Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 24(3), 350-361, 2018

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Yapıların plastik enerji dengesine göre sismik tasarımı

Seismic design of structures based on plastic energy balance

Onur MERTER[1*], *Taner UÇAR*[2]

[1]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye.
onur.merter@usak.edu.tr
[2]Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
taner.ucar@deu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.08.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 22.03.2017
doi: 10.5505/pajes.2017.28566
* Yazışılan yazar/Corresponding author
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analizi ve tasarımında enerji kavramına dayalı hesaplamalar, yer değiştirme esaslı yöntemlere bir alternatif olarak gelişmektedir. Enerjiye dayalı yapı tasarımı aynı zamanda yer değiştirme kavramını da içermekte ve diğer analizlere kıyasla daha rasyonel bir yöntem olarak anılmaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemde, deprem etkisi yapıya bir enerji girişi olarak ele alınmakta ve yapı sistemi için genel enerji denge denklemi yazılmaktadır. Plastik mafsalların kiriş uçlarında ve kolon alt uçlarında oluştuğu ideal göçme mekanizması esas alınmaktadır. Yapı için bir göreli kat ötelemesi oranının hedeflenmesi ile tasarım yatay kuvvetlerinin sistem üzerinde yaptığı dış işin genel enerji dengesinden elde edilen plastik enerji ile eşitlenmesi sonucunda taban kesme kuvveti ifadesi türetilmektedir. Enerji esaslı taban kesme kuvvetinin seçilen 3 ve 5 katlı çelik çerçeve yapıların kat seviyelerine eşdeğer statik yük olarak etkitilmesinin ardından, belirli bir yönetmeliğe göre önceden boyutlandırılmış yapı taşıyıcı sisteminin plastik tasarımı belirlenen yeni taban kesme kuvvetine göre tekrarlanmaktadır. İteratif bir yaklaşım sunan tasarım yönteminde, bir önceki iterasyonun kesit boyutları elde edilene dek tasarım devam etmektedir. Tasarım sonucunda belirlenen taşıyıcı sistemin, enerji esaslı taban kesme kuvveti ile doğrusal olmayan artımsal itme analizinden belirlenen göreli kat ötelemesi oranları ile tasarımda hedeflenen göreli kat ötelemesi oranı karşılaştırılmaktadır. Esas alınan ideal göçme mekanizması durumunun oluşup-oluşmadığı kontrol edilmektedir. Sonuçlar ölçekli gerçek deprem ivme kayıtları ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerin verdiği sonuçlarla karşılaştırılıp, yorumlanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Enerjiye dayalı tasarım, Enerji denge denklemi, Enerji esaslı taban kesme kuvveti, Plastik tasarım, Doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz

Abstract

Energy-based approaches are developed as an alternative to displacement-based methods in nonlinear analysis and design of structures. The structural design methodology based on energy concepts incorporates the displacement concept simultaneously and it may be mentioned more rational by comparison with the other existing methods. Earthquake is considered as an energy input to the structure within the study and then the general energy-balance equation is written for the structure system. Ideal collapse mechanism, where plastic hinges are assumed to be located on beam ends and column bases, is considered. An admissible interstory drift ratio is targeted for the design and base shear force expression is derived by equating the plastic energy from general energy-balance with the external work done by the design lateral forces. The new energy-based base shear force is distributed to story levels of 3- and 5-story steel structures as equivalent static lateral forces and then plastic design of structural system, which is predesigned that comply with a seismic code at the beginning of the methodology, is implemented. The structural design method involves an iterative technique and it is continued until the same sections of the former iteration are obtained. The interstory drift ratios obtained from pushover analysis using the inverted triangular distribution of energy-based base shear force are compared with the target drift of the design. The accepted ideal collapse mechanism is checked whether it occurs or not. The results are interpreted and compared to the results of nonlinear time history analyses performed by using the time histories of real earthquakes scaled in time domain.

Keywords: Energy-based design, Energy-balance equation, Energy-based base shear force, Plastic design, Nonlinear static and dynamic analysis

1 Giriş

Yapı sistemlerinin ekonomik ömürleri boyunca, çok sık görülebilen hafif şiddetli deprem yer hareketlerine maruz kalma olasılığı oldukça yüksektir. Tekrarlanma periyodu daha uzun olan orta şiddetli ve güçlü depremlerin gerçekleşme olasılığı ise daha düşük olup, yapıda yaratacağı hasar daha büyüktür. Deprem yönetmeliklerinin temel amacı, deprem bölgelerinde yapılacak yapıların çeşitli olasılıklarda gerçekleşmesi mümkün olan deprem etkilerine karşı dayanıklı olmasını sağlamak, yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşması muhtemel hasarı sınırlamak ve yapılarda yaşayan insanların can güvenliğini garanti altına almaktır.

Depremler genel olarak yapı sistemlerini elastik sınırlar ötesinde zorlayan yüklerdir. Şiddetli depremlerin etkisi altında tasarım spektrumundan yararlanılarak tanımlanan elastik deprem yükleri çok büyük değerler alır ve bu deprem yüklerini esas alarak doğrusal elastik davranış gösterecek bir yapı tasarlamak gerçekçi olmamakla beraber oldukça maliyetlidir. Bu nedenlerden dolayı, kullanıcıların can güvenliğini sağlamak koşuluyla, bir başka deyişle toptan göçme durumuna engel olunarak, yapılarda belli düzeyde hasara izin verilebilir. Deprem etkisi altında doğrusal elastik sınırı aşan yapı sisteminde yatay yükte belirgin bir artış olmamasına rağmen yer değiştirmeler giderek artacak ve yapıda plastik mafsallar oluşacaktır. Bu durum, depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesinde sağlanması gereken temel kavramlardan birisi olan sünekliği ifade etmektedir. Sünek davranan yapı sisteminde, doğrusal olmayan davranışın sonucunda oluşan plastik mafsal bölgeleri, belirli bir plastik moment ve dönme kapasitesine sahip olan taşıyıcı sistem kesitleridir. Yapı için öngörülen süneklik kapasitesinin sağlanabilmesi için, plastik şekil değiştirmelerin toplandığı kabul edilen plastik mafsal bölgelerinin yerleri ve bu kesitlerin plastik şekil değiştirme kapasiteleri önem taşımaktadır.

Taşıyıcı sistemi kiriş ve kolonlardan oluşan çerçeve yapı sistemlerinde plastik mafsalların genellikle, eksenel kuvvetin çok az ve süneklik kapasitesinin oldukça fazla olduğu kiriş elemanların uçlarında oluşması istenmektedir. Yüksek eksenel basınç kuvveti etkisindeki düşey taşıyıcı kolon elemanların uçlarında ise kat mekanizması adı verilen durumun önlenmesi gibi nedenlerden dolayı plastik mafsal oluşumu istenilen bir durum değildir. Ancak; zemin kat kolonlarının temele bağlantı noktalarında (kolon alt uçlarında) plastik mafsal oluşumları bir stabilite sorununa neden olmamaktadır. Türk Deprem Yönetmeliği'nde de çerçeve sistemlerde öngörülen taşıyıcı sistem süneklik kapasitesinin gerçekleşebilmesi, yerel (lokal) göçme mekanizmalarının önlenmesi ve ideal göçme mekanizmalarının sağlanması açısından güçlü kolon-zayıf kiriş koşulu ve taşıyıcı sistem elemanlarında gevrek kırılmanın önlenmesi şeklinde kapasite tasarımı ilkeleri tanımlanmaktadır.

Yapıların doğrusal olmayan davranışında yer değiştirme kavramını esas alan yöntemler, özellikle son yirmi yılda Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilen çeşitli rapor, proje ve yönetmeliklerde detaylı olarak ele alınmıştır [1]-[4]. Yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesinde kullanılan bu yöntemler, yer değiştirmeye dayalı performans kriterini baz almaktadır. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalar ise, henüz mevcut deprem yönetmeliklerine doğrudan girmemiş olan enerji esaslı yöntemlerin yapısal tasarım ve değerlendirme açısından daha akılcı ve güvenilir olabileceğini göstermektedir [5]-[12]. Enerji esaslı deprem mühendisliğinde cevabı aranan en temel soru deprem etkisindeki yapı sistemlerine giren enerjinin belirlenmesidir. Yapılara enerji girişi ile ilgili literatürde öncü çalışmalar mevcuttur [13],[14]. Hafif şiddetli depremlerde giren enerji yapıda elastik enerji ve sönüm enerjisi olarak dağılırken, orta şiddetli ve güçlü yer hareketlerinde bu enerjinin büyük bir çoğunluğu doğrusal olmayan davranış yoluyla (histeretik, plastik enerji olarak) dağılmaktadır. Enerji esaslı tasarım yöntemlerinde, yapının plastik enerjisi temel tasarım parametresi olarak ele alınmakta ve depreme bağlı olarak oluşması muhtemel hasar bölgeleri (plastik mafsalların yerlerinin seçimi) henüz tasarımın başında dikkate alınmaktadır.

Çalışma kapsamında, doğrusal elastik olmayan Tek Serbestlik Dereceli (TSD) sistemin genel dinamik hareket denkleminden hareketle enerji denklemi oluşturulmakta [15] ve bu denklem üzerinden yapısal enerji türleri tanımlanmaktadır. Modal Enerji-Ayrıştırma yaklaşımı kullanılarak eşdeğer TSD sistemin giren enerjisinden yatay yer hareketi etkisindeki Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) sistemlerin giren enerji denklemi elde edilmektedir. Genel enerji denklemi dinamik formdan elastik ve plastik enerjilerin toplamı şekline dönüştürülmekte ve giren enerjinin bir düzeltme katsayısı ile değiştirilmiş değeri olan yapısal hasarda etkin enerjiye eşitlenmektedir. Giren enerji düzeltme katsayısı, sistemin sünekliği, sönüm oranı ve taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan davranıştaki çevrimsel (histeretik) modellerine bağlı olarak tanımlanmış bir katsayıdır [13],[16]-[20]. Genel enerji denge denkleminden, sistemin toplam plastik enerjisinin teorik ifadesi oluşturulmaktadır. Bu ifade plastik mafsallarda toplandığı kabul edilen plastik enerjiye karşılık geldiğinden dolayı, sistemin iç plastik enerjisi olarak anılabilmektedir. Depremle birlikte yapıya giren enerji, Housner [14] tarafından TSD sistemler için verilmiş olan ve deprem hız spektrumuna bağlı en temel ifadenin ÇSD sistemler için dönüştürülmesi sonucu belirlenmektedir [13]. Yatay yüklerin yapının kat seviyelerine etkiyen statik eşdeğer yükler olarak varsayılmasının ardından, hedeflenen ideal göçme mekanizması ve yer değiştirme için plastik enerji dış kuvvetlerin işi şeklinde yazılmaktadır. İç ve dış plastik enerjinin birbirine eşitlenmesi sonucu, ideal göçme mekanizmasına sahip çerçeve yapı sistemleri için plastik taban kesme kuvveti denklemi teorik olarak elde edilmektedir. Çalışma kapsamında bu ifade enerji esaslı taban kesme kuvveti olarak anılmaktadır.

Çalışmanın boyutlandırma kısmında ise, enerji esaslı taban kesme kuvvetini esas alan iteratif bir plastik tasarım yöntemi kullanılmaktadır. Mevcut bir yönetmeliğe göre taşıyıcı sistem elemanlarına önboyut verilerek başlanan tasarımda, hesaplanan yeni taban kesme kuvveti kullanılarak kat seviyelerinde enerji dengesi yazılmakta ve buradan hareketle taşıyıcı sistem elemanları yeniden boyutlandırılmaktadır. Yeni boyutlara sahip sistemin dinamik özelliklerinin ve giren enerji değerlerinin değişmesinden ötürü enerji esaslı taban kesme kuvvetleri de değişecektir. Çalışmada bu şekilde ardışık iki iterasyondaki kesit boyutlarının birbiri ile aynı olduğu durumda, tasarım sonlandırılmakta ve o iterasyondan elde edilen taşıyıcı sistem kesitleri tasarımın nihai kesitleri olarak anılmaktadır.

Yöntemin pratik uygulaması, öncelikle 2016 Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğin [21] kullanılması ile Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım Esaslarına uygun olarak boyutlandırılan 3 ve 5 katlı çelik çerçeve yapı sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Giren enerjinin hesabında gerçek depremlerin zaman tanım alanında ölçeklenmiş kayıtları kullanılmıştır. Tasarım yönteminin geçerliliği, enerji esaslı boyutlandırılan çerçevelerin artımsal itme analizi ve gerçek depremlerin ölçekli kayıtlarının kullanılması ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile sınanmıştır. Kıyas parametresi olarak enerji esaslı plastik tasarımın başlangıcında hedeflenen plastik mafsal dağılımı ve göreli kat ötelemesi büyüklükleri kullanılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

2 Depremle birlikte yapı sistemlerine giren enerji

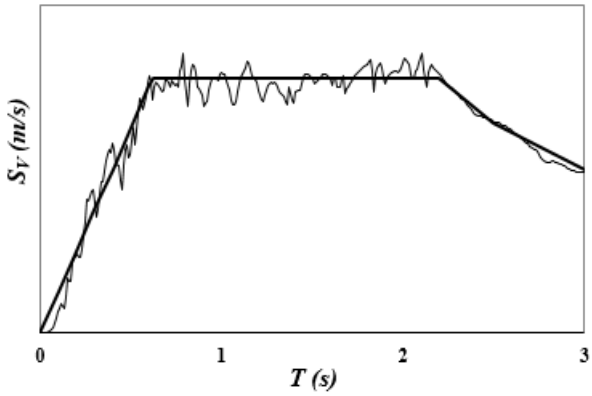
Yapıların enerji esaslı sismik tasarımında en önemli ve birincil aşama yapı sistemlerine giren deprem enerjisinin belirlenmesidir. Araştırmacılar tarafından en büyük yer ivmesi, en büyük yer hızı, depremin süresi, sistemin süneklik oranı vb. gibi farklı parametrelere bağlı olarak çeşitli enerji girişi ifadeleri öne sürülmüştür [14],[16],[17],[22]-[24]. Deprem etkisi altındaki eşdeğer TSD sistemlere giren toplam enerji ($E_{I(\mathrm{TSD})n}$), Housner'ın [14] en temel enerji girişi ifadesinden:

$$E_{I(\mathrm{TSD})n} = \frac{1}{2}\cdot M_n \cdot S_{V,n}^2 = \frac{1}{8}\cdot \frac{M_n \cdot T_n^2}{\pi^2}\cdot S_{a,n}^2 \qquad (1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. M_n: n. moda ait genelleştirilmiş kütle, $S_{V,n}$: elastik spektral hız (elastik hız spektrumu), T_n: n. moda ait periyot ve $S_{a,n}$: elastik spektral ivmedir (elastik ivme spektrumu). (1) No.lu eşitlik elastik spektral hız (S_V) değerine bağlı olup, yapı dinamiğinden yararlanılarak gerekli dönüşümlerin yapılması ile [15] elastik spektral ivmenin (S_a) bir fonksiyonu olarak da yazılabilir. Başka bir ifade ile giren enerjinin hesaplanmasında, S_V elastik hız spektrumu yerine S_a elastik ivme spektrumu değeri de kullanılabilmektedir.

Bir yer hareketi ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında dinamik analiz sonucunda elde edilen örnek bir hız spektrumu ve bu hız spektrum eğrisine ait idealleştirme Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 1'den; belirli depremlerin elastik hız

spektrumlarının ($S_V - T$ eğrilerinin) geniş bir periyot aralığında sabit kalma eğiliminin mevcut olduğu görülebilmektedir [14],[25],[26]. Tasarım hız spektrumları çeşitli uluslararası yönetmelikler [27]-[29] tarafından da tanımlanmakta olup; çalışma kapsamında giren enerjinin belirlenmesinde sabit bir değer olarak esas alınmaktadır. Hız spektrumlarının genellikle çok büyük bir periyot aralığında sabit olma eğilimi bir anlamda, (1) No.lu denklemde S_V değerinin sabit bir değer alınması varsayımını [14],[26] desteklemektedir.



Şekil 1: Bir yer hareketine ait hız spektrumu ve idealleştirilmiş şekli.

ÇSD sistemlere depremle birlikte giren enerji $E_{I(\text{ÇSD})n}$, Modal Enerji-Ayrıştırma yaklaşımının kullanılması ile şu şekilde ifade edilebilir [20],[30]:

$$E_{I(\text{ÇSD})n} = \sum_{n=1}^{N} E_{I(TSD)n} \cdot \Gamma_n^2 \tag{2}$$

Γ_n: n. moda ait modal katkı çarpanıdır ve $\Gamma_n = L_n/M_n$ şeklinde hesaplanmaktadır. Çalışma kapsamında ÇSD sistemin toplam enerjisinin hesaplanmasında yeterli titreşim modu sayısı dikkate alınmaktadır. Sistemin toplam deprem enerjisinin Modal Enerji-Ayrıştırma yaklaşımı ile belirlenmesi [30], süperpozisyon ilkesinin doğrusal olmayan sistemlerde geçerli olmamasından ötürü bir varsayımdır. Ancak depremle birlikte giren enerjinin bu pratik kabule dayanarak hesaplanması, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerle yakınsak sonuç vermesi açısından oldukça akılcıdır [20],[30]. Çalışmadaki tasarım yönteminde yapı sistemlerine enerji girişi (2) No.lu ifadenin kullanılması ile belirlenmekte ve buna bağlı olarak taban kesme kuvveti ifadesi türetilmektedir.

3 Yapı sistemlerinde genel enerji denklemi

Yapı sistemlerinde enerji kavramından bahsedebilmek için, öncelikle yapı dinamiğinin temel ifadesi olan TSD bir sistemin genel hareket denklemi ele alınmalıdır. Yatay yer hareketi etkisindeki TSD bir yapı sistemine ait genel dinamik hareket denklemi; u: kütlenin rölatif yer değiştirmesi, m: sistemin kütlesi, c: sönüm katsayısı, $f_s(u)$: doğrusal olmayan sistemin direnç kuvveti ve $\ddot{u}_g(t)$: güçlü yer hareketinin (deprem) ivmesi olmak üzere şu şekilde ifade edilebilir [15]:

$$\mathrm{m} \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + f_s(u) = -m \cdot \ddot{u}_g(t) \tag{3}$$

(3) No.lu genel hareket denklemi ifadesinin yer değiştirme üzerinden entegre edilmesi sonucunda genel enerji denklemi elde edilebilir:

$$\int_0^u m \cdot \ddot{u}\, du + \int_0^u c \cdot \dot{u}\, du + \int_0^u f_s(u)\, du = -\int_0^u m \cdot \ddot{u}_g(t)\, du \tag{4}$$

Bu denklemdeki integralleri zamana bağlı olarak ifade etmek de mümkündür. Bu durumda $du = \dot{u}\, dt$ olmak üzere genel enerji denklemi, deprem hareketinin toplam süresi (t_0) cinsinden:

$$\int_0^{t_0} m \cdot \ddot{u} \cdot \dot{u}\, dt + \int_0^{t_0} c \cdot \dot{u}^2\, dt + \int_0^{t_0} f_s(u) \cdot \dot{u}\, dt = -\int_0^{t_0} m \cdot \ddot{u}_g(t) \cdot \dot{u}\, dt \tag{5}$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikteki enerji girdisi sistemin kütlesine etkiyen $p_{eff}(t) = -m \cdot \ddot{u}_g(t)$ kuvveti tarafından sisteme aktarılır ve yine aynı denklemdeki kinetik enerji ifadesi de göreli hareketin enerjisini temsil etmektedir. Ayrıca viskoz sönüm veya plastik şekil değişimiyle tüketilen enerji de göreli harekete bağlı olduğundan göreli hareket üzerinden tanımlanan bu enerji ifadesi mutlak enerji ifadesine göre daha anlamlı olmaktadır [15].

5 No.lu eşitlikte integralli ifadelerden kurtularak ve bu ifadelerin simgesel karşılıklarını kullanarak:

$$E_K + E_\xi + E_S = E_I \tag{6}$$

eşitliği yazılır. Denklemin sol tarafındaki ile terim E_K: kinetik enerjiyi, ikinci terim E_ξ: viskoz sönümce tüketilen enerjiyi, üçüncü terim E_S: plastik şekil değişimiyle tüketilen enerji (E_p) ile geri kazanılabilir elastik şekil değişimi enerjisinin (E_{Se}) toplamını simgelemektedir. (6) No.lu eşitlikte; direnç kuvvetinin enerjisi elastik şekil değiştirme enerjisi ve plastik enerji bileşenleri şeklinde yazılırsa $\{E_S = E_{Se} + E_p\}$ ve $E_K + E_{Se}$ enerjilerinin toplamı da, sistemin toplam elastik enerjisi E_e şeklinde ifade edilecek olursa ($E_e = 1/2 \cdot V_y \cdot \Delta_y$) [13]:

$$E_e + E_\xi + E_p = E_I \tag{7}$$

No.lu eşitliğe ulaşılır. Burada, sistemin sönüm mekanizması ile tüketilen sönüm enerjisi E_ξ denklemin sağ tarafına alınır ve $\{E_I - E_\xi\}$ ifadesi E_D: Yapısal hasarda rol oynayan enerji olarak tanımlanır ve giren enerjinin belirli bir (λ) katı olarak dikkate alınır ise:

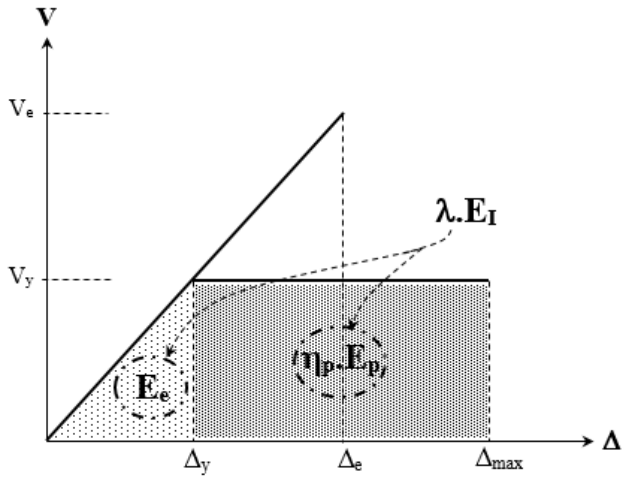
$$E_e + E_p = E_D = \lambda \cdot E_I \tag{8}$$

eşitliğine ulaşılır. λ: giren enerjinin düzeltme katsayısı olup, çeşitli araştırmacılar tarafından sistemin sönüm oranı ve sünekliğine bağlı olarak ifade edilmektedir [13],[16],[18],[19]. Bu çalışmada, Akiyama tarafından [13] sistemin viskoz sönüm oranının (ξ) bir fonksiyonu olarak ifade edilmiş olan λ katsayısı kullanılmıştır:

$$\lambda = f(\xi) = \frac{1}{(1 + 3 \cdot \xi + 1.2 \cdot \sqrt{\xi})^2} \tag{9}$$

(9) No.lu eşitlik ile elde edilen λ katsayısının, (8) No.lu eşitlikte yerine konulması ile enerji denklemi tamamlanmaktadır. Bu genel enerji eşitliğinden E_p plastik enerji ifadesi çekilir ve böylece yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışında plastik mafsal bölgelerinde tüketildiği kabul edilen toplam plastik enerji elde edilmiş olur. Şekil 2'de; (8) No.lu genel enerji

denkleminin $V-\Delta$ (Taban kesme kuvveti-yer değiştirme) grafiğinde ifade edilmiş şekli görülmektedir. Çalışmadaki tasarım yönteminde enerji dengesinden hareketle, yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışına ait V_y: akma taban kesme kuvveti ifadesi de türetilmektedir.



Şekil 2: Doğrusal olmayan ideal-elastoplastik davranışta elastik, plastik ve giren enerji.

4 Yatay kuvvetler tarafından yapılan dış iş

Tasarımda hedeflenen ve kiriş uçları ile zemin kat kolon alt uçlarında plastik mafsal oluşumunu esas alan ideal göçme mekanizması için enerji denge denkleminden belirlenecek olan taban kesme kuvveti kat seviyelerine eşdeğer deprem yükü olarak dağıtılabilir. Çalışmada da; Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'deki Eşdeğer Deprem Yükü yöntemine göre [31], toplam taban kesme kuvvetinin kat seviyelerine yatay yük olarak dağıtılması yapılmaktadır. Bu varsayım altında, çerçeve türü yapı sistemlerinde yatay kuvvetler tarafından yapılan dış iş (=plastik enerji):

$$E_p = \left[\sum_{i=1.Kat}^{N.Kat} F_i \cdot H_i + \Delta F_N \cdot H_N\right] \cdot \theta_p \qquad (10)$$

şeklinde ifade edilebilir. F_i: i. kat seviyesine etkiyen yatay yük, ΔF_N: tepe katına etkiyen ek eşdeğer yatay yük [36] ve H_i ve H_N: i. ve N. katın toplam yüksekliğidir. Yukarıdaki ifadede ağırlık kuvvetlerinin ikinci mertebe etkilere bağlı olarak yaptıkları iş dikkate alınmamıştır. θ_p: 1. mod şekline uygun olarak yer değiştirme yapan çerçeve yapı için hedeflenen plastik taban dönmesi değeridir ve hedeflenen toplam dönme (θ_u) değerinden, belirlenen akma dönmesinin (θ_y) çıkarılması sonucunda şu şekilde elde edilir:

$$\theta_p = \theta_u - \theta_y \qquad (11)$$

(10) No.lu dış iş eşitliğinde; $\Delta F_N = 0.0075 \cdot N \cdot V_y$ ve $F_i = \gamma_i \cdot V_y$ yazılması sonucunda (γ_i: kat seviyelerindeki eşdeğer yatay yüklerin hesaplanmasında taban kesme kuvveti katsayısı ve $(\gamma_1 + \gamma_2 + \cdots + \gamma_N) = 1)$) plastik enerji ifadesi şu şekilde yeniden yazılabilir:

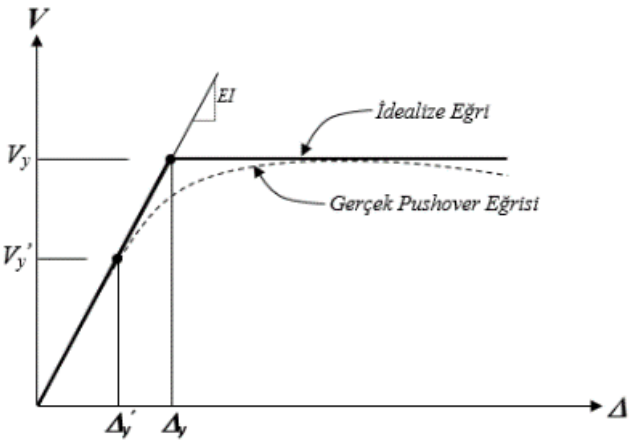
$$E_p = V_y \cdot \theta_p \cdot \left[\sum_{i=1.Kat}^{N.Kat} \gamma_i \cdot H_i + 0.0075 \cdot N \cdot H_N\right] \qquad (12)$$

(11) No.lu eşitlikteki θ_p değerinin elde edilmesi için, sistemin akma dönmesinin (dolayısıyla akma yer değiştirmesinin) belirlenmesi gerekir. Akma yer değiştirmesinin tespitinde birtakım belirsizlikler mevcut olup, literatürde konu ile ilgili çalışmalar mevcuttur [32],[33]. Bu çalışmada, akma yer değiştirmesi (Δ_y), yapı sistemine doğrusal olmayan artımsal itme analizinin uygulanması sonucunda:

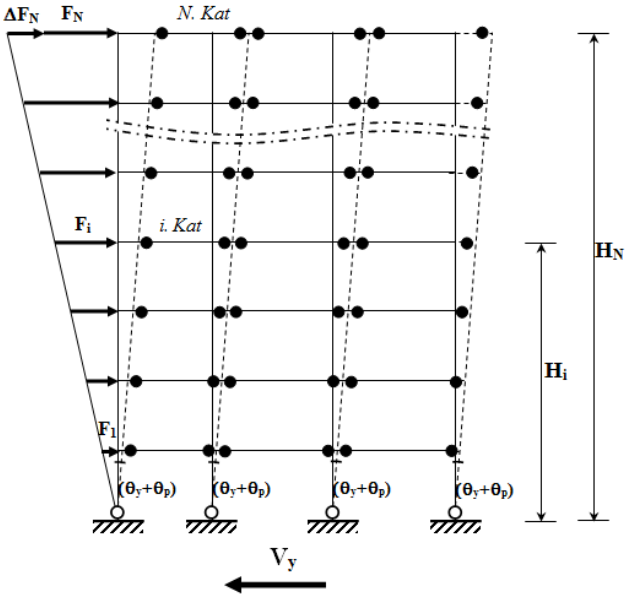
$$\Delta_y \cong \frac{V_y}{V_y'} \cdot \Delta_y' \qquad (13)$$

eşitliğinin kullanılması ile belirlenmiştir (Şekil 3). Δ_y': $V-\Delta$ (taban kesme kuvveti-yer değiştirme) eğrisinin doğrusallıktan ilk ayrıldığı noktadaki yer değiştirme, V_y ve V_y': sırasıyla en büyük ve Δ_y' yer değiştirmesine karşılık gelen taban kesme kuvvetidir [33]. Şekil 4'teki gibi 1. mod etkisinde olan çok katlı bir çerçevede, zemin kat tabanından itibaren akma dönmesi (θ_y) değeri yaklaşık olarak şu şekilde belirlenebilir:

$$\theta_y \cong \Delta_y / H_N \qquad (14)$$



Şekil 3: Akma yer değiştirmesinin belirlenmesi.



Şekil 4: İdeal göçme mekanizmasına sahip çok katlı çerçeve sisteme etkiyen taban kesme kuvveti.

5 Enerji esaslı yapı taban kesme kuvveti

Enerjiye dayalı tasarım felsefesinde; tasarım yatay kuvvetlerinin, çok katlı bir çerçeve sistem üzerinde yapmış olduğu dış iş (plastik enerji) ile (8) No.lu genel enerji dengesinden elde edilecek olan toplam plastik enerji ifadeleri birbirine denktir. Doğrusal olmayan davranışta ideal göçme mekanizmasına sahip bir sistemin plastik mafsallarında toplandığı kabul edilen plastik enerjinin (iç iş), yatay dış kuvvetlerin sistem üzerinden sahip olacağı plastik enerji (12 No.lu eşitlik) (dış iş) ile eşitlenmesi sonucunda, V_y yapı taban kesme kuvveti ifadesi eşitlikten çekilebilir. Elde edilen taban kesme kuvveti ifadesi, çalışma kapsamında "enerji esaslı taban kesme kuvveti" olarak adlandırılmaktadır. Doğrusal olmayan davranıştaki eğrisi Şekil 3'te verildiği gibi elastoplastik olarak idealleştirilen bir yapı sistemine ait enerji esaslı taban kesme kuvveti (V_y), enerji dengesinin kullanılması ile şu şekilde ifade edilebilir. Sistemin toplam elastik enerjisi $E_e = 1/2 \cdot V_y \cdot \Delta_y$, ÇSD sistemlere depremle birlikte giren enerji $E_{I(\text{ÇSD})n}$ ve sistemde yatay kuvvetler tarafından yapılan dış iş (8) No.lu denklemde yerine yazıldıktan sonra gerekli düzenlemeler yapılarak enerji esaslı taban kesme kuvvetini bilinmeyen olarak barındıran ikinci dereceden bir denklem elde edilir.

$$\left\{\frac{T_e^2}{8\cdot\pi^2}\cdot\frac{g}{W}\right\}V_y^2+\left\{\left(\sum_{i=1}^{N.kat}\gamma_i\cdot H_i+0.0075\cdot N\cdot H_N\right)\cdot\theta_p\right\}V_y-\lambda\cdot\sum_{n=1}^{N.mod}E_{I(TSD)n}\cdot\Gamma_n^2=0 \quad (15)$$

Bu denklemin enerji esaslı taban kesme kuvvetini veren kökü:

$$V_y=-\alpha+\sqrt{\alpha^2+\beta} \quad (16)$$

Burada; α ve β: enerji esaslı taban kesme kuvveti katsayıları olup, çalışma kapsamında şu şekilde hesaplanmaktadır:

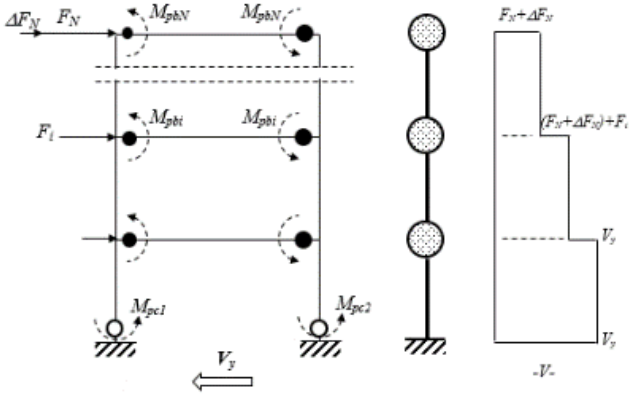
$$\alpha=\frac{4\cdot W\cdot\pi^2\cdot(\sum_{i=1}^{N.kat}\gamma_i\cdot H_i+0.0075\cdot N\cdot H_N)}{T_e^2\cdot g}\cdot\theta_p \quad (17)$$

$$\beta=\frac{8\cdot W\cdot\pi^2\cdot(\sum_{n=1}^{N.mod}E_{I(TSD)n}\cdot\Gamma_n^2)}{T_e^2\cdot g\cdot(1+3\xi+1.2\sqrt{\xi})^2} \quad (18)$$

(17) ve (18) No.lu ifadelerde; W: deprem yükü hesabında kullanılacak toplam yapı ağırlığı (sismik ağırlık), T_e: hakim moda ait elastik titreşim periyodu değeri, g: yer çekimi ivmesi, ξ: viskoz sönüm oranı, γ_i: F_i/V_y oranı, H_i ve H_N: sırası ile i. kat ve N. tepe katının toplam yükseklikleri ve $\sum E_{I(TSD)n}\cdot\Gamma_n^2$: ÇSD sisteme depremle birlikte girdiği kabul edilen toplam enerjidir. θ_p: plastik hedef dönme değeridir (11 No.lu eşitlik).

6 Taşıyıcı sistem elemanlarının enerji esaslı taban kesme kuvvetine göre plastik tasarımı

Çalışma kapsamında çerçeve türü yapılara ait taşıyıcı sistem elemanları, plastik enerji dengesinden (16) No.lu eşitlikteki gibi elde edilen taban kesme kuvvetine göre yeniden boyutlandırılmaktadır. Plastik tasarımda, doğrusal olmayan davranışın sonucunda plastik mafsallaşmaların gözlendiği kat seviyelerindeki plastik enerji dengesi esas alınmakta ve kiriş uçlarındaki plastik momentler elde edilmektedir. Uygulanan plastik tasarım yönteminin genel felsefesini açıklamak üzere Şekil 5'te; tek açıklıklı bir çerçeve yapıya ait plastik mafsallar, kiriş plastik mafsallarındaki plastik moment (M_{pbi}) değerleri, kolon alt uçlarında oluşan plastik mafsallar ve kolon plastik moment (M_{pc1} *ve* M_{pc2}) değerleri ve kat kesme kuvveti grafiği (V) gösterilmektedir.



Şekil 5: Bir çerçeve yapı sistemine etkiyen tasarım yatay yükleri, plastik mafsal bölgeleri ve plastik momentler.

Çalışmada çelik taşıyıcı sistem olarak boyutlandırılan çerçeve yapının zemin kat kolon alt uçlarında oluşan plastik mafsallara ait plastik moment değerleri (M_{pci}), kuvvetli eksen etrafında eğilen I kesitler için bileşik eğilme durumuna ait yaklaşık akma koşullarının kullanılması ile belirlenmektedir [34]:

$$N/N_p \le 0.15 \; için \; M/M_p - 1 = 0 \quad (19)$$

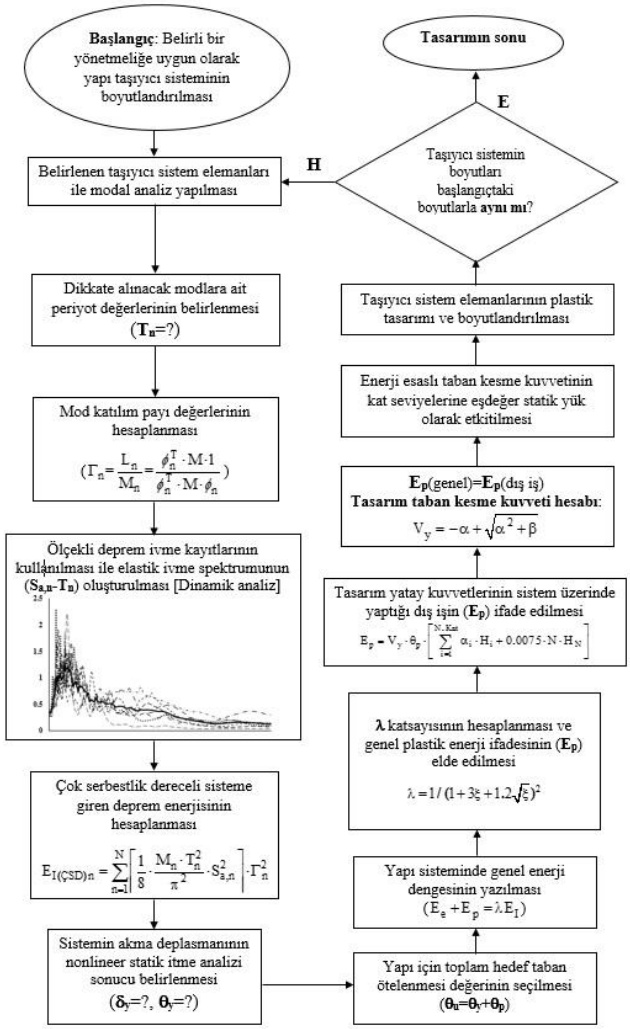
$$N/N_p > 0.15 \; için \; M/M_p + 1.18\cdot N/N_p - 1.18 = 0 \quad (20)$$

(19) ve (20) No.lu akma koşullarında; N_p: $M=0$ halinde kesitin taşıyabileceği en büyük (plastik) normal kuvvet ve M_p: $N=0$ halinde kesitin taşıyabileceği en büyük (plastik) moment değeridir.

M_{pci} değerlerinin belirlenmesinin ardından, her bir kat seviyesindeki plastik enerji dengesinden hesaplanan plastik moment değerlerine göre öncelikle kirişler boyutlandırılmaktadır. Normal kuvvet değeri ihmal edilen kirişlerin boyutlandırılmasında (19) No.lu akma koşulu kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan yöntem, çok açıklıklı çerçevelerin farklı açıklıklarına ait kirişlere tek tip kesit atanmasını uygun görmektedir. Kiriş boyutlandırmasının ardından, her bir aks kolonu ayrı ayrı çözümlenerek kolonlara ait eğilme momenti değerleri denge koşulundan faydalanılarak hesaplanır. İlgili akma bağıntısı kullanılarak bileşik eğilme etkisindeki kolonlara uygun kesitler atanır. Böylece yeni taşıyıcı sistem elemanlarının belirlenmesi ile ilk iterasyon sona ermektedir. İlk iterasyonun sonunda elde edilen kesitler, başlangıçtaki kesit boyutları ile aynı değil ise iterasyona devam edilir. Ardışık iki iterasyonun taşıyıcı sistem boyutları aynı olduğunda, iterasyona son verilir ve elde edilen boyutlar, tasarımın verdiği nihai boyutları olarak kabul edilir. Enerji esaslı iteratif tasarım yöntemine ait akış şeması Şekil 6'da verilmektedir.

Enerji esaslı plastik tasarımın sona ermesinin ardından, belirlenen V_y taban kesme kuvveti dağılımı esas alınarak yapıların doğrusal olmayan artımsal itme analizi gerçekleştirilir. Her bir kat seviyesindeki göreli kat ötelemesi oranları hesaplanır. Göreli kat ötelemesi oranları ile tasarımın başlangıcında ideal göçme mekanizması altında kabul edilen toplam hedef dönme (θ_u) değeri karşılaştırılır. Sonuçların

geçerliliği, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerin kullanılması ile sınanmaktadır.



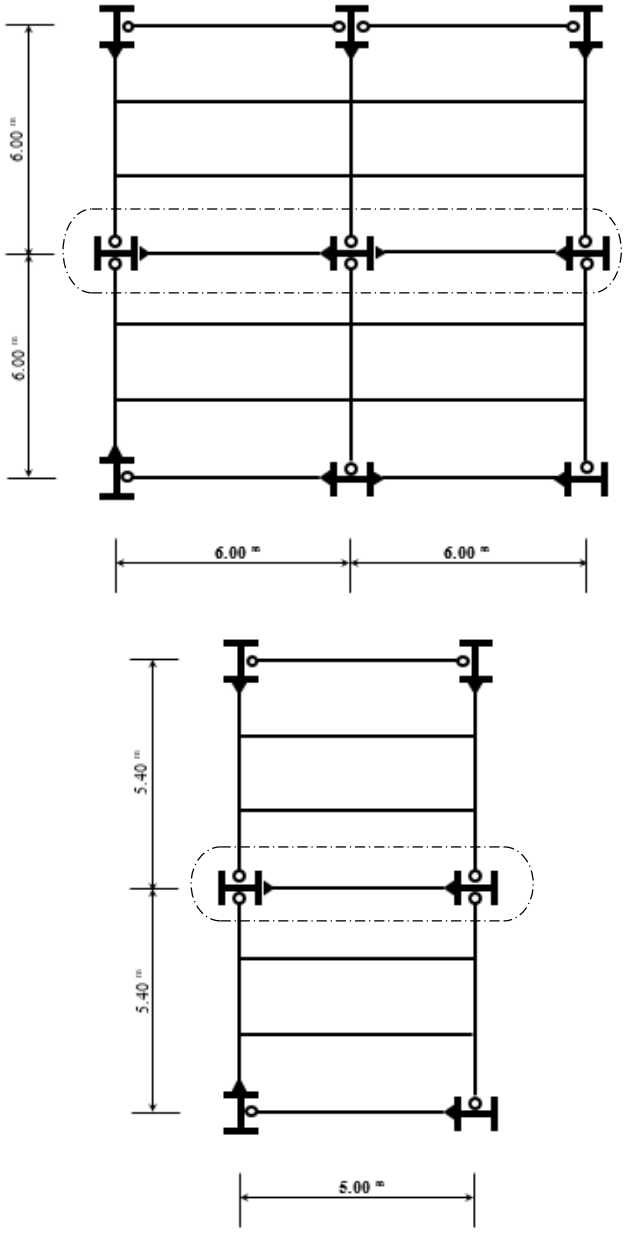
Şekil 6: Çalışma kapsamındaki enerji esaslı iteratif yönteme ait genel akış şeması.

7 Çelik çerçeve sistemlerin enerji dengesini esas alan yöntem ile tasarımı

Çalışmada, enerji esaslı yöntemin uygulanması amacı ile 3 katlı 2 açıklıklı ve 5 katlı tek açıklıklı çelik çerçeve yapılar öncelikle "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (2016)" esaslarına göre boyutlandırılmıştır. Malzeme; S235 sınıfı yapı çeliğidir. Yapı taşıyıcı sistemlerinin boyutlandırılmasında Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ilkeleri esas alınmıştır. YDKT'ye göre tasarımda 7 adet farklı yük kombinasyonu dikkate alınmıştır [21].

Taşıyıcı sistem elemanlarına kesit atamasında Avrupa Norm Profilleri (Avrupa kesit I-Profilleri) kullanılmıştır. Çelik yapıların üzerinde bulunduğu zemin sınıfı Z3 olup, yapılar 1. derece deprem bölgesindedir. 3 katlı 2 açıklıklı ve 5 katlı tek açıklıklı çerçevelerin çıkarıldığı yapılara ait kalıp planları Şekil 7'de verilmektedir.

Ele alınan 3 katlı 2 açıklıklı çerçeve yapıda her bir kat kirişindeki sabit ve hareketli yayılı yük değerleri sırası ile $g = 21$ kN/m ve $q = 12$ kN/m olarak hesaplanmıştır. 5 katlı tek açıklıklı çerçevede ise; $g = 18.9$ kN/m ve $q = 10.8$ kN/m'dir. Önboyutlandırma aşamasında, deprem hesabında Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik esas alınmıştır [31]. Yapılarda kiriş kesitleri IPE profili, kolon kesitleri HEB profili (Avrupa kesit geniş başlıklı I profili) olarak seçilmiştir. Hedeflenen göçme mekanizması, kiriş uçlarının ve zemin kat kolon alt uçlarının mafsallaştığı ideal göçme mekanizmasıdır. Yapılardaki hakim mod 1. moddur ve enerji hesaplamalarında ilk 3 titreşim modu dikkate alınmıştır [30]. İkinci mertebe etkileri ihmal edilmiştir. Viskoz sönüm oranı $\xi = \%2$ olarak alınmıştır. λ katsayısı (9) No.lu ifadenin kullanılmasıyla hesaplara dahil edilmiştir. Giren enerjinin hesabında, detayları 9. bölümde verilen yedi adet gerçek deprem kaydı kullanılmıştır.



Şekil 7: 3 katlı 2 açıklıklı ve 5 katlı tek açıklıklı çelik çerçevelerin çıkarıldığı yapı kalıp planları.

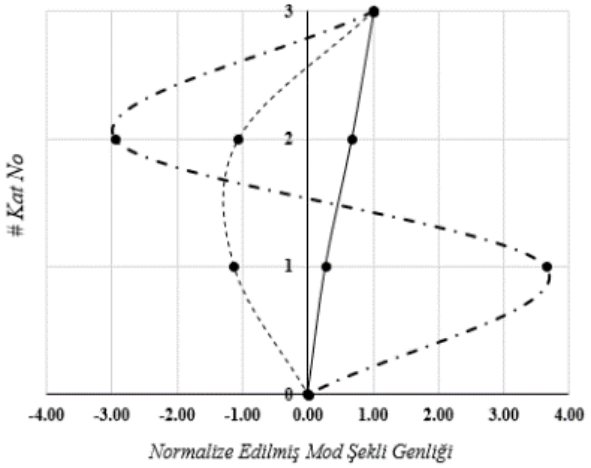
Tablo 1'de çerçeve yapılara ait tasarım parametreleri sunulmuştur. W: sismik yapı ağırlığı, θ_y: yapı kapasite eğrisinden belirlenen elastik akma dönmesi, θ_p: hedeflenen

ideal göçme mekanizması için plastik hedef dönmesi değeri, θ_u: toplam hedef dönmesi değeri, V_y: (8) No.lu denklem ile hesaplanmış olan enerji esaslı taban kesme kuvveti ve T_n: ilk 3 titreşim moduna ait periyot değerleridir. Aynı tabloda; ilgili titreşim modları esas alınarak hesaplanan kütle katılım oranları, modal katkı çarpanı ve depremle birlikte yapı sistemlerine giren toplam enerji değerleri de verilmiştir. Modal analizlerde, SAP2000 v.18 [35] programı kullanılmıştır. Her bir kat seviyesi rijit-diyafram olarak tanımlanmıştır.

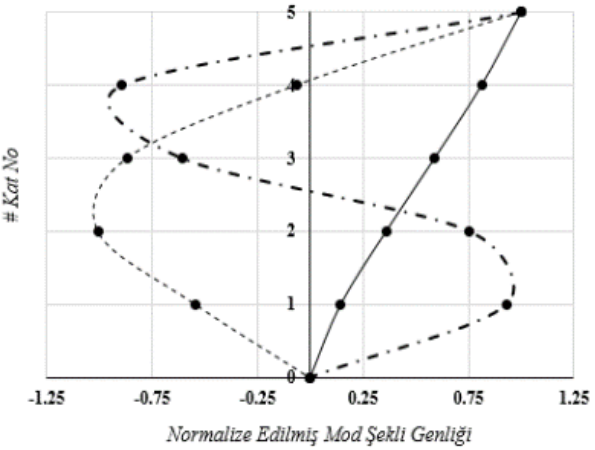
Tablo 1: Çerçeve yapılara ait tasarım parametreleri.

	3 Katlı Çerçeve			5 Katlı Çerçeve		
W (kN)	885.60			553.50		
θ_y (rad)	0.0067			0.0073		
θ_p (rad)	0.0133			0.0127		
θ_u (rad)	0.02			0.02		
V_y (kN)	248.95			168.67		
T_n (s)	*1. mod*	*2. mod*	*3. mod*	*1. mod*	*2. mod*	*3. mod*
	0.52	0.14	0.07	0.90	0.31	0.16
(L_n^2/M_n) ΣM_n	*1. mod*	*2. mod*	*3. mod*	*1. mod*	*2. mod*	*3. mod*
	0.820	0.137	0.042	0.801	0.131	0.047
Γ_n	*1. mod*	*2. mod*	*3. mod*	*1. mod*	*2. mod*	*3. mod*
	1.274	-0.349	0.074	1.343	-0.476	0.185
$E_{I(\text{ÇSD})n}$ (kNm)	24.07			28.53		

Çerçeve yapılara ait normalize edilmiş mod şekli genlikleri, ilk 3 mod için Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur.



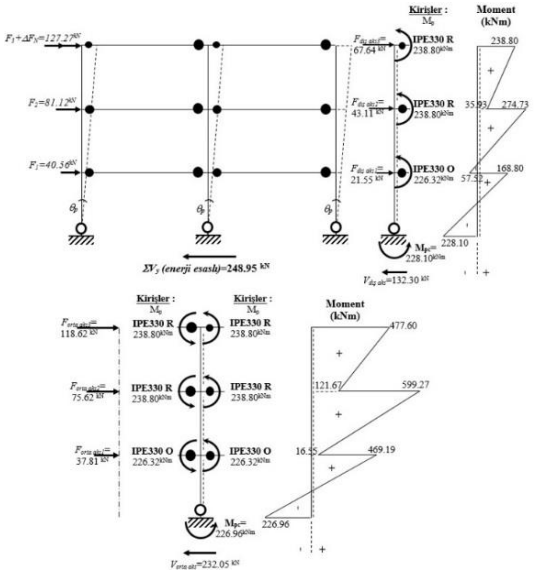
Şekil 8: 3 katlı 2 açıklıklı çerçeveye ait mod şekli genlikleri.



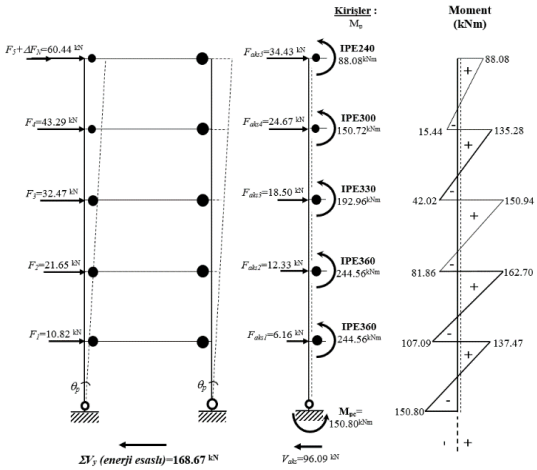
Şekil 9: 5 katlı tek açıklıklı çerçeveye ait mod şekli genlikleri.

Enerji esaslı tasarımda ara işlemlerin hızlı bir biçimde sürdürülebilmesi için, Şekil 6'daki akış diyagramını esas alan bir Excel programı yazılmıştır. Taban plastik dönme değerleri (θ_p), 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem için 0.02 olarak kabul edilebilen [36] değerden akma dönmesinin (θ_y) çıkarılması ile elde edilmiştir. θ_p değeri, enerji esaslı taban kesme kuvveti V_y'nin hesabında doğrudan hesaba katılmıştır. Enerji esaslı taban kesme kuvveti hesabında, seçilen depremler için oluşturulan ortalama enerji spektrumlarından eşdeğer TSD sistemlerin giren enerjileri belirlenmiş $(E_{I(\text{TSD})n})$ ve ilk 3 titreşim modunun dikkate alınması sonucu, (2) No.lu ifadeden yararlanılarak ÇSD sisteme giren enerji $(E_{I(\text{ÇSD})n})$ değeri hesaplanmaktadır.

Her iki çerçeve yapının nihai tasarımında kullanılan enerji esaslı taban kesme kuvveti ve kat seviyelerine dağıtılmış eşdeğer statik yük değerleri 3 ve 5 katlı çerçeveler için sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Aynı şekillerde, iteratif plastik tasarım sonucunda belirlenen kirişlerin uç kesitlere ve kolonların alt uç kesitlerine ait plastik eğilme momentleri, bunlardan hareketle kenar ve iç kolon aksları için ayrı ayrı hesaplanan yatay yük değerleri ve kolonların boyutlandırılmasında esas alınan eğilme momenti diyagramları da verilmektedir.



Şekil 10: 3 katlı çerçevenin plastik tasarımı.



Şekil 11: 5 katlı çerçevenin plastik tasarımı.

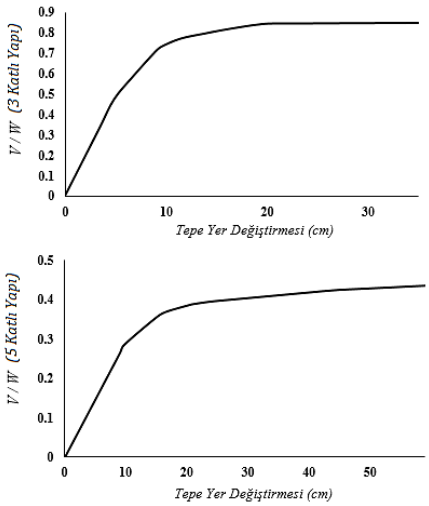
Tablo 2'de Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'e göre önboyutlandırması yapılan çelik çerçeve yapılara ait kesitler, çerçevelerin çalışmadaki enerji esaslı plastik tasarım prosedürü ile boyutlandırılması sonucunda belirlenen kiriş profilleri ile birlikte verilmektedir. Önboyutlandırmada, 3 katlı çerçevenin tüm kolonları HE360B olarak belirlenmiş ve iteratif tasarım sonucunda ise ilk 2 kat kolonları HE360B ve 3. Kat kolonları ise HE320B olarak elde edilmiştir. 5 katlı çerçevede ise, önboyutlandırmada HE400B profilinde olan kolonlar, enerji esaslı tasarım sonucunda HE240B olarak belirlenmiştir. Seçilen profiller tamamen uygulanan tasarım yönteminin sonucudur. 3 katlı çerçevede tasarımı sağlayan tüm kat kolonları için profil numaraları farklı seçilmiştir. 5 katlı çerçevede ise kat sayısındaki artışa bağlı olarak artan iterasyon adımları nedeniyle her kat için tasarımı sağlayan tek bir profil tipi seçilmiştir.

Tablo 2: Kat kirişleri için seçilen çelik profiller.

	Çelik Yapılar Yönetmeliği (2016)		Enerji Esaslı Yöntem	
	3 Katlı	*5 Katlı*	*3 Katlı*	*5 Katlı*
5. Kat	-	IPE 360	-	IPE 240
4. Kat	-	IPE 400	-	IPE 300
3. Kat	IPE 360	IPE 450	IPE 330 R	IPE 330
2. Kat	IPE 360	IPE 500	IPE 330 R	IPE 360
1. Kat	IPE 360	IPE 500	IPE 330 O	IPE 360

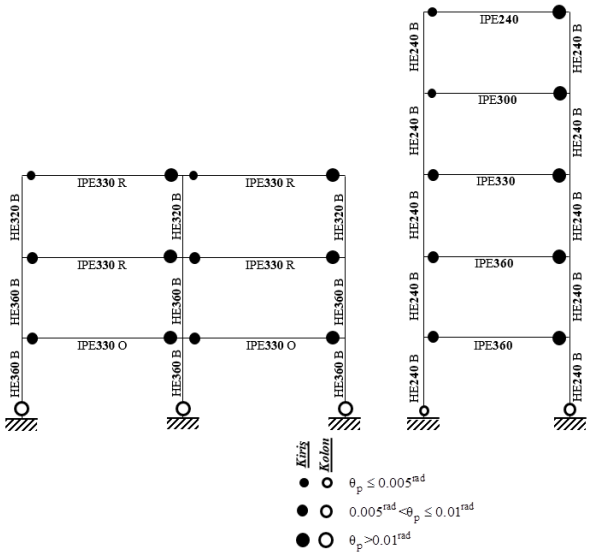
8 Çerçevelerin artımsal itme analizleri

Enerji esaslı plastik tasarıma göre boyutlandırılan çerçevelerin doğrusal olmayan modelleri ve artımsal itme analizleri SAP2000 v.18 [35] programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plastik mafsal bölgelerinin modellemesinde yığılı plastisite hipotezi esas alınmış ve plastik mafsal bölgeleri haricindeki bölgelerin doğrusal elastik davrandığı kabul edilmiştir. Plastik mafsal boyu, çalışan doğrultudaki kesit boyunun yarısı olarak alınmıştır [31]. Literatürde yaygın kabul gören bu yaklaşım, mühendislik uygulamalarında da büyük pratiklik sağlamaktadır. Hesaplanan nihai enerji esaslı taban kesme kuvveti (V_y) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'e göre çerçevelerin kat seviyelerine eşdeğer deprem yükü olarak dağıtılmış ve artımsal itme analizinde bu yatay yük dağılımı kullanılmıştır. Çerçeve yapılara ait taban kesme kuvveti – yer değiştirme kapasitesi eğrileri Şekil 12'de verilmiştir.



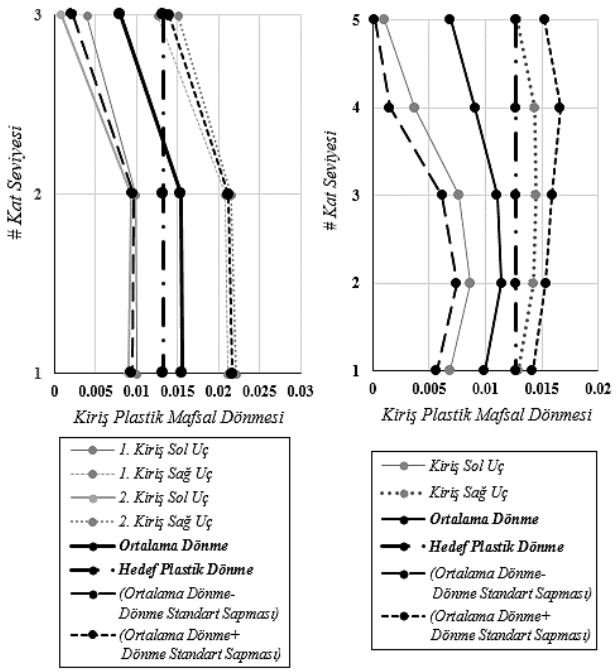
Şekil 12: 3 ve 5 katlı çelik yapılara ait kapasite eğrileri.

Doğrusal olmayan analizlerde; sünek olarak hasar gören yapı elemanlarının hasarları hesaplanan iç kuvvet ve birim şekil değiştirme seviyelerine göre göçme olarak derecelendirilmiş [31] ve bir kolon elemanın göçme seviyesine erişmesi yapının göçme sınırı olarak kabul edilmiştir. 3 ve 5 katlı çelik çerçeve türü yapıların artımsal itme analizleri nihai tasarımda esas alınan enerji esaslı taban kesme kuvveti (V_y) kullanılarak belirlenen göçme sınırına kadar gerçekleştirilmiştir. Her iki yapı için de tasarımda hedeflenen ideal göçme mekanizmasına yakın göçme mekanizmaları elde edilmiş ve plastik mafsalların kiriş uçlarında ve zemin kat kolon alt uçlarında oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 13). Kiriş uçlarında oluşan plastik mafsallar içi dolu dairelerle, kolon uçlarında oluşan plastik mafsallar ise içi boş dairelerle temsil edilmiştir. Ayrıca çapı farklı daireler kullanılarak bu kesitlerin plastik dönme değerinin mertebesi hakkında bir fikir verilmesi amaçlanmış ve plastik dönme değerlerine ait aralıklar da Şekil 13'te gösterilmiştir. Enerji esaslı plastik tasarım esas alınarak boyutlandırılan çerçevelerin kolon alt uçlarında oluşan plastik dönme değerleri tasarımda hedeflenen değere çok yakın elde edilmekle birlikte 5 katlı çerçevenin sol kolon ucunda hesaplanan dönme değeri tasarımda öngörülen değerin çok az bir farkla altında kalmıştır.



Şekil 13: Enerji esaslı yöntemle tasarlanan çerçevelerde oluşan plastik mafsal dağılımı.

Göçme sınırına kadar artımsal itme analizi gerçekleştirilen 3 ve 5 katlı çerçeve yapıların kiriş uçlarında oluşan plastik mafsallarına ait plastik dönme değerleri kat seviyesine bağlı olarak Şekil 14'te verilmiştir. Kirişlerin sağ ve sol uçlarındaki plastik dönme değerleri, ortalama dönme değerleri ile ±1 standart sapmalı olarak sunulmuştur. Grafiklerde Tablo 1'de verilen hedef plastik dönme (θ_p) değerleri de işaretlenmiştir. İdeal göçme mekanizmasına göre enerji esaslı olarak tasarlanmış çelik yapılarda, tasarımda hedeflenen θ_p değeri aynı zamanda her bir plastik mafsal için hedeflenmiş bir plastik dönme değeridir. Şekil 14'ten; 3 katlı yapının ilk 2 katında hedeflenen değerden bir miktar daha büyük ve son katında ise hedef dönmeden bir miktar daha küçük plastik dönme elde edilmiştir. 5 katlı yapıda kiriş plastik dönme değerlerinin ortalamaları, hedeflenen θ_p değerine yaklaşmış ancak bir miktar daha altında kalmıştır. Hedef plastik dönme değerlerinin, ortalama ±1 standart sapmalı plastik dönme değerleri arasında olduğu görülmüştür.



Şekil 14: 3 ve 5 katlı çerçevelerin artımsal itme analizi sonucu elde edilen kiriş plastik mafsal dönmesi (rad) değerleri.

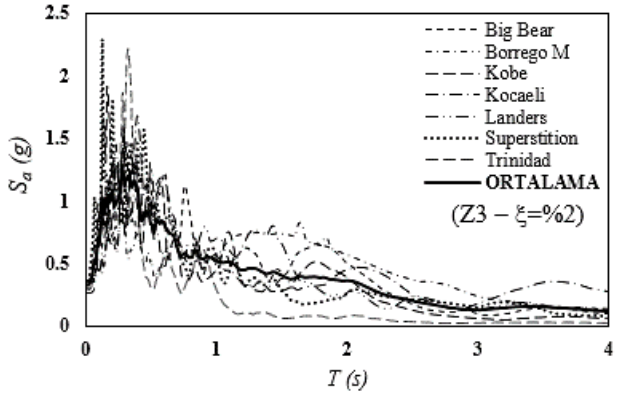
9 Enerji analizleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler

Enerji analizlerinde ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde Tablo 3'te verilen yedi adet gerçek yer hareketi kaydı kullanılmıştır. Yer hareketi kayıtları Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nin internet sitesinden elde edilmiştir [37]. İvme kayıtları Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te [31] yer alan Z3 tasarım ivme spektrumuna göre zaman tanım alanında ölçeklenmiştir. Seçilen depremlerin kayma dalgası hızları Z3 yerel zemin sınıfı ile eşleştirilebilecek şekilde $180 < V_{S30} < 360$ m/s aralığında olup, moment büyüklükleri M_w: $6 - 7.5$ aralığındadır. R_{JB}: yer hareketine ait Joyner-Boore mesafesi ve PGA ve PGV: en büyük yer ivmesi ve yer hızı değerleridir. Doğrultu atımlı faylanma mekanizmasına sahip ve yakın fay etkisi içermeyen kayıtlar seçilmiştir. SeismoSpect v2.1.2 [38] spektrum programının kullanılması ile depremlere ait %2 sönümlü elastik ivme ve hız spektrumları elde edilmiştir.

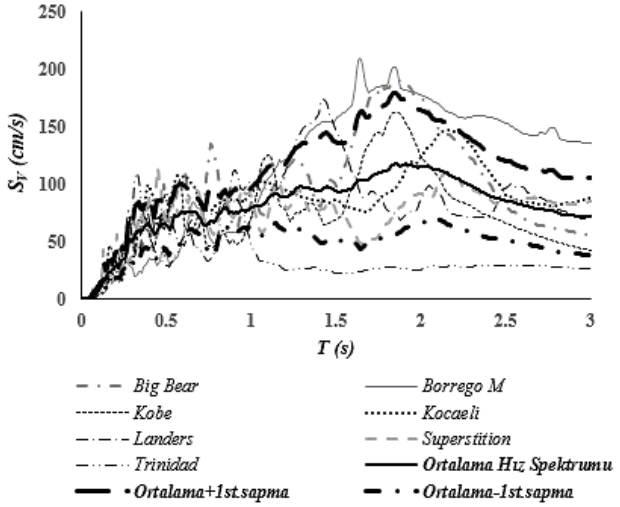
Tablo 3: Kayıtlara ait özellikler.

Deprem	M_w	R_{JB} *(km)*	V_{S30} *(m/s)*	*PGA (g)*	*PGV (cm/s)*
Big Bear-01, 1992	6.46	34.98	296.97	0.101	11.85
Borrego Mountain, 1968	6.63	45.12	213.44	0.133	26.71
Kobe, 1995	6.90	22.50	312.00	0.240	20.80
Kocaeli, 1999	7.51	13.60	281.86	0.312	58.85
Landers, 1992	7.28	23.62	353.63	0.152	29.60
Superstition Hills-02, 1987	6.54	11.16	316.64	0.286	29.02
Trinidad, 1980	7.20	76.06	311.75	0.151	8.88

Çalışmada kullanılan ve Z3 tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiş deprem hareketlerine ait elastik ivme ve elastik hız spektrumları Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 16'da; ortalama değerli ve ortalama ±1 standart sapmalı olarak verilen hız spektrumu grafiğinin, geniş bir periyot aralığında sabit kalma eğiliminde olduğu görülmektedir [7],[14].

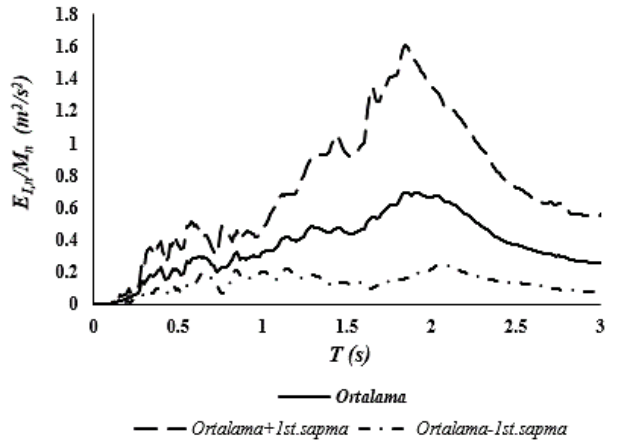


Şekil 15: Ölçekli kayıtlara ait elastik ivme spektrumları.



Şekil 16: Ölçekli kayıtlara ait elastik hız spektrumları.

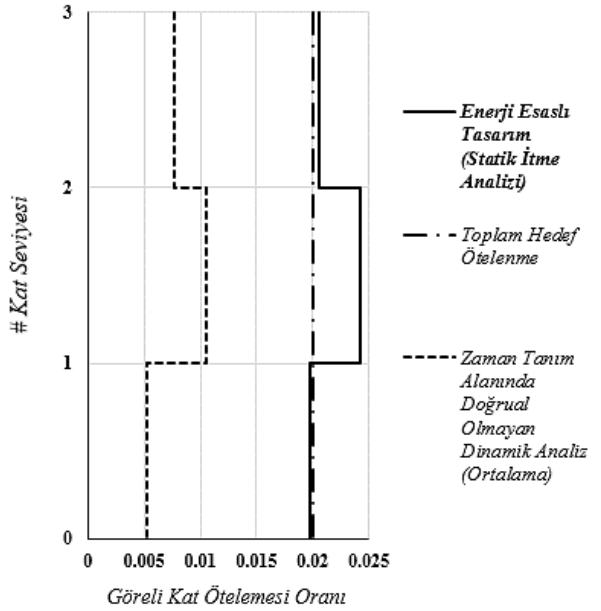
%2 sönüm oranına sahip eşdeğer TSD sisteme, çalışmada seçilen depremlerin etkimesi halinde elde edilecek olan giren enerji spektrumu ($\frac{E_{I,n}}{M_n} - T_n$ grafiği) Şekil 17'deki grafikte sunulmuştur. Çalışmada, Tablo 3'te verilen depremlerle birlikte eşdeğer TSD sistemlere giren enerjinin hesaplanmasında Şekil 17'deki ortalama giren enerji spektrumu kullanılmıştır. ÇSD sistemlere giren enerji (2) No.lu denklemden belirlenmiştir. İlk 3 moda ait modal katılım payı (Γ_n) değerleri Tablo 1'de verildiği gibi hesaplamalarda dikkate alınmıştır.



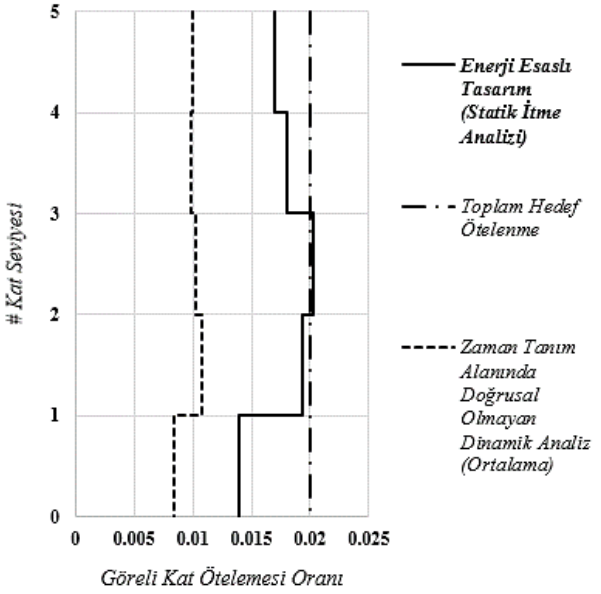
Şekil 17: %2 sönümlü eşdeğer TSD bir sisteme Tablo 3'teki depremlerle birlikte giren ortalama enerji spektrumu.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde çelik yapı elemanlarının histeretik davranışı için Elasto-Plastik Histeretik Modeli kullanılmış olup, sönümün kütle ve rijitliklerle orantılı olduğu Rayleigh sönüm modeli esas alınmıştır. Çelik çerçeve sistemler için viskoz sönüm oranı %2 olarak alınmıştır. SAP2000 v.18 Nonlinear [35] ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında analizlerde doğrudan integrasyon yöntemi kullanılmıştır.

Enerji esaslı plastik tasarım yöntemi kullanılarak boyutlandırılan çerçevelerin artımsal itme analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerden elde edilen göreli kat ötelemesi oranları, 3 katlı 2 açıklıklı yapı için Şekil 18'de ve 5 katlı tek açıklıklı yapı için ise Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 18: 3 katlı çerçeveye ait göreli kat ötelemesi oranı grafiği.



Şekil 19: 5 katlı çerçeveye ait göreli kat ötelemesi oranı grafiği.

Göreli kat ötelemesi oranı grafiklerinde tasarımın başlangıcında hedeflenen toplam göreli kat ötelemesi oranı (tabandan itibaren toplam dönme hedefi θ_u)'da belirtilmiştir. Enerji esaslı plastik yöntemle tasarlanan 3 katlı çerçevede, artımsal itme analizinden elde edilen göreli kat ötelemesi oranlarının ilk ve son katlarda hedeflenen değere oldukça yakın olduğu ve ara katta ise hedeflenen değerden bir miktar daha büyük elde edildiği gözlenmiştir. Rijitlik dağılımı bakımından düzenli olan ve katları arasında belirgin bir rijitlik farkı bulunmayan çerçeve tipi yapılarda, göreli kat ötelemesi oranı değerleri ara katlarda genellikle en alt ve en üst katlara oranla bir miktar daha büyük olmaktadır. Aynı çerçevede, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerin göreli kat ötelemesi sonuçları, hedeflenen göreli kat ötelemesi oranının altında kalmıştır (Şekil 18). 5 katlı çerçevede artımsal itme analizinin verdiği göreli kat ötelemesi sonuçlarının ara katlarda hedeflenen ötelenme oranına yakınsadığı görülmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilen ortalama göreli kat ötelemesi oranı sonuçlarının, hedeflenen ötelenme oranından ve enerji esaslı tasarlanan çerçevenin artımsal itme analizinin vermiş olduğu göreli kat ötelemesi oranından daha küçük olduğu sonucu elde edilmiştir (Şekil 19). Z3 tasarım ivme spektrumu esas alınarak zaman tanım alanında ölçeklenen deprem kayıtlarının %2 sönüm oranı için oluşturulan elastik ivme spektrumlarının ortalaması özellikle $T = 0.5$ sn'den büyük periyotlar için tasarım spektrumundan daha küçük ivme değerleri vermektedir. Dolayısıyla bu depremler kullanılarak hesaplanan ortalama göreli kat ötelemesi oranlarının, hedeflenen göreli kat ötelemesi oranı olarak seçilen Tasarım Depremi'ne ait %2 göreli kat ötelemesi değerinden ve 1. mod şekli ile orantılı yatay yük dağılımın kullanıldığı artımsal itme analizinin vermiş olduğu göreli kat ötelemesi oranından küçük olması beklenen bir sonuçtur.

10 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada, yapı sistemlerinin öngörülen bir ideal göçme mekanizmasına ve hedeflenen bir plastik ötelenme (plastik dönme) değerine göre tasarımını amaçlayan enerji esaslı iteratif bir yöntem sunulmaktadır. Yöntemin uygulaması, çelik taşıyıcı sistemli çok katlı çerçeve yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Plastik tasarım yöntemi temel olarak, sünek davranan yapı sistemindeki iç enerji (plastik enerji) ile dış enerjinin (tasarım yatay kuvvetlerinin sistem üzerinde yapmış olduğu işin) dengesine dayanmaktadır. Tasarımda, sistemin plastik mafsallarında tüketilen plastik enerjinin genel ifadesinin, tasarım yatay kuvvetlerinin çerçeve yapı üzerinde yapmış olduğu dış iş ifadesine eşitlenmesi sonucu yapı için enerji esaslı bir taban kesme kuvveti türetilmektedir. Enerji esaslı yeni taban kesme kuvvetine göre, çerçeve yapı sisteminin katlarında plastik enerji dengesi yazılmakta ve kat kirişleri ve kolonlar boyutlandırılmaktadır. Çalışmadaki yöntem doğrudan plastik durumdaki kuvvetlerin dengesini esas almakta olup, başlangıçta hedeflenen ötelenme değerinin sağlanıp-sağlanmadığı çeşitli doğrusal elastik olmayan hesap yöntemleri kullanılarak kontrol edilmektedir.

Enerji esaslı yöntem ile ve Çelik Yapılar ve Türk Deprem Yönetmelikleri ile tasarlanan çelik çerçevelerde farklı taşıyıcı sistem profilleri elde edilmiştir. Enerji esaslı plastik tasarım yöntemine göre boyutlandırılan yapılarda çelik taşıyıcı sistem profillerinin, sözü geçen yönetmeliklere göre tasarlanan aynı yapılardaki taşıyıcı sistem profillerine göre genellikle daha küçük olduğu bulgulanmıştır. Bu sonuç yönetmeliklerde yer alan tasarım yöntemlerinin oldukça güvenli tarafta olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte çalışmada kullanılan tasarım yönteminin doğrudan plastisite teorisini esas aldığı,

yönetmeliklerde yer alan tasarım yöntemlerinde ise yapının doğrusal olmayan davranışının bazı katsayılarla dikkate alındığı göz önünde bulundurulmalıdır. 3 katlı çelik çerçevede; enerji esaslı tasarım sonucunda kiriş profilleri bir numara küçülmüş ve kesit yükseklikleri 360 mm'den 330 mm'ye düşmüştür. Aynı çerçevede; Çelik Yapılar ve Deprem Yönetmeliklerine göre boyutlandırmada kolon profilleri HE360B iken, mevcut enerji esaslı yöntemle tasarım sonucunda ilk 2 katın kolon profilleri aynı kalmış ve 3. kat kolon profilleri ise HE320B olarak belirlenmiştir. 5 katlı çelik çerçevede; enerji esaslı tasarım sonucunda kiriş profilleri 1. ve 2. katta IPE500'den IPE360'a, 3. katta IPE450'den IPE330'a, 4. katta IPE400'den IPE300'e ve son katta ise IPE360'dan IPE240'a inmiştir. Bu çerçevede çelik kolon profillerinin HE400B iken, enerji esaslı tasarımın sonucunda HE240B olduğu görülmüştür.

Enerji esaslı yöntemin kullanılması ile tasarlanan çelik yapılarda, doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler sonucunda katlar arası göreli kat ötelemesi oranı farkının oldukça azaldığı ve özellikle ara katlarda birbirine çok yakın göreli kat ötelemesi oranları elde edildiği belirlenmiştir. Tasarımın başlangıcında da, tüm katlar için tek bir hedef göreli kat ötelemesi oranı belirlenmiş ve taban kesme kuvveti bu değere göre elde edilerek yapı taşıyıcı sistem elemanları boyutlandırılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerden göreli kat ötelemesi oranı dağılımlarının hedeflenen sabit değere yaklaştığı görülmüştür. Bu sonuç kullanılabilirlik sınır durumu esas alınarak yapılacak tasarımlarda plastik analiz esaslı tasarım yönteminin avantajını açıkça ortaya çıkarmaktadır. Böylece göreli kat ötelemeleri tasarımın en başında sınırlandırılarak işletme yükleri altında yapının veya yapı elamanlarının kullanımını olumsuz biçimde etkileyebilecek durumların ortaya çıkması önlenmiş olur. Seçilen deprem kayıtları ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında analizlerin vermiş olduğu göreli kat ötelemesi oranı sonuçları, hedeflenen göreli kat ötelemesi oranı ve artımsal itme analizinden elde edilen göreli kat ötelenmesi oranının çok az bir farkla altında kalmıştır.

Şiddetli depremler etkisinde doğrusal elastik davranış göstermeyen yapı sistemleri için henüz tasarımın başında bir göçme modunun belirlenmiş ve boyutlandırmanın elemanların elastik ötesi kapasitelerinden hareketle yapılmış olması önemli bir avantajdır. Bu şekilde dayanıma göre tasarım yöntemlerinde de ekonomik nedenlerden dolayı bilerek izin verilen belli düzeyde hasarın, istenilen kesitlerde toplanması sağlanmaktadır. Başka bir deyişle, hasarın büyüklüğü ve dağılımı en başta dikkate alınmaktadır. Moment kapasiteleri esas alınarak boyutlandırılan taşıyıcı elemanlarda gevrek davranış olasılığı ortadan kalkmakta ve taşıyıcı sistem elemanlarının veya taşıyıcı sistemin süneklik kapasitesinden etkin bir şekilde faydalanılmış olmaktadır.

Tasarım aşamasında taşıyıcı sistem elemanlarının plastik kapasiteleri esas alındığından, hemen hemen dünyadaki tüm deprem yönetmeliklerinde yer alan kuvvet esaslı ve dayanıma göre tasarım yaklaşımına oranla daha ekonomik çözümler mümkündür. Bu sonuç, enerji esaslı ve dayanıma göre tasarımdan ayrı ayrı hesaplanan ve karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilen profil numaralarından kolaylıkla görülebilir. Ayrıca, sabit bir göreli kat ötelemesi değerine göre tasarım yapıldığından, katlar arası birbirine yakın ötelenme değerleri elde edilmektedir. Yapıdaki kuvvetlerin göreli yer değişimiyle orantılı olduğu düşünüldüğünde, bu nokta da yöntemin önemli bir avantajı olarak ön plana çıkmaktadır. Sabit bir göreli kat ötelemesi oranı dayanıma göre tasarımda dikkate alınmamakta ve taşıyıcı sistemde tamamen eşdeğer deprem yüklerinin dağılımına bağlı bir göreli kat ötelemesi profili oluşmaktadır.

Çalışmadaki yöntemden elde edilen taban kesme kuvveti sonuçlarının, doğrusal elastik olmayan statik ve dinamik tabanlı farklı yöntemlerin kullanılmasıyla elde edilen taban kesme kuvvetleri ile kıyaslanmasının, hesaplamaların diğer yöntemlere yakınsaklığının belirlenmesi açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, çalışmada hesaplanan plastik taban kesme kuvvetinin çeşitli deprem yönetmeliklerinde taşıyıcı sistemin tümü için tek bir parametreye bağlı olarak azaltılan taban kesme kuvveti ile aynı olması beklenmemelidir.

Tasarım yönteminde belirli kabuller esas alınmıştır ve tasarımın sonuçları bu kabuller altında değerlendirilmelidir. Yapı sistemlerinde enerji dengesini esas alan bu plastik tasarım yöntemi, kiriş uçları ve zemin kat kolon alt uçlarının mafsallaştığı ideal göçme mekanizmasına sahip sünek çerçeve sistemler için geçerli olup, farklı göçme mekanizmalarına sahip sistemler için çalışmalar genişletilebilir. Çerçevelerin açıklık sayısı ne olursa olsun, çalışmadaki yöntemde aynı katın bütün kirişlerinde aynı plastik momentin olduğu kabul edilmekte ve dolayısıyla farklı açıklıklardaki tüm kirişlere aynı boyutlar atanabilmektedir. Bu durum, ilerleyen çalışmalarda ele alınıp, geliştirilebilir. Söz konusu tasarımın üç boyutlu gerçek yapı sistemlerine uygulanması olası görünmekle birlikte bu tasarım felsefesini esas alan yazılımlara ihtiyaç vardır. Yöntemin betonarme veya daha farklı taşıyıcı sistemli yapılara uygulanması için ilave çalışmalar gerekmektedir. Çalışma türetilen taban kesme kuvvetinin viskoz sönüm oranını esas alan giren enerji düzeltme katsayısına bağlı olarak değişmesi muhtemeldir. Bu nedenle, literatürde farklı araştırmacılar tarafından önerilen λ değerinin taban kesme kuvveti sonuçlarını ne oranda etkileyeceği ileriki çalışmalarda incelenebilir. Giren enerji ile ilgili hesaplama kabullerinin azaltılması ve enerjinin doğrudan zaman tanım alanında dinamik analizlerden hesaplanması, yöntemin sonuçlarını daha gerçekçi hale getirmek için hedeflenen çalışmalardandır.

11 Kaynaklar

[1] Applied Technology Council. "ATC40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1". California, USA, SSC 96-01, 1996.

[2] Federal Emergency Management Agency. "FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings". Washington, DC, USA, 2000.

[3] Federal Emergency Management Agency. "FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures". Washington, DC, USA, 2005.

[4] Structural Engineers Association of California. "Vision 2000 Performance Based Seismic Engineering of Buildings". Sacramento, CA, USA, 1995.

[5] Akbaş B, Shen J. "Earthquake resistant design and energy concepts". *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 14(2), 2877-2901, 2003.

[6] Bertero VV, Teran-Gilmore A. *Use of Energy Concepts in Earthquake-Resistant Analysis and Design: Issues and Future Directions*. Advances in Earthquake Engineering Practice: Series 2, University of California, Berkeley, 1994.

[7] Leelataviwat S, Goel SC, Stojadinovic B. "Energy based seismic design of structures using yield mechanism and target drift". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 128(8), 1046-1054, 2002.

[8] Teran-Gilmore A, Avila E, Rangel G. "On the use of plastic energy to establish strength requirements in ductile structures". *Engineering Structures* 25(7), 965-980 2003.
[9] Khashaee, P, Mohraz B, Sadek F, Lew HS, Gross JL. "Distribution of Earthquake Input Energy in Structures". The National Institute of Standards and Technology (NIST), Building and Fire Research Laboratory, NISTIR 6903, USA, 2003.
[10] Fajfar P, Vidic T, Fischinger M. "On the energy input into structures". *Proceedings of the Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 20-23 November 1991.
[11] Zahrah TF, Hall WJ. "Earthquake energy absorption in SDOF structures". *Journal of Structural Engineering*, 110(8), 1757-1773, 1984.
[12] Leelataviwat S, Saewon W, Goel SC. "Application of energy balance concept in seismic evaluation of structures". *Journal of Structural Engineering*, 135(2), 113-121, 2009.
[13] Akiyama H. *Earthquake-Resistant Limit State Design for Buildings*. Japan, The University of Tokyo Press, 1985.
[14] Housner GW. "Limit design of structures to resist earthquakes". *The First World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, California,12-15 June 1956.
[15] Chopra AK. *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall, 1995.
[16] Kuwamura H, Galambos T. "Earthquake load for structural reliability". *Journal of Structural Engineering*, 115(6), 1446-1462, 1989.
[17] Fajfar P, Vidic T. "Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* 23(5), 523-537, 1994.
[18] Benavent-Climent A, Pujades LG, Lopez-Almansa F. "Design energy input spectra for moderate seismicity regions". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(5), 1151-1172, 2002.
[19] Benavent-Climent, A, Lopez-Almansa F, Bravo-Gonzales DA. "Design energy input spectra for moderate-to-high seismicity regions based on Colombian earthquakes". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1129-1148, 2010.
[20] Bai J, 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*, Lisboa, Portugal, 24-28 September 2012.
[21] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik". Ankara, Türkiye, 2016.
[22] Zahrah TF, Hall WJ. "Earthquake energy absorption in SDOF structures". *Journal of Structural Engineering*, 110(8), 1757-1773, 1984.
[23] Uang CM, Bertero VV. "Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake Resistant Design". Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, UCB/EERC-88/18, 1988.
[24] Manfredi G. "Evaluation of seismic energy demand". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(4), 485-499, 2001.
[25] Lopez-Almansa F, Yazgan AU, Benavent-Climent A. "Design energy input spectra for high seismicity regions based on Turkish registers". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(4), 885-912, 2013.
[26] Leelataviwat S, Goel S, Stojadinović B. "Energy-based seismic design of structures using yield mechanism and target drift". Journal of Structural Engineering, 128(8), 1046-1054, 2002.
[27] International Conference of Building Officials. "Uniform Building Code". Whittier, California, USA, 1994.
[28] International Conference of Building Officials. "Uniform Building Code". Whittier, California, USA, 1997.
[29] European Committee for Standarization. "Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings". Brussels, 2004.
[30] Kalkan E, Kunnath SK. "Effective cyclic energy as a measure of seismic demand". *Journal of Earthquake Engineering,* 11(5), 725-751, 2007.
[31] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik". Ankara, Türkiye, 2007.
[32] Yüksel İ, Polat Z. "Betonarme çerçeve sistemlerinde sistem akma parametrelerinin tespiti". *Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 14 Ekim 2002.
[33] Tjhın TN, Aschheim MA, Wallace JW. "Yield displacement estimates for displacement-based seismic design of ductile reinforced concrete structural wall buildings". *The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 1-6 August 2004.
[34] Özer E. *Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi*. İstanbul, Türkiye, Ders Notu, İTÜ, 2004.
[35] Computers and Structures Inc. "SAP2000 Ultimate: Integrated Solution for Structural Analysis and Design". Structural Analysis Program, Version 18.0.1, Berkeley, CA, 2015.
[36] Liao WC. Performance-Based Plastic Design of Earthquake Resistant RC Moment Frames. PhD Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor, USA, 2010.
[37] Pacific Earthquake Engineering Research Center. "PEER Ground Motion Database". http://ngawest2.berkeley.edu/ (12.12.2015).
[38] Seismosoft Ltd. "SeismoSpect v2.1.2". Italy, 2015.