

DÜZLEM ÇELİK ÇERÇEVELERDE İKİNCİ MERTEBE ETKİLERİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

*Mustafa Berker ALICIOĞLU** 

Alınma: 23.06.2020; düzeltme: 11.09.2020; kabul: 06.10.2020

Öz: Deprem esnasında özellikle yüksek ve ağır yük taşıyan yapı sistemlerindeki düşey taşıyıcı elemanlarda yeter derecede küçük olmayan yer değiştirmeler oluşabilir. Bu yer değiştirmeler, ikinci mertebe etkisini beraberinde getirir. Öte yandan, yapıların deprem dayanımlarının belirlenmesinde doğrusal olmayan statik analiz, tasarımcılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışma ile düzlem çelik çerçevelerde ikinci mertebe etkileri, doğrusal olmayan statik analiz ile incelenmiştir. Çerçeve tipi yapılar, ikinci mertebe etkileri dikkate alınarak ve alınmayarak analiz edilmiştir. Her çerçeve için iki ayrı performans eğrisi oluşturulmuştur. Zemin kat yüksekliğinin artmasıyla çerçevelerdeki yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür. Zemin kat yüksekliği ile normal kat yüksekliği arasındaki oranın iki ve ikiden büyük olması durumu için yapısal tasarımda ikinci mertebe etkilerinin dikkate alınması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çelik çerçeve, yer-değiştirme, doğrusal olmayan statik analiz, ikinci mertebe etkisi

Numerical Investigation of Second Order Effects In Plane Steel Frames

Abstract: During the earthquake, particularly large displacements may occur on vertical members in tall and heavy load bearing structure systems. These displacements bring about the second order effects. On the other hand, nonlinear static analysis is often used by the designers on the determination of earthquake resistance of structures. With this study, second order effects in plane steel frames are investigated with nonlinear static analysis. Plane steel frames were analyzed with or without second order effects. Two separate performance curves were created for each frame. With the increase of the ground story height, it was observed that the displacement values in the frames increased. It is recommended to consider second order effects in structural design for the case where the ratio between the ground story height and the normal story height is two or more.

Keywords: Steel frame, displacement, nonlinear static analysis, second order effect

* Manisa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 45030 Yunusemre/Manisa
İletişim Yazarı: Mustafa Berker ALICIOĞLU (berker.alicioglu@gmail.com)

1. GİRİŞ

Yapısal çelik, genel itibariyle demir ve karbon alaşımıdır. Alaşımında karbon, fosfor, kükürt, silisyum, azot, manganez, bakır gibi cevherler bulunmaktadır. Ayrıca krom, nikel, vanadyum ve molibden gibi cevherler de yüksek dayanımlı çelik üretiminde kullanılmaktadır. Çeliğin mekanik özelliklerini belirleyici en önemli parametre, alaşımın içerisindeki karbon miktarıdır. Alaşımın içerisindeki karbon miktarı arttıkça, dayanımı ve sertliği artmakta sünekliliği ise azalmaktadır (Deren ve diğ., 2008).

Günümüzde yapısal çelik, geniş bir uygulama alanına sahip olup bina, endüstri yapısı, kule, köprü, üst geçit, depo, spor tesisi, hangar, gökdelen gibi yapıların inşa edilmesinde tercih edilir. Yerinde dökme ve ön üretilmiş betonarme yapılara oranla çelik yapılar, hafif olup daha hızlı inşaat yapımına olanak sağlar. Çelik yapılar, kullanım amaçlarına göre çeşitli yük etkilerine göre tasarlanırlar. Bir endüstri yapısı ağır zati yüklere, bir gökdelen şiddetli rüzgâra ve deprem riskinin yüksek olduğu bir bölgedeki bina da şiddetli depreme maruz kalabilmektedir. Rüzgârın ve depremin yatay yükler, zati yüklerin düşey yükler olarak yapılara etkidiği varsayımı, yapı tasarımında göz önüne alınan hususların başında gelir. Yatay yükler, kolon eksenlerinde yer değiştirmelere neden olur. Kolon eksenlerindeki yer değiştirme neticesinde düşey yükler, eksantrik etkiyi meydana getirir. Eksantrik etkiyle beraber kolonlardaki kesit tesirlerinden biri olan moment değerinde ikincil bir artış görülür. Moment değerinde meydana gelen bu ikincil artışa ikincil mertebeye etkisi denir.

Tasarım yapılırken binalardaki yer değiştirme büyüklüklerine göre ikincil mertebeye etkileri göz ardı edilebilir, genel kabuller ile yaklaşık olarak ya da yer değiştirmelerin denge denklemlerine etkisi ile dikkate alınabilir. Zati ağırlığı ve kat yüksekliği fazla olmayan yeterli rijitliğe sahip yapılarda ikincil mertebeye etkileri göz ardı edilebilir.

Zati ağırlığı ile kat yüksekliği fazla ve yüksek olan yapılarda ikincil mertebeye etkilerinin yapı tasarımında göz önüne alınması önerilmektedir (Günaydın ve diğ., 2017).

Ayrıca yapıların tasarlanmasında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz türleri kullanılmaktadır. Çelik yapıları oluşturan kolon ve kiriş gibi taşıyıcı elemanların taşıma kapasiteleri ve yatay yükler altındaki davranışları doğrusal değildir. Yatay yükler altında tasarlanan bir yapının doğrusal olmayan analizi yapılarak şekil değiştirmeye göre tasarlanması daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

1.1. Literatür Özeti

İkincil mertebeye etkisi, P-delta etkisi olarak da adlandırılmakta olup bu alanda araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Ashwini ve diğ. (2020) kirişsiz döşemeye sahip binaların çerçevesiz binalara oranla daha sünek olduklarını belirterek tasarımda P-delta etkilerinin bu tip binalarda önem kazandığını bildirmişlerdir. P-delta etkilerinin tasarıma dâhil edilmesi yönünde basit bir yöntem önermişlerdir.

Walport ve diğ. (2019) EN 1993-1-1 standardına göre yapılacak olan tasarımlarda ikincil mertebeye etkilerinin dikkate alınmasında kullanılan elastik burkulma yük faktörü kabulünün yetersiz kaldığını düşünmüşlerdir. Plastik analiz ile tasarlanmış çelik çerçevelerin stabilitesini değerlendirmek için parametrik bir analiz yaparak, bu yük faktörünün hesaplanmasında farklı bir yöntem önermişlerdir. Tong ve diğ. (2019) kusurlu elemanlara sahip yapı sistemlerinde ikincil mertebeye etkilerinin önem arz ettiğini belirterek analiz aşamasında bu kusurların kolayca modellenmesine ilişkin bir yöntem geliştirmişlerdir.

Jain ve diğ. (2018) yüksek binaların artan nüfusla beraber gelecek için gereksinim olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek binalarda ikincil mertebeye etkilerini dikkate alarak perde duvarların ve visko elastik damperlerin optimum konumlarını belirlemeye yönelik bir çalışma yapmışlardır.

Günaydın ve diğ. (2017) ikinci mertbe etkilerinin düzlem çelik çerçeve sistemlerin serbest titreşim periyotlarına olan etkilerini incelemişlerdir. İkinci mertbe etkilerinin tasarımda göz önüne alınmasını ve çelik çerçeve sistemler için ikinci mertbe etkileri altında serbest titreşim periyotlarının hesabına ait bir yöntem önermişlerdir.

İkinci mertbe etkilerinin yapısal tasarımında dikkate alınabilmesi için doğrusal olmayan analiz yöntemleri ve plastik mafsallı teorilerinden yararlanılmaktadır. Doğrusal olmayan analiz yöntemleri ve plastik mafsallı teorilerine ilişkin literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır.

Dezhkam (2017) çalışmasında üç farklı çelik perde tipine sahip çelik çerçeveler üzerinde plastik mafsallaşmanın noktasal olduğunu varsayarak doğrusal olmayan statik analiz yöntemini kullanmıştır. Ters V çapraz, X çapraz ve dış merkez çapraz perde tiplerini incelemiştir. Yapı ve eleman performansları üzerinden karşılaştırma yaparak dış merkez çaprazlı perde tipinin yatay yükler altında diğer çapraz tiplerine oranla performansının daha iyi olduğunu belirlemiştir.

Nguyen ve diğ. (2016) statik yükler altındaki yarı rijit kolon-kiriş birleşimlerine sahip düzlem çelik çerçevelerin analizini gerçekleştirmişlerdir. Çerçevelerdeki plastik mafsallaşmanın bölgesel olduğunu varsayarak doğrusal olmayan denge denklemlerinin çözümünde Newton-Raphson iteratif yöntemini kullanmışlardır. İteratif çözüm adımlarında kullanılan yük faktörünün belirlenmesine ilişkin bir öneride bulunmuşlardır. Doan-Ngoc ve diğ. (2016) düzlem çelik çerçevelerde ikinci mertbe etkilerini de dikkate alan plastik mafsallı analizi yapabilen Matlab esaslı bir program geliştirmişlerdir. İkinci mertbe etkilerini, yedinci derece polinom fonksiyonu kullanarak çerçeve rijitlik matrisindeki formülasyona eklemişlerdir.

Hoang ve diğ. (2015) plastik mafsallı, ikinci mertbe etkileri, malzeme ve taşıyıcı eleman modellemesi gibi konularda genel bilgiler vererek çeşitli üç boyutlu çelik yapıların doğrusal olmayan analiz yöntemlerini kullanarak çözümlemeler yapmışlardır.

Torkamani ve diğ. (1997) sonlu elemanlar yöntemiyle ikinci mertbe elastik düzlem çerçeve analizi yapmışlardır. Çalışmada geometri değişimlerini dikkate alarak ikinci mertbe etkilerinin çözümünü yapabilen bir prosedür sunulmuştur. Prosedür algoritmadan oluşmakta olup C/C++ programlama dilinde programlanmıştır. Prosedür ile oluşturulan algoritmanın yapı sistemleri için kullanılan birinci ve ikinci mertbe analizleri arasındaki farkın anlaşılması noktasında yararlı olabileceği belirtilmiştir.

Kural ve diğ. (2011) doğrusal analize göre boyutlandırılan farklı formlardaki merkezi çelik çaprazlı çok katlı çelik yapılar üzerinde geometri bakımından doğrusal olmayan davranışları incelemişlerdir. Merkezi çelik çaprazla teşkil edilmiş çelik binalardaki ikinci mertbe etkilerin, moment aktaran çerçeve sistemine göre daha küçük mertbede olduğu tespit edilmiştir.

Kural ve diğ. (2012) dört katlı beş açıklığa sahip çelik yapı sisteminin artımsal ve pratik yöntemler kullanılarak ikinci mertbe analizini yapmışlardır. Çalışma ile söz konusu yöntemlerden elde edilen kat yatay yer değiştirmeleri ve eleman uç momentleri, göz önüne alınan referans çalışma sonuçları ile birlikte incelenmiştir. Hesap yöntemlerinin birbirlerine göre performansları değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan artımsal ve pratik ikinci mertbe analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçların referans çalışma sonuçları ile uyumlu ve yeterli hassasiyette olduğu tespit edilmiştir.

Seçer (2007) ikinci mertbe etkilerini kapsayan birçok geometrik nonlineer analiz yöntemiyle farklı kolon-kiriş birleşim tiplerine sahip altı katlı tek açıklıklı düzlem çelik çerçeveyi incelemiştir.

2. GENEL BİLGİLER

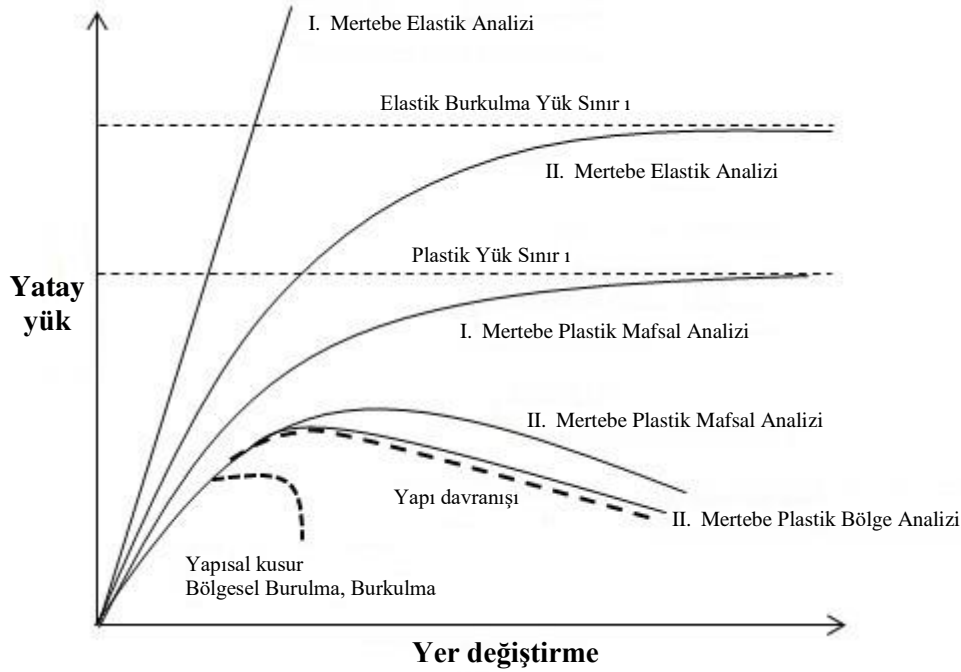
Gevrek malzemeler, yatay yükler altında pratikte elastik ötesi dayanım gösteremezler. Ancak sünek malzemeler, elastik ötesi dayanım gösterirler. Artan yatay yükler karşısında yapı sistemleri elastik davranışın limitine gelerek elastik ötesi davranış göstermeye başlarlar. Yapı sistemini oluşturan taşıyıcılar, gevrek malzemedeki yapılmışsa elastik ötesi davranış ile yapısal olarak ağır hasar alırlar. Bu nedenle yapı sistemini oluşturan taşıyıcıların sünek davranış

göstermesi istenir. Yapısal çeliğin yatay yükler etkisi altındaki davranışının da sünek olduğu bilinmektedir.

Düşey taşıyıcı olan kolonlar, yatay yük etkisi altındaki yapının hareketiyle birlikte yer değiştirir. Yer değiştirmeler, sünek yapı sistemlerinde kabul edilebilir seviyelerde kalabilmekte ve yapısal hasar kontrol edilebilmektedir. İkinci mertbe etkilerinin yapısal tasarımda dikkate alınabilmesi için yapı sistemini oluşturan taşıyıcıların sünek olması gerekmektedir. Yapısal çeliğin sünek davranışı, ikinci mertbe etkileri altında plastik analize olanak tanımaktadır.

2.1. Yapı Analiz Türleri

Yapılar, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz türleri kullanılarak tasarlanırlar. Tasarımda izlenecek yol, yapının niteliklerine göre değişmektedir. Tek katlı endüstri tipi çelik yapının tasarımında doğrusal analiz kullanılırken çok katlı çelik bir binanın tasarımında doğrusal olmayan analiz kullanılabilir.



Şekil 1:
Analiz türleri (Chan ve diğ., 2000)

Yapıda stabiliteden veya taşıyıcı elemanlardaki kusurdan kaynaklı bir ön hasar mevcutsa artan yatay yükler altında yapının gerçek davranışını göstermesi beklenemez. Yapısal çelik malzemenin ve bu malzeme ile inşa edilen yapının davranışı doğrusal değildir. Malzeme davranışı ve geometri değişimleri hesaba katıldıkça yapı analizi karmaşıklaşmakta ve gerçek yapı davranışına yakınsaklık artmaktadır. Şekil 1 ile yapı davranışıyla analiz türleri arasındaki ilişki gösterilmeye çalışılmıştır.

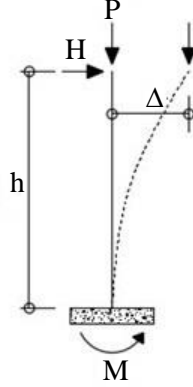
2.2. I. ve II. Mertbe Teorileri

Yapı sistemlerinin yatay yükler altında doğrusal davranış sergilememesinin iki önemli nedeni vardır. Bunlardan ilki malzemenin doğrusal davranmaması, ikincisi ise geometrinin değişim göstermesi olarak sıralanır. Yapı malzemesinin doğrusal elastik olmamasıyla gerilme-

şekil değiştirme bağıntıları ve geometri değişimleri nedeniyle de yapı sisteminin denge denklemleri doğrusal değildir (Çakıroğlu ve diğ., 1980).

Yatay yük etkisi ile yapı sistemlerinin yapmış olduğu yer değiştirmeler, yapının geometrisini değiştirmektedir. Geometri değişimlerinin yapı denge denklemlerine etkisinin göz önüne alınmaması I. Mertebe, alınması ise II. Mertebe teorisi olarak adlandırılır.

I. ve II. Mertebe teorileri arasındaki fark, alt noktasında ankastre mesnetli, üst noktasında düşey P ve yatay H yükü uygulanmış h boyundaki bir kolon üzerinde Şekil 2 ile gösterilmiştir. Δ , kolona H yükü uygulandığında kolon üst ucunda oluşacak yer değiştirme miktarını, M ise ankastre mesnette oluşacak moment değerini simgelemektedir.



Şekil 2:

I. ve II. Mertebe teorilerinin karşılaştırılması (Çakıroğlu ve diğ., 1980)

Kolon alt ucundaki M değeri, Δ miktarı dikkate alınmaksızın hesaplanırsa hesaplamada I. mertebe teorisi geçerli olur ve M değeri, Denklem 1 ile elde edilir.

$$M = H \times h \quad (1)$$

Kolon alt ucundaki M değeri, Δ miktarı dikkate alınarak hesaplanırsa hesaplamada II. mertebe teorisi geçerli olur ve M değeri, Denklem 2 ile elde edilir.

$$M = H \times h + P \times \Delta \quad (2)$$

2.3. Plastik Mafsal Analizi

Deprem yer hareketi sırasında hem yapısal hem de yapısal olmayan hasarlar, yanal yer değiştirmelerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle performans esaslı depreme dayanıklı yapı tasarımında yanal yer değiştirmelerin tahmin edilmesi büyük önem arz etmektedir (Moghaddam ve diğ., 2006).

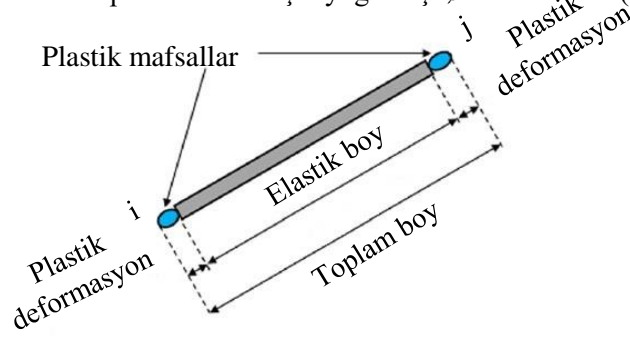
Plastik mafsal analizi, yatay yüklere maruz kalan yapı sistemlerindeki deformasyonların tahmin edilmesinde kullanılan basitleştirilmiş doğrusal olmayan statik hesap yöntemidir. Doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemine oranla daha az hesaplama gerektirir ve hesaplamada ivme-zaman değer çiftleri kullanılmaz. Ancak statik olmasından dolayı yapı sistemleri üzerindeki dinamik etki, yanlış tahmin edilebilir.

Yatay yük etkisiyle kolon gibi taşıyıcı elemanlarda yapı malzemesinin tipine göre gevrek ya da sünek kırılma meydana gelebilir. Eğilme momentindeki artış ile gerçekleşecek olan kırılma sünek karakterlidir. Çelik kolon kesitindeki kırılma türünün de sünek olması kuvvetle muhtemel olmaktadır. Bir kesit, plastik moment (M_p) değerine kadar eğilme momenti taşıyabilir. Kesitteki

eğilme momenti M_p değerine eşit olunca o kesitte bir plastik mafsal oluşur (Çakıroğlu ve diğ., 1980).

Plastik mafsallar, belirli bir kapasiteye kadar eğilme momenti taşıyıp kapasitelerini aşan değerlerde kesitin serbestçe dönmesine izin veren noktalar olarak tanımlanabilir. Plastik mafsaldaki plastik dönme değeri maksimum değere ulaşıncaya kadar kesit taşıyıcı özelliğini kaybeder.

Plastik mafsal kabulüne göre yapılan doğrusal olmayan statik analizde eleman i ve j uç noktalarında plastik deformasyon oluştuğu, ara bölgenin ise elastik davrandığı varsayımı yapılmaktadır. Şekil 3 ile çubuk eleman üzerinde i ve j uç noktalarındaki plastik mafsallar gösterilmiştir. Bu noktalarda plastik davranışın yoğunlaştığı kabul edilir (Hoang ve diğ., 2015).



Şekil 3:

Plastik mafsal gösterimi (Hoang ve diğ., 2015)

Plastik mafsal analizinde yapıya düşey yükler etkiltilerek hesap yapılır. Böylece yapıyı oluşturan kesitlerde gerilme değerleri artık sifıra eşit değildir. Düşey yük çözümlemesinin ardından yapıya belli bir yatay yük şablonu ile artan yükleme yapılır. Artan yatay yükler altında yapıyı oluşturan elemanlardaki eğilme moment değerleri kontrol edilir. Eğilme moment değeri, M_p değerine eşit olan noktada plastik mafsal oluştuğu varsayılır. Her plastik mafsal oluşumuyla yatay yükleme yenilenerek yapının yatay yük taşıma kapasitesi, performans eğrisi ile belirlenmeye çalışılır.

Performans eğrisi, taban kesme kuvveti – çatı yer değiştirme değer çiftlerinin oluşturduğu eğri olarak adlandırılır. Eğri, elastik limit yük seviyesine kadar doğrusaldır. Elastik limit sonrası doğrusallığını kaybeder.

2.4. Yönetmeliklerimizde İkinci Mertebe Etkisi

Ülkemizde çelik yapıların tasarımı, genel itibariyle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYDE) çerçevesinde yapılmaktadır. Her iki yönetmelikte de ikinci mertebe etkilerine değinilmiştir.

TBDY (2018) ile yapılarda görel kat ötelemelerinin sınırlı kalması istenmektedir. Bunun yanında ikinci mertebe etkilerinin hangi koşullarda dikkate alınacağı ve yapıların bitişik nizam olması durumunda deprem derzi miktarının ne olacağı konularında bir takım hesaplamalar içermektedir. İkinci mertebe etkilerinin dikkate alınıp alınmayacağına dair TBDY (2018), (X) deprem doğrultusu için ikinci mertebe gösterge değerinin Denklem 3 ile hesaplanmasını istemektedir.

$$\theta_{II,i}^{(X)} = \frac{(\Delta_i^{(X)})_{ort} \sum_{k=i}^N W_k}{V_i^{(X)} h_i} \quad (3)$$

$(\Delta_i^{(X)})_{ort}$ i. kattaki kolonlarda (X) deprem doğrultusunda hesaplanan azaltılmış görelî kat ötelemelerinin kat içindeki ortalama değeri, N bodrum kat üstündeki toplam kat sayısı, W_k k. katın toplam ağırlığı, $V_i^{(X)}$ (X) deprem doğrultusunda i. kattaki azaltılmış kat kesme kuvveti, h_i i. katın yüksekliği olarak adlandırılmıştır.

$$\theta_{II,max}^{(X)} \leq 0,12 \frac{D}{C_h R} \quad (4)$$

Tüm katlar için hesaplanan $\theta_{II,i}^{(X)}$ lerin maksimum değeri, Denklem 4 ile hesaplanan sınır değerden küçük veya eşit ise ikinci mertbe etkilerinin tasarıma esas iç kuvvetlerin hesabında dikkate alınması gerekli değildir. D dayanım fazlalığı katsayısı, C_h İkinci mertbe hesabında kullanılan ampirik katsayı, R Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı olarak adlandırılmıştır.

ÇYTHYDE (2018), ikinci mertbe teorisinin dayandığı esasları açıklamıştır. İkinci mertbe analizi için yaklaşık bir yöntem önermiştir.

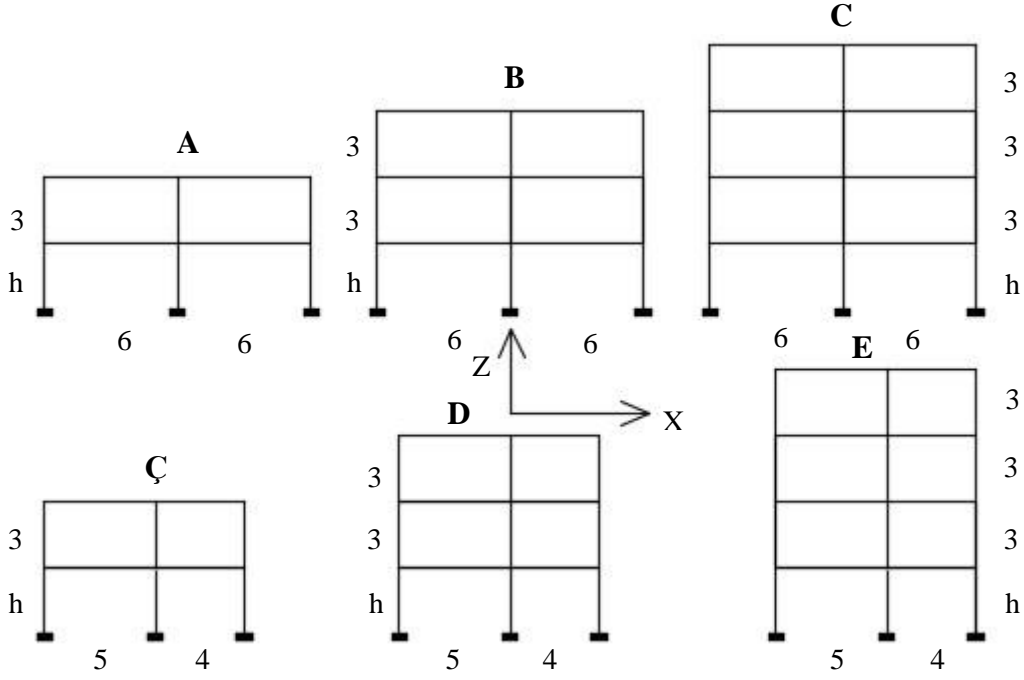
Ayrıca TBDY (2018) öncesinde Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) yürürlükteydi. DBYBHY (2007) de göz önüne alınan deprem doğrultusunda her bir katta ikinci mertbe gösterge değeri Θ_i 'nin Denklem 5 ile verilen koşulu sağlaması durumunda, ikinci mertbe etkilerinin yürürlükteki betonarme ve çelik yapı yönetmeliklerine göre değerlendirileceği ifade edilmiştir.

$$\theta_i = \frac{(\Delta_i)_{ort} \sum_{j=i}^N W_j}{V_i h_i} \leq 0,12 \quad (5)$$

İkinci mertbe etkilerinin dikkate alınmasına ilişkin sınır değer, DBYBHY (2007) de 0,12 iken bu değer, TBDY (2018) de Denklem 4 ile hesaplanmaktadır.

3. NÜMERİK ÇALIŞMA

Analizlerde yapısal analiz ve tasarım yapabilen Sap 2000 bilgisayar programı kullanılmıştır. Program, sonlu eleman yöntemini kullanmaktadır. Çalışmada altı adet düzlem çelik çerçeve ele alınmıştır. Çerçevelere ilişkin görseller, Şekil 4 ile verilmiştir. (h) zemin kat yükseklik parametresi olup 3m, 6m ve 9m, normal kat yüksekliği ise 3m olarak seçilmiştir.



Şekil 4:
Düzlem çelik çerçeve gösterimi (ölçüler: m)

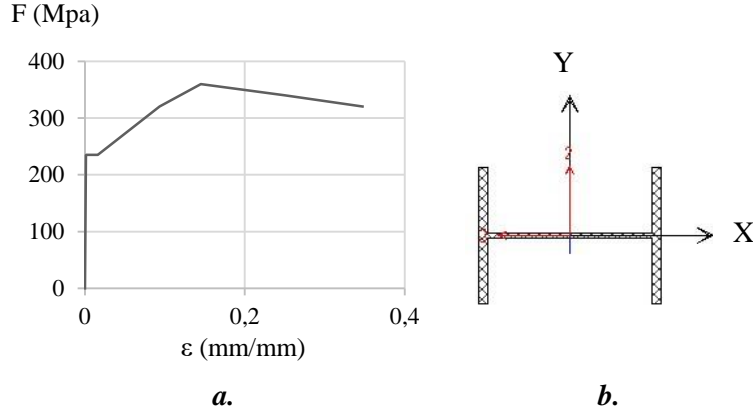
3.1. Yöntem

Analizde serbestlik dereceleri, (X) ve (Z) doğrultularında yer değiştirme (Y) doğrultusunda dönme olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece analiz iki boyuta indirgenmiştir. Çerçevelerin zemine ankastre mesnetlendiği kabul edilmiştir.

Yapısal çelik malzeme olarak S235 çelik sınıfı seçilmiştir. Çeliğin akma gerilmesi, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri, ÇYTHYDE (2018)' den, beklenen malzeme dayanımı katsayısı, TBDY (2018)' den alınmıştır. Gerilme (F) – şekil değiştirme (ϵ) değer çiftlerinin hesabında Yun ve diğ. (2017)' de yer alan bağıntılardan yararlanılmıştır.

Performans eğrilerinin elde edilebilmesi için çerçevelerin düşey yükler altında mafsallaşmaması gerekmektedir. Çerçeveler, HEA400 kesitiyle oluşturulmuştur. Çerçeveyi oluşturan kesit, ÇYTHYDE (2018)' nin Bölüm 8' ine göre eksenel basınç kuvveti etkisi altında Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yaklaşımına göre tasarlanmıştır. Tasarım, düşey yüklerin en elverişsizine sahip C çerçevesinde $h = 9\text{m}$ durumu için yapılmıştır.

Şekil 5 (a) ile çelik malzemenin F – ϵ grafiği, Şekil 5 (b) ile analizlerdeki (X) doğrultusuna göre kolon kesitinin aks takımı gösterilmiştir.

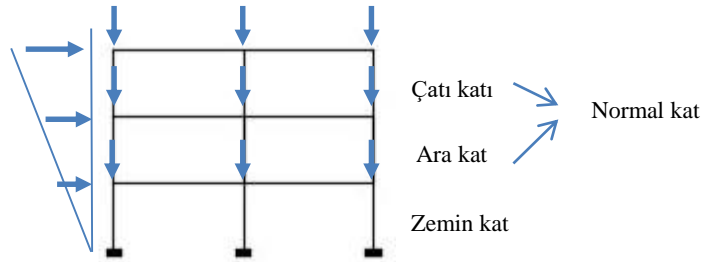


Şekil 5:

a. S235 yapısal çeliğinin gerilme-şekil değiştirme grafiği, b. Kolon aks takımı

Çerçevelerde kolon-kiriş birleşim düğüm noktalarına noktasal düşey yükleme yapılmıştır. Düşey yükler, açıklık mesafeleriyle orantılı olacak şekilde seçilmiştir. A, B ve C çerçevelerinin zemin ve ara katlarındaki sol ve sağ aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 90 kN, çatı katlarındaki sol ve sağ aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 45 kN, zemin ve ara katlarındaki orta aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 180 kN, çatı katlarındaki orta aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 90 kN yük tanımlanmıştır.

Ç, D ve E çerçevelerinin zemin ve ara katlarındaki sol aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 75 kN, zemin ve ara katlarındaki sağ aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 60 kN, çatı katlarındaki sol aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 37,5 kN çatı katlarındaki sağ aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 30 kN, zemin ve ara katlarındaki orta aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 135 kN, çatı katlarındaki orta aks düğüm noktalarına (-Z) doğrultusunda 67,5 kN yük tanımlanmıştır. Düşey yükleme yapılan noktalar, Şekil 6 ile gösterilmiştir.



Şekil 6:

Katlara etkiyen yükler

Yatay yükler, yine Şekil 6 ile gösterilen düğüm noktalarına uygulanmıştır. Her kata etkiyen yük, kat kütleleriyle orantılıdır. İki katlı çerçevenin zemin kat seviyesine 1 birim, çatı katı seviyesine 1,5 birim; üç katlı çerçevenin zemin kat seviyesine 1 birim, ara kat seviyesine 2 birim, çatı katı seviyesine 2,5 birim; dört katlı çerçevenin zemin kat seviyesine 1 birim, ara kat seviyelerine sırasıyla 2 birim, 3 birim, çatı katı seviyesine 3,5 birim yük etkilmiştir. Böylece yatay yük vektörü kat kütleleriyle orantılı ve yaklaşık üçgen formudur.

ÇYTHYDE (2018) de plastik mafsal, doğrusal elastik olmayan şekil değiştirmelerin yığıldığı bölge olarak tanımlanmıştır. Malzemenin doğrusal olmayan davranışının analizde göz önüne alınabilmesi için çerçeve elemanlarına plastik mafsal tanımı yapılmalıdır. Çerçeveleri oluşturan kolon-kiriş eleman uç noktalarında plastik mafsal oluşacağı kabul edilmiş ve bu noktalara plastik mafsal tanımı yapılmıştır.

Plastik mafsallar için FEMA-356 (2000) da bulunan Tablo 5-6' da yer alan doğrusal olmayan prosedür için kullanılan mafsal model kriterlerinden yararlanılmıştır.

3.2. Analiz

Çerçevelerin hem I. hem de II. Mertebe analizleri için düşey ve yatay yük koşullarında iki farklı analiz durumu tanımlanmıştır. Tablo 1 ile analiz parametrelerine yer verilmiştir.

Tablo 1' deki verilere göre düşey yük analizi öncesinde çerçeve elemanlarında gerilme sıfır olduğundan analiz başlangıç koşulu gerilmesizdir. Düşey analiz yapıldıktan sonra elemanlarda gerilme sıfır olmadığından yatay yük için başlangıç koşulu düşey yükleme sonrasında elde edilen kesit tesirleridir. Malzeme ve hem malzeme hem de geometri değişimleri dikkate alındığından analiz tipi, doğrusal olmayan statik analizdir.

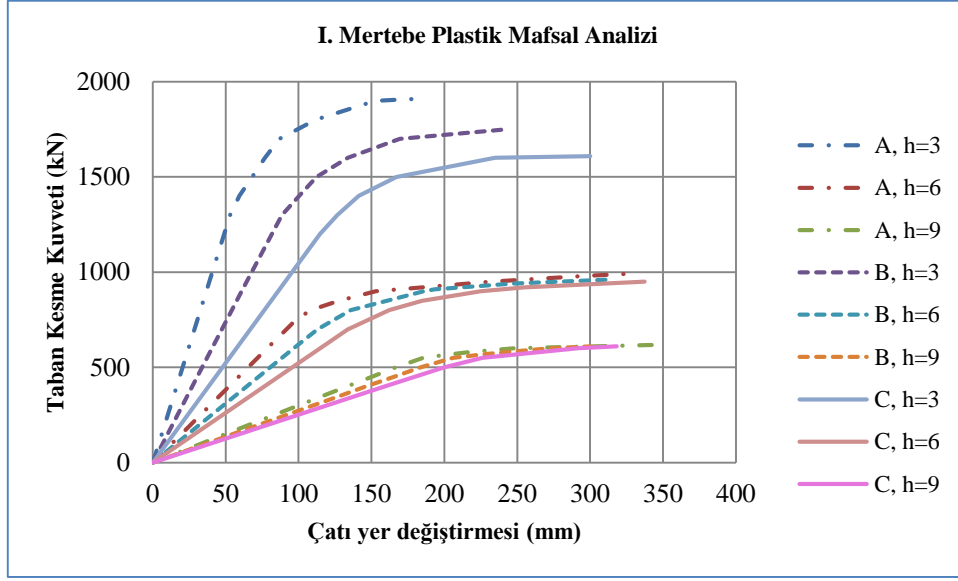
I. Mertebe plastik mafsal analizinde geometri değişimleri dikkate alınmamakta ancak II. Mertebe plastik mafsal analizinde geometri değişimleri dikkate alınmaktadır. Tüm analiz durumları için malzeme davranışı doğrusal değildir.

Tablo 1. Analiz parametreleri

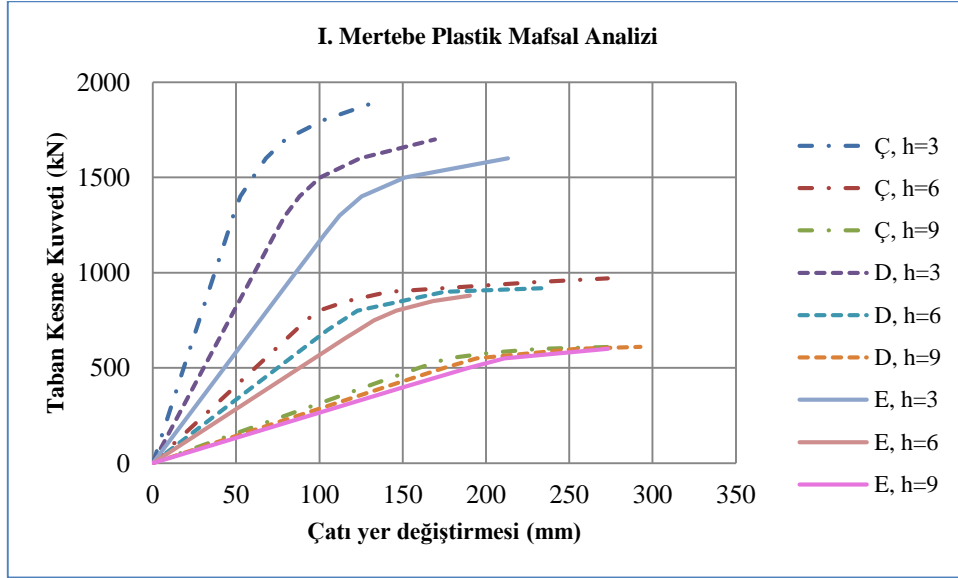
| Analiz parametreleri | I. Mertebe | | II. Mertebe | |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Düşey yük | Yatay yük | Düşey yük | Yatay yük |
| Başlangıç koşulları | Gerilmesiz | Düşey yükleme sonrası | Gerilmesiz | Düşey yükleme sonrası |
| Analiz tipi | Doğrusal olmayan statik | Doğrusal olmayan statik | Doğrusal olmayan statik | Doğrusal olmayan statik |
| Geometri değişimi | Yok | Yok | Var | Var |
| Malzeme davranışı | Doğrusal olmayan | Doğrusal olmayan | Doğrusal olmayan | Doğrusal olmayan |
| Uygulanan yük | Düşey | Yatay | Düşey | Yatay |
| Yük uygulama kontrolü | Kuvvet | Kuvvet | Kuvvet | Kuvvet |
| İzlenen yer değiştirme doğrultusu ve kat bilgisi | (X) Çatı katı | (X) Çatı katı | (X) Çatı katı | (X) Çatı katı |

Analizlerde hem düşey hem de yatay doğrultularda yükleme yapılmıştır. Yük uygulama kontrolü deformasyon esaslı olmayıp kuvvet esaslıdır. Yatay yük artımı, program tarafından yapılmayıp kullanıcı tarafından yapılmıştır. İlk olarak düşey yükleme durumu için sonra yatay yükleme durumu için analiz yapıp yatay yük miktarı her analiz sonrası artırılmıştır. Böylelikle çerçevelerdeki mafsallaşmanın artması sağlanmıştır. Yatay yük miktarı, çerçeve göçme öncesi durumu oluşuncaya kadar artırılmıştır.

Yatay yük durumu için yapılan analiz ile elde edilen çatı yer değiştirme ve taban kesme kuvveti değer çiftleriyle performans eğrileri sadece (X) doğrultusu için oluşturulmuştur. Analizler sonrasında elde edilen performans eğrileri Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10 ile gösterilmiştir.

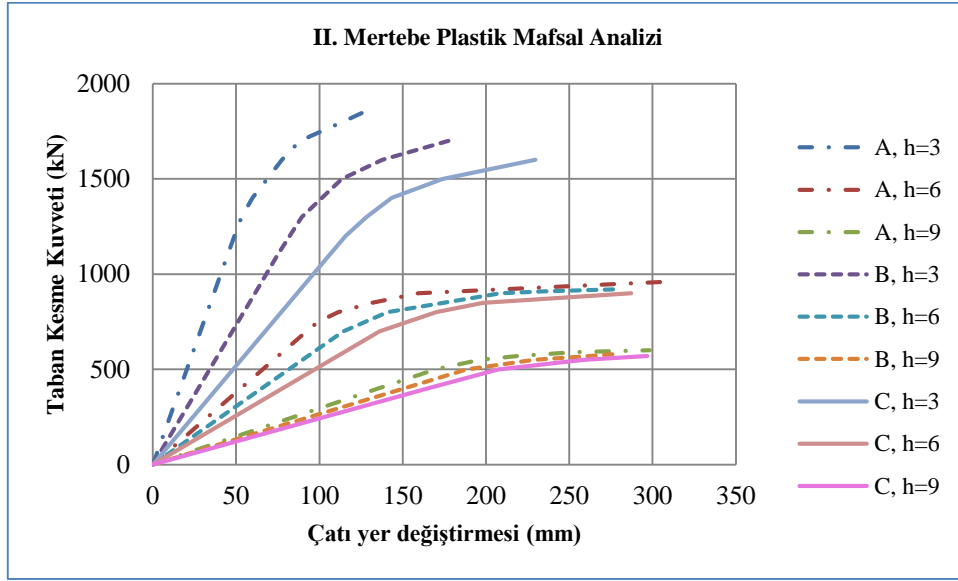


Şekil 7:
A, B ve C çerçevelerinin I. mertebe performans eğrileri

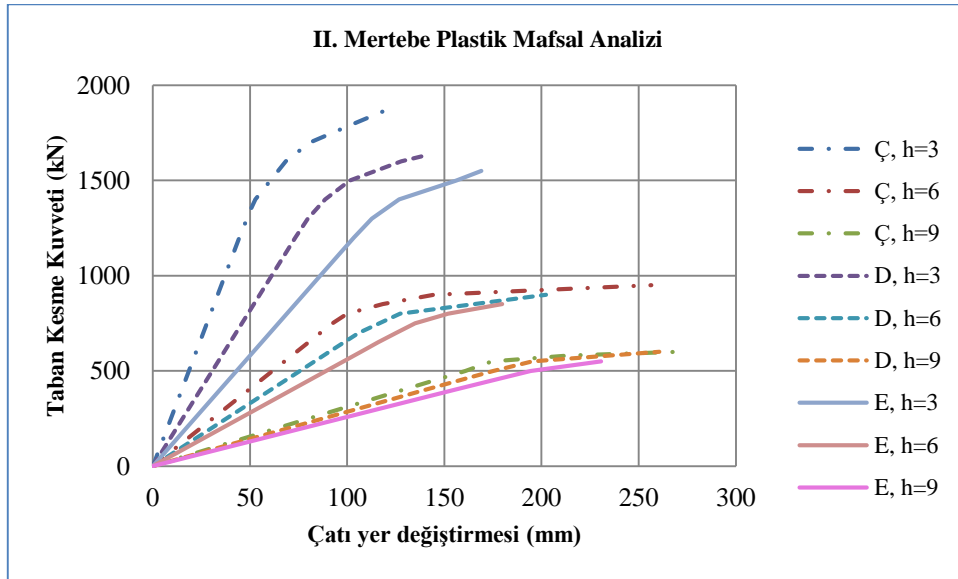


Şekil 8:
Ç, D ve E çerçevelerinin I. mertebe performans eğrileri

Şekil 7 ve Şekil 8 ile gösterimi yapılan eğriler, I. Mertebe Plastik Mafsal Analizi ile elde edilmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10 ile gösterimi yapılan eğriler, II. Mertebe Plastik Mafsal Analizi ile elde edilmiştir.



Şekil 9:
A, B ve C çerçeveslerinin II. mertebe performans eğrileri



Şekil 10:
Ç, D ve E çerçeveslerinin II. mertebe performans eğrileri

I. ve II. Mertebe Plastik Mafsal Analizleri (PMA) sonucunda elde edilen çatı yer değıştirme değerleri, bu değerler arasındaki yüzde fark, Denklem 3 ile hesaplanmış ikinci mertebe gösterge değerleri ve Denklem 4 ile hesaplanmış ikinci mertebe gösterge sınır değeri, Tablo 2' de yer almaktadır. Denklem 4' de yer alan D , C_h ve R değerleri sırasıyla 3 – 1 ve 8 olarak TBDY (2018)' den alınmıştır. İkinci mertebe gösterge değerinin hesabında TBDY (2018) de yer alan Eş Değer Deprem Yüğü Yöntemi ve verileri kullanılmıştır.

Hesaplamalarda bina önem katsayısı (I) 1, yerel zemin sınıfı ZD ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi düzeyi dikkate alınmıştır. Enlem: 38,61000 ve Boylam: 27,38000 kabul edildiğinden yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (T_B) 0,479 saniye ve kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{Ds}) 1,201 olarak hesaplanmıştır. Hesaplama düşey ve yatay yük bileşenlerinden oluşan tek bir kombinasyon kullanılmıştır.

Tablo 2 de yer alan II. mertebe plastik mafsal analizi ile elde edilen çatı yerdeğiştirme değerleri maksimum değerlerdir. I. mertebe plastik mafsal analizi ile elde edilen çatı yerdeğiştirme değerleri, II. mertebe için maksimum çatı yerdeğiştirme değerlerine karşılık gelen taban kesme kuvveti ile hesaplanan değerlerdir.

Doğrusal olmayan statik analiz ile yapılan incelemede Şekil 1' de dikkate alındığında I. mertebe plastik mafsal analizi ile elde edilen maksimum çatı yerdeğiştirmesi, II. mertebe plastik mafsal analizine oranla daha fazla olmaktadır. II. mertebe plastik mafsal analizi, gerçek yapı davranışına daha yakınsak olduğundan değerlendirmede II. mertebe analizinden elde edilen maksimum çatı yerdeğiştirme değerleri esas alınmıştır.

Tablo 2. Analiz sonuçları 1

| Çerçeve | Çatı yerdeğiştirmesi (mm) I. PMA | Maks. Çatı yerdeğiştirmesi (mm) II. PMA | %Fark | Fark \leq %5 | $\theta_{II,max}^{(X)}$ | TBDY 2018 sınır değeri | $\theta_{II,max}^{(X)} \leq 0,045$ |
|---------|-------------------------------------|--|-------|----------------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|
| A, h=3 | 124,98 | 126,40 | 1,14 | √ | 0,0034 | 0,045 | √ |
| A, h=6 | 275,22 | 312,21 | 13,44 | - | 0,0092 | 0,045 | √ |
| A, h=9 | 248,15 | 298,37 | 20,24 | - | 0,0175 | 0,045 | √ |
| B, h=3 | 169,37 | 177,47 | 4,78 | √ | 0,0101 | 0,045 | √ |
| B, h=6 | 203,31 | 276,61 | 36,05 | - | 0,0155 | 0,045 | √ |
| B, h=9 | 241,03 | 277,10 | 14,96 | - | 0,0298 | 0,045 | √ |
| C, h=3 | 228,13 | 229,68 | 0,68 | √ | 0,0104 | 0,045 | √ |
| C, h=6 | 224,87 | 287,21 | 27,72 | - | 0,0159 | 0,045 | √ |
| C, h=9 | 248,12 | 296,78 | 19,61 | - | 0,0302 | 0,045 | √ |
| Ç, h=3 | 121,82 | 122,52 | 0,57 | √ | 0,0024 | 0,045 | √ |
| Ç, h=6 | 228,96 | 256,55 | 12,05 | - | 0,0064 | 0,045 | √ |
| Ç, h=9 | 233,22 | 270,51 | 15,99 | - | 0,0127 | 0,045 | √ |
| D, h=3 | 135,05 | 140,01 | 3,67 | √ | 0,0069 | 0,045 | √ |
| D, h=6 | 175,04 | 202,26 | 15,55 | - | 0,0111 | 0,045 | √ |
| D, h=9 | 204,81 | 260,66 | 27,27 | - | 0,0215 | 0,045 | √ |
| E, h=3 | 162,05 | 169,01 | 4,29 | √ | 0,0064 | 0,045 | √ |
| E, h=6 | 168,22 | 179,81 | 6,89 | - | 0,0157 | 0,045 | √ |
| E, h=9 | 211,13 | 230,59 | 9,22 | - | 0,0304 | 0,045 | √ |

Tablo 2 de yer alan yüzde fark hesabı için Denklem 6 kullanılmıştır. Yüzde farkın 5' ten küçük olduğu çerçevelerde çatı yerdeğiştirme miktarı ile taban kesme kuvveti arasındaki farkların çok az olduğu ve yatay yükler altında performanslarının benzer olduğu kabul edilmiştir.

$$\text{Yüzde fark} = [(\text{Sütun 3} / \text{Sütun 2}) \times 100] - 100 \quad (6)$$

İki analiz tipi ile elde edilen maksimum çatı yerdeğiştirme değerleri ile maksimum taban kesme kuvvetleri ve aralarındaki farklar Tablo 3 ile gösterilmiştir. Tablo 3 de yer alan yüzde farklar da Denklem 6 ile benzer şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 3. Analiz sonuçları 2

| Çerçeve | Maks. Çatı yer değiştirmesi (mm) | Maks. Çatı yer değiştirmesi (mm) | % Fark | Maks. Taban Kesme Kuvveti (kN) | Maks. Taban Kesme Kuvveti (kN) | % Fark |
|---------|--|--|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| | I. PMA | II. PMA | | I.PMA | II. PMA | |
| A, h=3 | 181,81 | 126,40 | -30,48 | 1.910 | 1.850 | -3,14 |
| A, h=6 | 323,86 | 312,21 | -3,60 | 990 | 970 | -2,02 |
| A, h=9 | 350,01 | 298,37 | -14,75 | 620 | 600 | -3,23 |
| B, h=3 | 243,02 | 177,47 | -26,97 | 1.750 | 1.700 | -2,86 |
| B, h=6 | 310,97 | 276,61 | -11,05 | 960 | 920 | -4,17 |
| B, h=9 | 301,03 | 277,10 | -7,95 | 610 | 580 | -4,92 |
| C, h=3 | 300,02 | 229,68 | -23,45 | 1.610 | 1600 | -0,62 |
| C, h=6 | 337,43 | 287,21 | -14,88 | 950 | 900 | -5,26 |
| C, h=9 | 318,27 | 296,78 | -6,75 | 610 | 570 | -6,56 |
| Ç, h=3 | 135,02 | 122,52 | -9,26 | 1.900 | 1.880 | -1,05 |
| Ç, h=6 | 273,04 | 256,55 | -6,04 | 970 | 950 | -2,06 |
| Ç, h=9 | 276,21 | 270,51 | -2,06 | 610 | 600 | -1,64 |
| D, h=3 | 169,45 | 140,01 | -17,37 | 1.700 | 1.630 | -4,12 |
| D, h=6 | 238,00 | 202,26 | -15,02 | 920 | 900 | -2,17 |
| D, h=9 | 292,65 | 260,66 | -10,93 | 610 | 600 | -1,64 |
| E, h=3 | 213,14 | 169,01 | -20,70 | 1.600 | 1.550 | -3,13 |
| E, h=6 | 190,30 | 179,81 | -5,51 | 880 | 850 | -3,41 |
| E, h=9 | 273,26 | 230,59 | -15,62 | 600 | 550 | -8,33 |

4. SONUÇLAR

Çalışma ile düzlem çelik çerçevelerin zemin kat yüksekliği arttırılarak yapı performans eğrileri üzerinden ikinci merteye etkileri incelenmiştir. İki, üç ve dört katlı altı adet çerçeve ele alınmıştır. I. merteye plastik mafsalsal analizi ile malzemenin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmışken II. merteye plastik mafsalsal analizi ile hem malzemenin doğrusal olmayan davranışı hem de geometri değişimleri göz önünde bulundurulmuştur.

Yapılan literatür araştırmasıyla yatay yükler etkisi altındaki yapı davranışını tahmin etmede II. merteye plastik mafsalsal analizinin I. merteye oranla daha başarılı olduğu görülmüş olup II. merteye plastik mafsalsal analiz sonuçları esas alınmıştır.

I. merteye plastik mafsalsal analizi ile elde edilen performans eğrisinin değer çiftleri II. merteye plastik analizine oranla büyük olup (h) zemin kat yükseklik parametresi arttıkça aradaki farkın arttığı görülmüştür.

Düşey yük miktarı ve (h) arttıkça çerçevelerin taşıyabildiği taban kesme kuvveti azalmaktadır. (h)'ın artmasıyla çerçeveler sünek davranış göstermektedir ancak rijitlikleri kayda değer derecede azalmaktadır.

Tablo 3 de yer alan veriler incelendiğinde II. merteye PMA ile elde edilen taban kesme kuvveti değerleri I. merteye oranla daha küçük olup fark yüzde 0,62 ile 8,33 arasında değişmektedir. Benzer durum çatı yer değiştirme miktarları için de geçerlidir. Ancak yer değiştirme miktarlarındaki yüzde fark 2,06 ile 30,48 olarak hesaplanmıştır. Tüm çerçeveler için çatı yer değiştirme miktarları arasındaki farkın taban kesme kuvveti değerleri arasındaki farktan büyük olduğu belirlenmiştir.

DBYBHY (2007) ile belirlenen ikinci merteye gösterge sınır değeri 0,12 iken TBDY (2018) de sınır değeri Denklem 4 ile hesaplanmaktadır. Yeni deprem yönetmeliğiyle sınır değeri 0,12' den küçük olup sınır değerinde iyileştirme olduğu görülmüştür. Ancak yapılan bu iyileştirmenin

Tablo 2 deki verilerde dikkate alındığında (h) = 6m ve (h) = 9m durumları için yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Tablo 3 de yer alan veriler göz önüne alındığında ikinci mertebe etkilerinin artan yatay yükler altında çerçeve performansını tahmin etme noktasında büyük önem taşıdığı belirlenmiştir. Bunun yanında (h)' in normal kat yüksekliğine oranının iki ve ikiden büyük olması durumları için çerçeve performansının tahmininde ve yapı tasarımında ikinci mertebe etkilerinin mutlaka dikkate alınması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu, F. ve Çağlayan, Ö. (2008) *Çelik Yapılar*, 3. Baskı, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
2. Günaydın, A. ve Aydın, M.R. (2017) İkinci mertebe etkilerinin sistem serbest titreşim periyotlarına etkisi, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*.
3. Ashwini, M. and Sangeeta, S. (2020) Seismic performance of flat slab buildings considering P-delta effect, *Journal of Structural Engineering and Management*, 7(1), 1-16.
4. Walport, F., Gardner, L. and Nethercot, D.A. (2019) A method for the treatment of second order effects in plastically-designed steel frames, *Engineering Structures*, Imperial College, London, 200, doi:10.1016/j.engstruct.2019.109516
5. Tong, J.Z., Pan, W.H. and Pi, Y.L. (2019) Exact solutions for second-order effect of imperfect beams and frames based on matrix structural analysis, *Structures, Institution of Structural Engineers*, Elsevier, 23, 677-689. doi:10.1016/j.istruc.2019.12.001
6. Jain, T. and Patil, S.B. (2018) Optimum location of shear walls and visco-elastic dampers in R.C.C framed tall buildings considering second order effects, *Techno Societal 2018*, Springer, 1, 811-824.
7. Dezhkam, B. (2017) Investigating performance of plastic hinge in steel frames by knee barcing, *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 12(3), 431-445.
8. Nguyen, P-C. and Kim, S-E. (2016) Advanced analysis for planar steel frames with semi-rigid connections using plastic-zone method, *Steel and Composite Structures*, 21(5), 1121-1144, doi:10.12989/scs.2016.21.5.1121
9. Doan-Ngoc, T-N., Dang, X-L., Chu, Q-T., Balling, R.J. and Huu, C-N. (2016) Second-order plastic-hinge analysis of planar steel frames using corotational beam-column element, *Journal Of Constructional Steel Research*, 121, 413-426, doi:10.1016/j.jcsr.2016.03.016
10. Hoang, V-L., Dang, H-N., Jaspert, J-P. and Démonceau, J-F. (2015) An overview of the plastic-hinge analysis of 3D steel frames, *Asian Pasific Journal on Computational Engineering*, 2:4, doi:10.1186/s40540-015-0016-9
11. Torkamani, M.A., Sönmez, M. and Cao, J. (1997) Second-order elastic plane frame analysis using finite element method, *Journal of Structural Engineering*, 123, 1225- 1235, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:9(1225)
12. Kural, M.E. ve Zeybek, Ö. (2011) Merkezi çelik çaprazla teşkil edilmiş çok katlı çelik yapıların ikinci mertebe analizi, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Yıl: 10, Sayı: 20, 1- 14.
13. Kural, M.E., Zeybek, Ö. ve Seçer, M. (2012) Çelik yapı sistemlerinde ikinci mertebe analiz yöntemlerinin incelenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 75- 87.

14. Seçer, M. (2007) Investigation of practical geometric nonlinear analysis methods for semi rigid steel plane frames, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sayı: 13, 97-110.
15. Chan, S.L. and Chui, P.P.T. (2000) *Non-Linear Static And Cyclic Analysis of Steel Frames With Semi-Rigid Connections*, Elsevier Science.
16. Çakıroğlu, A. ve Özer, E. (1980) *Malzeme Ve Geometri Bakımından Lineer Olmayan Sistemler*, Cilt 1, Matbaa Teknisyenleri Basım Evi, İstanbul.
17. Moghaddam, H. and Hajirasouliha, I. (2006) An investigation on the accuracy of pushover analysis for estimating the seismic deformation of braced steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 64(4), 343-351, doi:10.1016/j.jcsr.2005.07.009
18. TBDY (2018), *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, İç İşleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
19. ÇYTHYDE (2018), *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
20. DBYBHY (2007), *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
21. Sap 2000 V.12, CSI Analysis Reference Manual. (2009), *Education Version*, Berkeley, California, USA.
22. Yun, X. and Gardner, L. (2017) Stress-strain curves for hot-rolled steels, *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 36- 46.
23. FEMA (2000), *Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buldings*, Prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, (Report No. FEMA-356), Washington, D.C.
24. EN 1993-1-1 (2005), *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, European Committee For Standardization.