

Betonarme Binaların Kritik Deprem Doğrultularının Belirlenmesinde Farklı Plan ve Enkesit Geometrisinin Etkisi

Umut HASGÜL^{1,*}, Erdal İRTEM¹

¹Balıkesir Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. İnşaat Müh. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir.

Özet

Bu çalışmada, deprem yüklerinin betonarme binaların plandaki asal eksenlerinin yanısıra ara doğrultulardan da etkimesi hali için, yapısal davranış taleplerinin oluşacak en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde farklı plan ve enkesit geometrisinin etkinliği doğrusal olmayan teori çerçevesinde araştırılmıştır. Bunun için, herhangi bir yapısal düzensizliği bulunmayan ve ortogonal akslara sahip olan 3 katlı dört betonarme binanın plandaki asal eksenlerinin yanısıra çok sayıda ara deprem doğrultusu için artımsal statik itme (pushover) analizleri yapılarak kapasite eğrileri ayrı ayrı elde edilmiştir. Daha sonra, ilgili deprem doğrultularının her biri için FEMA 440'daki Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi ile belirlenen performans noktaları esas alınarak, plastik kesitlerdeki (plastik mafsallardaki) plastik dönme taleplerinin ve binaların görelî kat ötelemesi taleplerinin deprem doğrultusu ile değişimi incelenmiş ve bu davranış taleplerinin en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultuları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığı altında, deprem yüklerinin doğrultu etkisi nedeniyle betonarme binaların plastik kesitlerindeki plastik dönme taleplerinin en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde kolon enkesitinin kare veya dikdörtgen olmasının etkili bir parametre olduğu, en elverişsiz görelî kat ötelemesi taleplerini veren kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde ise, plan geometrisinin kare veya dikdörtgen olmasının oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kritik deprem doğrultusu, doğrusal olmayan statik analiz, yerdeğiştirme katsayıları yöntemi, plastik dönme, görelî kat ötelemesi.

Effects of Different Plan and in Cross-Section Geometry in Determination of Critical Earthquake Directions on RC Buildings

Abstract

In this study, effects of different plan and cross-section in determination of critical earthquake directions corresponding to the most unfavorable values of structural response demands were investigated in nonlinear theory framework when the earthquake

* Umut HASGÜL, hasgul@balikesir.edu.tr.

loads act in both principal axis directions and interval directions different from the principal axes in plan. In the study, capacity curves for the different earthquake directions of four RC buildings that have orthogonal axes and have no structural irregularities were separately obtained by bi-directional pushover analyses. Then, the buildings were pushed statically to the performance points determined by using Displacement Coefficients Method in FEMA 440. After the nonlinear static analyses, variations of the response demands with the earthquake directions, and also the critical earthquake directions were determined for the considered each building. When the analysis results are evaluated, it is concluded that the different cross-section geometry (square or rectangular) is an effective parameter in determination of the critical directions corresponding to the most unfavorable column plastic rotation demands. It is also concluded that the different plan geometry is considerably effective in determination of the critical directions corresponding to the most unfavorable story drift demands.

Keywords: Critical earthquake direction, nonlinear static analysis, displacement coefficients method, plastic rotation, story drift.

1. Giriş

Binaların deprem etkisi altındaki sismik tasarımında can (yaşam) güvenliğini sağlayan hasar kontrolünü ana performans hedefi olarak öngören birçok yönetmelik ve standartta [1–5], deprem yer hareketinin binaların plandaki asal eksen doğrultularının yanısıra ara doğrultulardan da etkimesi halinde, sistem elemanlarında oluşacak en elverişsiz davranış büyüklüklerini (genellikle kesit tesirleri) belirleyebilmek amacıyla çeşitli birleştirme kuralları öngörülmektedir. Bu birleştirme kuralları gözönüne alınarak tasarlanan binaların, öngörülen performans hedeflerini asal doğrultularının yanısıra, ara deprem doğrultuları için de sağlaması gerekmektedir [6].

Deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularının yanısıra ara doğrultudan da etkimesini (doğrultu etkisini) gözönüne alan ve çoğunlukla *doğrusal- elastik* teoreminin esas alındığı literatürdeki çalışmalarda, deprem yer hareketinin bir veya her iki yatay bileşeninin aynı anda etkimesi sonucu elde edilen davranış büyüklükleri (genellikle kesit tesirleri), zaman tanım alanında analizlerden elde edilen sonuçlar referans alınarak karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda, deprem yüklerinin doğrultu etkisi nedeniyle sistem elemanlarında oluşacak en elverişsiz davranış büyüklüklerini tasarım aşamasında kontrol edebilmek amacıyla çeşitli birleştirme kuralları (%30, %40, SRSS, CQC3 birleştirme kuralı, vb.) önerilmiştir [6–12]. Birçok uluslararası yönetmelikte, köprü ve bina türü yapı sistemlerinin *doğrusal- elastik* tasarımı için bu birleştirme kurallarının bazıları öngörülmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır [1–5, 13, 14].

Binaların Performansa Dayalı Tasarımı ve Değerlendirmesi (PDTD) kavramını esas alan çok sayıda yönetmelik ve önstandart niteliğindeki belgede, öngörülen performans hedefine bağlı olarak belirlenen deprem tehlike seviyesi (veya seviyeleri) altında yapısal davranış taleplerinin belirlemede kullanılan doğrusal olmayan statik analizlerin, binanın karakteristik özellikleri gözönüne alınmaksızın plandaki asal eksen doğrultularında yapılması öngörülmektedir [1, 2, 4, 15–17]. Buna karşın, deprem yer hareketinin yatay bileşenlerine ait doğrultuların değişken olduğu bilinmektedir. Deprem etkisinin binanın plandaki asal eksen (X ve Y) doğrultularından etkime olasılığı ile herhangi bir ara doğrultudan etkimesi olasılığı aynıdır.

Binaların doğrusal olmayan değerlendirme analizlerinde yapılan bu yaklaşım, en elverişsiz yapısal davranış taleplerinin deprem yüklerinin binanın asal eksen (X ve Y) doğrultularından etkimesi halinde meydana geldiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Ancak, en elverişsiz yapısal davranış taleplerinin depremin binaların plandaki asal doğrultularından farklı ara bir doğrultudan da etkimesi halinde oluşabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, PDTD kavramı çerçevesinde binaların doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinde kullanılan artımsal statik itme (pushover) analizlerinde ve ayrıca, belirli bir deprem tehlike seviyesi altında pushover analizi esas alan değerlendirme yöntemleri ile bina performans düzeylerinin belirlenmesinde, deprem yüklerinin doğrultu etkisinin gözönüne alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır [18]. Bunun sonucu olarak, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularından farklı ara doğrultulardan da etkimesi hali için, öngörülen performans düzeylerinin değerlendirilmesinde etkin olan yapısal davranış taleplerinin (plastik şekildeğiştirme ve görelî kat ötelemesi talepleri) doğrusal olmayan teori çerçevesinde araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, deprem yüklerinin betonarme binaların plandaki asal eksenlerinin yanısıra ara doğrultulardan da etkimesi hali için, yapısal davranış taleplerinin (görelî kat ötelemesi ve plastik dönme talepleri) oluşacak en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde farklı *plan* ve *enkesit geometrisinin* etkinliği doğrusal olmayan teori çerçevesinde araştırılmıştır. Bunun için, plandaki her iki asal eksenine göre simetrik veya antisimetrik olan 3 katlı dört betonarme binanın plandaki asal eksenlerinin yanısıra çok sayıdaki ara deprem doğrultusu için artımsal statik itme (pushover) analizleri yapılarak kapasite eğrileri ayrı ayrı elde edilmiştir. Daha sonra, ilgili deprem doğrultularının her biri için FEMA 440'daki Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi ile belirlenen performans noktaları esas alınarak, plastik kesitlerdeki (plastik mafsallardaki) plastik dönme talepleri ve binaların görelî kat ötelemesi taleplerinin deprem doğrultusu ile değişimi incelenmiş ve bu davranış taleplerinin en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultuları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığı altında, deprem yüklerinin doğrultu etkisi nedeniyle betonarme binaların plastik kesitlerindeki plastik dönme talepleri ile görelî kat ötelemesi taleplerinin oluşacak en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde farklı *plan* ve *enkesit geometrisinin* etkinliği değerlendirilmiştir.

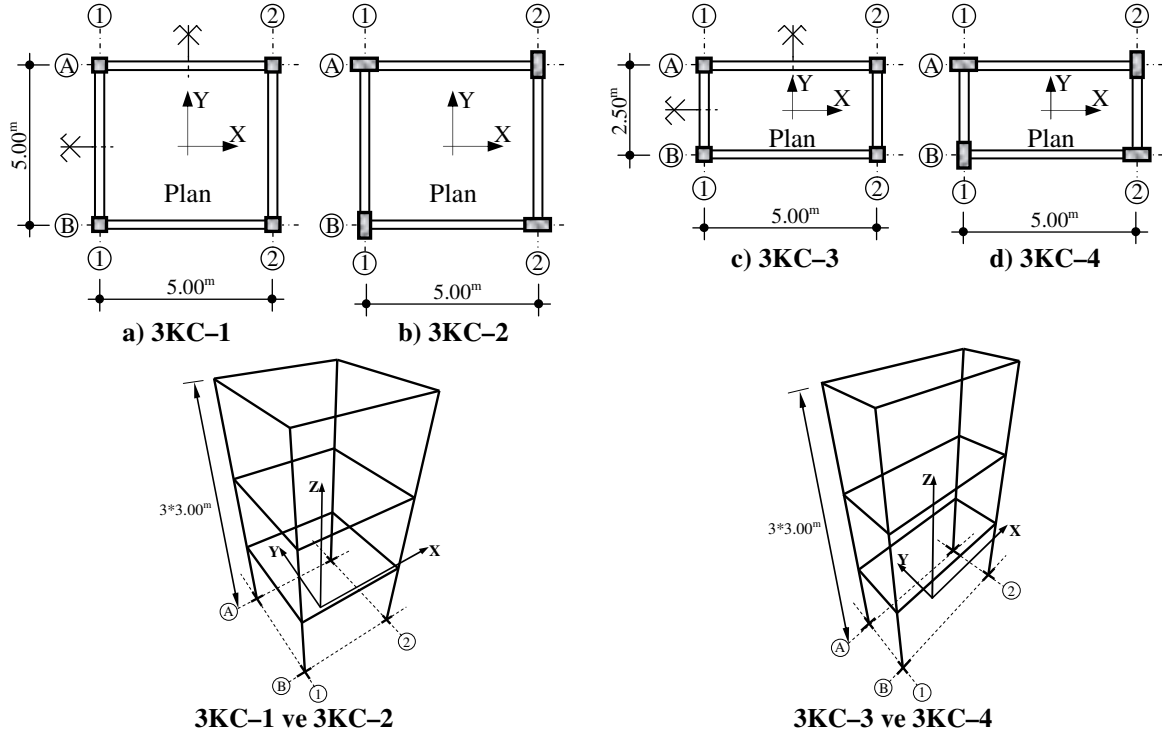
2. Betonarme binalar üzerinde sayısal incelemeler

2.1 Betonarme binaların özellikleri

Sayısal incelemeler kapsamında, betonarme binaların doğrusal olmayan statik analizlerinde deprem yüklerinin doğrultu etkisini araştırmak için, herhangi yapısal düzensizliği olmayan, ortogonal akslara sahip ve moment aktaran çerçevelerden oluşan 3 katlı dört betonarme bina üç boyutlu olarak incelemiştir. Plandaki her iki asal eksen doğrultusunda tek açıklıklı olan betonarme binaların özellikleri aşağıda verilmiştir [18].

- **3KC-[1-4]** : Üç (3) Katlı betonarme Çerçeve binalar.
 - **3KC-1** : Planı ve kolon enkesitleri *kare* olan bina, (Şekil 1-a),
 - **3KC-2** : Planı *kare*, kolon enkesitleri *dikdörtgen* olan bina (Şekil 1-b),
 - **3KC-3** : Planı *dikdörtgen*, kolon enkesitleri *kare* olan bina (Şekil 1-c),
 - **3KC-4** : Planı ve kolon enkesitleri *dikdörtgen* olan bina (Şekil 1-d),

İncelenen dört betonarme bina, TS 500 [19], TDY-2007 [2] ve yürürlükteki ilgili diğer Türk Standartlarına göre boyutlandırılmıştır. Planda ve düşeyde herhangi bir yapısal düzensizliği bulunmayan, her katta sonsuz rijit diyafram özelliği gösteren döşemelerin bulunduğu ve süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerden oluşan betonarme binaların kat planları ve üç boyutlu taşıyıcı sistemleri Şekil 1’de verilmiştir. Çalışmada ele alınan binaların boyutlandırılmasında kullanılan genel parametreler, giriş ve kolonların enkesit boyutları, donatıları, taşıma kapasiteleri ve ayrıca, binaların serbest titreşim analizinden elde edilen brüt ve etkin (çatlamış) enkesit rijitlikli birinci doğal titreşim periyotları Hasgül (2011)’de [18] verilmiştir.



Şekil 1. 3KC-[1-4] binaların planları ve üç boyutlu taşıyıcı sistemleri

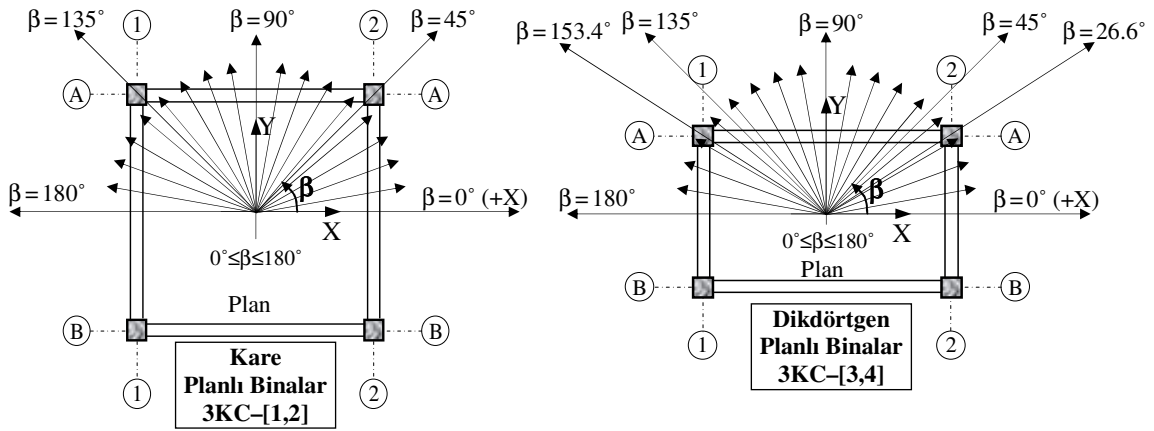
2.2 Gözönüne alınan deprem doğrultuları

Çalışmada incelenen betonarme binalar, plandaki her iki asal eksene göre *simetrik* veya *antisimetrik*dir. Bu nedenle, deprem yüklerinin $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ arasında etkimesi halinde, herhangi bir kolon plastik kesitinde elde edilen şekildeğiştirme talepleri ile bu kolonun plandaki asal eksenlere göre antisimetrik konumunda olan kolon plastik kesitinin $\beta = 180^\circ \sim 360^\circ$ arasındaki bölgede ve X-X eksenine göre antisimetriği olan β değerleri için elde edilen şekildeğiştirme talepleri eşittir. Ayrıca, deprem yüklerinin $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ arasında etkimesi halinde elde edilen kapasite eğrileri, yerdeğiştirme talepleri ve görelî kat ötelemesi talepleri ile $\beta = 180^\circ \sim 360^\circ$ arasındaki bölgede ve X-X eksenine göre antisimetriği olan β değerleri için elde edilenler eşittir [18]. Bu nedenle, çalışma kapsamında ele alınan betonarme binaların şekildeğiştirme bazlı doğrusal olmayan statik analizlerinin $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ arasında yapılması yeterli olmuştur.

Çalışmada, 3KC-[1-4] binaların $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ arasındaki bölgede yapılacak iki doğrultulu doğrusal olmayan statik analizlerinde deprem yükleri;

- Binaların plandaki asal eksen doğrultularından ($\beta=0^\circ$, 90° ve 180°) ve $\beta=0^\circ\sim 180^\circ$ arasında 10° 'lik aralıklarla etkiyen ($\beta=10^\circ$, 20° , ..., 170° , 180°) ara doğrultulardan,
- Binaların plan köşegeni (diyagonal) doğrultularından,
- Her bina için ortak ara doğrultu olan $\beta=45^\circ$, $\beta=135^\circ$ 'lik özel iki doğrultudan etkilmiştir (Şekil 2).

Buna göre, $\beta=0^\circ\sim 180^\circ$ arasındaki bölgede *kare* planlı binalarda toplam 21 (yirmi bir) farklı deprem doğrultusu, *dikdörtgen* planlı binada ise toplam 23 (yirmi üç) farklı deprem doğrultusu gözönüne alınmıştır. İncelenen betonarme binaların şekildeğiştirme bazlı doğrusal olmayan statik analizlerinde gözönüne alınan deprem doğrultuları, kat planları üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2). Binaların her kata ait kat kütle merkezine etkiyen deprem yüklerinin, plandaki +X'den itibaren saat akrebinin tersi yönünde yaptığı açı β (deprem doğrultusu) olarak tanımlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. 3KC binaların kat planları ve β deprem doğrultuları

2.3 Betonarme binaların doğrusal olmayan statik analizleri

Çalışmanın bu bölümünde, 3KC betonarme binaların gözönüne alınan her bir β deprem doğrultusu için plastik kesitlerdeki (plastik mafsallardaki) plastik dönme taleplerinin ve görelî kat ötelemesi taleplerinin belirlenmesi amacıyla iki doğrultulu doğrusal olmayan statik analizleri yapılmıştır.

Varsayımlar

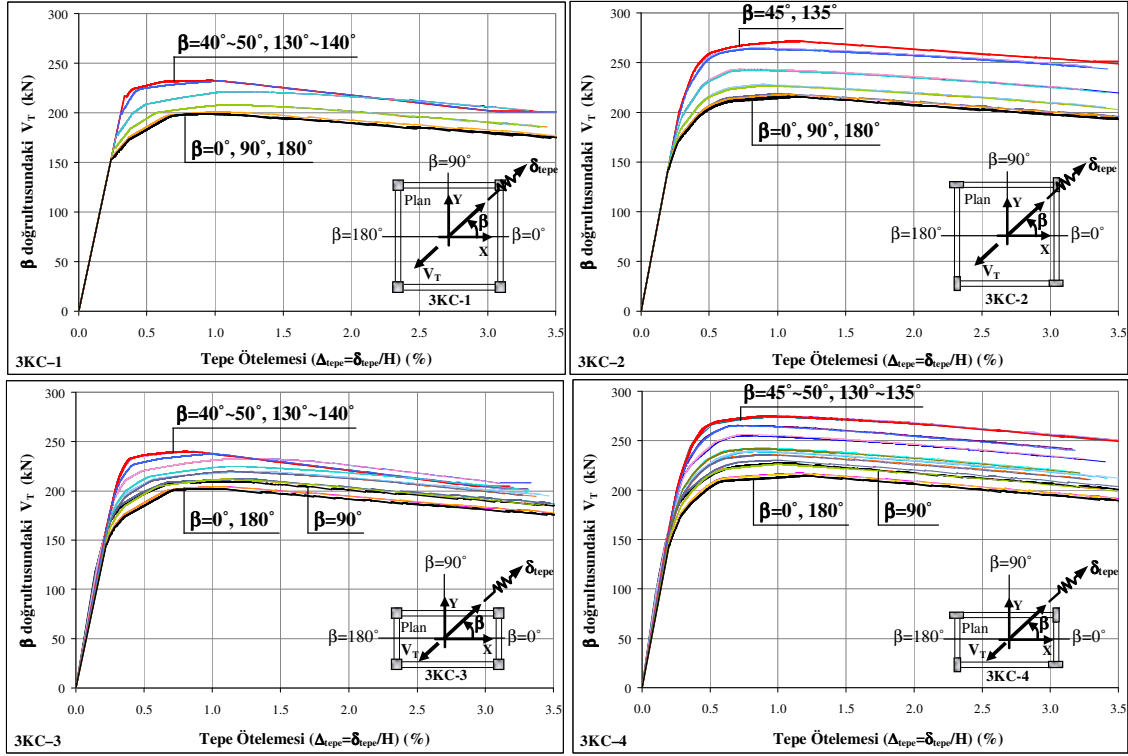
- Deprem yer hareketinin düşey bileşeni ihmal edilmiştir.
- Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin *plastik kesit* (plastik mafsal) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bu kesitler dışındaki bölgelerde sistemin *doğrusal-elastik* davrandığı varsayılmıştır.
- Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarındaki plastikleşmeyi ifade eden akma koşullarının, kirişlerde basit eğilme ile, kolonlarda ise iki eksenli eğilme momenti ve normal kuvvetin etkileşimi ile meydana geldiği kabul edilmiştir. Kiriş ve kolon plastik kesitlerindeki malzemenin doğrusal olmayan davranışını temsil eden *moment-plastik dönme* bağıntıları için *rijit-plastik model* esas alınmıştır.
- Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini gözönüne alan İkinci Mertebe Teorisine göre statik analizler yapılmıştır.

- Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının (kiriş ve kolon) çatlamış enkesit rijitlikleri için TDY (2007)'de önerilen bağıntılardan yararlanılmıştır.
- Kesme kuvveti ve burulma momenti etkisi altında sistemin *doğrusal-elastik* davranış gösterdiği kabul edilmiştir.
- Binaların plandaki asal eksen doğrultularının yanısıra ara deprem doğrultularında da birinci doğal titreşim moduna ait periyotlarının 1.00s'yi geçmemesi ($T_{1,e} < 1.00$ s) ve ayrıca, modal kütle katılım oranının %70'den büyük olması yani, sadece birinci titreşim modunun etkin olması ve yüksek modların etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olması nedeniyle, depremi temsil eden yatay yük dağılımı olarak *birinci mod atalet kuvveti dağılımı* kullanılmıştır.
- Binaların kolon plastik kesitlerindeki şekildeğiştirme taleplerinin deprem doğrultusu ile değişiminin incelenmesi, binaların sadece *en alt kat kolonlarının alt uçlarındaki* plastik kesitlerde yapılmış ve bu kesitlerdeki şekildeğiştirme taleplerinin tüm yapı davranışını temsil ettiği kabul edilmiştir.

2.4 Binaların kapasite eğrilerinin belirlenmesi

İncelenen betonarme binaların yatay kuvvetler altındaki davranışını temsil eden ve taşıma kapasitesini ifade eden kapasite eğrilerinin belirlenmesi için, sabit düşey yükler ve monotonik olarak artan yatay deprem yükleri altında malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan teoriye göre iki doğrultulu artımsal statik itme (pushover) analizleri gözönüne alınan deprem doğrultuları (β) için yapılmış ve deprem yüklerinin etkideği doğrultudaki *Toplam Taban Kesme Kuvveti-Tepe Ötelemesi* ($V_T - \Delta_{tepe}$) eğrileri (kapasite eğrileri) elde edilmiştir (Şekil 3). Çalışmada, 3KC binaların gözönüne alınan her bir β deprem doğrultusu için artımsal statik itme (pushover) analizlerinde *CSI Perform-3D* bilgisayar programından yararlanılmıştır [20].

İncelenen binaların farklı deprem doğrultuları için elde edilen kapasite eğrileri incelendiğinde (Şekil 3), en büyük yatay yük taşıma kapasitelerinin, beklenildiği gibi, binanın her iki doğrultusundaki çerçevelere ait kiriş rijitliklerinin de etkili olması nedeniyle, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksenlerinden farklı ara doğrultulardan etkimesi halinde olduğu görülmektedir [18].



Şekil 3. Binaların gözönüne alınan β deprem doğrultularına ait kapasite eğrileri

2.5 Binaların tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin belirlenmesi

Çalışmada incelenen 3KC betonarme binaların gözönüne alınan her bir β deprem doğrultusu için artımsal statik itme analizlerinden elde edilen kapasite eğrilerinden yararlanılarak δ_{tepe} tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin (performans noktalarının) belirlenmesinde, literatürde yaygın olarak kullanılan FEMA 440'deki Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi (YKY) [21] esas alınmıştır. ATC-55 projesi kapsamında hazırlanan FEMA 440 raporunda, binaların YKY ile tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin belirlenmesinde farklı etkileri (tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışın etkisi, doğrusal-elastik davranış ile beklenen maksimum elastik olmayan yerdeğiştirmeler arasındaki ilişki) temsil eden C katsayıları üzerinde çok sayıda çalışma yapılmış ve yöntemde önemli iyileştirmeler yapılmıştır [21].

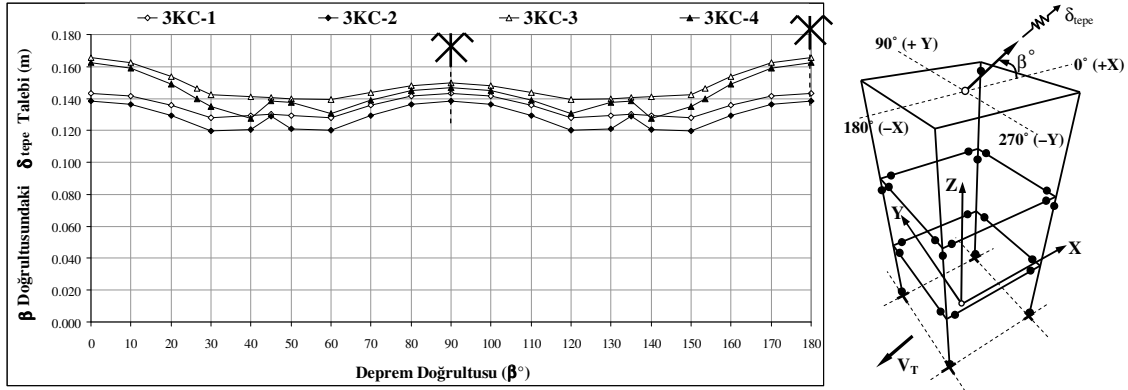
YKY ile tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin belirlenmesinde deprem tehlike seviyesi olarak, $I = 1$ olan binalar için 50 yılda aşılma olasılığı %10 ve maksimum spektral ivmesi 1.0g olan TDY-2007'deki [2] %5 sönümlü tasarım ivme spektrumu esas alınmıştır. İncelenen binaların doğrusal olmayan analizleri (ön analizler) sonucunda, yapısal elemanlardaki plastik dönme taleplerinin küçük değerler alması nedeniyle, TDY-2007'deki tasarım ivme spektrumu 1.5 kat artırılarak ölçeklendirilmiştir. Çalışmada ele alınan 3KC binaların gözönüne alınan her bir β deprem doğrultusu için hesaplanan δ_{tepe} tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin β ile değişimi Şekil 4'de verilmiştir.

Şekil 4'deki grafiklerden görüleceği üzere,

- Planı *kare* olan 3KC–[1,2] binaların en elverişsiz tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin (δ_{tepe}^{cr}), deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen (X ve Y) doğrultularından etkimesi halinde olduğu,
- Planı *dikdörtgen* olan 3KC–[3,4] binalarda ise, beklenildiği gibi, deprem yüklerinin binaların yatay rijitliğinin daha az olduğu asal eksen (Y) doğrultularından etkimesi halinde olduğu belirlenmiştir (şekil 4).

Bunun nedeni, binaların asal eksen doğrultularındaki yatay yük taşıma kapasitelerinin ara deprem doğrultularındakilere göre daha küçük olmasıdır (şekil 3–4).

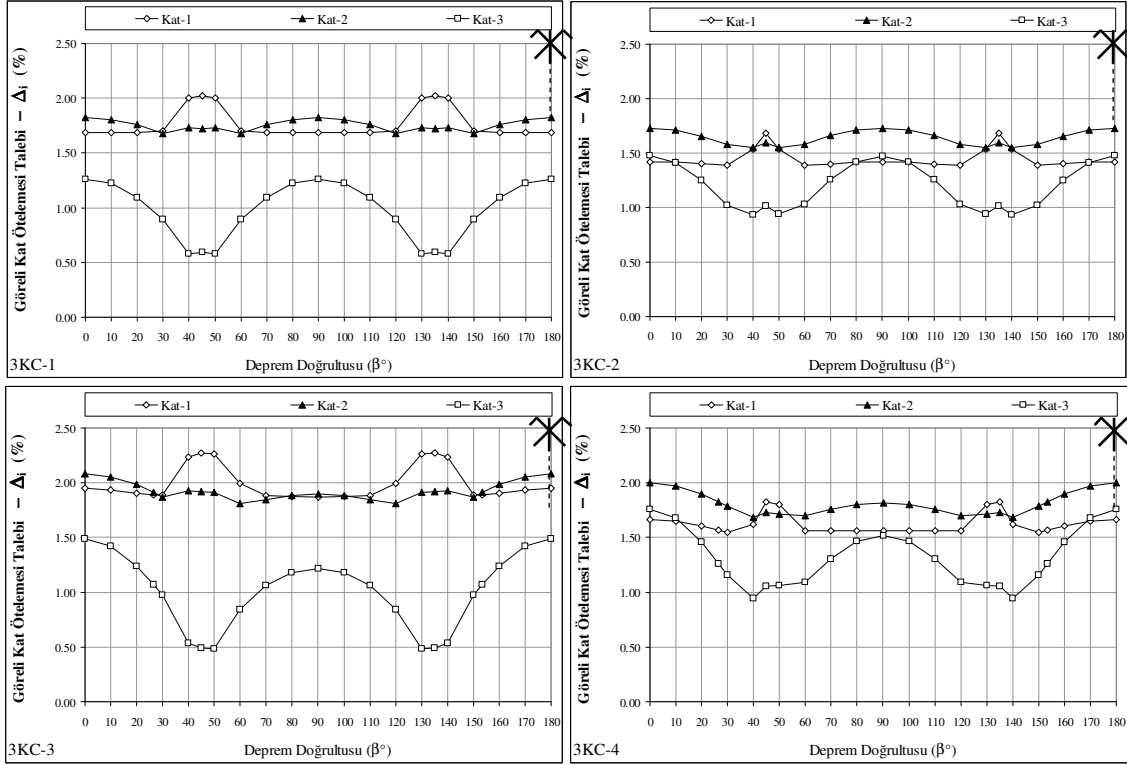
Bununla birlikte, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularına $\pm 10^\circ$ yakın olan doğrultular arasından etkimesi halinde, en elverişsiz tepe yerdeğiştirmesi taleplerine çok yakın $[(0.95-1.00) \delta_{tepe}^{cr}]$ değerlerin de elde edildiği görülmüştür (şekil 4). Ayrıca, $\beta=0^\circ \sim 180^\circ$ arasındaki deprem doğrultuları için elde edilen yerdeğiştirme talepleri, $(\delta_{tepe} - \beta)$ grafiklerindeki $\beta=90^\circ$ 'ye göre simetriktir (şekil 4).



şekil 4. δ_{tepe} tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin β deprem doğrultusu ile değişimi

2.6 Betonarme binaların görelı kat ötelemesi taleplerinin belirlenmesi

Çalışmada, $\beta=0^\circ \sim 180^\circ$ gözönüne alınan deprem doğrultuları için YKY ile belirlenen tepe yerdeğiştirmesi taleplerine (performans noktalarına) ulaşmış betonarme binaların her bir katındaki kat yerdeğiştirmesi taleplerinden yararlanılarak, Δ_i görelı kat ötelemesi talepleri ve bunların β deprem doğrultusu ile değişimi belirlenmiştir (şekil 5). Deprem yüklerinin binaların $\beta = 180^\circ \sim 360^\circ$ arasında etkimesi halinde elde edilecek görelı kat ötelemesi talepleri, $(\Delta_i \sim \beta)$ grafiklerindeki $\beta = 180^\circ$ 'ye göre simetriktir (şekil 5).



Şekil 5. Δ_i görel kat ötelemesi taleplerinin β deprem doğrultusu ile değişimi

Şekil 5'deki grafiklerden görüleceği üzere,

- Üst katlardaki (2. ve 3. katlar) en elverişsiz görel kat ötelemesi taleplerinin (Δ_i^{cr}),
 - Planı *kare* olan 3KC–[1,2] binalarda deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen (X ve Y) doğrultularından etkimesi halinde oluştuğu,
 - Planı *dikdörtgen* olan 3KC–[3,4] binalarda ise, deprem yüklerinin binanın yatay rijitliğinin daha az olduğu asal eksen (Y) doğrultusundan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 5).

Bununla birlikte, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularına,

$\pm 10^\circ$ yakın olan doğrultular arasından etkimesi halinde 3.katta

$\pm 20^\circ$ farklı olan doğrultular arasından etkimesi halinde ise 2.katta

en elverişsiz görel kat ötelemesi taleplerine çok yakın $[(0.95-1.00)\Delta_i^{cr}]$ değerlerin de elde edildiği görülmektedir (Şekil 5).

- Alt katlardaki en elverişsiz görel kat ötelemesi taleplerinin (Δ_i^{cr}) ise,
 - Deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularından farklı olan ve çoğunlukla $\beta_{cr} = 45^\circ, 135^\circ$ ile $\beta_{cr} = 225^\circ, 315^\circ$ 'lik ara doğrultulardan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 5).
 - Bununla birlikte, deprem yüklerinin binaların kritik deprem doğrultularına 5° yakın olan ara doğrultulardan ($\beta_{cr}=45^\circ \pm 5^\circ, 135^\circ \pm 5^\circ$ ile $\beta_{cr}=225^\circ \pm 5^\circ, 315^\circ \pm 5^\circ$) etkimesi halinde, en elverişsiz görel kat ötelemesi taleplerine çok yakın $[(0.95-1.00)\Delta_i^{cr}]$ değerlerin de elde edildiği görülmektedir (Şekil 5).

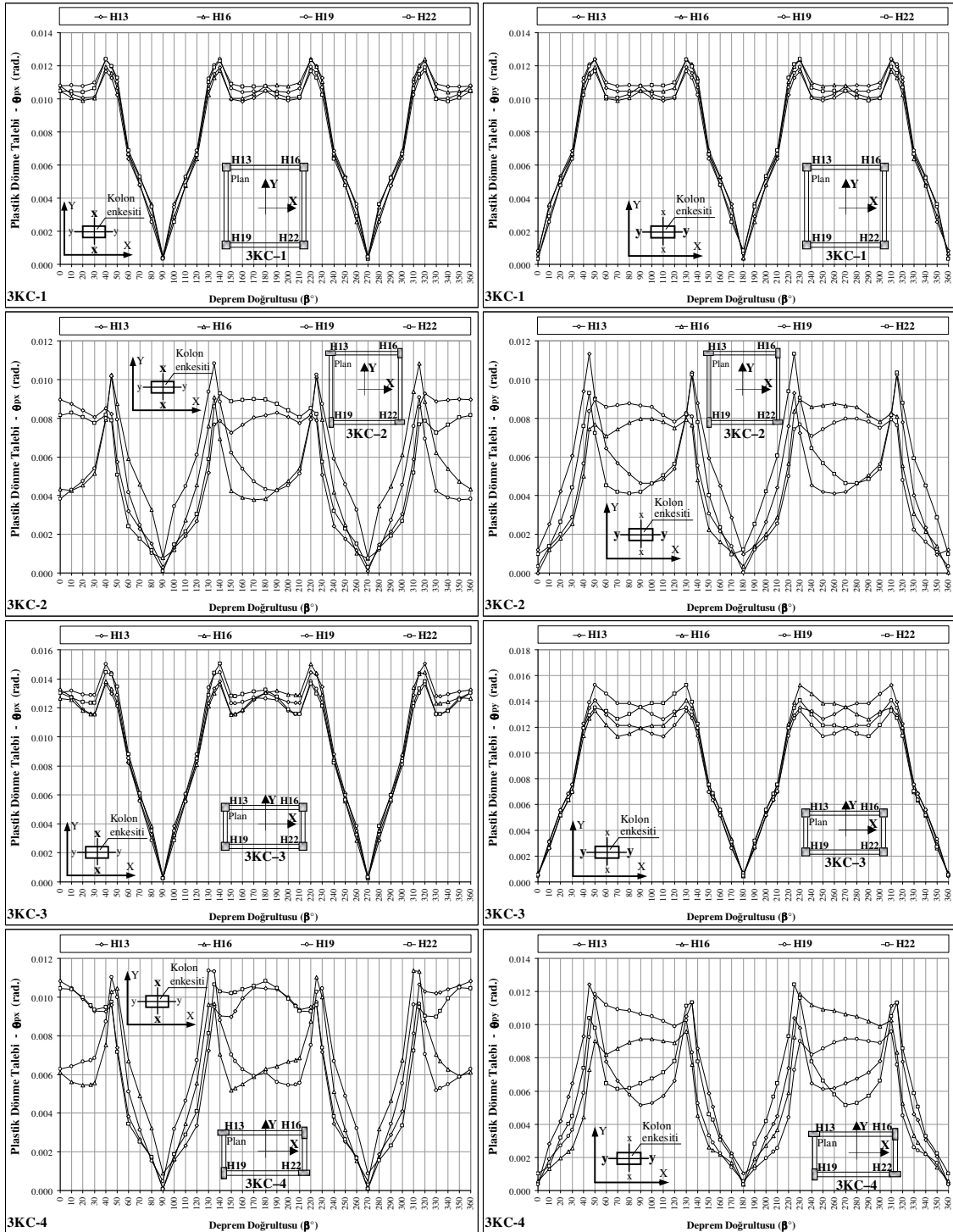
2.7 Plastik kesitlerdeki plastik dönme taleplerinin belirlenmesi

Çalışma kapsamında ele alınan betonarme binaların gözönüne alınan β deprem doğrultularındaki şekildeğiştirme bazlı doğrusal olmayan statik analizleri sonucunda, en elverişsiz kiriş plastik dönme taleplerinin, beklenildiği gibi, deprem yüklerinin kiriş eksenine paralel olan doğrultudan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir. Bu nedenle, ortogonal akslara sahip betonarme binaların kiriş plastik kesitlerindeki en elverişsiz plastik dönme taleplerinin elde edilmesi için, binanın plandaki asal eksen doğrultularında ($\beta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ve 270°) yapılacak doğrusal olmayan statik analizler yeterli olmakta ve bu nedenle, çok doğrultulu deprem yükleri altındaki doğrusal olmayan değerlendirme analizleri kirişler için gerekmemektedir [18].

Bununla birlikte, gözönüne alınan her bir β deprem doğrultusu için YKY ile belirlenen tepe yerdeğiştirmesi taleplerine (performans noktalarına) ulaşmış betonarme binaların kolon plastik kesitlerindeki (plastik mafsallarındaki) θ_{px} ve θ_{py} plastik dönme taleplerinin deprem doğrultusu ile değişimi belirlenmiştir. Planda *simetrik* veya *antisimetrik* olan 3KC binaların $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ arasında gözönüne alınan deprem doğrultuları için *en alt kat kolonlarının alt uçlarındaki* plastik kesitlerde elde edilen θ_{px} ve θ_{py} plastik dönme taleplerinden yararlanılarak, deprem yüklerinin $\beta = 0^\circ \sim 360^\circ$ arasında etkimesi hali için θ_{px} ve θ_{py} taleplerinin β deprem doğrultusu ile değişimi Şekil 6'daki grafiklerde verilmiştir.

Çalışmada incelenen betonarme binaların en alt kat kolon plastik kesitlerindeki θ_{px} ve θ_{py} plastik dönme taleplerinin β deprem doğrultusu ile değişimi incelendiğinde (Şekil 6), en elverişsiz (θ_{px}^{cr} ve θ_{py}^{cr}) ve ona çok yakın değerlerdeki $[(0.95-1.00)\theta_{px}^{cr}$ ve $(0.95-1.00)\theta_{py}^{cr}]$ kolon plastik dönme taleplerinin, kolon enkesitinin *kare* veya *dikdörtgen* olmasına bağlı olarak birbirinden farklı deprem doğrultularında oluşabildiği belirlenmiştir. Buna göre;

- En elverişsiz (θ_{px}^{cr} ve θ_{py}^{cr}) ve ona çok yakın değerlerdeki $[(0.95-1.00)\theta_{px}^{cr}$ ve $(0.95-1.00)\theta_{py}^{cr}]$ plastik dönme taleplerinin,
 - *Kare enkesitli* kolon plastik kesitlerinde (3KC-[1,3]), deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksenlerinden (X ve Y) farklı olan ve çoğunlukla $\beta_{cr}=45^\circ \pm 5^\circ, 135^\circ \pm 5^\circ$ ile $\beta_{cr}=225^\circ \pm 5^\circ, 315^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki doğrultulardan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, binaların kritik deprem doğrultularındaki plastik dönme taleplerinin, asal eksen doğrultularından elde edilen değerlere oldukça yakın olduğu görülmüştür (Şekil 6).
 - *Dikdörtgen enkesitli* kolon plastik kesitlerinde (3KC-[2,4]) ise çoğunlukla, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen (X ve Y) doğrultularından ve bu doğrultulara $\pm 10^\circ$ yakın olan ($\beta_{cr}=0^\circ \pm 10^\circ, 90^\circ \pm 10^\circ$ ile $\beta_{cr}=180^\circ \pm 10^\circ, 270^\circ \pm 10^\circ$) doğrultular arasından ve ayrıca, $\beta_{cr}=45^\circ \pm 5^\circ, 135^\circ \pm 5^\circ$ ile $\beta_{cr}=225^\circ \pm 5^\circ, 315^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki ara doğrultulardan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. θ_{px} ve θ_{py} kolon plastik dönme taleplerinin β deprem doğrultusu ile değişimi

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, deprem yüklerinin betonarme binaların plandaki asal eksenlerinin yanısıra ara doğrultulardan da etkimesi hali için, plastik dönme talepleri ve görelî kat ötelemesi taleplerinin oluşacak en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde farklı plan ve enkesit geometrisinin etkinliği doğrusal olmayan teori çerçevesinde araştırılmıştır. Bunun için, herhangi bir yapısal düzensizliği bulunmayan ve ortogonal akslara sahip olan 3 katlı dört betonarme binanın plandaki

asal eksenlerinin yanısıra çok sayıdaki ara deprem doğrultusu için iki doğrultulu doğrusal olmayan statik analizleri yapılarak, plastik kesitlerdeki (plastik mafsallardaki) plastik dönme talepleri ve binaların görelî kat ötelemesi taleplerinin deprem doğrultusu ile değişimi incelenmiş ve bu davranış taleplerinin en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultuları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığı altında, binaların performans dayalı tasarımı ve değerlendirilmesinde etkin olan yapısal davranış taleplerinin en elverişsiz değerlerini veren kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde *farklı plan ve enkesit geometrisinin etkinliği* değerlendirilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçların, ele alınan betonarme binaların genel özelliklerini kapsayan diğer betonarme binalar için de geçerli olacağı düşünölmektedir.

- 1) İncelenen binaların farklı deprem doğrultuları için elde edilen kapasite eğrileri incelendiğinde, beklenildiği gibi, en büyük yatay yük taşıma kapasitelerinin, binanın her iki doğrultusundaki çerçevelere ait kiriş rijitliklerinin de etkili olması nedeniyle, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksenlerinden farklı ara doğrultulardan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir.
- 2) δ_{epe} tepe yerdeğiştirme taleplerine ait en elverişsiz değerlerin, planı *kare* olan binalarda deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularından, planı *dikdörtgen* olan binada ise, binanın yatay rijitliğinin daha az olduğu asal eksen doğrultusundan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularına $\pm 10^\circ$ yakın olan doğrultular arasından etkimesi halinde, en elverişsiz tepe yerdeğiştirme taleplerine çok yakın $[(0.95-1.00) \delta_{tepe}^{cr}]$ değerler de elde edilmektedir.
- 3) Δ_i görelî kat ötelemesi taleplerine ait en elverişsiz değerlerin,
 - Üst katlarda, planı *kare* olan binalarda deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularından, planı *dikdörtgen* olan binalarda ise, yatay rijitliğin daha az olduğu asal eksen doğrultusundan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir.
 - Bununla birlikte, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularına $\pm 10^\circ$ yakın olan doğrultular arasından etkimesi halinde, en elverişsiz görelî kat ötelemesi taleplerine çok yakın $[(0.95-1.00) \Delta_i^{cr}]$ değerlerin de elde edildiği belirlenmiştir.
 - Alt katlarda ise, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultularından farklı olan ve çoğunlukla $\beta_{cr} = 45^\circ \pm 5^\circ$, $135^\circ \pm 5^\circ$ ile $\beta_{cr} = 225^\circ \pm 5^\circ$, $315^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki doğrultulardan etkimesi halinde oluştuğu belirlenmiştir.
- 4) En elverişsiz ve ona çok yakın değerlerde $[(0.95-1.00) \theta_{px}^{cr}]$ ve $[(0.95-1.00) \theta_{py}^{cr}]$ olan kolon plastik dönme taleplerinin çoğunlukla, deprem yüklerinin binaların plandaki asal eksen doğrultuları ile bu doğrultulara $\pm 10^\circ$ yakın olan doğrultular arasından ve ayrıca, $\beta_{cr} = 45^\circ \pm 5^\circ$, $135^\circ \pm 5^\circ$ ile $\beta_{cr} = 225^\circ \pm 5^\circ$, $315^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki doğrultulardan etkimesi halinde oluştuğu görölmüştür.
- 5) Binaların kolon plastik dönme taleplerinin en elverişsiz değerlerini veren β_{cr} kritik deprem doğrultularının belirlenmesinde, farklı plan geometrisinin (*kare* ve *dikdörtgen*) oldukça az etkili olduğu, buna karşın kolon enkesitinin *kare* veya *dikdörtgen* olmasının etkili bir parametre olduğu görölmüştür. Ayrıca, binaların üst katlarındaki en elverişsiz görelî kat ötelemesi taleplerini veren β_{cr} kritik deprem doğrultularının

belirlenmesinde, *plan geometrisinin* etkili bir parametre olduğu, buna karşın kolon enkesitinin *kare* veya *dikdörtgen* olmasının oldukça az etkili olduğu görülmüştür. Binaların alt katlarındaki görelî kat ötelemesi talepleri için ise, *farklı plan ve/veya kolon enkesit geometrisinin* oldukça az etkili olduğu belirlenmiştir.

- 6) İncelenen betonarme binaların δ_{lepe} tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin, Δ_i görelî kat ötelemesi taleplerinin ve kiriş – kolon plastik kesitlerindeki θ_p plastik dönme taleplerinin en elverişsiz değerlerinin belirlenebilmesi için, çok sayıda deprem doğrultusu için araştırma yapılması yerine, aşağıda önerilen daha az sayıdaki kritik deprem doğrultusu için araştırma yapılmasının yeterli olduğu belirlenmiştir. Buna göre, deprem yüklerinin binalara plandaki;
- asal eksenler $\beta_{cr} = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ve 270° ,
 - $\beta_{cr}=45^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki $\beta_{cr} = 40^\circ, 45^\circ$ ve 50° ,
 - $\beta_{cr}=135^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki $\beta_{cr} = 130^\circ, 135^\circ$ ve 140° ,
 - $\beta_{cr}=225^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki $\beta_{cr} = 220^\circ, 225^\circ$ ve 225° ,
 - $\beta_{cr}=315^\circ \pm 5^\circ$ arasındaki $\beta_{cr} = 310^\circ, 315^\circ$ ve 320° ,
 - planlı kare olmayan binalarda ayrıca *plan köşegeni (diyagonal)* doğrultularından etkiltilerek iki doğrultulu doğrusal olmayan statik analizlerinin yapılması önerilmektedir.
- 7) Deprem yüklerinin doğrultu etkisi ile ilgili genel bir değerlendirme yapıldığında, betonarme binaların şekildeğiştirme bazlı en elverişsiz davranış büyüklüğü taleplerinin ve dolayısıyla bunları veren kritik deprem doğrultularının belirlenebilmesi için, binaların plandaki asal eksen doğrultularındaki analizlerin yeterli olmadığı, ayrıca asal eksenlerden farklı çok sayıda ara deprem doğrultusu için de araştırma yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kritik deprem doğrultularının belirlenmesi ile ilgili olarak 6. madde’deki önerilerden yararlanılabilir.

Kaynaklar

- [1]. ASCE 41–06, Seismic rehabilitation of existing buildings, **American Society of Civil Engineering**, Reston, Virginia, (2007).
- [2]. DBYBHY, Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, TDY 2007, **Bayındırlık ve İskan Bakanlığı**, Ankara, (2007).
- [3]. IBC, International building code, **International Code Council**, Birmingham, (2006).
- [4]. Eurocode–8, Design of structures for earthquake resistance, Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, **European Committee for Standardization**, Brussels, (2003).
- [5]. UBC–97, Uniform building code, structural engineering design provisions, v.2, **International Conference of Building Officials**, Whittier, California, (1997).
- [6]. Wilson, E.L., Suharwardy, I. ve Habibullah, A., A clarification of the orthogonal effects in a three–dimensional seismic analysis, **Earthquake Spectra**, 11, 4, 659-666, (1995).
- [7]. Newmark, N.M., Seismic design criteria for structures and facilities: Trans–Alaska pipeline system, **Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering**, Earthquake Engineering Research Institute, 94-103, (1975).

- [8]. Rosenblueth, E. ve Contreras, H., Approximate design for multicomponent earthquakes, **Journal of the Engineering Mechanics (ASCE)**, **103**, 881-893, (1977).
- [9]. Çakıroğlu, A., Earthquake-resistant design according to the most unfavourable seismic direction under combined internal forces, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, **15**,7, 853-864, (1987).
- [10]. Lopez, O.A. ve Torres, R., The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, **26**, 9, 881-894, (1997).
- [11]. Menun, C. ve Kiureghian, A.D., A replacement for the 30%, 40%, and SRSS rules for multicomponent seismic analysis, **Earthquake Spectra**, **14**, 1, 153-163 (1998).
- [12]. Özmen, G., Ortogonal olmayan yapılarda maksimum donatı oranlarının tayini, **TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi**, **16**, 1, 3445-3466, (2005).
- [13]. ATC 32, Improved seismic design criteria for California bridges: Provisional recommendations, **Applied Technology Council**, Redwood City, California (1996).
- [14]. AASHTO, Recommended LRFD guidelines for the seismic design of highway bridges, **American Association of State Highway and Transportation Officials**, NCHRP 20-07 Task 193, (2006).
- [15]. ATC 40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Vol. 1, **Applied Technology Council**, Redwood City, California, (1996).
- [16]. FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, **Federal Emergency Management Agency**, Washington, D.C., (2000).
- [17]. Otani, S., Japanese PRESS design guidelines for reinforced concrete buildings, Research Report No. 10, **National Center for Disaster Prevention**, Mexico, (1994).
- [18]. Hasgül, U., Betonarme Binaların Şekildeğiştirme Esaslı Doğrusal Olmayan Analizinde Deprem Doğrultusu Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2011).
- [19]. TS 500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2000).
- [20]. CSI Perform-3D, Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures, **Computers and Structures Inc.**, Berkeley, California, (2006).
- [21]. FEMA 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, **Federal Emergency Management Agency**, Washington, D.C., (2005).