katın yanal rijitliğine ve o katın kesme kuvveti değerine bağılı olarak değişmektedir. Kiriş tasarımında, enerji denge denklemindeki “ M_{pcj} ” zemin kat kolonlarının taban plastik moment değeri, zemin kat kolonlarının kesme kuvvetine bağılı olarak çeşitli yöntemlerin kullanılması ile tahmin edilebilir. Yapılan çalışmada “ M_{pcj} ” moment değerleri, Muto Yönteminin verdiği

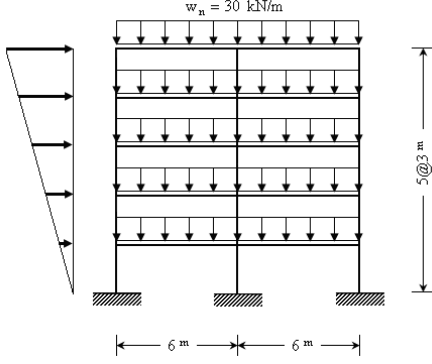
sonuçlar esas alınarak kabul edilmiştir. Tasarım başlangıcında çerçevenin tüm akslarındaki kolonlarının mesnetle birleşim bölgelerinde aynı plastik moment değerinin olduğu varsayılmıştır. Kat kirişlerinin plastik momentlerinin hesaplanması ile ve elde edilen kesit plastik mukavemet momentlerine uygun olarak kirişler boyutlandırılır. Kiriş tasarımının ardından kolon tasarımı gerçekleştirilir. Sistem öngörülen göçme mekanizmasına ulaştığı anda, yüklenme durumlarına bağılı olarak kolonların etkisinde oldukları maksimum eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerleri elde edilir. Bileşik eğilme etkisindeki kolon enkesitlerine ait akma yüzeyleri kullanılarak kolonların boyutlandırılması yapılır.

Tasarım Yönteminin Uygulaması

Enerji esaslı tasarım yönteminin uygulaması, seçilen 5 katlı çelik çerçeve yapı için gerçekleştirilmiştir. Tasarım yönteminin uygulamasında yapı malzemesi olarak, akma dayanımı 24 kN/cm² ve Elastisite Modülü 210000 MPa olan Fe 37 sınıfı Çelik kullanılmıştır. Yapı taşıyıcı sistemi Avrupa Norm Profilleri (<http://www.en-standard.eu>) kullanılarak boyutlandırılmıştır. Kirişler için IPE, kolonlar için HEB profilleri (geniş başlıklı Avrupa kesit I profilleri) kullanılmıştır. Tasarım için seçilen çerçeve düzeni ve kütle ve rijitlik dağılımının düzgün olduğu iki açıklıklı çerçevedir. Kat yükseklikleri 3’er metre ve her bir açıklık 6’şar metre’dir. Her bir açıklıkta 30 kN/m’lik düzgün yayılı yükün bulunduğu dikkate alınmış, taşıyıcı sistem elemanlarının ağırlıkları ihmal edilmiştir. Tasarıma esas seçilen çelik çerçeve yapı Şekil 2’de görülmektedir. Çerçeve yapının 1. derece deprem bölgesinde olduğu ve üzerinde bulunduğu zeminin Türk Deprem Yönetmeliğine göre Z4 Yerel Zemin Sınıfında olduğu kabul edilmiştir.

Tasarımda, ATC-13’e göre (Tablo 1) orta hasar, ağır hasar ve çok ağır hasar durumlarını temsil etmek üzere limit durumda %1.5, %2 ve %3.5’luk toplam görelî kat ötelenmesi oranları (θ_T) kullanılmıştır. Tasarımda hedeflenen tepe katı toplam yatay yer değiştirme değerleri sırası

ile 22.5 cm, 30 cm ve 52.5 cm'dir. Üç farklı durum için enerji esaslı tasarım yapılmış ve farklı taşıyıcı sistemler elde edilmiştir.



Şekil 2. Enerji esaslı tasarıma esas seçilen çerçeve yapı

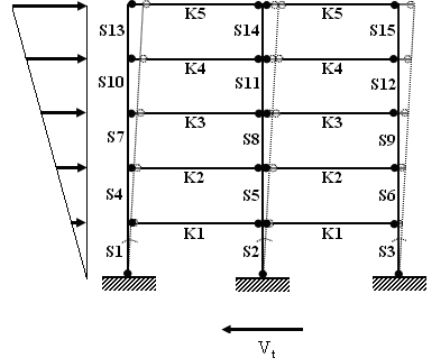
Tasarımlara esas toplam görelî kat ötelenmesi oranları, plastik dönme, elastik akma dönmesi, yapı birinci doğal titreşim periyodu, enerji esaslı elde edilen toplam taban kesme kuvvetinin toplam yapı ağırlığına oranı, elastik spektral ivme katsayısı ve enerji esaslı taban kesme kuvveti hesabında kullanılan boyutsuz katsayı sırası ile Tablo 2'de sunulmuştur. Tüm dönme değerleri radyan, periyot saniye ve elastik spektral ivme katsayısı g yer çekimi ivmesi cinsinden verilmiştir.

Tablo 2. Çelik çerçevenin farklı görelî kat ötelenmesi oranlarına göre tasarımına ait parametreler

θ_r	θ_p	θ_f	T	V/W	a	α
0.015	0.005	0.01	0.63	0.582	1.000	1.136
0.02	0.01	0.01	0.74	0.470	1.000	1.655
0.035	0.025	0.01	0.92	0.325	0.981	2.638

Tasarımda herhangi bir kattaki tüm kirişler aynı boyutta kabul edilmiştir. Çerçeve için seçilen göçme mekanizması ve taşıyıcı sistem adlandırılmaları Şekil 3'de görülmektedir. Tablo 2'de sunulan tasarım sonuçları Şekil 3'deki göçme mekanizması durumu (limit durum) içindir. Yatay yükler altında çerçevenin yatay yer

değiştirme yapmış hali Şekil 3'de gösterilmiştir. Sisteme etkileyen toplam taban



Şekil 3. Çelik çerçevenin ideal göçme mekanizması, kolon ve kiriş adları

kesme kuvveti V_t , (7) nolu denklem ile hesaplanan enerji esaslı taban kesme kuvvetidir.

Çelik çerçevenin farklı hedef yer değiştirmeleri için elde edilen enerji esaslı tasarım sonuçları (tasarımdan elde edilen çelik kolon ve kiriş profilleri) Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir. Hedeflenen kat yatay yer değiştirmesinin artması ile birlikte, taşıyıcı sistemi oluşturan çelik profillerin boyutlarında azalma meydana gelmiştir. Tasarımda hedeflenen yapı performans seviyesi ATC-13'e (1985) göre IV'ten VI'ya (Tablo 1) değişmektedir (Tablo 3 ve Tablo 4). Farklı performans seviyeleri için tasarlanan çelik çerçevelerin doğrusal olmayan statik artımsal itme analizleri sonucunda elde edilen Kapasite Eğrileri Şekil 4'de görülmektedir.

Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de performans noktalarına kadar itilen çelik çerçevelerin kat yatay yer değiştirmeleri ve tasarımda hedeflenen kat yatay yer değiştirmeleri verilmiştir. Doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi sonuçlarına göre tasarımda hedeflenen kat yatay yer değiştirmelerinin aşılmadığı gözlenmiştir. Tasarımlarda hedef yer değiştirmeye en yakın sonucu, %1.5 hedef görelî kat ötelenmesi oranına göre (orta hasar performans seviyesine

göre) yapılan tasarımın verdiği görülmüştür (Şekil 5).

Tablo 3. Tasarım sonucunda elde edilen çelik kiriş profilleri

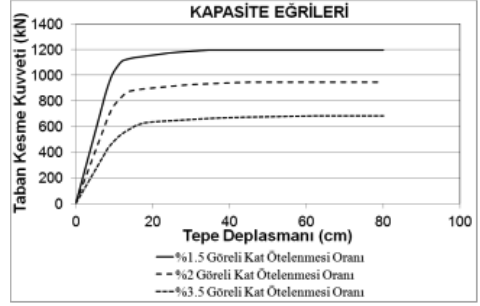
Tasarımda Hedeflenen Tepe Yer Değiştirmesi Değerleri ve Hedef Performans Seviyeleri			
	22.5 cm	30 cm	52.5 cm
	Orta Hasar	Ağır Hasar	Çok Ağır Hasar
K1	IPE 550	IPE 500	IPE 450
K2	IPE 550	IPE 500	IPE 450
K3	IPE 550	IPE 500	IPE 400
K4	IPE 500	IPE 450	IPE 400
K5	IPE 450	IPE 400	IPE 360

Tablo 4. Tasarım sonucunda elde edilen çelik kolon profilleri

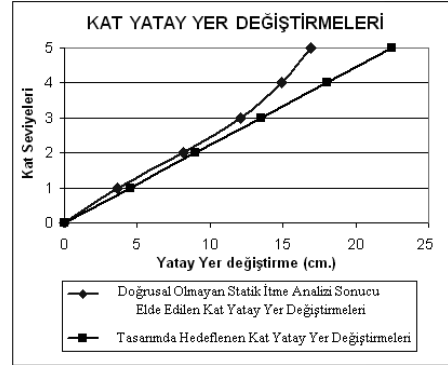
Tasarımda Hedeflenen Tepe Yer Değiştirmesi Değerleri ve Hedef Performans Seviyeleri			
	22.5 cm	30 cm	52.5 cm
	Orta Hasar	Ağır Hasar	Çok Ağır Hasar
S1	HEB 360	HEB 320	HEB 280
S2	HEB 600	HEB 500	HEB 400
S3	HEB 360	HEB 320	HEB 280
S4	HEB 360	HEB 320	HEB 280
S5	HEB 500	HEB 450	HEB 360
S6	HEB 360	HEB 320	HEB 280
S7	HEB 360	HEB 320	HEB 280
S8	HEB 500	HEB 450	HEB 360
S9	HEB 360	HEB 320	HEB 280
S10	HEB 340	HEB 300	HEB 280
S11	HEB 500	HEB 450	HEB 360
S12	HEB 340	HEB 300	HEB 280
S13	HEB 280	HEB 260	HEB 240
S14	HEB 400	HEB 340	HEB 300
S15	HEB 280	HEB 260	HEB 240

Çalışma kapsamında doğrusal olmayan statik artımsal itme analizleri ile birlikte, zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, tasarımda hedeflenen kat yatay yer değiştirmelerinin (veya görel kat ötelenmesi oranlarının) kontrol edilmesinde kullanılmıştır. Zaman tanım alanında dinamik analizlerde; 1999 Kocaeli Depremi,

1999 Düzce Depremi, 1995 Afyon-Dınar Depremi, 2003 Bingöl Depremi, 2003 Denizli-Sarayköy Depremi, 1992 Erzincan Depremi ve 2005 İzmir-Sığacık depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır (Şekil 8 – 14).



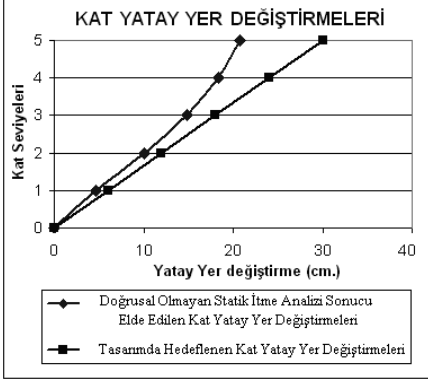
Şekil 4. %1.5, %2 ve %3.5 Görel kat ötelenmesi oranlarına göre tasarlanan çerçevelerin artımsal itme eğrileri



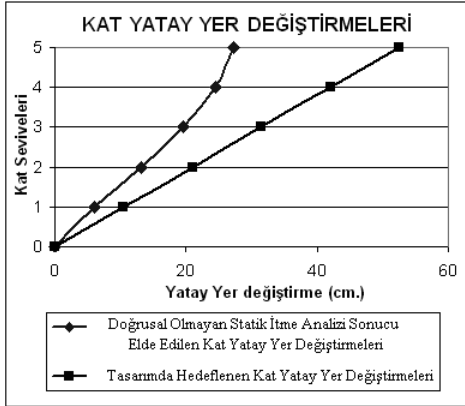
Şekil 5. %1.5 Hedef görel kat ötelenmesi oranı için kat yatay yer değiştirmesi değerleri

Doğrusal olmayan statik analizler ve dinamik analizlerde SAP2000 (Computers and Structures, 2011) yapı analiz programı kullanılmıştır. Analizler sonucunda kat yatay yer değiştirmeleri ile birlikte görel kat ötelenmesi oranları da hesaplanmış ve tasarımda hedeflenen oranlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 15). Görel kat ötelenmesi oranları (Δ_i) eşitlik (13) de verildiği gibi hesaplanmıştır (DBYBHY, 2007).

$$\Delta_i = \frac{\delta_{pi}}{H_i} \quad (13)$$



Şekil 6. %2 Hedef görel kat ötelenmesi oranı için kat yatay yer değiştirmesi değerleri

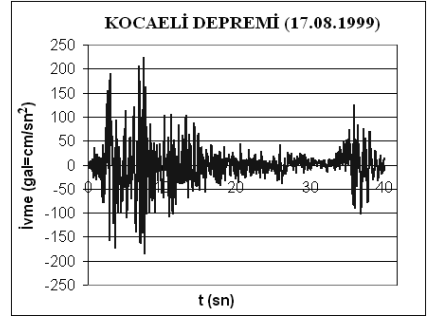


Şekil 7. %3.5 Hedef görel kat ötelenmesi oranı için kat yatay yer değiştirmesi değerleri

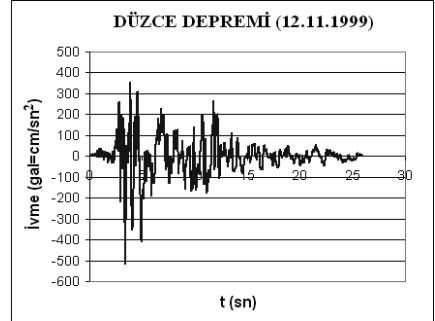
(13) nolu eşitlikte; δ_{pi} : Yapının i. katındaki görel kat ötelenmesi ve H_i : Yapının i'nci katının temel üstünden itibaren ölçülen yüksekliğidir. Şekil 15'de; doğrusal olmayan statik artımsal itme analizlerinin ve Şekil 8 – 14'de ivme kayıtları verilen depremlerin kullanılması sonucu gerçekteştirilen dinamik analizlerin sonucunda elde edilen görel kat ötelenmesi oranları sunulmuştur. Analizler

sonucunda elde edilen görel kat ötelenmesi oranları, tasarım başlangıcında hedeflenen görel kat ötelenmesi oranları ile karşılaştırılmış ve hiçbir kat seviyesinde hedef görel kat ötelenmesi oranlarının aşılmadığı görölmüştür (Şekil 15).

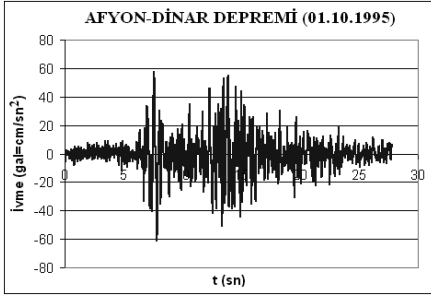
Dinamik analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtlarına (Şekil 8 – 14) ait önemli bazı özellikler Tablo 5'de verilmiştir.



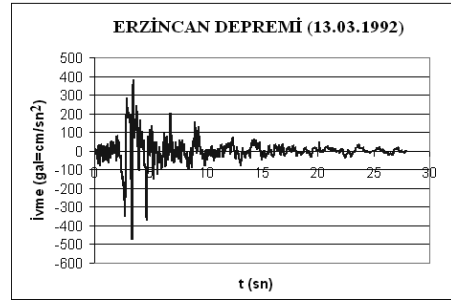
Şekil 8. Kocaeli depremine ait doğu-batı doğrultusu ivme kaydı



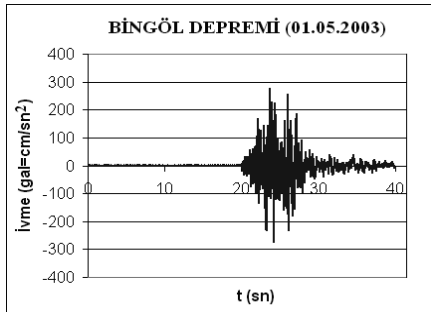
Şekil 9. Düzce depremine ait doğu-batı doğrultusu ivme kaydı



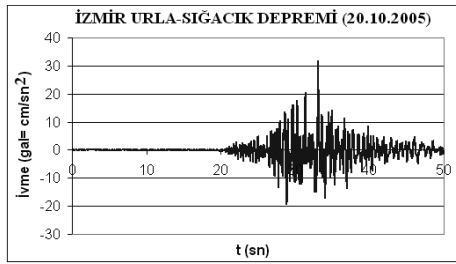
Şekil 10. Afyon-Dinar depremine ait doğu-batı doğrultusu ivme kaydı



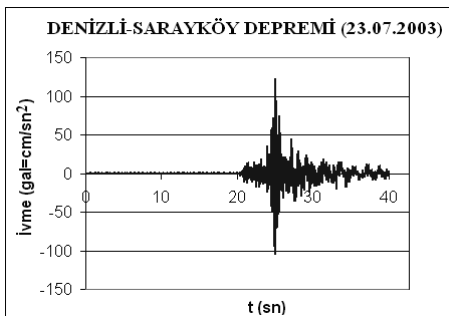
Şekil 13. Erzincan depremine ait doğu-batı doğrultusu ivme kaydı



Şekil 11. Bingöl depremine ait doğu-batı doğrultusu ivme kaydı



Şekil 14. İzmir-Sığacık depremine ait doğu-batı doğrultusu ivme kaydı



Şekil 12. Denizli-Sarayköy depremine ait doğu-batı doğrultusu ivme kaydı

Deprem ivme kayıtlarının seçilmesi ve düzenlenmesinde “T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı” internet sitesinden yararlanılmıştır (<http://www.deprem.gov.tr>).

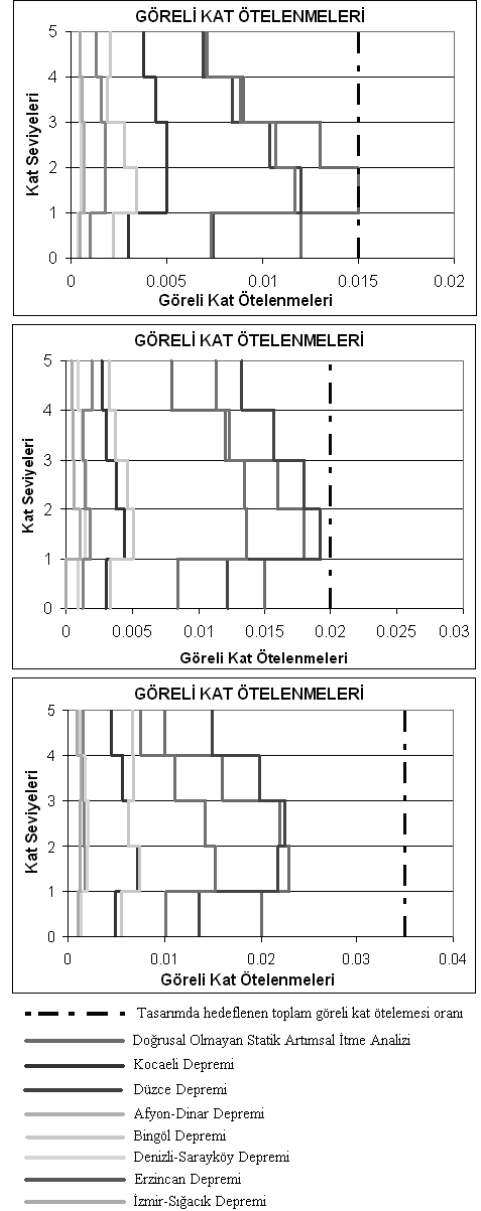
Tablo 5’de; M_w : Depremin moment büyüklüğü, PGA: En büyük yer ivmesi (cm/s^2), PGV: En büyük yer hızı (cm/s)’dır. Dinamik analizlerde kullanılan depremlerin kayıt yerleri Kocaeli ve Düzce depremleri için sırasıyla “Kocaeli ve Düzce Merkez Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü”; Afyon-Dinar depremi için “Denizli-Çardak Sağlık Ocağı”; Bingöl depremi için “Bingöl Merkez Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü”, Denizli-Sarayköy depremi için “Denizli-Sarayköy Jeotermal Lojmanları”, Erzincan depremi için “Erzincan Merkez Meteoroloji Müdürlüğü” ve İzmir-Sığacık depremi için “Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi-Bornova”dır (<http://www.deprem.gov.tr>).

Tablo 5. Zaman tanım alanında dinamik analizlerde seçilen deprem ivme kayıtlarının özellikleri

Deprem	M_w	Odak Derinliği (km)	PGA (cm/s^2)	PGV (cm/s)
Kocaeli	7.6	15.9	230.80	38.59
Düzce	7.1	11	406.20	68.57
Afyon-Dinar	6.4	5	47.79	3.39
Bingöl	6.3	6	296.04	21.87
Denizli-Sarayköy	5.3	11	122.16	4.79
Erzincan	6.6	23	478.77	78.22
İzmir – Sığacık	5.8	15.4	31.93	2.73

Sonuçlar

Bu çalışmada, Türk Deprem Yönetmeliğine göre ön boyutlandırması yapılmış olan beş katlı çelik çerçevelerin, farklı performans seviyeleri için seçilmiş olan kat yatay yer değiştirmelerine göre enerji esaslı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım başlangıcında seçilen bir göçme mekanizması üzerinde enerji denge denklemlerinin yazılması sonucu, yapıya etkien taban kesme kuvveti hesaplanmış ve taşıyıcı sistem elemanları boyutlandırılmıştır. Tasarımdan elde edilen taşıyıcı sistemlere sahip yapılara doğrusal olmayan statik itme analizi ve seçilen yedi deprem kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizler uygulanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen kat yatay yer değiştirmeleri, tasarımda hedeflenen yer değiştirme değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar grafik halinde sunulmuştur. Hedeflenen yer değiştirme değerleri hiçbir tasarımda aşılmamış ve hedef yer değiştirmeye en yakın sonucu orta hasar performans seviyesine göre yapılan tasarımın verdiği görülmüştür. Çalışmada, analizler sonucu elde edilen kat yatay yer değiştirmelerinden görel kat ötelenmesi oranları da hesaplanmış ve hedef görel kat ötelenmesi oranları ile karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 15. %1.5; %2 ve %3.5 Görel kat ötelenmesi oranlarına göre tasarlanmış çerçevelerde doğrusal olmayan statik itme analizi ve dinamik analizler sonucunda elde edilen görel kat ötelenmesi oranları

Tasarım sonuçlarının kontrolü görelî kat ötelenmesi oranı üzerinden de gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen görelî kat ötelenmesi oranları, hiçbir kat seviyesinde hedef görelî kat ötelenmesi oranını aşmamıştır. Doğrusal olmayan statik artımsal itme analizlerinin, Düzce ve Erzincan depremleri ile gerçekleştirilen enerji esaslı tasarımlardan; hedeflenen kat yatay yer değiştirme değerlerinin artması ile birlikte taşıyıcı sistemi oluşturan çelik profillerin boyutlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Görelî kat ötelenmesi oranları cinsinden ifade edilecek olursa; hedef ötelenmenin %1.5'dan %3'e artması ile birlikte en büyük kolon kesitleri HEB 600'den HEB 400'e ve en büyük kiriş kesitleri ise IPE 550'den IPE 450'ye değişmiştir. Çalışma kapsamındaki tasarım yönteminin daha iyi sonuçlar verebilmesi için yapılması gereken bazı çalışmalar mevcuttur. Yöntemdeki enerjiye dayalı hesap prosedürü, birinci mod etkisindeki düzenli yapılar için geliştirilmiştir. Yapının mod şeklini daha gerçekçi bir şekilde dikkate alacak yöntemler üzerine çalışılması gereklidir. Çalışmada elastik akma dönmesi değeri %1 olarak kabul edilmiştir. Bu değerin yapının özelliklerine göre geliştirilerek hesaplara dahil edilmesi, daha hassas sonuçlar elde edilmesi açısından önemlidir. Tasarım yöntemi farklı açıklık ve yüksekliklerdeki çeşitli yapılar için geliştirilebilir.

Kaynaklar

Akbaş, B. and Shen, J., (2001). Energy Approach in Performance-Based Seismic Design of Steel Moment Resisting Frames for Basic Safety

- Objective, *The Structural Design of Tall Buildings*, **10**, 193-217.
- Akiyama, H., (1985). *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*, University of Tokyo Press, Tokyo.
- ATC-13, (1985). Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology.
- Computers and Structures, Inc., (2011). SAP2000 Nonlinear, v15.0.0, Structural Analysis Program, Berkeley, California.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2007). T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 26454 sayılı resmi gazete, Ankara.
- Fajfar, P., Vidic, T. ve Fischinger, M. (1991). On the Energy Input into Structures, *Pasifik Deprem Konferansı*, 23, 523-537.
- Housner, G. W., (1956). Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, *Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, 1-13, Oakland, California.
- Kuwamura, H. ve Galambos, T. V. (1989). Earthquake Load for Structural Reliability, *Journal of Structural Engineering*, **115**, 6, 1446-1462.
- Leelataviwat, S., (1998). Drift and Yield Mechanism Based Seismic Design and Upgrading of Steel Moment Frames, *Ph.D. Thesis*, University of Michigan.
- Leelataviwat, S., Goel, S.C. and Stojadinovic, B., (2002). Energy-based Seismic Design of Structures using Yield Mechanism and Target Drift, *Journal of Structural Engineering*, **128**, 8, 1046-1054.
- Merter, O., (2008). Yapıların Enerji Esaslı Performans Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Uang, C.-M., Bertero, V. V., (1990). Evaluation of Seismic Energy in Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**, 77-90.
- <http://www.deprem.gov.tr>, (01.03.2011).
- <http://www.en-standard.eu>, (24.11.2011).