

Çelik Yapıların Öngörülen Görelî Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı

Onur MERTER*
Özgür BOZDAĞ**
Mustafa DÜZGÜN***

ÖZ

Günümüz yönetmeliklerinde yer alan ve yapıların yatay yük analizinde kullanılan yöntemler genellikle doğrusal elastik yöntemler olup, deprem etkisi altında yapıların elastik ötesi davranışı hesaplarda dolaylı olarak dikkate alınmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, yapının elastik ötesi davranışının hesaplara daha gerçekçi şekilde dahil edilmesine olanak vermektedir. Bu çalışmada, yapı elemanlarının elastik ötesi davranışı dikkate alınarak ve yapıdaki enerji dengesi kullanılarak, yeni yapılacak yapıların kullanım fonksiyonuna göre öngörülen görelî kat ötelemesi oranını sağlayacak şekilde tasarlanmasına yönelik bir hesap yöntemi sunulmuştur. Çelik yapıların elde edilen hedef yer değiştirmelere ulaştığı andaki görelî kat ötelemesi oranları, başlangıçta öngörülen görelî kat ötelemesi oranlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Elastik ötesi davranış, enerji esaslı tasarım, hedef yer değiştirme, performans dayalı tasarım.

ABSTRACT

Energy-based Design of Steel Structures According to the Predefined Interstory Drift Ratio

The methods which take place in current building codes and used in seismic design of structures are generally linear elastic. Inelastic behavior of the structures under the effect of earthquake is considered indirectly in seismic design codes. Recent studies enable inelastic behavior of structures to be taken into account properly in the structural design. In this study, a calculation method oriented towards the design of new structures which fulfill the predefined interstory drift ratio according to the usage function of the structures was offered by considering the inelastic behavior of the structural members and by using the energy balance of the structures. Interstory drift ratios when the steel structure displacements reach

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 01.04.2009 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - onur.merter@deu.edu.tr

** Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ozgur.bozdogan@deu.edu.tr

*** Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - mustafa.duzgun@deu.edu.tr

the target displacements were compared with the initial interstory drift ratios and the results were interpreted.

Keywords: Inelastic behavior, energy-based design, target displacement, performance based design.

1. GİRİŞ

Yapılar deprem yükleri altında genellikle elastik ötesi davranış göstermektedir. Özellikle deprem yükleri işletme yükü sınırını aşarak yapının yatay yük taşıma gücüne yaklaştıkça, taşıyıcı elemanlardaki iç gerilmeler elastik sınırı aşmakta ve eleman yer değiştirmeleri büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu nedenle, yapıların elastik ötesi davranışlarında göçme mekanizmaları büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde yapı sistemlerinin depreme dayanıklı tasarımı; dayanım esaslı tasarım yöntemlerinin yanında yer değiştirme ve enerji esaslı analizlerle de gerçekleştirilmektedir. Dayanım esaslı tasarım yönteminde taşıyıcı sistem elemanlarının taşıma gücü, yapıya etkiyen dış kuvvetler altında oluşacak eleman iç kuvvet değerlerinden büyük olacak şekilde tasarlanmaktadır. Yer değiştirme esaslı tasarımda amaç, yapının deprem yükleri altında aşırı yatay yer değiştirme yapmasını ve taşıyıcı sistem elemanlarında aşırı şekil değiştirmelerin meydana gelmesini önlemektir. Enerji esaslı tasarımda ise, yapının elastik ve elastik ötesi davranışla tüketebileceği enerjinin deprem anında yapıya girecek olan deprem enerjisinden büyük olması amaçlanmaktadır.

Enerji esaslı tasarım ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Depreme dayanıklı yapı tasarımında enerji esaslı analiz yöntemlerinin kullanılması, ilk defa Housner tarafından yapılan çalışmada [1] önerilmiştir. Çalışmada belirli depremlerin hız spektrumlarının geniş bir periyot aralığında sabit kalma eğiliminin olduğu gösterilmiş ve çok serbestlik dereceli sistemlere depremlerle birlikte giren enerji ifade edilmiştir. Yapı sistemlerine depremlerle birlikte giren enerji ve bunun depreme dayanıklı tasarım ve değerlendirmede kullanılması ile ilgili olarak da birçok çalışma yapılmıştır [2,3,4]. Uang ve Bertero [2] yapı sistemlerine giren deprem enerjisini hesaplamak için yöntemler sunmuş ve tek serbestlik dereceli sistemlerde enerji denge denklemini formülize etmiştir. Akiyama, çalışmasında [5] yapı sisteminin eşdeğer tek serbestlik dereceli sisteme indirildiği varsayımını yaparak, yapının elastik davranışla tükettiği enerjiyi tanımlamıştır. Depreme dayanıklı yapı tasarımında enerjiye dayalı bir yöntem de Surahman'ın çalışmasında [6] kullanılmıştır. Çalışmadaki yöntemde deprem enerji spektrumları, yapısal elemanlardaki enerji dağılımları ve enerji depolama kapasiteleri üzerinde durulmuştur. Leelataviwat tarafından yapılan çalışmada [7], öngörülen bir göçme mekanizması üzerinde enerji denge denklemlerinin yazılması ile yapı tasarımında kullanılabilecek yeni bir tasarım yöntemi ortaya konmuştur. Enerji esaslı olarak geliştirilmiş yöntemle görelî kat ötelemesi oranı kavramı da dahil edilerek, yöntem çelik çerçevelerin tasarımında kullanılmıştır. Enerji dengesi kavramının çok serbestlik dereceli sistemler için geliştirilerek, deprem etkisi altındaki yapıların değerlendirilmesinde kullanımı Leelataviwat ve Goel'in çalışmalarında [8,9,10] ele alınmıştır. Shen ve Akbaş'ın çalışmalarında depreme dayanıklı yapı tasarımında enerji kavramı incelenmiş [11,12,13] ve çok katlı eğilme çerçevelerinin enerji esaslı yaklaşımlarla performans dayalı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Lee ve Goel tarafından yapılmış olan çalışmada [14] ise enerji kavramları kullanılarak yapı tasarımı

gerçekleştirmiş ve Leelataviwat'ın çalışmasındaki gibi [7] yapılara etkiyen taban kesme kuvveti enerji esaslı tasarım yöntemi ile elde edilmiştir. Literatürdeki enerji esaslı çalışmaların büyük bir kısmı çelik yapılar üzerinedir. Kim ve Choi'nin çalışmalarında [15] merkezi çapraz elemanlı çok katlı çelik çerçevelerin enerji esaslı tasarımı yapılmış, sonuçlar zaman tanım alanında çözümler ile doğrulanmıştır.

Performansa dayalı tasarım, deprem etkisindeki yapının göstereceği davranışın yapıdan beklenen ölçütlerde olmasını sağlayan tasarımdır. Bu çalışma kapsamındaki enerji esaslı ve performansa dayalı tasarımda, Leelataviwat tarafından geliştirilen yöntemin [7] Türk Deprem Yönetmeliğine göre düzenlemesi yapılmıştır. Yapı performansını belirleyecek kriter olarak görelî kat öteleme oranı seçilmiş ve yapı performansına bağlı görelî kat öteleme oranları ATC-13'den [16] alınmıştır. Yapı tasarımı, yapının kullanım fonksiyonuna uygun olarak öngörülen görelî kat öteleme oranına göre gerçekleştirilmiştir. Öngörülen görelî kat öteleme oranına göre, yapıya etkiyen taban kesme kuvveti hesaplanmış ve yapı taşıyıcı sistemi boyutlandırılmıştır. Tasarımda herhangi bir kattaki tüm girişler aynı boyutta kabul edilmiştir. Tasarımın tamamlanmasının ardından, yapıya doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi uygulanarak yapının kapasite eğrisi elde edilmiştir. 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinin [17] yedinci bölümünde belirtilen yönteminin kullanılmasıyla hesaplanan hedef yer değiştirme değerine kadar itilen yapının her katındaki görelî kat öteleme oranları belirlenmiştir. Elde edilen görelî kat öteleme oranları, enerji esaslı tasarımın başlangıcında öngörülen görelî kat öteleme oranlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. ÇOK KATLI ÇELİK YAPILAR İÇİN TANIMLANAN ENERJİ ESASLI TASARIM YÖNTEMİ

Yeni yapılacak yapıların tasarımı için önerilmiş olan enerji esaslı tasarım yönteminde, yapıya depremle birlikte giren toplam enerjinin bir kısmının yapının elastik davranışı ile geriye kalan kısmının ise yapının elastik ötesi davranışı ile tüketileceği varsayılmaktadır. Housner, 1934 El Centro, 1940 El Centro, 1949 Olympia ve 1952 Taft depremleri gibi dünyadaki çeşitli büyük depremlerin tepki hız spektrumlarını inceleyerek, geniş bir periyot aralığında spektrum eğrilerinin sabit kalma eğiliminde olduğunu göstermiştir [1]. Çalışma kapsamındaki enerji esaslı tasarım yönteminde, çok serbestlik dereceli yapı sistemlerine depremle birlikte giren enerji değerini hesaplamak için Housner tarafından tanımlanmış olan [1];

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

ifadesi kullanılmıştır. Burada; E_I çok serbestlik dereceli sisteme deprem sırasında giren toplam enerjiyi, M_t sistemin toplam kütlelerini, S_v elastik spektral hız değerini göstermektedir. Housner'in tanımlamış olduğu bu toplam enerji denklemi, gerekli ifadelerin yerine konulmasıyla aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

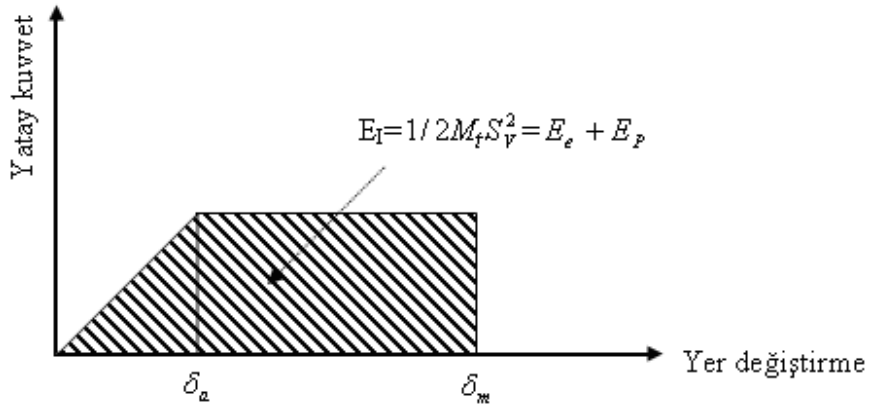
$$E_I = \frac{Wga^2T^2}{8\pi^2} \quad (2)$$

(2) nolu denklemde; W toplam yapı ağırlığını, g yer çekimi ivmesini, T yapının birinci doğal titreşim periyodunu ve a elastik spektral ivme katsayısını (boyutsuz ivme) göstermektedir. “ a ” elastik spektral ivme katsayısı değeri değişik deprem kayıtlarından oluşturulacak özel tasarım ivme spektrumundan belirlenebileceği gibi, Türk Deprem Yönetmeliğinde [17] tanımlanan standart elastik ivme spektrumundan da elde edilebilir. Çalışma kapsamındaki tasarımda Türk Deprem Yönetmeliği [17] esas alınmış ve elastik spektral ivme katsayısı değeri buna göre hesaplanmıştır.

Housner tarafından (1) nolu denklemdeki gibi ifade edilmiş olan toplam enerji değeri, bu enerjinin sistemin elastik ve elastik ötesi davranışıyla tüketildiğinin varsayılması ile şu şekilde yazılabilmektedir:

$$E_I = E_e + E_p \quad (3)$$

(3) denklemde E_e sistem tarafından tüketilen elastik enerji olup, elastik sınırı aşmayarak doğrusal-elastik davranış gösteren kesitlerde depolandığı varsayılan enerjidir. E_p ise sistemin plastik enerjisi olup, bu enerjinin doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu plastik mafsallarında depolandığı varsayılmıştır. Sistemin elastik ve plastik enerjisi, ideal elastoplastik davranışı temsil eden yatay kuvvet – yer değiştirme grafiği ile Şekil 1’de gösterilmiştir. Burada δ_a akma durumuna karşılık gelen yer değiştirme olup, δ_m maksimum yer değiştirmedir.



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

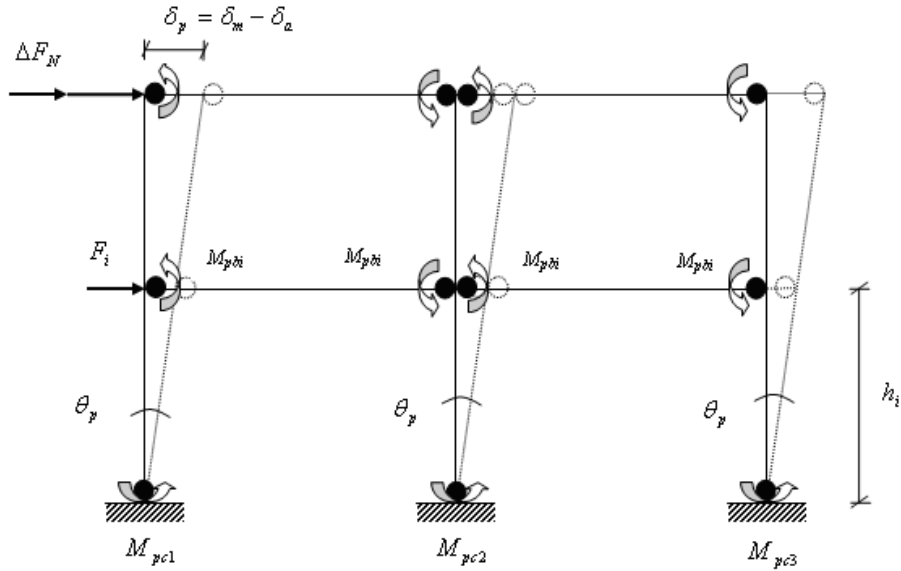
Akiyama [2], tüm yapı sisteminin tek serbestlik dereceli sisteme indirgenebileceğini varsayarak, elastik enerjisi aşağıdaki denklemlerle tanımlamıştır:

$$E_e = \frac{1}{2} M_t \left(\frac{T}{2\pi} \frac{V_t}{W} g \right)^2 \quad (4)$$

Bu eşitlikte V_t yapıya etkiyen toplam taban kesme kuvvetidir. Yapıya etkiyen toplam enerjinin ve yapı tarafından tüketilen elastik enerjinin ifade edilmesinin ardından, (2) nolu toplam enerji ifadesinden (4) nolu elastik enerji ifadesinin çıkarılmasıyla, E_p plastik enerjisi şu şekilde elde edilir:

$$E_p = \frac{WT^2 g}{8\pi^2} \left[a^2 - \left(\frac{V_t}{W} \right)^2 \right] \quad (5)$$

E_p plastik enerjisinin (5) nolu denklemden elde edilmesinin ardından, aynı plastik enerji klasik iş-enerji bağıntısıyla elde edilmiştir. Bu amaçla ele alınacak olan yapıda, deprem etkileri altında Şekil 2'deki gibi öngörülen bir göçme mekanizmasının oluşacağı kabul edilmiştir. Yapının göçme limit anında tabandan itibaren θ_p kadar plastik dönme yapacağı varsayılmış ve bu durum için plastik enerji denklemi yeniden yazılmıştır. (6).



Şekil 2. İki katlı iki açıklıklı bir çerçevenin ideal göçme mekanizması, giriş uç plastik momentleri ve zemin kat kolon tabanı uç plastik momentleri

Çelik Yapıların Öngörülen Göreli Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı

Öngörülen göçme mekanizması için, göçme limiti anında yapıda tüketilecek toplam plastik enerji aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$E_p = \left(\sum_{i=1}^N 2nM_{pbi} + \sum_{j=1}^M M_{pcj} \right) \theta_p \quad (6)$$

(6) nolu plastik enerji denkleminde M_{pbi} i. kat kirişlerinin plastik momenti, M_{pcj} j. akstaki zemin kat kolonunun taban plastik momentidir. N toplam kat sayısı, n bir kattaki toplam kiriş sayısı ve M zemin kattaki toplam kolon sayısıdır. Şekil 2.de görülen δ_p , N . katın plastik yer değiştirmesidir.

Tasarımda göz önüne alınacak olan ideal göçme mekanizması Şekil 2’de görülen mekanizma olup, plastik mafsalların kiriş uçlarında ve zemin kat kolonlarının alt uçlarında oluşacağı varsayılmaktadır. Sistemdeki doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin de, buradaki plastik mafsallarda toplandığı ve diğer kesitlerin doğrusal-elastik davrandığı kabul edilmektedir.

Plastik mafsallarda yapılan iç işin, sistemde yapılan dış işe eşitlenmesi ile;

$$\sum_{i=1}^N 2nM_{pbi} + \sum_{j=1}^M M_{pcj} = \sum_{i=1}^N F_i h_i + \Delta F_N h_N \quad (7)$$

denkleminde ulaşırlı. Bu denklemde F_i kat seviyelerine etkileyen deprem kuvveti olup, Türk Deprem Yönetmeliğinde [17] “Katlara Etkiyen Eşdeğer Deprem Yüklerinin Belirlenmesi” kısmında verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$F_i = (V_t - \Delta F_N) \frac{w_i h_i}{\sum_{j=1}^N w_j h_j} \quad (8)$$

(8) nolu eşitlikte ise; ΔF_N yapının N. tepe katına etkileyen ek deprem yüküdür. w_i ve w_j ; i. ve j. katların ağırlıkları olup, h_i ve h_j i. ve j. katların zeminden olan yükseklikleridir. ΔF_N değeri yine Türk Deprem Yönetmeliği’nde [17] verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta F_N = 0,0075 N V_t \quad (9)$$

Burada N binanın temel üstünden itibaren toplam kat sayısıdır.

(7) nolu eşitliğin, (6) nolu plastik enerji denkleminde yerine konulmasıyla E_p plastik enerji denklemi yeniden yazılabilir.

$$E_p = \left(\sum_{i=1}^N F_i h_i + \Delta F_N h_N \right) \theta_p \quad (10)$$

(10) nolu denklem ile elde edilen plastik enerji ifadesinde, F_i kuvveti için (8) nolu denklem, ΔF_N kuvveti için (9) nolu denklem yerine konular ve bu plastik enerji, (5) nolu denklem ile ifade edilmiş olan plastik enerji ile eşitlenerek gerekli düzenlemeler yapılırsa,

V_t enerji esaslı taban kesme kuvveti;

$$\frac{V_t}{W} = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4a^2}}{2} \quad (11)$$

şeklinde elde edilir [7,18,19]. Burada α ; yapının göçme mekanizması, birinci doğal titreşim periyodu, kat yükseklikleri, kat adedi ve kat ağırlıkları gibi özelliklerine bağlı olan boyutsuz parametredir. α katsayısı aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi [19] hesaplanmaktadır.

$$\alpha = d - e + f \quad (12)$$

α katsayısının hesaplanmasında kullanılan d , e ve f katsayıları denklem (13), (14) ve (15)'de verilmiştir [19].

$$d = \left(\frac{\sum_{i=1}^N w_i h_i^2}{\sum_{i=1}^N w_i h_i} \right) \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \quad (13)$$

$$e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N w_i h_i^2}{\sum_{i=1}^N w_i h_i} \right) \frac{0,06\theta_p N\pi^2}{T^2 g} \quad (14)$$

$$f = \frac{0,06\theta_p N h_N \pi^2}{T^2 g} \quad (15)$$

Çelik Yapıların Öngörülen Görelî Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı

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. (16).

$$\theta_T = \theta_y + \theta_p \quad (16)$$

Bu çalışmada enerji esaslı tasarımda dolaylı olarak kullanılan θ_y değeri, literatürdeki kabulün [18] göz önünde bulundurulmasıyla %1 olarak alınmıştır.

Limit durumda görelî kat ötelemesi oranları tüm katlarda aynı olacaktır. Bu sebeple, θ_T 'nin belirlenmesinde görelî kat ötelemesi oranları kriter olarak kullanılabilir. ATC-13'de görelî kat ötelemesi oranlarına bağli olarak, yapıda oluşacak hasarı tanımlamak üzere Tablo 1 verilmiştir [16].

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

Performans Seviyesi	Hasar Durumu	Görelî Kat Ötelemesi 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	$\Delta > 5$

Yapı tasarımında kullanılacak toplam dönme değeri θ_T , yapıda oluşması öngörülecek hasar seviyesine göre Tablo 1 yardımı ile belirlenebilir.

3. TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARININ BELİRLENMESİ

Yapıya etkiyecek tasarım toplam taban kesme kuvveti hesaplandıktan sonra kolon ve kiriş taşıyıcı sistem elemanları plastik tasarım esaslarına göre belirlenmektedir. Tasarımda, yapının göçme mekanizmasının Şekil 2'deki gibi olduğu ve limit durumda plastik mafsalların kiriş uçlarında ve kolonların mesnetle birleşim bölgelerinde oluşacağı kabul edilmektedir. Elemanlardaki plastikleşen bölgeler Yığılı Plastisite Yaklaşımı kullanılarak, plastik mafsallarla modellenmiştir. Tasarım sırasında Türk Deprem Yönetmeliğinde belirtilen güçlü kolon - zayıf kiriş şartının sağlanıp sağlanmadığı da ayrıca kontrol edilmektedir.

Yapıda ideal göçme mekanizmasının olduğu anda, plastik mafsallarda yapılan iç iş ile dış işin eşitlenmesiyle elde edilen denklem (7)'deki M_{pbi} değeri, her bir katın yanal rijitliğine ve o katın kesme kuvveti değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle hesaplarda i. kat kirişlerinin plastik momenti, tanımlanan bir referans moment değerinin belli bir oranı olarak aşağıdaki denklem ile tariflenebilir.

$$M_{pbi} = \beta_i M_{pbr} \quad (17)$$

Bu denklemde M_{pbi} i. kat kirişlerinin plastik momenti, β_i kiriş kesme dayanım faktörü ve M_{pbr} kiriş referans plastik moment değeridir. Denklem (17)'deki eşitlik, denklem (7)'de yerine konulursa;

$$\sum_{i=1}^N F_i h_i + \Delta F_N h_N = \sum_{i=1}^N 2n\beta_i M_{pbr} + \sum_{j=1}^M M_{pcj} \quad (18)$$

denklemini elde edilir.

Kiriş kesme dayanım faktörü genel olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [7].

$$\beta_i = \left(\frac{V_i}{V_N}\right)^b \quad (19)$$

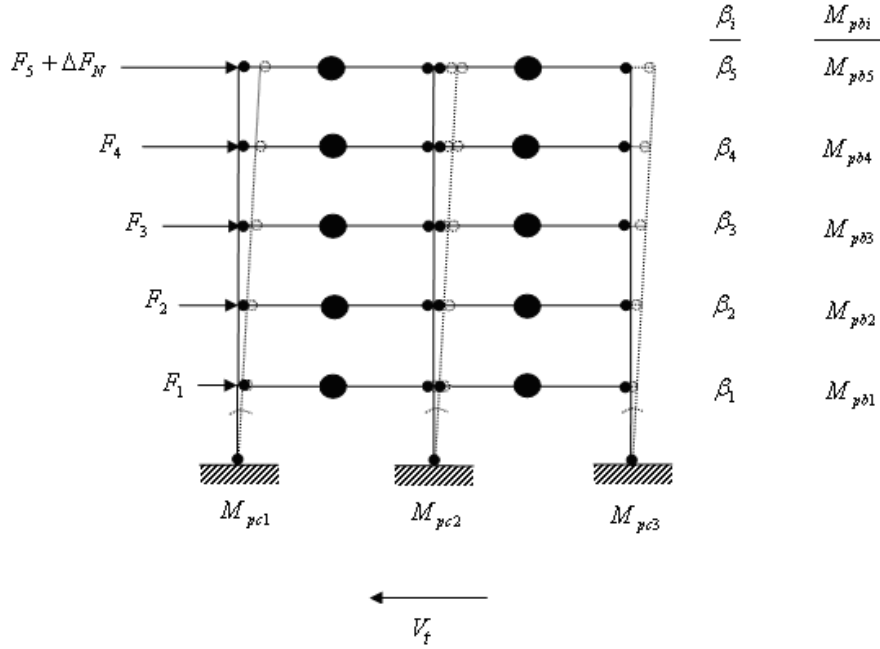
Bu ifadede; V_i i. kat kesme kuvveti ve V_N en üst kat kesme kuvvetidir. b nümerik faktör olup, Lee ve Goel tarafından [14] şu şekilde ifade edilmiştir:

$$b = 0,5T^{-0,2} \quad (20)$$

Bu eşitlikte yer alan b nümerik faktörü çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, b değeri için yapının birinci doğal titreşim periyoduna (T) bağlı olarak Lee ve Goel tarafından elde edilen (20) nolu ifade kullanılmıştır. Denklem (19) ile ifade edilmiş olan β_i kiriş kesme dayanım faktörü Şekil 3'de şematik olarak gösterilmiştir. Kiriş tasarımında kullanılmak üzere, her kattaki β_i faktörüne göre hesaplanan M_{pbi} kat kirişi plastik momentleri, β_i değerleri ile birlikte kat seviyelerine yazılmıştır.

Kiriş tasarımında, M_{pbr} referans plastik momentinin denklem (18) ile ve β_i kiriş kesme dayanım faktörünün denklem (19) ile hesaplanmasının ardından her bir kat kirişi için gerekli olan M_{pbi} plastik moment değerleri belli olacaktır. (17). Elde edilen bu M_{pbi} plastik momentlerine göre kat kirişleri boyutlandırılır.

Çelik Yapıların Öngörülen Göreli Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı

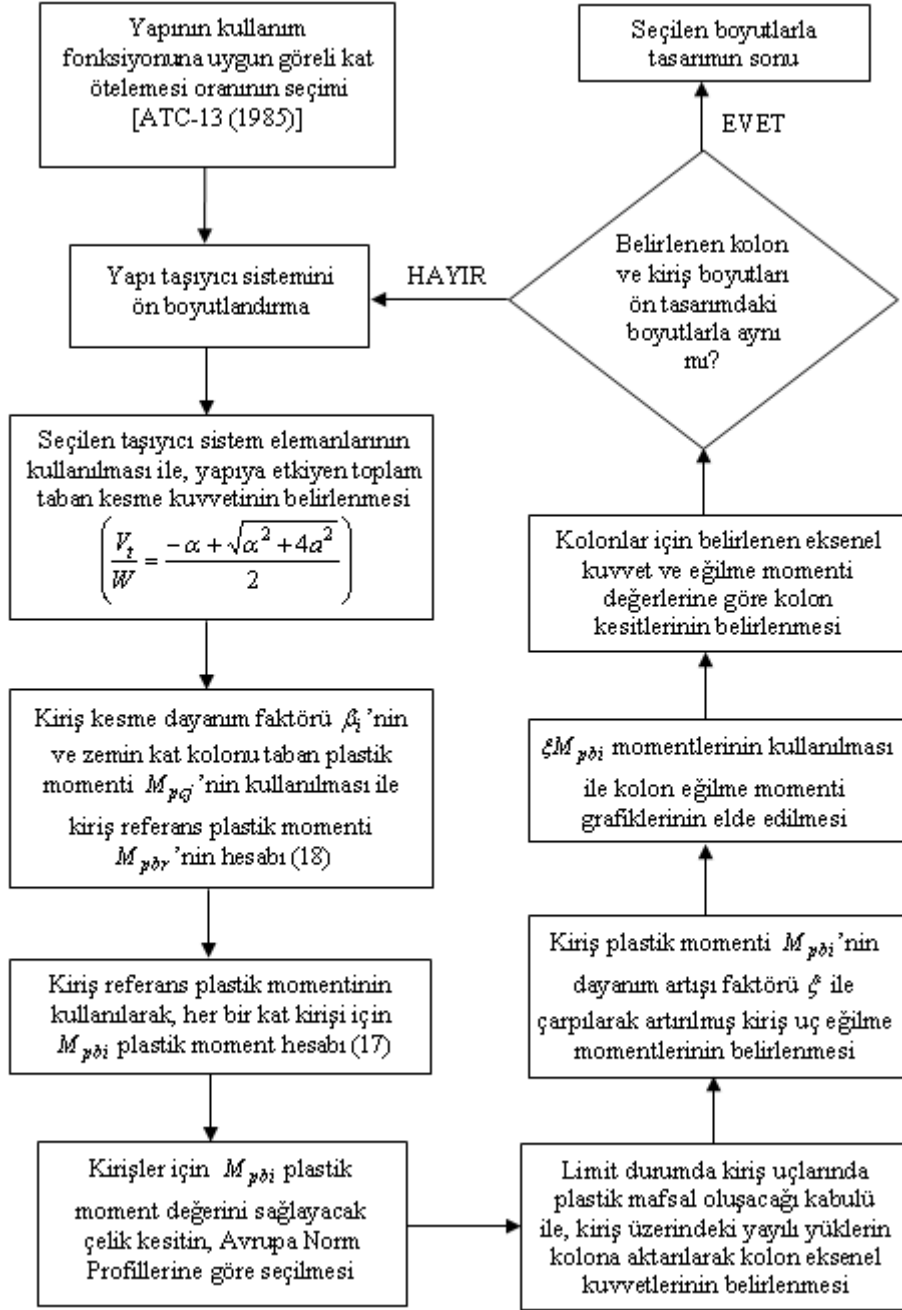


Şekil 3. Beş katlı iki açıklıklı bir yapının her bir katındaki kiriş tasarımına ait β_i parametreleri ve buna bağlı olarak kat kirişlerinin plastik momentleri

Kiriş tasarımının ardından, kolon tasarımı yapılmaktadır. Kolon diplerindeki plastik mafsalsal momenti (M_{pcj}) zemin kat kolonlarında oluşacak kesme kuvvetine bağlı olarak çeşitli yöntemlerle belirlenebilir. Yapılan çalışmada, kolon diplerinde oluşacak plastik moment değerlerinin hesabında Muto Yöntemi kullanılmıştır.

Kirişlerde pekleşme etkisinin dikkate alınmasından dolayı bir dayanım artışı varsayımı yapılmakta ve kiriş uçlarındaki plastik mafsalsal momentleri ξ olarak tanımlanan bir dayanım artışı faktörüyle çarpılmaktadır. Bu nedenle kolon tasarımında kiriş uçlarını mafsallaştıran M_{pbi} kiriş plastik momentleri yerine, ξM_{pbi} ile hesaplanan artırılmış eğilme momenti kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kirişlerdeki dayanım artışı oranının %5 olduğu varsayılarak, $\xi = 1.05$ alınmıştır. En üst kattaki plastik mafsalların mekanizmanın davranışını etkilememesinden dolayı ise, çatı katı seviyesinde $\xi = 1$ alınmıştır.

Sistem öngörülen göçme mekanizmasına ulaştığı anda, yükleme durumlarına bağlı olarak kolonların etkisinde oldukları maksimum eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerleri elde edilmiştir. Bileşik eğilme etkisindeki kolon enkesitlerine ait akma yüzeyleri kullanılarak [20] kolonların boyutlandırılması yapılmıştır. Tasarım yönteminin uygulama adımları Şekil 4'deki akış diyagramında görülmektedir.



Şekil 4. Öngörülen görece kat öteleme oranına göre enerji esaslı çelik yapı tasarımı yönteminin akış diyagramı

4. TASARIM YÖNTEMİNİN SAYISAL UYGULAMASI

Çalışmada açıklanan enerji esaslı tasarım yöntemi kullanılarak, öngörülen farklı göreli kat ötelemesi oranları için 2, 5 ve 8 katlı çerçevelerin tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, yapılarda ATC-13'e göre Orta Hasar, Ağır Hasar ve Çok Ağır Hasar durumlarını temsil etmek üzere (Tablo 1) limit durumda %1.5, %2 ve %3.5'lük göreli kat ötelemesi oranları kullanılmıştır.

Tasarım yönteminin uygulamasında yapı malzemesi olarak, akma dayanımı 24 kN/cm^2 ve Elastisite Modülü 210000 MPa olan Fe 37 sınıfı Çelik kullanılmıştır. Yapı taşıyıcı sistemi Avrupa Norm Profilleri kullanılarak boyutlandırılmıştır. Kirişler için IPE, kolonlar için HEB profilleri kullanılmıştır. Yöntemin uygulaması için düzenli, kütle ve rijitliklerin dağılımının düzgün olduğu çerçeve sistemler seçilmiştir. Tasarımın uygulandığı tüm yapılarda kat yükseklikleri 3'er metre ve her bir açıklık 6'şar metre'dir. Her bir açıklıkta 30 kN/m^2 'lik düzgün yayılı yükün bulunduğu dikkate alınmış, taşıyıcı sistem elemanlarının ağırlıkları ihmal edilmiştir. Yapıların 1. derece deprem bölgesinde olduğu ve üzerinde buldukları zeminin Z4 Yerel Zemin Sınıfında olduğu kabul edilmiştir. Binanın kullanım amacı veya türüne göre (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.) Bina Önem Katsayısı $I=1.0$ olarak seçilmiştir [17].

Tasarımda ilk olarak yapılara etkiyecek olan taban kesme kuvveti değerleri belirlenmiştir. Nihai durumda 2, 5 ve 8 katlı yapılar için %1.5, %2 ve %3.5'lük θ_T değerlerine göre hesaplanan parametreler ve V_t/W oranları Tablo 2, 3 ve 4'te verilmiştir. Tasarım sonucu belirlenen kiriş ve kolon kesit boyutları Şekil 5, 6 ve 7'de gösterilmiştir.

Tablo 2. İki katlı çerçevelerin tasarımına ait parametreler

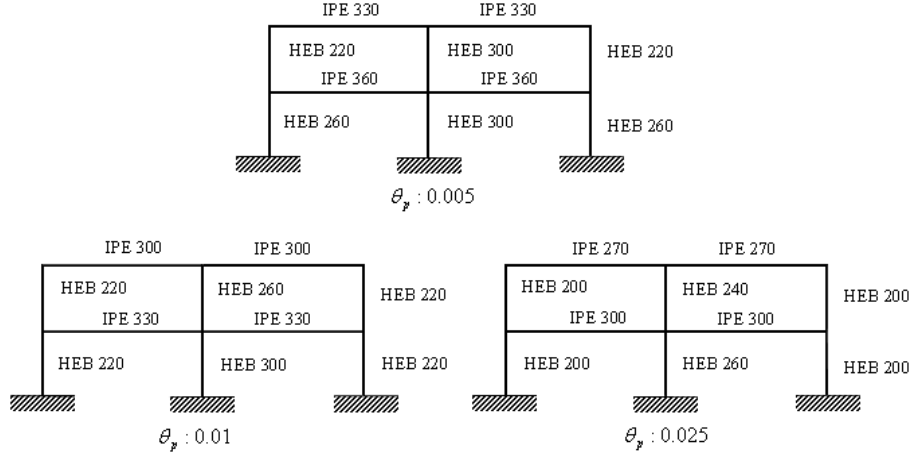
Kat Adedi	T (sn.)	a	θ_y	θ_p	α	V_t/W
2	0.48	1.000	0.01	0.005	0.867	0.656
2	0.56	1.000	0.01	0.01	1.298	0.543
2	0.67	1.000	0.01	0.025	2.262	0.379

Tablo 3. Beş katlı çerçevelerin tasarımına ait parametreler

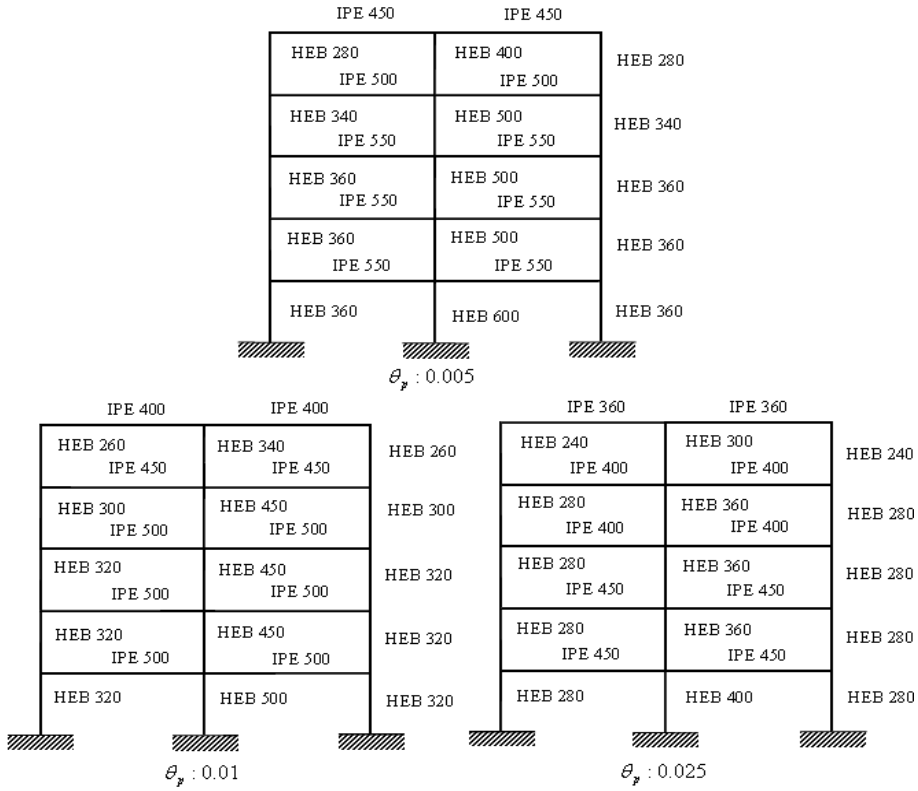
Kat Adedi	T (sn.)	a	θ_y	θ_p	α	V_t/W
5	0.63	1.000	0.01	0.005	1.136	0.582
5	0.74	1.000	0.01	0.01	1.655	0.470
5	0.92	0.981	0.01	0.025	2.638	0.325

Tablo 4. Sekiz katlı çerçevelerin tasarımına ait parametreler

Kat Adedi	T (sn.)	a	θ_y	θ_p	α	V_t/W
8	0.69	1.000	0.01	0.005	1.484	0.503
8	0.86	1.000	0.01	0.01	1.905	0.429
8	1.24	0.774	0.01	0.025	2.283	0.238

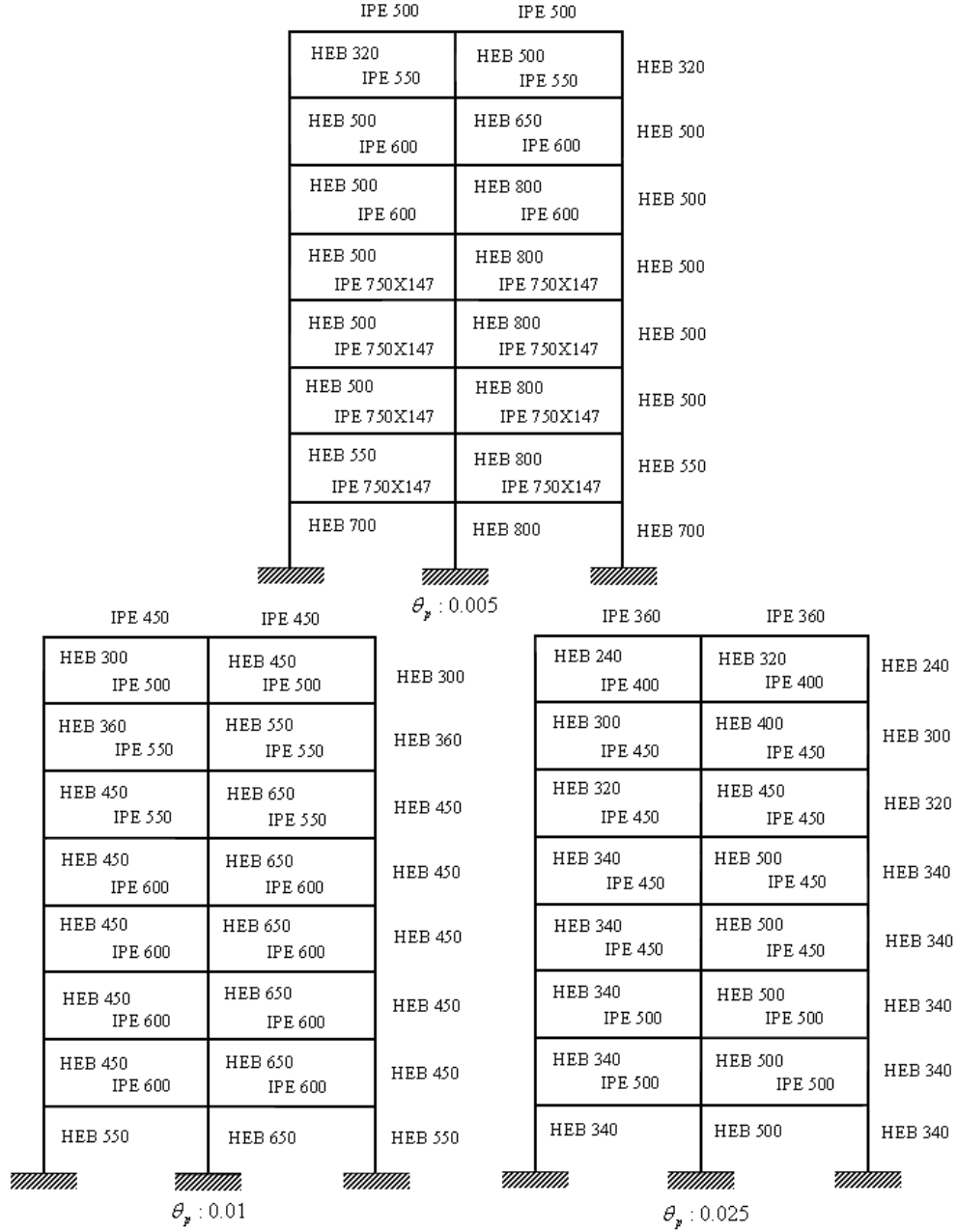


Şekil 5. İki katlı iki açıklıklı çelik çerçevelerin %1.5, %2 ve %3.5 görelî kat ötelemesi oranlarına göre enerji esaslı tasarımı



Şekil 6. Beş katlı iki açıklıklı çelik çerçevelerin %1.5, %2 ve %3.5 görelî kat ötelemesi oranlarına göre enerji esaslı tasarımı

Çelik Yapıların Öngörülen Görelî Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı

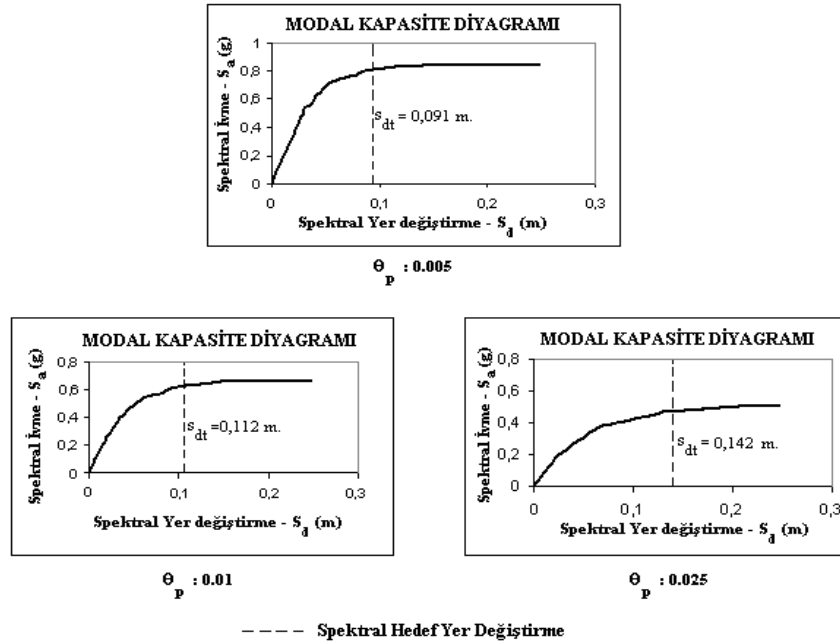


Şekil 7. Sekiz katlı iki açıklıklı çelik çerçevelerin %1.5, %2 ve %3.5 görelî kat ötelemesi oranlarına göre enerji esaslı tasarımı

5. ENERJİ ESASLI TASARIMIN DEĞERLENDİRİLMESİ

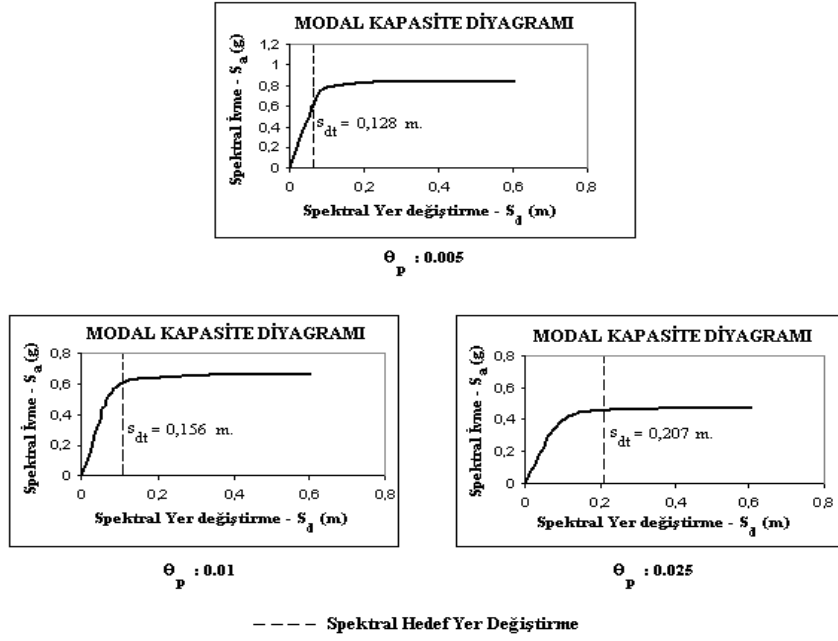
Bu bölümde, önceki bölümlerde açıklanan enerji esaslı yöntemle tasarlanan 2, 5 ve 8 katlı çelik çerçevelerin öngörülen görelî kat ötelemesi oranlarını sağlayıp sağlamadığı, doğrusal olmayan statik artımsal itme analizleri ile kontrol edilmiştir. Analizlerde SAP 2000 programı kullanılmıştır. Enerji esaslı hesap yönteminin değerlendirmesinde kullanılan artımsal itme analizlerinde ikinci mertbe etkileri ihmal edilmiş ve kesit moment - dönme ilişkileri ideal elastoplastik olarak tanımlanmıştır. %1.5, %2 ve %3.5'luk görelî kat ötelemesi oranlarına göre tasarlanmış olan 2, 5 ve 8 katlı çerçeveler için yapılan doğrusal olmayan statik artımsal itme analizleri sonucu elde edilen kapasite eğrilerinin, ordinatı spektral ivme ve apsisi spektral yer değiştirme olan modal kapasite diyagramlarına dönüştürülmesi ile [21] elde edilen grafikler Şekil 8, 9 ve 10'da verilmiştir. Ayrıca, 2007 Türk Deprem Yönetmeliği yedinci bölümünde açıklanan yöntem ile belirlenen deprem yer değiştirme talepleri de aynı grafikler üzerinde gösterilmiştir.

Enerji esaslı tasarım yönteminde tasarım parametresi olarak görelî kat ötelemesi oranları kullanıldığından, deprem yer değiştirme talebine ulaşıldığı anda çerçevelerde oluşan görelî kat ötelemesi oranları tasarımda öngörülen görelî kat ötelemesi oranları ile karşılaştırılmıştır. Artımsal itme analizlerinden elde edilen görelî kat ötelemesi oranları ve tasarımda hedeflenen görelî kat ötelemesi oranları Şekil 11, 12 ve 13'de verilmiştir. Sonuçların incelenmesinden, iki katlı yapıda hedeflenen görelî kat ötelemesi oranlarının aşıldığı ancak 5 ve 8 katlı yapılarda aşılmadığı görülmektedir.

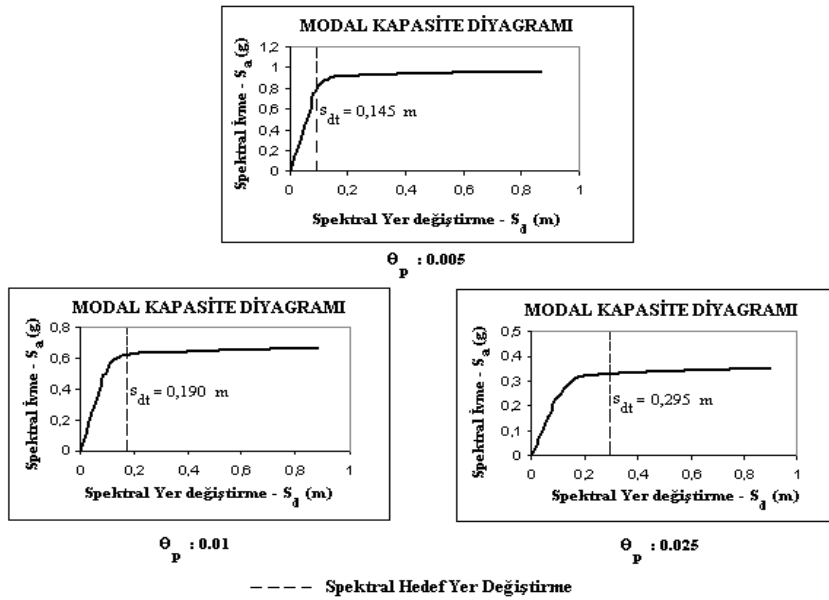


Şekil 8. %1.5, %2 ve %3.5 görelî kat ötelemesi oranlarına göre tasarlanan iki katlı iki açıklıklı yapının modal kapasite grafikleri

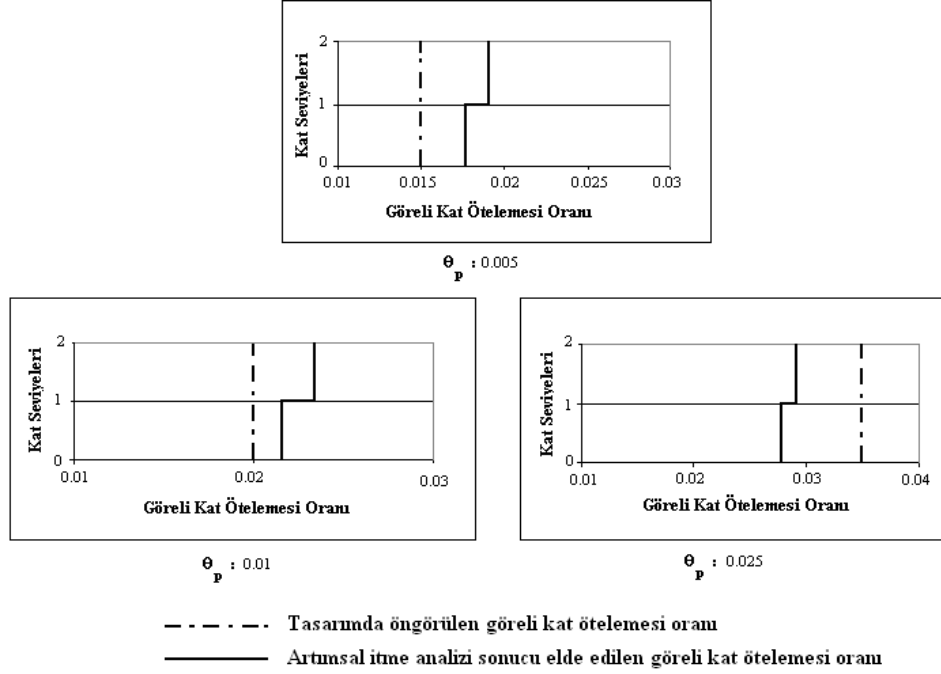
Çelik Yapıların Öngörülen Göreli Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı



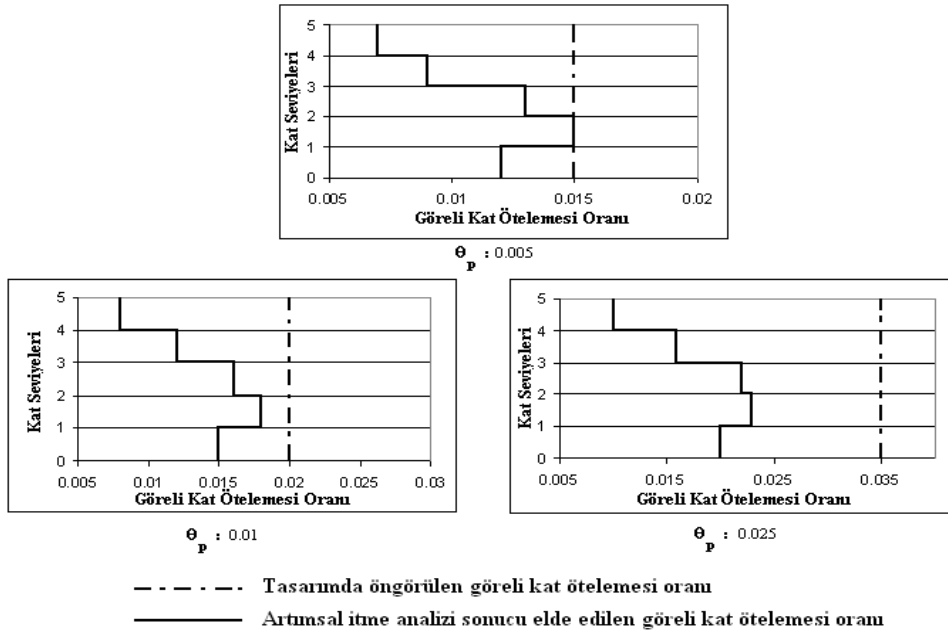
Şekil 9. %1.5, %2 ve %3.5 göreli kat ötelemesi oranlarına göre tasarlanan beş katlı iki açıklıklı yapının modal kapasite grafikleri



Şekil 10. %1.5, %2 ve %3.5 göreli kat ötelemesi oranlarına göre tasarlanan sekiz katlı iki açıklıklı yapının modal kapasite grafikleri

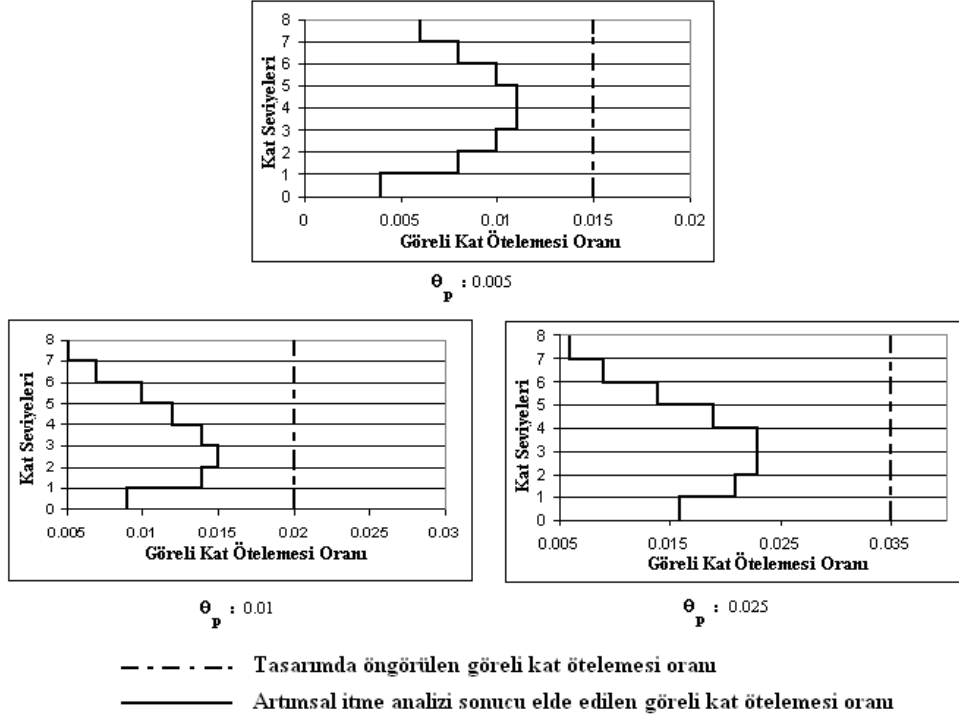


Şekil 11. Enerji esaslı olarak tasarlanan iki katlı çerçevelerin görel kat ötelemesi oranları



Şekil 12. Enerji esaslı olarak tasarlanan beş katlı çerçevelerin görel kat ötelemesi oranları

Çelik Yapıların Öngörülen Görelî Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı



Şekil 13. Enerji esaslı olarak tasarlanan sekiz katlı çerçevelerin görelî kat ötelemesi oranları

6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, yapıların öngörülen görelî kat ötelemesi oranına göre enerji esaslı tasarımı için bir hesap yöntemi sunulmuştur. Yöntemin uygulanabilirliğini araştırmak için seçilen iki, beş ve sekiz katlı çelik çerçevelerin önerilen hesap yöntemi ile tasarımı yapılmış ve artımsal itme analizi yöntemi ile, öngörülen görelî kat ötelemesi oranlarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Tasarım yöntemi, büyük ölçüde kabullere dayanan iteratif bir yöntem olduğu için uygun hesap algoritmalarını içeren bir bilgisayar programının kullanılması gerekli olmuştur. Excel programı ile her bir iterasyondaki uzun işlemler hızlı bir şekilde yapılarak, sonuçlara kısa sürede ulaşılmıştır. İlgili akış diyagramı Şekil 4'de mevcuttur. Tasarım yönteminde yapıların elastik ötesi davranışları dikkate alınmıştır. Yer değiştirme ve kuvvet esaslı analiz yöntemlerinden farklı olarak, yapılardaki enerji kavramının kullanılması ile tasarım yapılmıştır. Enerji kavramı, göçme mekanizması ve görelî kat ötelemesi oranı kavramları ile desteklenmiş ve tasarım yöntemi geliştirilmiştir.

Tasarımı yapılan çerçeveler için elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, iki katlı çerçevenin %2 ve %1,5'lük görelî kat ötelemesi oranına göre tasarımlarında hedeflenen görelî kat ötelemesi oranlarının her bir kat seviyesinde aşıldığı görülmüştür. İki katlı çerçevenin sadece %3,5'lük görelî kat ötelemesi oranına göre tasarımında, artımsal itme analizi sonucu elde edilen görelî kat ötelemesi oranları hedeflenen değerin altında kalmıştır. Beş katlı

çerçevenin tasarımında, öngörülen görelî kat ötelemesi oranlarının hiçbir kat seviyesinde aşılmadığı ve artımsal itme analizinden elde edilen görelî kat ötelemesi oranlarının tasarımda hedeflenen değerlere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Sekiz katlı çerçevede ise, beş katlı çerçeveye benzer olarak tasarımda hedeflenen görelî kat ötelemesi oranları aşılmamış ve artımsal itme analizi sonucu elde edilen görelî kat ötelemesi oranları öngörülen değerlerin oldukça altında kalmıştır. Görelî kat ötelemesi oranı kriterine göre gerçekleştirilen enerji esaslı tasarımlardan elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, yöntemin orta yükseklikteki yapılar için daha uygun sonuç verdiği görülmüştür.

Yöntemin daha iyi sonuçlar verebilmesi için yapılması gereken bazı çalışmalar mevcuttur. Yöntemdeki hesap prosedürü, birinci mod hakimiyetindeki yapılar için geliştirilmiştir. Yapının birinci mod şekli, doğrusal olarak yöntemde kullanılmıştır. Yapının mod şeklini daha doğru olarak dikkate alacak yöntemler üzerine çalışılması gerekli olmaktadır. Tasarım yöntemi yapılardaki açıklık sayısı, ara mesafe ve yükseklik gibi parametrelerin de değerlendirilmesi ile geliştirilebilir. Ayrıca çalışmada yapının elastik dönme değeri %1 olarak kabul edilmiştir. Bu kabulün yapı yükseklik ve özelliklerine göre geliştirilmesi, yöntemin daha gerçekçi sonuçlar vermesi açısından faydalı olacaktır.

Semboller

- a : Elastik spektral ivme katsayısı
- b : Kiriş kesme dayanım faktörü hesabında kullanılan nümerik faktör
- d : α katsayısının hesabında kullanılan ve çeşitli yapı özelliklerine bağlı olan sayı
- e : α katsayısının hesabında kullanılan ve çeşitli yapı özelliklerine bağlı olan sayı
- E_e : Yapı sistemi tarafından tüketilen elastik enerji
- E_T : Çok serbestlik dereceli sisteme deprem sırasında giren toplam enerji
- E_p : Doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu plastik mafsallarda depolandığı varsayılan toplam plastik enerji
- f : α katsayısının hesabında kullanılan ve çeşitli yapı özelliklerine bağlı olan sayı
- F_i : i . kat seviyesine etkiyen deprem kuvveti
- g : Yerçekimi ivmesi
- h_i : i . katın yüksekliği
- h_N : N . katın yüksekliği
- M : Zemin kattaki toplam kolon sayısı

Çelik Yapıların Öngörülen Göreli Kat Ötelemesi Oranına Göre Enerji Esaslı Tasarımı

- M_p : Kolon plastik momenti
- M_{pbi} : i. kat kirişlerinin plastik momenti
- M_{pbr} : Kat kirişlerinin referans plastik momenti
- M_{pcj} : j. akstaki zemin kat kolonunun taban plastik momenti
- M_t : Çok serbestlik dereceli sistemin toplam kütlesi
- n : Bir kattaki toplam kiriş sayısı
- N : Binanın temel üstünden itibaren toplam kat sayısı
- N_p : Kolon plastik eksenel kuvveti
- s_{dt} : Spektral hedef yer değiştirme
- S_V : Elastik spektral hız
- T : Yapının birinci doğal titreşim periyodu
- V_i : i. kat kesme kuvveti
- V_t : Enerji esaslı toplam tasarım taban kesme kuvveti
- V_N : En üst kat kesme kuvveti
- w_i : i. katın toplam ağırlığı
- W : Yapının toplam ağırlığı
- α : Enerji esaslı tasarım taban kesme kuvveti hesabında kullanılan boyutsuz parametre
- β_i : Kiriş kesme dayanım faktörü
- δ_a : Akma yer değiştirme
- δ_m : Maksimum yer değiştirme
- δ_p : Plastik yer değiştirme
- Δ : ATC-13'de geçen göreli kat ötelemesi oranı

ΔF_N : Yapının tepesine etkiyen ek deprem yükü

θ_p : Yapının öngörülen plastik dönme değeri

θ_T : Öngörülen toplam hedef dönme değeri

θ_y : Elastik akma dönmesi

ξ : Pekleşme etkisinden dolayı kirişlerde dikkate alınan dayanım artışı faktörü

Teşekkür

Birinci yazar desteği için Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Housner, G. W., Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, 5, 1-13, 1956.
- [2] Uang, C.-M., Bertero, V. V., Evaluation of Seismic Energy in Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 1, 77-90, 1990.
- [3] Khashae, P., Mohraz, B., Sadek, F., Lew, H. S. and Gross, J. L., Distribution of Earthquake Input Energy in Structures, National Institute of Standards and Technology Interagency Report, NISTIR 6903, Gaithersburg, MD, United States of America, 2003.
- [4] Aoki, H. and Ikeda, K., Hysteresis Model of Low-rise Steel-frame Building and Its Seismic Performance, Steel Structures, 6, 327-336, 2006.
- [5] Akiyama, H., Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings, University of Tokyo Press, Tokyo, 1985.
- [6] Surahman, A., Earthquake-Resistant Structural Design Through Energy Demand and Capacity, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 2099-2117, 2007.
- [7] Leelataviwat, S., Drift and Yield Mechanism Based Seismic Design and Upgrading of Steel Moment Frames, Ph.D. Thesis, University of Michigan, 1998.
- [8] Leelataviwat, S., Saewon, W. and Goel, S. C., Application of Energy Balance Concept in Seismic Evaluation of Structures, Journal of Structural Engineering, 135, 2, 113-121, 2009.
- [9] Goel, S. C., Liao, W-C. and Leelataviwat, S., An Energy Spectrum Method for Seismic Evaluation of Structures, Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, Applied Technology Council and the Structural Engineering Institute of ASCE, San Francisco, CA, 2009.

- [10] Leelataviwat, S., Saewon, W. and Goel, S. C., An Energy Based Method for Seismic Evaluation of Structures, 14th World Conference on Earthquake Engineering: Innovation Practice Safety, Beijing, China, 2008.
- [11] Akbaş, B. and Shen, J., 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, 2001.
- [12] Akbaş, B., Energy-Based Earthquake Resistant Design of Steel Moment Resisting Frames, Ph.D. Dissertation, Graduate College of Illinois Institute of Technology, 1997.
- [13] Akbaş, B. ve Shen, J., Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Enerji Kavramı, İMO Teknik Dergi, Yazı 192, 2877-2901, 2003.
- [14] Lee, S-S. and Goel, S. C., Performance Based Design of Steel Moment Frames Using Target Drift and Yield Mechanism, Research Report, UMCEE 01-17, The University of Michigan, Department of Civil and Environmental Engineering, 2001.
- [15] Kim, J. and Choi, H., Energy-Based Seismic Design of Structures with Buckling-Restrained Braces, Steel and Composite Structures, 4, 6, 437-452, 2004.
- [16] ATC-13, Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, ATC-13 Report, Redwood City, California, 1985.
- [17] T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 6 Mart 2007 gün ve 26454 sayılı resmi gazete, Ankara.
- [18] Leelataviwat, S., Goel, S. C. and Stojadinovic, B., Energy-based Seismic Design of Structures using Yield Mechanism and Target Drift, Journal of Structural Engineering, 128, 8, 1046-1054, 2002.
- [19] Merter, O., Yapıların Enerji Esaslı Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008.
- [20] Özer, E., Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi Ders Notları, <http://www.ins.itu.edu.tr/eozer>, 2008.
- [21] Federal Emergency Management Agency, FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Washington D.C., 2005.