



# DIŞ MERKEZ ÇAPRAZLI BİR ÇELİK PERDENİN DEPREM PERFORMANSININ DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK HESAP YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

## THE SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF AN ECCENTRICALLY BRACED STEEL FRAME BY NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS

Yavuz DURGUN<sup>1\*</sup>, Cüneyt VATANSEVER<sup>1</sup>, Konuralp GİRGIN<sup>1</sup>, Engin ORAKDÖĞEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa Yerleşkesi, 34469, İstanbul  
durgunya@itu.edu.tr, cuneyt.vatansever@itu.edu.tr, girgink@itu.edu.tr, orak@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.10.2012, Kabul Tarihi/Accepted: 11.01.2013  
\*Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2013.22932

### Özet

Bu çalışmada, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik-2007 (DBYBHY-2007) ye göre boyutlandırılan altı katlı dış merkez çaprazlı bir çelik perdenin deprem performansı, zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri, çapraz ve kolonların iç kuvvet istemleri ile bağ kirişi kesme kuvveti ve dönme istemleri dikkate alınmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yedi adet deprem ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen istemlerin ortalama değerleri esas alınarak dış merkez çaprazlı çelik perdelerin kullanıldığı orta yükseklikteki binalar için DBYBHY-2007'de öngörülen kapasite tasarımı yaklaşımının yeterliliği araştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Dış merkez çaprazlı çelik perde, Bağ kirişi, Zaman tanım alanı, Doğrusal olmayan analiz, Performans değerlendirilmesi

### Abstract

The goal of this paper is to investigate the non-linear response and to assess the seismic performance of a six story eccentrically braced steel frame (EBF). For this, split-K-braced EBF with high ductility level designed according to the Turkish Earthquake Code-2007 (TEC-07) is analyzed under seven selected earthquake records. The performance of the EBF is assessed considering drift, story and base shear demands, brace and column axial forces and bending moment demands, link beam shear force and rotation demands. Mean values of the demands are used in the performance assessment. The provisions based on capacity design approach specified in TEC-07 for EBFs with high ductility level are discussed by employing the findings.

**Keywords:** Eccentrically braced steel frame, Link beam, Time history analysis, Non-linear analysis, Performance evaluation.

## 1 Giriş

Enerji sönmüleme kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle dış merkez çelik çaprazlı perdeler yatay deprem yüklerinin taşınması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın hazırlanmasında yararlanılan dış merkez çaprazlı çelik perdeler ile ilgili mevcut çalışmaların bir bölümü aşağıda özetlenmiştir.

Berman ve diğerleri [1], dış merkez çelik çaprazlı çerçevelerin birleşim noktalarındaki sünekliliğinin artırılması amacıyla kiriş kesitinin azaltılması yaklaşımını araştırmışlardır. Birleşim bölgesini, kiriş kesitinin çeşitli geometrilerini de dikkate almak suretiyle bir kayma elemanı gibi davranacak şekilde sonlu elemanlar ile modelleyerek, bu tür birleşim bölgelerinin sünekliliğini arttıran bir çözüme ulaşmayı amaçlamışlardır.

Bosco ve Rossi [2], bağ kirişi dayanım fazlalığının deprem davranışına etkisini araştırmışlardır. Hasar dağıtma kapasitesi adı ile tanımladıkları yeni bir parametre ile kapasite tasarım kriterlerine uygun olarak boyutlandırılmış yapıların deprem davranışını açıklamaya çalışmışlardır.

Crişan ve Stratan [3], çok katlı dış merkez çaprazlı çelik çerçevelerde dayanım fazlalığı istemini üç farklı deprem yönetmeliğine [P100-1/2006 (RO), EN 1998 (EU) ve AISC 341-05 (USA)] göre incelemişlerdir. Bu çalışmalarda itme analizi ve zamana bağlı doğrusal olmayan hesap yöntemlerini kullanmışlardır. Elemanların doğrusal olmayan davranışını FEMA356'da tanımlanan plastik mafsal modeliyle temsil etmişlerdir.

Kobocevic ve David [4], Kanada'nın Montreal ve Vancouver şehirlerinde yapılacak üzere tasarlanan 14, 20 ve 25 katlı ters V tipi dış merkez çaprazlı çelik çerçevelerin deprem istemlerini, tasarım spektrumuna uygun olarak ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarını kullanarak araştırmışlardır.

Lin ve diğerleri [5], dış merkez çaprazlı çelik ve burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçevelerin deprem güvenliklerini, eğilme çerçeveleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Bu amaca yönelik olarak, üç boyutlu 6 örnek bina üzerinde çalışarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemlerini kullanmışlardır.

Okazaki ve arkadaşları [6], dış merkez çaprazlı çelik çerçevelerde, çapraz elemanlarla kolon arasında kalan kiriş bölgesinin tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemek üzere toplam 24 adet numune üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde plastik dönme kapasitelerine ulaşılmadan önce, çoğu numunenin taşıma gücünün birleşim yerlerindeki kaynaklarda oluşan kırılma nedeniyle sona erdiğini gözlemlemişlerdir. Bu problemin aşılması için iki ayrı birleşim bölgesi detayı önermişlerdir.

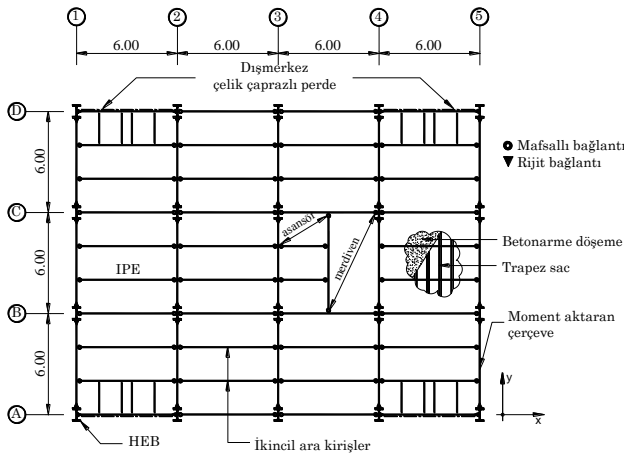
Richards ve Uang [7], dış merkez çaprazlı çelik çerçevelerde, bağlantı girişinin başlık genişliğinin başlık kalınlığına oranının dönme kapasitesine etkisini araştırmak üzere, bağlantı bölgesini sonlu elemanlar yöntemi ile analitik olarak incelemişlerdir. Bu amaçla hazırlanan ve daha önceden yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanan 112 adet sonlu eleman modeli üzerinde çalışarak birleşim bölgelerinin performansını araştırmışlardır.

Richards [8], sünek çelik çaprazlı çerçevelerde büyük ölçüde sünek elemanlarının varlığına ve akma mekanizmasına bağlı olan kolon deprem istemlerini, burkulması önlenmiş çaprazlı çerçeveler, özel merkezi çaprazlı çerçeveler ve dışmerkez çaprazlı çerçeveler üzerinde incelemiştir. Çerçeveler doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ile, farklı kat yükseklikleri ve farklı dayanım seviyeleri için çözülmüştür.

Bu çalışmada, dış merkez çaprazlı çelik perdelerin bulunduğu çelik yapılar için DBYBHY-2007 [9]'da öngörülen kapasite tasarımı ilkelerinin tartışılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle, bir doğrultuda dış merkez çaprazlı çelik perdeler içeren ve DBYBHY-2007'e göre boyutlandırılan altı katlı çelik bir yapı sistemi göz önüne alınmış, sadece dış merkez çaprazlı çelik perde sisteminin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri (ZTADOA) yapılarak deprem istemleri elde edilmiştir. Söz konusu deprem istemleri, görelî kat yerdeğiştirmeleri, taban ve kat kesme kuvvetleri, bağ kirişlerindeki dönmeler ve kesme kuvvetleri, kolon ve çaprazların dayanımlarına ilişkin büyüklüklerdir. Elde edilen sonuçlardan yararlanmak suretiyle DBYBHY-2007'de bu tür yapılar için öngörülen kapasite tasarımı ilkeleri irdelenmiştir.

## 2 Model Bina

Model bina Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) Açıklamalar ve Örnekler Kitabı'nda yer alan Örnek 7 esas alınarak oluşturulmuştur, [10]. Binanın yatay yük taşıyıcı sistemi, X-ekseni doğrultusunda süneklik düzeyi yüksek dış merkez çaprazlı çelik perdelerden (DMÇÇP den), Y-ekseni doğrultusunda ise süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerden oluşmaktadır. Bina tipik kat planı Şekil 1'de verilmektedir. X eksenine paralel ve DMÇÇP'lerin dışında kalan tüm kirişlerin kolonlara bağlantıları ile kolonların zayıf eksenleri etrafında temele bağlantılarının mafsallı olduğu varsayılmaktadır. Kirişlerin betonarme döşeme ile birlikte kompozit olarak davranışı göz önüne alınmamıştır.

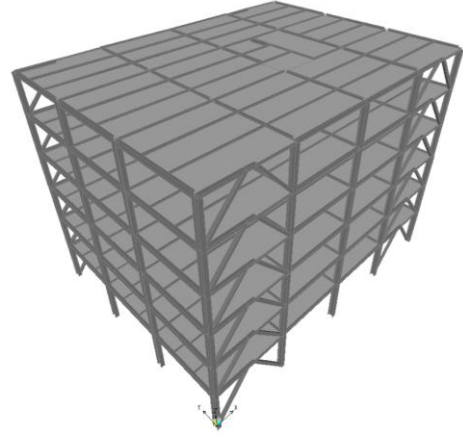


Şekil 1: Tipik kat planı.

Normal katlar için toplam sabit ve hareketli düşey yükler sırasıyla 4.9kN/m<sup>2</sup> ve 2.0kN/m<sup>2</sup>, çatı katı için bu değerler, 4.3kN/m<sup>2</sup> ve 1.0kN/m<sup>2</sup> olarak dikkate alınmaktadır. Ayrıca sadece normal katlarda çevre kirişlerine etkiyen 3.0kN/m'lik bir duvar yükü de öngörülmüştür, [10].

Binanın işyeri olarak kullanılacağı, birinci derece deprem bölgesinde olduğu ve Z2 yerel zemin sınıfı üzerinde inşa edileceği varsayılmaktadır. Buna göre deprem

karakteristikleri, etkin yer ivmesi katsayısı,  $A_0 = 0.40$ , bina önem katsayısı,  $I=1.00$ , spektrum karakteristik periyotları  $T_A=0.15s$  ve  $T_B=0.40s$ , taşıyıcı sistem davranış katsayısı  $R_x=7$  ve hareketli yük katılım katsayısı  $n=0.30$  olarak belirlenmiştir. Bina doğal titreşim periyotlarının hesabında Şekil 2'de verilen üç boyutlu analitik model kullanılmıştır. Analitik modelin hazırlanmasında SAP2000, [11] bilgisayar yazılımından yararlanılmıştır. DBYBHY-2007 Madde 2.7.4.1 uyarınca Denk. (2.11)'e göre X doğrultusundaki doğal titreşim periyodu 0.58s ve Madde 2.7.1.1 uyarınca Denk. (2.4)'e göre toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) 1607.8kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2: Analitik model.

## 3 Dış Merkez Çaprazlı Çelik Perde (DMÇÇP) Modeli

Göz önüne alınan üç boyutlu yapı sisteminin bir doğrultudaki davranışını temsil eden ve Şekil 3'te hesap modeli verilen DMÇÇP'nin doğrusal olmayan dinamik hesapları için OpenSEES-(Open System for Earthquake Engineering Simulation) [12] bilgisayar yazılımı kullanılmaktadır. Ayrıca, OpenSEES bilgisayar yazılımının veri girişindeki esaslarına göre, yükleme düzlemi içindeki kolonlar zayıf eksenleri etrafında eğilmeye maruz kaldıkları için hesap modeli üç boyutlu olarak hazırlanmıştır.

OpenSEES bilgisayar yazılımı ortamında modellenen DMÇÇP'nin, üç boyutlu gerçek yapı sisteminin hesap yapılan X doğrultusundaki davranışını temsil edebileceğini göstermek üzere, her iki sistemin de serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Perdenin modal analizlerinde kat kütlelerinin,  $m_{1,2,3,4,5} = 66.97 \text{ kNs}^2/\text{m}$ ,  $m_6 = 50.64 \text{ kNs}^2/\text{m}$  olarak ölçümlenmiş ve toplandığı varsayılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, OpenSEES ortamında çözülen perde modeline ait ilk üç serbest titreşim periyodu sırasıyla,  $T_1 = 0.62s$ ,  $T_2 = 0.21s$  ve  $T_3 = 0.12s$ 'dir. Bina'nın bütünü temsil eden yapı sisteminin aynı doğrultudaki ilk üç serbest titreşim periyodu ise yine sırasıyla  $T_1 = 0.58s$ ,  $T_2 = 0.20s$  ve  $T_3 = 0.11s$  olarak elde edilmiştir. Her iki sistemin ilk üç serbest titreşim periyotlarının karşılaştırılmasından, hesap doğrultusunda sadece DMÇÇP'den oluşan modelin, gerçek yapı sisteminin bu doğrultudaki davranışını yeterli bir yaklaşıklıkla temsil edebileceği sonucuna varılmıştır.

DMÇÇP'nin OpenSEES ile hazırlanan hesap modelinde, çaprazlar, kolonlar ve kirişlerin bağ kirişi bölgesi dışındaki bölümleri için lif yaklaşımının kullanıldığı 'nonlinearBeamColumn' olarak isimlendirilen kütüphane elemanından yararlanılmıştır. Ayrıca, kolon ve çaprazlarda ikinci mertebe etkileri de dikkate alınmıştır. Gerçek yapı

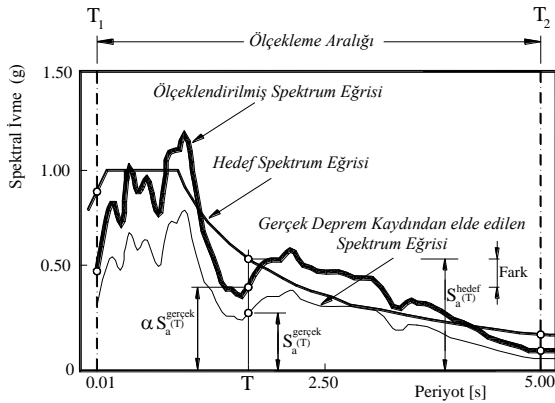


edilmesi, gerçek deprem kaydına ait % 5 sönüm oranı için elde edilmiş olan tepki spektrumunun, istenilen belirli bir periyot aralığında, hedef tasarım ivme spektrumuna eşleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu işlemde kaydın süresi ve frekans içeriği değişmemektedir. Eşleştirmede en küçük kareler tekniği yaklaşımı kullanılmakta olup, ölçeklenmiş deprem ivme kaydına ait tepki spektrumu ile hedef olarak alınan tasarım ivme spektrumu genlikleri arasındaki farkın belirli bir periyot aralığı  $[[T_1:T_2]]$  için minimize edilmesi amaçlanmaktadır, Şekil 5. Buna göre 'Fark'ın integrasyon ifadesi,

$$|Fark| = \int_{T_1}^{T_2} [\alpha S_a^{gerçek}(T) - S_a^{hedef}(T)]^2 dT \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,

- $S_a^{gerçek}$  : Gerçek deprem kaydının % 5 sönüm oranındaki ivme spektrumu,  
 $S_a^{hedef}$  : % 5 sönüm oranındaki hedef tasarım ivme spektrumu,  
 $\alpha$  : Doğrusal ölçekleme katsayısı,  
 $T$  : Titreşim periyodu,  
 $T_1, T_2$  : Ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının başlangıç ve bitiş değerleridir.



Şekil 5: Gerçek deprem kaydına ait ivme spektrumunun, hedef tasarım ivme spektrumuna eşleştirilmesi.

Ölçeklenmiş deprem ivme kaydına ait tepki spektrumu ile hedef olarak alınan tasarım ivme spektrumu genlikleri arasındaki farkların toplamının en küçük olması için, (4)'te verilen fark fonksiyonu ifadesinin doğrusal ölçekleme katsayısı  $\alpha$ 'ya göre türevi sıfır olmalıdır. Buna göre (4) ifadesinin

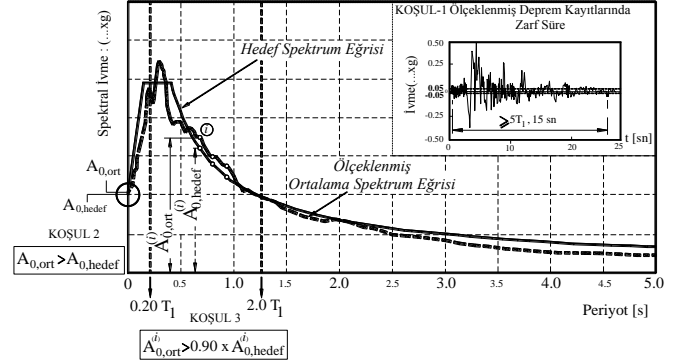
$$|Fark|_{\min} = \frac{d|Fark|}{d\alpha} = 0 \quad (5)$$

bağıntısında yerine konulmasıyla  $\alpha$  doğrusal ölçekleme katsayısı, ölçekleme aralığı boyunca toplam fonksiyonu cinsinden,

$$\alpha = \frac{\sum_{T=T_1}^{T=T_2} [S_a^{gerçek}(T) \times S_a^{hedef}(T)]}{\sum_{T=T_1}^{T=T_2} [S_a^{gerçek}(T)]^2} \quad (6)$$

olarak elde edilir [17,18].

DBYBHY-2007'de, bina ve bina türü yapıların zaman tanım alanında doğrusal veya doğrusal olmayan deprem hesabı için, yapay yöntemlerle üretilen, daha önce kaydedilmiş veya benzeştirilmiş deprem yer hareketlerinin kullanılmasına izin verilmektedir. Buna göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde kullanılacak ölçeklenmiş deprem kayıtları için DBYBHY-2007 yönetmeliğince sağlanması gerekli koşullar Şekil 6'da tanımlanmıştır.



Şekil 6: Ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarında DBYBHY, (2007) yönetmeliğince sağlanması gerekli koşullar.

Bu çalışmada, zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan analizlerde, Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY-2007) nde belirtilmiş olan koşullar çerçevesinde ve birinci derece deprem bölgesi ( $A_0=0.40g$ ), Z2 yerel zemin sınıfı için tanımlanan % 5 sönümlü ve 50 yılda aşılma olasılığı % 10 olan tasarım ivme spektrumuna uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmiş toplam 7 adet deprem yer hareketi kullanılmıştır. Ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının elde edilmesinde izlenen yol aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Deprem büyüklüğü, faylanma mekanizması, mesafe ve zemin koşulları parametrelerine bağlı olarak PEER kuvvetli yer hareketi veri bankasından gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi.
2. Seçilmiş gerçek deprem kayıtlarının, % 5 sönüm oranı için tepki spektrumlarının ( $S_a^{gerçek}(T, \xi = 0.05)$ ) elde edilmesi.
3. Her bir deprem kaydı için elde edilmiş olan  $S_a^{gerçek}(T, \xi = 0.05)$  tepki spektrumunu,  $S_a^{hedef}(T, \xi = 0.05)$  hedef spektrumuna eşleştirmede kullanılacak ölçekleme katsayısının (6) bağıntısıyla hesaplanması.
4. Deprem kayıtlarının ölçek katsayısı ile çarpılarak %5 sönüm oranına sahip tepki spektrumlarının ( $\alpha S_a^{gerçek}(T, \xi = 0.05)$ ) elde edilmesi.
5. Ölçeklenmiş deprem kayıtlarından kuvvetli yer hareketi süresi bakımından deprem yönetmeliğinin öngördüğü koşulları sağlamayan kayıtların elenmesi. Yer hareketi süresi olarak zarf süre (Bracketed Duration) esas alınmıştır. Zarf süre, deprem kaydında belirli bir eşik ivme değerinin ilk ve son olarak aşıldığı anlar arasındaki süre olarak tanımlanmaktadır. Eşik ivme değeri olarak 0.05g lik ivme değeri kullanılmıştır.
6. Ölçeklemede gözönüne alınan  $T_1=0.01sn$  ve  $T_2=5.00sn$  periyotları ile tanımlı ölçekleme aralığı boyunca hedef spektrum ve ölçeklendirilmiş kayda ait tepki spektrumu genlikleri arasındaki oransal göreceli yüzdellik hata (OGH) miktarının;

$$|OGH(\%)| = \frac{\Delta T}{(T_2 - T_1)} \sum_{T_1}^{T_2} \left| \alpha S_a^{gercek}(T) - S_a^{hedef}(T) \right| / S_a^{hedef}(T) \times 100 \quad (7)$$

bağıntısıyla elde edilmesi.

Burada,

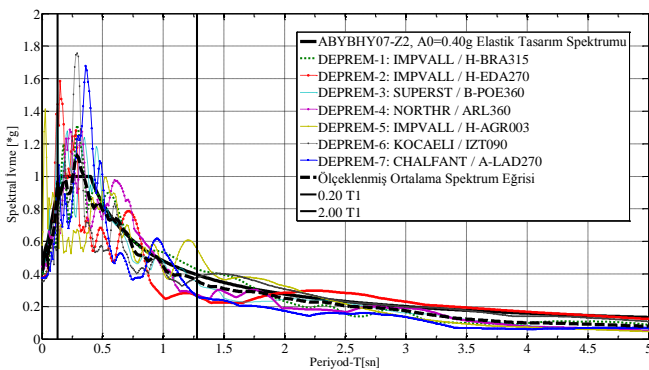
$\Delta T$  : Tepki spektrumlarının hesaplanmasında esas alınan periyot aralığıdır.

7. Ölçeklendirilmiş bütün kayıtlar içinde, ölçekleme katsayısı ve oransal göreceli hatası en küçük olan ilk 7 depremin seçilmesi
8. Seçilmiş deprem kayıtlarının deprem yönetmeliğinin öngördüğü koşulları sağlayıp sağlamadığının araştırılması.

Ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının elde edilmesine yönelik olarak yukarıda verilmiş olan (1-8) arasındaki hesap adımlarının gerçekleştirilmesine olanak sağlamak üzere, Fortran programlama dilinde kodlanmış OLCEK.FOR adlı bir bilgisayar programından yararlanılmıştır, [19]. Bu çalışma kapsamında, zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesaplar için seçilmiş 7 adet ölçeklendirilmiş deprem kaydına ait bilgiler ise Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesapta kullanılan Z2 yerel zemin sınıfı için kullanılan deprem kayıtları ve ölçekleme katsayıları ( $\alpha$ ).

Deprem	Kayıt	Kayıt Süresi [s]	Zarf Süre [s]	Ölçekleme Katsayısı ( $\alpha$ )	Pik İvme [g]
1.Imperial Valley-06	IMPVALL/H-BRA315	37.815	20.030	1.831	0.402
2.Imperial Valley-06	IMPVALL/H-EDA270	38.955	15.150	1.064	0.375
3.Superstition Hills-02	SUPERST/B-POE360	22.290	19.540	1.384	0.416
4.Northri-01	NORTHR/ARL360	39.980	21.960	1.449	0.446
5.Imperial Valley-06	IMPVALL/H-AGR003	28.350	25.260	1.558	0.577
6.Kocaeli	KOCAELI/IZT090	29.995	25.140	1.598	0.351
7.Chalfant Valley-02	CHALFANT/A-LAD270	39.975	31.210	2.141	0.375



Şekil 7: DBYBHY-2007, Z2 yerel zemin sınıfı, 1.derece deprem bölgesi ( $A_0=0.40$  g) tasarım ivme spektrumuna uyumlu olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarına ait spektrum eğrileri ve ortalama spektrum.

## 5 Analiz Yöntemi

DMÇÇP analitik modelinin doğrusal olmayan dinamik analizleri tasarım ivme spektrumuna uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmiş olan 7 adet ivme kaydı için OpenSEES yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde göz önüne alınan varsayımlar aşağıda sıralanmıştır.

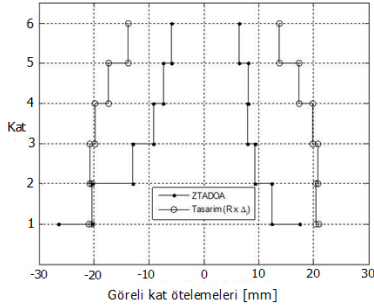
1. Binanın tamamı yerine sadece DMÇÇP'lerden biri (D aksı boyunca, 1-2 aksları arasındaki DMÇÇP) dikkate alınmaktadır,
2. Model bina için toplam eşdeğer deprem yükünün her bir DMÇÇP ye eşit dağıldığı varsayılmıştır. Diğer kolonların X doğrultusundaki kat kesme kuvvetlerinin aktarılmasına katkısı ihmal edilmektedir,
3. 1 ve 2 aksı D-C kirişlerinin sabit ve hareketli düşey yüklerden meydana gelen uç kuvvetleri analiz boyunca sabit kalacak şekilde 1-D ve 2-D kolonlarına her bir kat düzeyinde tekil yükler olarak etkililmektedir,
4. DMÇÇP'nin etkili alanı içindeki yayılı sabit ve hareketli düşey yükler, on parçaya bölünen kirişler üzerindeki düğüm noktalarına eşdeğer statik tekil yükler olarak etkililmektedir,
5. Kolon ve bağ kirişi uçlarının sistem düzlemine dik yer değiştirmeleri sınırlandırılmaktadır,
6. Kirişlerin kolonlara, çaprazların kiriş-kolon birleşim bölgeleri ile kiriş alt başlıklarına rijit olarak bağlandığı varsayılmaktadır. Birleşim levhalarının sistem davranışına olan etkisi terkedilmiştir,
7. Kolonların temele ankastr olarak mesnetlendiği varsayılmaktadır,
8. Kat kütleleri, sabit düşey yüklerin tamamı ve hareketli yüklerin % 30'u dikkate alınarak hesaplanmıştır,
9. Her bir katın kütleleri, ilgili kattaki kolonların üst uçlarında toplandığı ve sadece X-ekseni doğrultusundaki serbestlikleri göz önünde tutulduğu tekil kütleler halinde dikkate alınmaktadır,
10. Çapraz elemanlar için burkulma katsayısının, güvenli tarafta kalmak üzere  $K_c=1.00$  olduğu varsayılmaktadır,
11. Kolonların burkulma boyu hesabında, dış merkez çaprazlar nedeniyle düğüm noktalarının ötelenmesi önlendiğinden bu tür sistemlerin elemanları için verilen en büyük burkulma katsayısı, güvenli tarafta kalacak şekilde  $K_k = 1.00$  dikkate alınmaktadır,
12. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, sabit düşey yükler ( $g+0.30q$ ) ve yatay doğrultuda etkiyen deprem ivmelerinin ortak etkisi altında gerçekleştirilmektedir,
13. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde *Rayleigh* sönüm yaklaşımı kullanılmakta olup, sönüm oranı % 2 olarak dikkate alınmaktadır,

## 6 Sistem Performansının Değerlendirilmesi

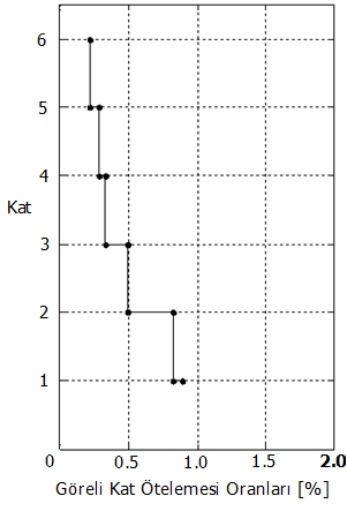
Sistem performansının değerlendirilmesinde, toplam 7 adet ivme kaydı kullanılarak elde edilen görel kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri, çaprazların ve kolonların iç kuvvet istemleri ile bağlantı kirişi kesme kuvveti ve dönme istemlerinin ortalama değerleri esas alınmaktadır. Bu büyüklükler, DBYBHY-2007'de sünellik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik perdeler için verilen koşullar dikkate alınarak irdelenmiştir.

Şekil 8, doğrusal olmayan dinamik analizler sonucunda elde edilen ortalama maksimum ve minimum görel kat yer değiştirmeleri ile tasarım görel kat yer değiştirmesi oranlarını ( $R \times \Delta_i$ ) göstermektedir. Şekil 8 incelendiğinde, 1. katın görel kat ötelemesinin haricinde tüm katlarda, ZTADOA ile hesaplanan görel kat ötelemeleri, DYBHY-2007'de tanımlanan etkin görel kat ötelemelerinden küçüktür. Etkin görel kat

ötelemesinin 1. katta aşılmasına rağmen, görelî kat ötelemesi oranı sınır değeri olarak verilen % 2 hiç bir katta aşılmamaktadır. Bu durum, tüm katlar için ZTADOA ile hesaplanan ortalama en büyük görelî kat ötelemesi oranlarının verildiği Şekil 9'da görülmektedir.

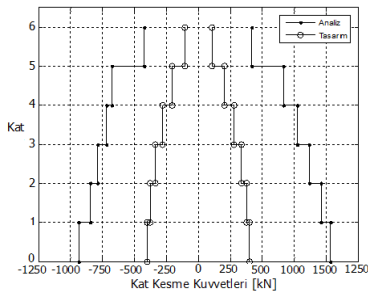


Şekil 8: ZTADOA-ortalama en büyük  $[(\Delta_{i,ort})_{maks}]$  ve tasarım  $[R \times \Delta_i]$  görelî kat ötelemeleri.



Şekil 9: ZTADOA-ortalama en büyük görelî kat ötelemesi oranları -  $[(\Delta_{i,ort})_{maks} / h_i]$ .

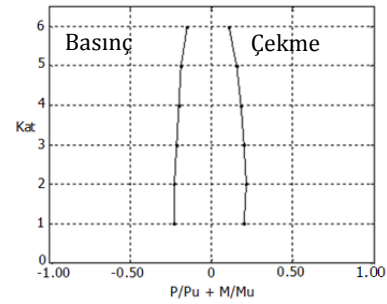
Şekil 10, ZTADOA ile elde edilen ortalama en büyük kat kesme kuvvetleri ile tasarımda dikkate alınan kat kesme kuvvetlerinin katlara göre değişimini ifade etmektedir. Analiz sonucu elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değeri, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile hesaplanan ve tasarımda esas alınan taban kesme kuvveti değerinin 2.68 katıdır. Bu değer DMÇÇP ler için DBYBHY-2007'de verilen 2.5 büyütme katsayısı ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 10: ZTADOA-ortalama en büyük ve DBYBHY-2007 tasarım kat kesme kuvvetleri.

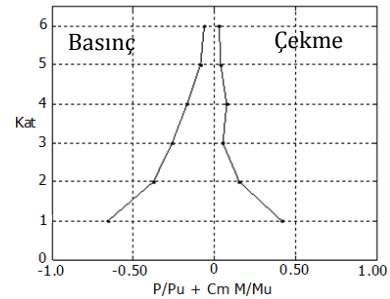
Şekil 11 ise, çaprazlarda analizler sonucu elde edilen en büyük eksenel kuvvetler ile bunlara karşı gelen eğilme momentlerinin, dayanım eksenel kuvvetlerine ve eğilme

momentlerine oranını göstermektedir. Şekilden, bağ kirişinin plastikleşmesine neden olan yüklemenin  $1.25D_a$  katından oluşan iç kuvvetlere göre tasarımı yapılan çaprazların hiç birinde basınç ve çekme dayanımlarının aşılmadığı görülmektedir. Eksenel kuvvet dayanımı  $P_u$ , basınç etkisi altında eleman burkulma dayanımına ( $1.7 \times \sigma_{bem} \times A$ ), çekme etkisi altında ise çekme dayanımına ( $1.7 \times \sigma_{çem} \times A$ ) eşit olarak dikkate alınmaktadır. Çapraz uç birleşimi nedeniyle oluşabilecek olası net enkesitin kopma dayanımının, kayıpsız enkesitin akma dayanımından büyük olduğu varsayılmaktadır. Çaprazlar için azaltılmış plastik moment kapasitesi,  $M_u$ , ( $P_{maks}/P_p$ ) oranının 0.25'ten küçük ve analizler sonunda elde edilen eğilme momentlerinden gelen en büyük katkının %2 mertebelerinde kalması nedeniyle, kesitin plastik moment kapasitesi  $M_p$ 'ye eşit olarak alınmaktadır. Eksenel akma dayanımını gösteren  $P_p$ ,  $\sigma_a \times A$  şeklinde hesaplanmaktadır. Plastik moment değeri  $M_p$  ise,  $\sigma_a \times W_p$ ' dir.



Şekil 11: Çaprazların bileşik eğilme etkisi altındaki etkileşimli istem/kapasite oranları.

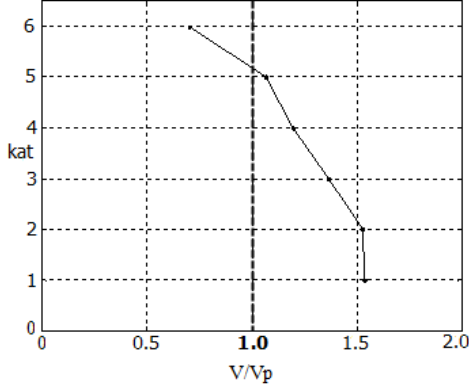
Şekil 12'de, eksenel kuvvet ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki kolonlarda etkileşimli istem/kapasite oranlarının katlara göre değişimi verilmiştir. Şekil 12'den de görüldüğü gibi, kolon istem/kapasite oranları ( $P/P_u + C_m M/M_u$ ), 1.0 değerinden oldukça küçük kalmaktadır. Burada  $C_m = 1.0$ ,  $P_u$  ve  $M_u$  sırasıyla, eksenel basınç altında burkulma dayanımını esas alan eksenel kuvvet dayanımını ve  $M_u (= M_p \times (1 - P_u / P_e))$  [20] eğilme düzlemi içinde stabilite kaybını dikkate alacak şekilde hesaplanan eğilme momenti dayanımını göstermektedir.  $P_e$  Euler (elastik) burkulma yükünü ifade etmektedir. Eksenel kuvvetin çekme olması halinde etkileşim, ( $P/P_u + M/M_u$ ),  $P_u = P_p$  ve  $M_u = M_p$  olarak gözönüne alınmaktadır. Burada, analizler sonunda elde edilen en büyük eksenel kuvvet  $P$  ve bu kuvvete karşı gelen eğilme momenti ise  $M$  ile gösterilmektedir.



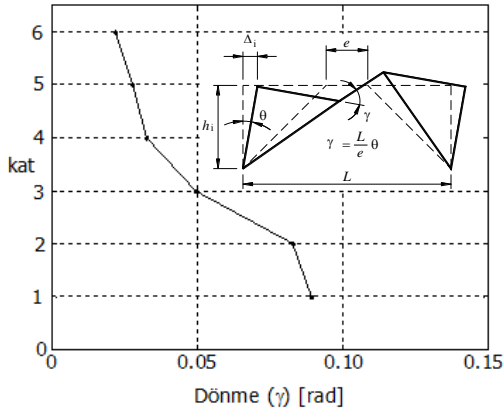
Şekil 12: Kolonların bileşik eğilme etkisi altında etkileşimli istem/kapasite oranları.

Etkileşimli istem/kapasite oranının oldukça küçük olması, diğer doğrultuda deprem yüklerinin aktarılması için sadece süneklik düzeyi yüksek çerçevelerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu doğrultuda kolon elemanlarının

boyutlandırılmasında belirleyici etken, dayanım yerine görel kat ötelemeleri olmaktadır. Etkin görel kat ötelemesi oranı sınır değerinin (%2) aşılmasını önlemek amacıyla kesitleri büyütülen kolonların dayanım oranları, dış merkez çaprazlı çelik perde düzlemi içinde elde edilen iç kuvvetler dikkate alınarak değerlendirildiğinde, küçük olarak elde edilmektedir. Her iki doğrultuda da süreklilik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik perdelerin kullanılmasıyla, kolonlar için daha ekonomik bir boyutlandırma yapılabilir.



Şekil 13: Bağ kirişinde  $[V/V_p]$  oranının katlardaki değişimi.



Şekil 14: Bağ kirişi  $\gamma$ -dönme açısının katlardaki değişimi.

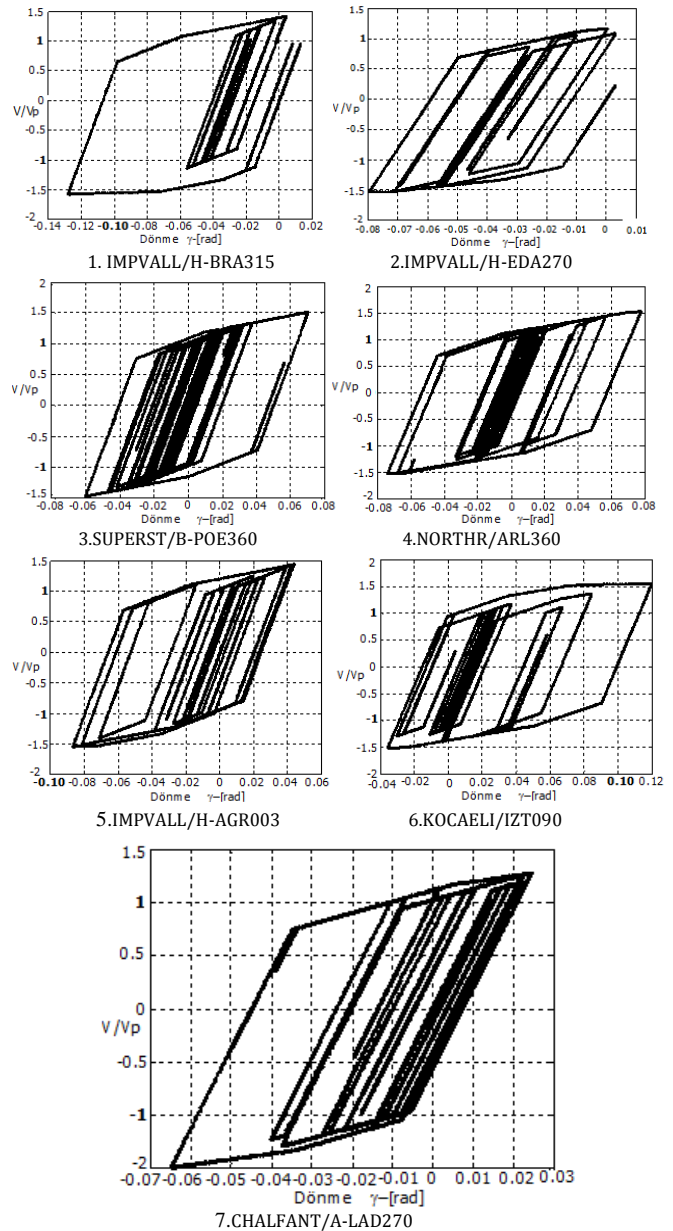
Şekil 13, bağ kirişi kesme kuvvetinin plastik kesme kuvvetine oranının katlara göre değişimini göstermektedir. Şekil 13 incelendiğinde, en üst kat hariç tüm bağ kirişlerinin kayma akma dayanımına ulaştığı gözlenmektedir. Bu durum, tasarım aşamasında bağ kirişi uzunluğunun belirlenmesinde kaymadan kaynaklanan akma için öngörülen ( $e \leq 1.6M_p / V_p$ ) bağlantısının yeterli olduğunu göstermektedir.

Şekil 14 bağ kirişi dönme açısının( $\gamma$ ) görel kat ötelemesi açısına( $\theta$ ) bağlı olarak tanımı ve bu açının katlara göre değişimini göstermektedir. Dönme açısına ait sınır değerler, bağ kirişinin uzunluğuna bağlı olarak 0.03rad ile 0.10rad arasında değişmektedir. Tasarım aşamasında bağ kirişi uzunluğu,  $e = 600\text{mm}$  ( $=0.86M_p / V_p$ ) olarak belirlenmiştir. Buna göre, DBYBHY-2007 Madde 4.8.4(a) dikkate alındığında bağ kirişi dönme açısının sınır değeri 0.10rad olarak verilmektedir.

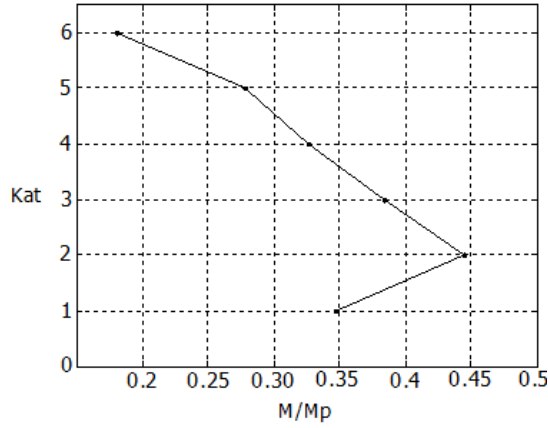
Şekil 14 incelendiğinde hiç bir katta bağ kirişi dönme açısı sınır değerinin aşılmadığı görülmektedir. Tasarım aşamasında birinci kata ait bağ kirişi dönme açısı 0.056rad olarak hesaplanmıştır. Analizler sonunda, birinci kata ait en büyük ortalama bağ kirişi dönme açısı değeri ise tasarım aşamasında

hesaplanan değer yaklaşık 1.50 katı olarak elde edilmiştir. Buna göre, bu örnekten elastik olarak hesaplanan bağ kirişi dönme açısının % 50 oranında aşılabildiği görülmektedir. Ayrıca, bağ kirişi uzunluğunun belirlenmesinde, DBYBHY-2007 Madde 4.8.8.2'de verilen önerinin ( $1.0 M_p/V_p \leq e$ ) dışına çıkılarak daha kısa bağ kirişi oluşturulması halinde, dönme isteminin artacağı beklenmelidir. Bu nedenle, dönme isteminin belirlenen sınırlar içinde karşılanabilmesi için çok kısa bağ kirişi oluşturulmasından kaçınılmalıdır.

Şekil 15, 7 adet deprem ivme kaydı için birinci kat bağ kirişine ait dönme açısının, kesme kuvveti/plastik kesme kuvveti oranı arasındaki değişimi göstermektedir. Şekil 15 incelendiğinde, 0.10 rad sınır dönme açısının bazı depremler için aşıldığı ve  $V/V_p$  oranının 1.5 değerine ulaştığı görülmektedir. Birinci kat ve diğer katlarda bağ kirişine ait dönme açısı ve kesme kuvveti/plastik kesme kuvveti oranı ortalama değerleri Şekil 13 ve 14'de verilmektedir.



Şekil 15: 7 adet deprem ivme kaydı için birinci Kat bağ kirişi dönme açısı- $\gamma$  ve kesme kuvvetleri oranının- $[V/V_p]$  değişimi.



Şekil 16: Bağ kirişi dışında kalan kiriş parçalarında oluşan en büyük eğilme momentinin plastik momente oranı.

Şekil 16, bağ kirişi dışında kalan kiriş parçalarında meydana gelen en büyük ortalama momentin plastik momente oranını göstermektedir. Şekil incelendiğinde, bağ kirişi dışında kalan kiriş parçalarında oluşan en büyük ortalama moment değerinin, tüm katlarda plastik moment değerinden oldukça küçük kaldığı görülmektedir. Tasarım aşamasında bağ kirişi dışında kalan kiriş parçasının elastik kalması öngörülmektedir. İncelenen DMÇÇP'de bağ kirişi dışında kalan kiriş parçalarında oluşan en büyük eksenel basınç kuvvetinin akma basınç kuvvetine oranı %1 olduğundan, eksenel basınç kuvvetinin plastik momente etkisi terk edilmiştir.

## 7 Sonuç

Bu çalışmada, DBYBHY-2007'ye uygun olarak boyutlandırılan ve orta yükseklikteki dış merkez çaprazlı çelik perdelerin (DMÇÇP) bulunduğu yapı sistemlerini temsil eden model bir yapı sistemi gözönüne alınmıştır. Bu model için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi (ZTADOA) kullanılarak deprem istemleri elde edilmiş ve bu istemler DBYBHY-2007'de öngörülen kapasite tasarımı ilkeleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

- Plastik şekil değiştirmeler, bağ kirişi tasarımında öngörüldüğü gibi kayma etkisi altında oluşmaktadır,
- Bağ kirişi dışında kalan kiriş parçaları doğrusal elastik davranış göstermektedir,
- Çapraz elemanlarda çekme kuvveti etkisi altında akma ve burkulma meydana gelmemektedir,
- DBYBHY-2007'de öngörülen görel kat ötelemesi oranı sınır değerleri aşılmamaktadır,
- Etkin görel kat ötelemesi sınırı olan % 2 değerinin aşılmasını önlemek amacıyla enkesitleri büyütülen kolonların dayanım oranları, dış merkez çaprazlı çelik perde düzlemi içinde oluşan iç kuvvetler dikkate alınarak değerlendirildiğinde küçük olarak elde edilmektedir. Her iki doğrultuda da süneklik düzeyi yüksek dış merkez çaprazlı perdelerin kullanılmasıyla kolonlar için daha ekonomik bir boyutlandırma yapılabilir.

Bu çalışmada göz önüne alınan ve altı katlı DMÇÇP için elde edilen sayısal sonuçlar bütünüyle değerlendirildiğinde, DBYBHY-2007'de öngörülen kapasite tasarım esaslarının yeterli olduğu görülmektedir.

## 8 Semboller

$C_m$	: Moment dağılımını ifade eden bir katsayı,
$M_p$	: Plastik eğilme momenti,
$P_p$	: Eksenel akma dayanımı,
$P_u$	: Eksenel çekme veya basınç dayanımı,
$P_e$	: Euler(elastik) burkulma yükü,
$P_{maks}$	: Çaprazlardaki maksimum eksenel kuvvet,
$V_p$	: Kesme kuvveti kapasitesi,
$G$	: Kayma modülü,
$A_{kayma}$	: Kayma alanı,
$A$	: Enkesit alanı,
$h$	: Enkesit yüksekliği,
$t_w$	: Gövde kalınlığı,
$t_r$	: Başlık kalınlığı,
$W_p$	: Plastik mukavemet momenti,
$e$	: Bağ kirişi boyu,
$\Delta_i$	: $i$ 'nci kat için görel kat ötelemesi,
$\gamma$	: Bağ kirişi dönme açısı,
$\theta$	: Görel kat ötelemesi açısı,
$h_i$	: $i$ . katın kat yüksekliği,
$R$	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı,
$g$	: Sabit yük simgesi,
$q$	: Hareketli yük simgesi,
$\sigma_a$	: Yapı çeliğinin akma dayanımı,
$D_a$	: Akma gerilmesi artırım katsayısı,
$\sigma_{bem}$	: Basınç emniyet gerilmesi,
$\sigma_{çem}$	: Çekme emniyet gerilmesi,

## 9 Kaynaklar

- Berman, J.W., Okazaki, T., Hauksdottir, H.O., "Reduced Link Sections for Improving the Ductility of Eccentrically Braced Frame Link-to-Column Connections", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136, No.5, 543-553, 2010.
- Bosco, M., Rossi, P.P., "Seismic behavior of eccentrically braced frames", Engineering Structures, Vol. 31, 664-674, 2009.
- Crısan, A., Staratan, A., "Overstrength Demands in Multistorey Eccentrically Braced Frames", Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Sustainability in Science Engineering, 401-406.
- Koboevic, S., David, S.O., "Design and Seismic Behaviour of Taller Eccentrically Braced Frames", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 37, 195-208, 2010.
- Lin, K-C., Lin, C-C. J., Chen J-Y., Chang, H-Y., "Seismic reliability of steel framed buildings", Structural Safety, Vol. 32, 174-182, 2010.
- Okazaki, T., Engelhardt, M.D., Drolias, A., Schell, E., Hong, J-K., Uang, C-M., "Experimental investigation of link-to-column connections in eccentrically braced frames", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, 1401-1412, 2009.
- Richards, P.W., Uang, C-M., "Effect of Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 10, 1546-1552, 2005.
- Richards, P.W., "Seismic Column Demands in Ductile Braced Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, 135 (1), 33-41, 2005.



- [9] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara, 2007.
- [10] Aydınöğlü, M.N., Celep, Z., Özer, E., Sucuoğlü, H. "Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik açıklamalar ve örnekler kitabı", T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, IPKB-İstanbul Proje Koordinasyon Merkezi, 2012.
- [11] SAP2000, "Structural Analysis Program", Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 2005.
- [12] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. "The **Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES)** User Command-Language Manual." Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. Calif., Berkeley, CA, (<http://opensees.berkeley.edu>), 2006.
- [13] Ramadan, T., and Ghobarah, A., "Analytical model for shear-link behavior." Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(11), 1574-1580, 1995.
- [14] Richards, P.W., "Testing protocol for short links in eccentrically braced frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, 132(8), 1183-1191, 2006.
- [15] Bruneau, M., Uang, C-M. and Whittaker, A. "Ductile Design of Steel Structures", Mc. Graw Hill, 1998.
- [16] PEER Strong Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center. California. <http://peer.berkeley.edu/smcat>, 2007.
- [17] Nikolau, A.S., "A GIS Platform for Earthquake Risk Analysis", PhD. Dissertation, State University of New York at Buffalo, 1998.
- [18] Fajhan, Y.M., "Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY,2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi ", IMO Teknik Dergi, Yazı: 292, 4423-4444, 2008.
- [19] Durgun, Y. "Mevcut betonarme yapıların deprem performanslarının belirlenmesi ve viskoz akışkanlı sönümleyiciler ile güçlendirilmesi için artımsal analize dayalı bir algoritma, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2012.
- [20] Salmon, C.G. and Johnson, J.E. and Malhas, F.A. "Steel Structures-Design and Behavior", 5th Edition, Pearson, Prentice Hall, USA.