



Merkezi çaprazlı çerçevelerde dayanım farklılığı sonucu oluşan burulma etkileri

Bora Akşar^{1*}, Bülent Akbaş¹, Ercan Şerif Kaya², Ferit Çakır³

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41400, Türkiye

²Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya, 07450, Türkiye

³İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34295, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Merkezi çaprazlı çelik yapı tasarımı
- Farklı kat seviyeleri için doğrusal olmayan burulma etkileri
- Farklı çapraz dayanım konfigürasyonundan oluşacak doğrusal olmayan burulma etkileri

Makale Bilgileri

Geliş: 31.05.2016

Kabul: 09.01.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406776

Anahtar Kelimeler:

Merkezi çaprazlı çerçeveler,
burulma etkileri,
sismik tasarım

ÖZET

Bu çalışma, çapraz elemanların dayanımındaki rastlantısal farklardan dolayı merkezi çaprazlı çerçeveler (MÇÇ) kullanılarak tasarlanmış yapıların kuvvetli deprem yer hareketleri altında sergilediği burulma davranışını incelemeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, çaprazlardaki dayanım farklılığının, çaprazın gerçek dayanımının minimum akma gerilmesinden (F_y) değil, arttırılmış (beklenen) akma gerilmesinden ($R_y F_y$) kaynaklandığı kabulü yapılmıştır. Bu amaçla alçak ve orta katlı yapıları temsilen, üç ve dokuz katlı dış çerçeveleri MÇÇ olarak tasarlanmış farklı çapraz dayanım konfigürasyonlarına sahip iki yapıdaki burulma nedeniyle oluşabilecek doğrusal olmayan davranış kuvvetli deprem yer hareketleri altında incelenmiştir. Yapının kapasite eğrisi farklı durumlar için elde edilmiştir ve zaman tamın alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile belirlenen görelî kat öteleme oranları sunulmuştur.

Relative story displacements and torsional effects caused by strength variations in concentrically braced frames

H I G H L I G H T S

- Design of structures having concentrically braced frames
- Inelastic torsional effects on structures having different story levels
- Inelastic torsional effects on braces having different strength configurations

Article Info

Received: 31.05.2016

Accepted: 09.01.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406776

Keywords:

Concentrically braced
frames,
torsional effects,
seismic design

ABSTRACT

This study will investigate the accidental torsional response in steel structures designed by CBFs due to the variation in strength of braces under strong earthquake ground motions. For this study, it is assumed that the variation in strength of braces would come from the expected yield stress ($R_y F_y$) rather than minimum specified yield stress (F_y) of brace member. For this purpose, inelastic torsional response of a three and nine-story building having perimeter CBFs having various brace strength configurations subjected to strong earthquake ground motions is investigated in detail. The results are presented in the form of base shear vs. roof displacement (pushover curve, capacity curve) and drift ratio through nonlinear dynamic response analyses.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çelik binalardaki merkezi çaprazlı çerçeveler (MÇÇ) sismik yüklere karşı en etkili yatay yük taşıyıcı sistemlerden biridir. MÇÇ'nin en önemli avantajları arasında yanıl rijitlik ve dayanımın en ekonomik kesitler kullanılarak sağlanması ve MÇÇ tasarım hesaplarının kolaylıkla yapılabilmesi gösterilebilir. Ancak, MÇÇ düşük enerji sönmleme kapasitesine ve çevrimsel yüklem altında çapraz elemanda oluşabilecek global burkulma ve bağlantılarında oluşabilecek gevrek kırılma sebebiyle de düşük sünekliğe sahiptir [1]. MÇÇ'de yatay yüklere karşı çalışan elemanlar çaprazlardır ve çapraz elemanların narinlik oranının artması, çaprazın sismik enerji sönmleme kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır. Çapraz elemanın aksel kuvvet-deformasyon ilişkisi moment çerçevelerdeki moment-dönme ilişkisinden büyük ölçüde farklıdır ve çevrimsel yüklem altında simetrik olmayan, basınç altında önemli oranda dayanım kaybı gösteren bir davranışa sahiptir.

Ülkemizde, günümüze dek daha yaygın olarak betonarme taşıyıcı sistemler üzerine çalışmalar yapılmıştır, bunlar içerisinde deney binasının hasar düzeyinin belirlenmesinden [2], zayıf kolon-kiriş birleşimlerinin incelenmesinden [3], hasar verilerinin incelenmesinde titreşim verilerinden yararlanarak kalibrasyon yapılmasından [4] ve ilköğretim yapılarının incelenmesine varan [5] konuları içermektedir. Merkezi çaprazlı çerçevelerin doğrusal olmayan davranışının belirlenmesine yönelik çalışmalar da son zamanlarda hız kazanmıştır. Tremblay vd. [6] kutu kesitli profillerden oluşmuş merkezi çaprazlı çerçevelerin doğrusal olmayan davranışını belirlemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Bununla birlikte çaprazların düzlem dışı deformasyonlarını tahmin etmeye yönelik basit bir denklem önermişlerdir. Tremblay ve Poncet [7] kütle düzensizliği bulunan 8 katlı MÇÇ'nin deprem davranışını incelemiş, kütle düzensizliğinin hemen kullanım seviyesinde elastik davranış üzerinde önemli ölçüde etkisi olmadığı sonucuna varmıştır. Erduran ve Ryan [8], 4 farklı deprem seviyesi için 3 katlı MÇÇ yapısının doğrusal olmayan burulma davranışını üzerinde çalışmalar yapmışlar, ayrıca burulma davranışını tahmin etmek için statik itme analizi ve elastik davranış spektrumunu değerlendirme yöntemi olarak kullanmışlardır. Cakir vd. [9], MÇÇ'nin çapraz elemanlarındaki sismik enerji tüketme taleplerini doğrusal olmayan malzeme davranışını göz önüne alarak incelemişlerdir. Akbas vd. [1], FEMA P695 [10] standardının önerdiği değerlendirme kriterlerini kullanarak, sünek ve sünek olmayan MÇÇ yapılarının göçme olasılıkları üzerinde doğrusal olmayan dinamik analizler ile çalışmalar yapmıştır. Kaymak ve Tuna [11], dolgu duvarların çelik çerçevelerin yatay kuvvet altındaki davranışları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yedi farklı dolgu duvar kombinasyonu kullanarak, çelik çerçevelerde simetrik ve asimetrik dolgu duvar dağılımının maksimum yük, enerji dağılımı, süneklik, yatay deplasman ve en büyük taban kesme kuvveti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Merkezi çaprazlı çerçevelerden oluşan bir yapıda, burulma düzensizliğinin sadece kütle ve rijitlik

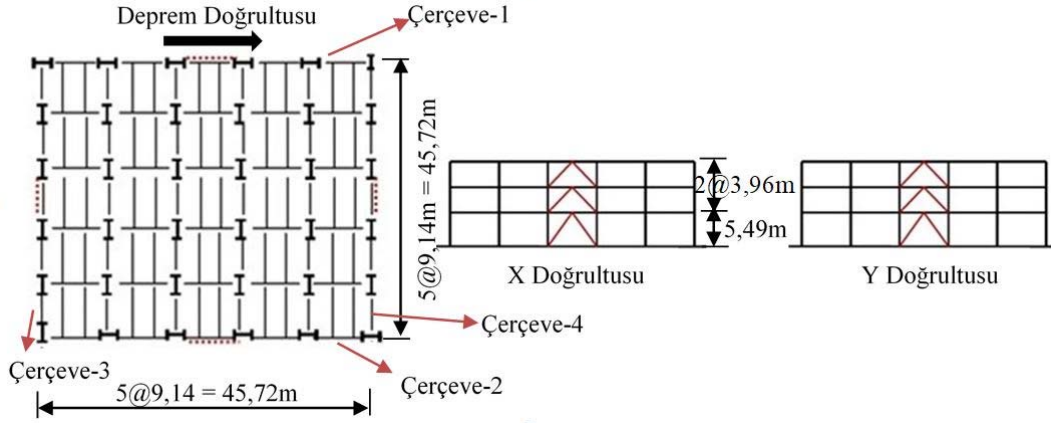
merkezi farklılığından değil çaprazlardaki dayanım farklılığından da kaynaklanabilir. Bu çalışmada, çapraz elemanların dayanımındaki olası farklılardan dolayı MÇÇ kullanılarak tasarlanmış 3 ve 9 katlı iki yapının kuvvetli deprem yer hareketi altında sergilediği burulma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, çaprazlardaki dayanım farklılığının çaprazın minimum akma gerilmesinden (F_y) değil, artırılmış (beklenen) akma gerilmesinden ($R_y F_y$) kaynaklandığı kabulü yapılmıştır. Bu amaçla alçak ve orta katlı yapıları temsilen, 3 ve 9 katlı, dış çerçeveleri MÇÇ olarak tasarlanmış farklı çapraz dayanım konfigürasyonlarına sahip iki yapıdaki burulma nedeniyle oluşabilecek doğrusal olmayan davranış, kuvvetli deprem yer hareketleri altındaki incelenmiştir. Sonuçlar, yapının kapasite eğrisi ve zaman tamın alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile elde edilen görel kat öteleme oranları şeklinde belirtilmiştir.

2. ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYTICAL STUDY)

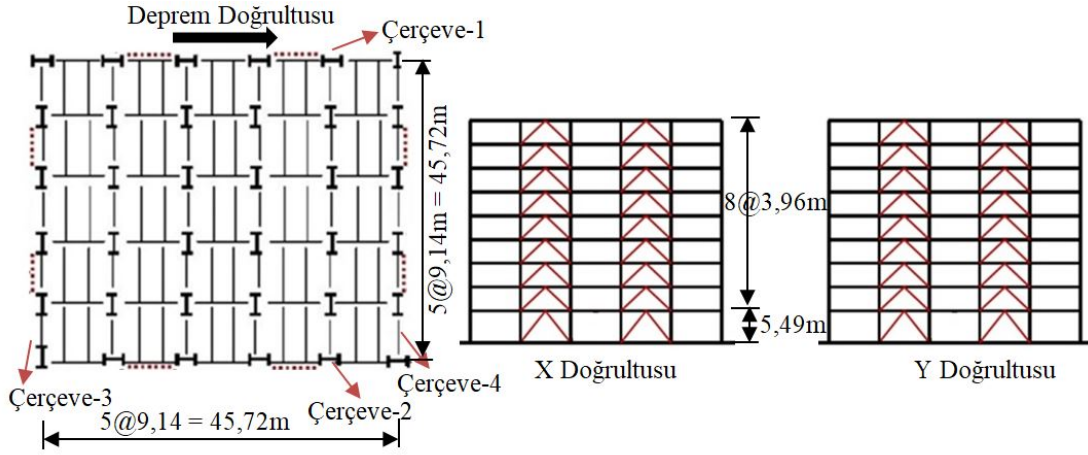
2.1. Yapının Tanımı (Structural Configuration)

Kuvvetli deprem yer hareketleri altındaki elastik olmayan burulma davranışını incelemek amacıyla Akbaş vd. [12] tarafından tasarlanan 3 ve 9 katlı iki bina kullanılmıştır. Kullanılan iki adet binadaki çapraz dayanımları değiştirilerek, çeşitli çapraz dayanım konfigürasyonlarını içeren 8 farklı durum oluşturulmuştur. Binaların taşıyıcı sistemleri bina çevresindeki MÇÇ'lerden oluşmaktadır. Yapıların planı simetriktir ve plan ölçüleri 45,72 m x 45,72 m boyutlarındadır. Kat yükseklikleri ilk katta 5,49 m, normal katlarda 3,96 m'dir. MÇÇ'ler 9,14 m uzunluğunda 5 açıklıktan oluşmaktadır. Binalara ait kesit ve plan görünüşleri Şekil 1 ve Şekil 2'de sunulmuştur. Her bir bina için iç çerçeveler mafsallı bağlantılarla teşkil edilip sadece düşey yükleri taşımakta, yatay yükler binanın çevresindeki MÇÇ'ler tarafından aktarılmaktadır. Dış çerçeve bağlantıları mafsallı bağlantı tercih edilmiştir. Yapısal sistemin dayanımı ve stabilitesi artırılmış deprem etkileri altında da kontrol edilmiş, ayrıca, AISC 341-10 [13] yönetmeliğine göre belirlenmiş en kesit (kompaktlık) şartları (kolon ve çaprazlar için yüksek süneklik seviyesi, kirişler için orta süneklik seviyesi) uygulanmıştır. Her bir binanın katlarının yatay düzlemde rijit diyafram hareketi yaptığı kabul edilmiştir. Ters V şeklindeki çelik çaprazlı çerçeve için taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R), 6; taşıyıcı sistem dayanım fazlalığı (veya büyütme) katsayısı (Ω_o), 2 ve yer değiştirme büyütme katsayısı (C_d), 5 alınarak taban kesme kuvveti, dayanıma göre hesap ve görel kat öteleme kontrolleri yapılmıştır.

Çapraz elemanlar için kutu kesitli S275 kalitesinde profiller kullanılmıştır. Kolon ve kirişler için ise S355 yapısal çelik kalitesinde Amerikan geniş başlıklı kesitler kullanılmıştır. Her iki yapıya da ait kesit bilgileri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Binaların deprem hesapları için $S_s=1,5g$ ve $S_1=0,8g$ olarak kabul edilmiştir. Katlarda eleman ağırlıklarını da içeren sabit yükler $3,84 \text{ kN/m}^2$, hareketli yükler ise $2,4 \text{ kN/m}^2$ olarak alınmıştır.



Şekil 1. 3 Katlı yapı planı ve kesiti (Plan and section view of 3 story building)



Şekil 2. 9 Katlı yapı planı ve kesiti (Plan and section view of 9 story building)

Tablo 1. 3 Katlı binada kullanılan kesitler (Profiles used in 3 story building)

Kat	Çapraz Elemanlar	Çaprazsız Açıklık Kirişleri	Çaprazlı Açıklık Kirişleri	Çaprazlı Açıklık Kolonları	Dış Kolonlar
Çatı	HSS 7 x 7 x 1/2	W 21 x 44	W 21 x 306	W 14 x 40	W 12 x 40
2. Kat	HSS 7 x 7 x 1/2	W 21 x 44	W 21 x 335	W 14 x 40	W 12 x 40
1. Kat	HSS 10 x 10 x 5/8	W 21 x 44	W 21 x 395	W 14 x 65	W 12 x 40

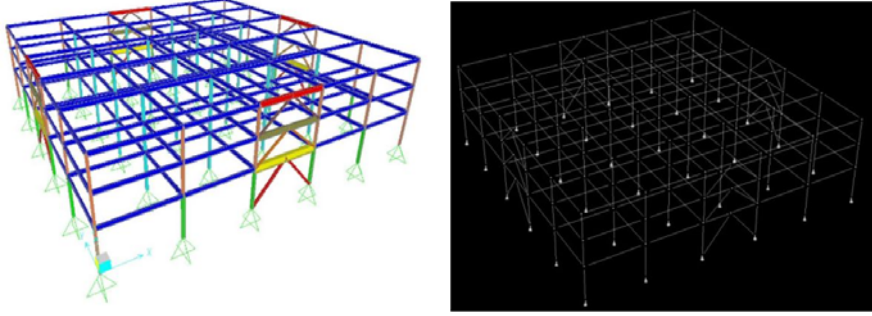
Tablo 2. 9 Katlı Binada kullanılan kesitler (Profiles used in 9 story building)

Kat	Çapraz Elemanlar	Çaprazsız Açıklık Kirişleri	Çaprazlı Açıklık Kirişleri	Çaprazlı Açıklık Kolonları	Dış Kolonlar
Çatı	HSS 7 x 7 x 1/2	W 21 x 44	W 33 x 221	W 14 x 48	W 14 x 48
8. Kat	HSS 7 x 7 x 1/2	W 21 x 44	W 33 x 221	W 14 x 68	W 14 x 48
7. Kat	HSS 8 x 8 x 5/8	W 21 x 44	W 33 x 291	W 14 x 68	W 14 x 48
6. Kat	HSS 8 x 8 x 5/8	W 21 x 44	W 33 x 291	W 14x 159	W 14 x 48
5. Kat	HSS 9 x 9 x 5/8	W 21 x 44	W 30 x 357	W 14x 159	W 14 x 48
4. Kat	HSS 9 x 9 x 5/8	W 21 x 44	W 30 x 357	W 14 x 233	W 14 x 48
3. Kat	HSS 10 x 10 x 5/8	W 21 x 44	W 33 x 354	W 14 x 233	W 14 x 48
2. Kat	HSS 10 x 10 x 5/8	W 21 x 44	W 33 x 354	W 14 x 455	W 14 x 61
1. Kat	HSS 10 x 10 x 5/8	W 21 x 44	W 36 x 395	W 14 x 455	W 14 x 61

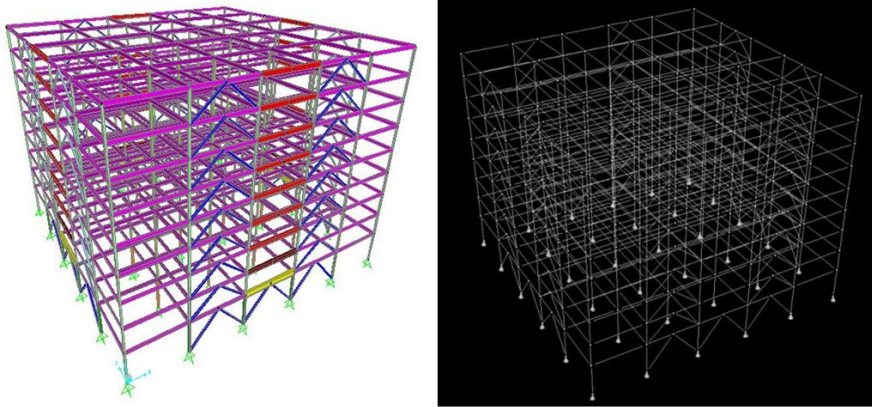
Yapının sayısal modeli SAP2000'de [14] oluşturulmuş, doğrusal olmayan analizler ve performans değerlendirilmesi PERFORM 3D V.5 [15] doğrusal olmayan analiz programı ile yapılmıştır. Binalara ait SAP2000 ve PERFORM 3D modelleri Şekil 3 ve 4'de verilmiştir.

Çaprazlara ait tanımlanan aksel kuvvet – birim şekil değiştirme modeli Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 2'de P_{cr} , nominal basınç dayanımını; P_y , nominal çekme dayanımını ifade etmektedir. Burkulma sonrası basınç kapasitesi $P_{residual}$,

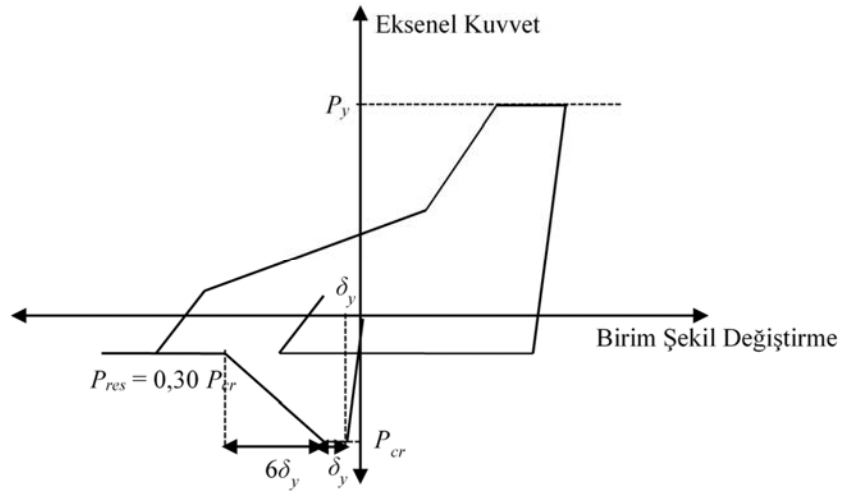
AISC 341-10 yönetmeliğine göre nominal basınç kapasitesinin %30'u ($0,3P_{cr}$) olarak alınmıştır. Aksel akma birim deformasyonu, δ_y , P_{cr} seviyesine karşılık gelmektedir. Sayısal instabilite (karasızlık) problemlerini engellemek amacıyla burkulma sonrası dayanım değişmeksizin az miktarda aksel birim kısalma bölgesi olduğu kabul edilmiştir. Çevrimdeki basınç şekil değiştirmelerinin artması sonucu oluşan çekme-uzama etkisi PERFORM 3D [15] programında uzama faktörü 0,05 olarak tanımlanmıştır. Çapraz elemanın doğrusal olmayan davranış modelinde,



Şekil 3. 3 Katlı binaya ait SAP2000 ve PERFORM 3D modelleri (Sap2000 and Perform 3D models of 3 story building)



Şekil 4. 9 Katlı binaya ait SAP2000 ve PERFORM 3D modelleri (Sap2000 and Perform 3D models of 9 story building)



Şekil 5. Çaprazlara ait aksel kuvvet – Birim şekilde değiştirme grafiği (Axial load – Strain diagram of Brace)

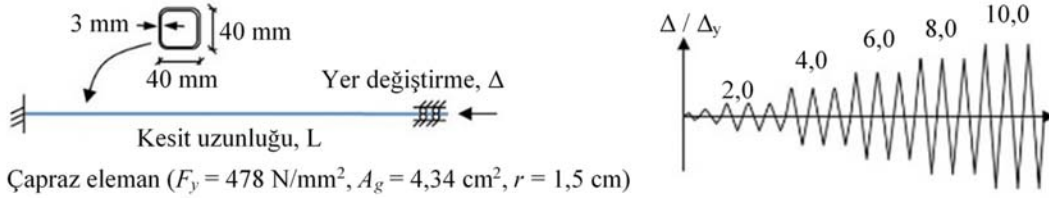
kutu kesitli profiller için arttırılmış gerilme katsayısı $R_y = 1,4$ alınarak beklenen gerilme $R_y F_y$ olarak tanımlanmıştır. Çapraz elemanların bulunduğu açıklıktaki kolon ve kirişler için AISC 341-10 [13] yönetmeliğine uygun olarak pekleşme etkisi %5 için normal kuvvet – moment (P-M) etkileşimi tanımlanmıştır. 3 ve 9 katlı MÇÇ'lerin doğal periyotları sırasıyla 0,638 ve 1,254 sn olarak bulunmuştur. Doğrusal olmayan dinamik analizler için yapı sönümü %5 olarak kabul edilmiş ve Rayleigh sönümü kullanılmıştır.

2.2. Çapraz Elemanların Modellenmesi (Modeling of Brace Members)

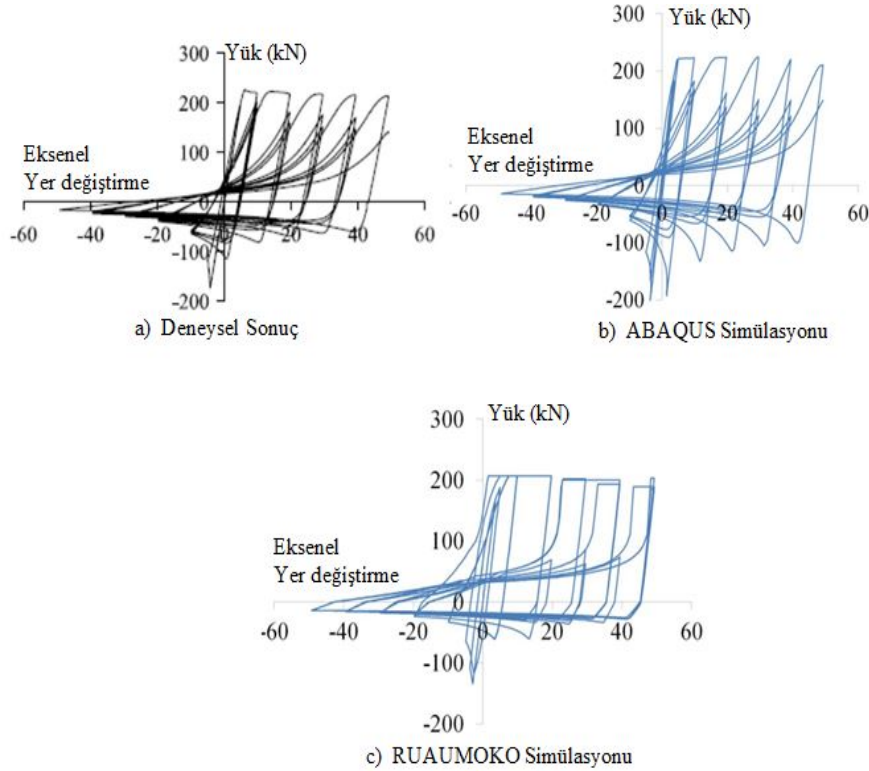
Binalarda kullanılan çapraz elemanların Perform 3D ile sağlıklı bir şekilde modellenmesi amacıyla, Nip vd. tarafından yapılan deneyde [16] kullanılan ve Şekil 6 'da verilen çapraz eleman ile yükleme protokolü Perform 3D de modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 8'de çapraz eleman için Perform 3D'de elde edilen aksel yer

değiştirme – yük çevrimsel (yer-yük değiştirme) eğrisi görülmektedir. Bu sonuçlar, Şekil 7'de verilen deneysel sonuçlarla, ABAQUS ve RUAUMOKO programları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılınca çok yakın sonuç vermektedir. Bu aşamadan sonra binalarda kullanılan çapraz kesitlerinin modellenmesine geçilmiştir. Deneyde kullanılan kesit, HSS 10*10*5/8 kesittir.

Çaprazlar doğrusal olmayan çelik çubuk (Inelastic Steel Bar) olarak modellenmiştir. Program bu tanımlama için her çapraz profile ait malzeme tipini ve kesit alanını istemektedir. Şekil 9'da bu menü gösterilmektedir. Çaprazlarda kullanılan malzeme, basınç altında burkulmaya izin veren (burkulabilir) doğrusal olmayan çelik malzeme (Inelastic Steel Material, Buckling) malzeme modelidir. Yani malzeme; burkulma özelliğinin tanımlanabildiği elastik olmayan çelik bir malzemedir. Bu malzemeye ait gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi genel hali ile Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 6 Örnek çapraz eleman ve Nip vd. tarafından yapılan deneylerde kullanılan yükleme protokolü [16]
(Braced member and loading procedure used in experiment conducted by Nip et. al)



Şekil 7. Çapraz elemanın deney ve simülasyon sonuçları (Experiment and simulation result for Braced member)

Şekil 9’da görüldüğü gibi malzemeye ait elastisite modülü, maksimum çekme gerilmesi, maksimum uzama şekil değiştirmesi, maksimum basınç gerilmesi, maksimum kısılma şekil değiştirmesi ve diğer kesite ait limit değerler tanımlanmaktadır. Maksimum çekme gerilmesi 317 Mpa kabul edilmiştir ve kritik basınç gerilmesi hesaplanmıştır. Şekil değiştirmeye limitleri ise aşağıdaki gibi alınmıştır;

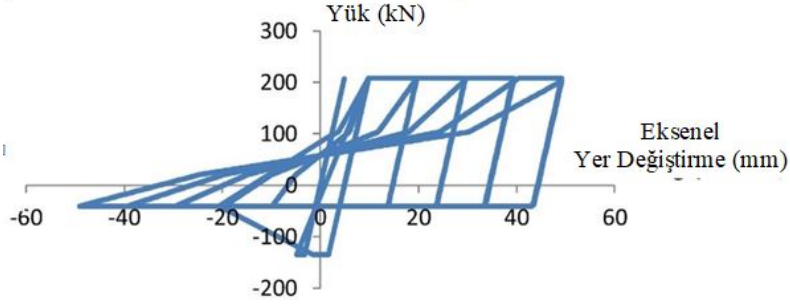
- Maksimum uzama şekil değiştirmesi akma uzamasının 100 katı (Programın sonlanmasını engellemek için),
- Maksimum kısılma şekil değiştirmesi akma kısılmasının 100 katı (Programın sonlanmasını engellemek için),
- DL limiti akma kısılmasının 2 katı,
- DR limiti akma kısılmasının 8 katı olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca aşağıda Şekil 10’da ise aynı modele ait “Çevrimsel Kuvvet-Deformasyon İlişkisi” özellikleri de tanımlanmıştır.

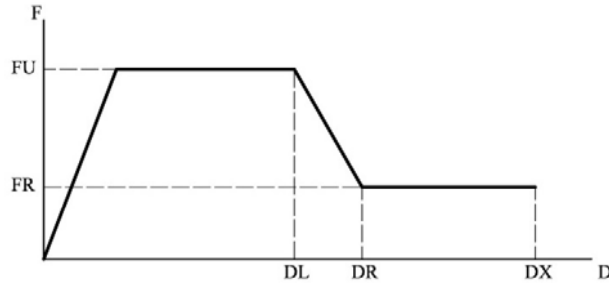
Bu özellikler daha önce doğrulamasını yaptığımız çekme elemanından alınmıştır. Şekil 10’dan da anlaşıldığı üzere burkulma sonrasındaki tekrar yüklemelerdeki dönüm noktaları “Nokta A” ve “Nokta B” olarak tanımlanmıştır. Programda ilgili yerlere bu noktaların maksimum gerilme ve şekil değiştirmelere oranları girilmek suretiyle tanımlama yapılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak bir de “Gerilme Esneme Faktörü” %5 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, Şekil 11’de HSS10X10X5/8 kesitine ait şekil değiştirmeye grafiği verilmiştir.

2.3. Çaprazlı Açıklıktaki Çelik Kirişlerin Modellenmesi (Modeling of Braced Bay Steel Beams)

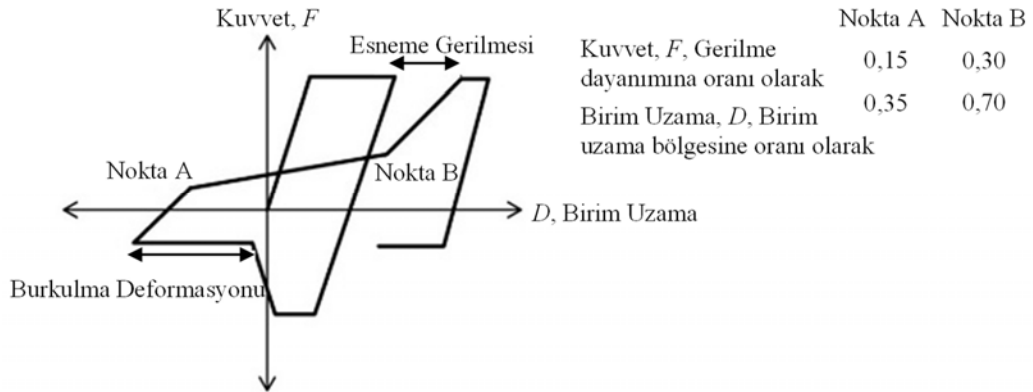
Çaprazlı açıklıklardaki çelik kirişler, çaprazlardan dolayı oluşan dengelenmemiş kuvvetler dolayısıyla bir kolon gibi modellenmiştir. Tüm çaprazlı açıklıklardaki kiriş elemanları



Şekil 8. Perform 3D programını ile elde edilen Yük- Aksel yerdeğiştirme diyagramı
(Perform 3D result for Load – Axial displacement diagram)



Şekil 9. Doğrusal olmayan burkulabilir çelik malzeme Gerilme – Birim şekil değiştirme ilişkisi
(Stress- Strain relation for inelastic steel material with buckling)



Şekil 10. Çevrimsel Kuvvet-Deformasyon ilişkisi (Force-Deformation loop)

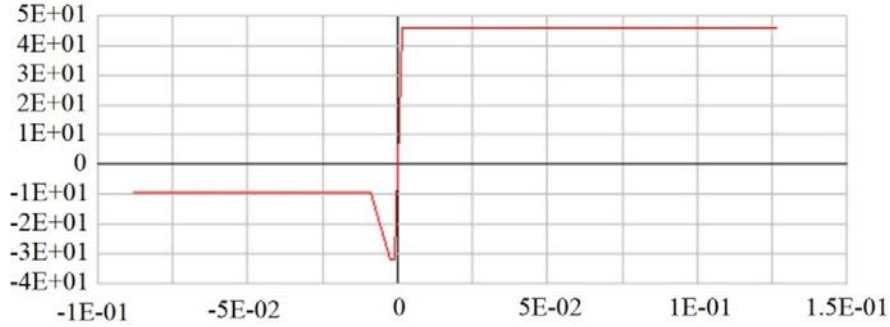
mafsallı birleşimlere sahiptir. Merkezi çelik çaprazlı çerçevelerde zaten bütün birleşimler (kiriş-kolon, çapraz-kiriş, çapraz-kolon birleşimleri) mafsallı birleşimdir. Ayrıca, bir de kirişin orta noktasında, çaprazların birleştiği noktalara çok yakın bir noktaya lineer olmayan davranışı modelleyebilmek açısından bir “Eksenel Kuvvet-Moment” mafsallı atanmıştır. Böylece bir yarım kiriş parçası; bir ucunda dönmeye karşı serbestlik (moment release), doğrusal kalan kısım ve diğer ucunda Eksenel Kuvvet-Moment mafsallı olmak üzere üç kısımdan meydana gelmektedir. Burada doğrusal olmayan davranışı kontrol eden Eksenel Kuvvet-Moment mafsallını programda “Çelik Dönme Tipli Doğrusal Olmayan Eksenel Kuvvet-Moment Mafsallı (Inelastic P-M2-M3 Hinge Steel Rotation Type)” olarak tanımlanmıştır. Kesit özellikleri “Standart Çelik Kesitli kolon (Column, Standart Steel Section)” olarak programın kendi profil kütüphanesinden çağırarak oluşturulabileceği gibi “Standart Olmayan Çelik Kesitli Kolon (Column, Non-Standart Steel Section)” olarak da tanımlanabilir. Kolon modeli oluşturulurken, elastisite modülü, poisson oranı, akma gerilmeleri ve akma yüzeyini tanımlayan katsayıların programda ilgili bölümlere girilmesi gerekmektedir. Böylece “Eksenel Kuvvet-Moment Mafsallı (P-M2-M3 hinge)” menüsünde çağrıldığında tüm doğrusal olmayan özellikler tanımlanmış olacaktır. Bu tanımlamalardan sonra “Eksenel Kuvvet-Moment Mafsallı, Çelik Dönme Tipli (P-M2-M3 Hinge, Steel Rotation Type)” menüsünde “Temel Kuvvet-Deplasman ilişkisi (Basic F-D Relationship)” sekmesindeki deformasyon sınırlarını belirlenmesi gerekmektedir. Bu sınırlarda 0,1 yani %10 dönme olarak tanımlanmıştır. Bu değer büyük olmasının sebebi programın sonlanmasını engellemektir.

2.4. Doğrusal Davranan Kolon ve Kirişlerin Modellenmesi (Modeling of Beams and Columns with linear Behavior)

Çaprazlar ve çaprazlı açıklıklardaki kirişler haricindeki tüm kolon ve kirişler doğrusal elastik eleman olarak tanımlanmıştır.

2.5. Analitik Çalışma (Analytical Study)

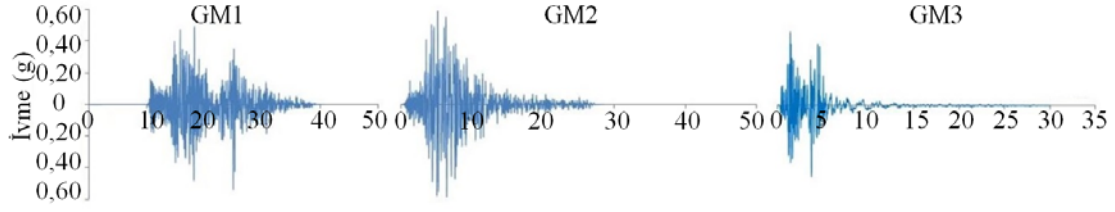
Yapıların doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinde aşılma olasılığı 10% ve 2% olan iki grup yer hareketi Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) kuvvetli yer hareketi veri tabanından seçilmiştir [17]. Tablo 3’de bu yer hareketlerine ait detaylı bilgiler gösterilmiştir. Her grup 3 adet depremden oluşmaktadır. Seçilen deprem yer hareketlerinin kaydedildiği zeminlerin kayma dalgası hızı 300 m/s - 770 m/s arasındadır. Seçilen depremler, davranış spektrumlarına uygun olarak ölçeklendirilmiştir. Seçilen depremlerin ölçeklendirilmiş ivme – zaman geçmişleri Şekil 12 ve Şekil 13’de verilmiştir. Tasarım spektrumu, ASCE 7-10 [17] uyarınca belirlenmiştir. Şekil 12 ve 13’de belirtilen depremlerden 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler GM1, GM2 ve GM3 olarak, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler GM4, GM5 ve GM6 olarak adlandırılmıştır. Ayrıca, Şekil 14’te seçilen bu yer hareketleri için ölçeklendirilmiş davranış spektrumları verilmiştir. Çalışmada üç ve dokuz katlı, dış çerçeveleri MÇÇ olarak tasarlanmış farklı çapraz dayanım konfigürasyonlarına sahip iki yapıdaki burulma nedeniyle oluşabilecek doğrusal olmayan davranış kuvvetli deprem yer hareketleri altındaki incelenmiştir. Sonuçlar, yapının kapasite eğrisi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi ile analiz



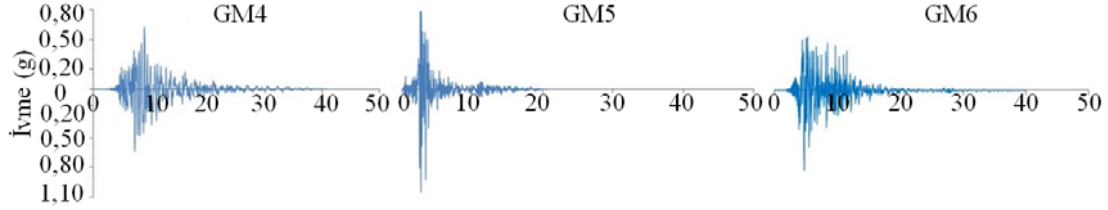
Şekil 11. HSS10X10X5/8 Kesitine Ait Şekil Değiştirme Grafiği (Stress-Strain Diagram for HSS10X10X5/8)

Tablo 3. PEER veri tabından alınan deprem kaydı özellikleri (Properties of earthquake records obtained from PEER database)

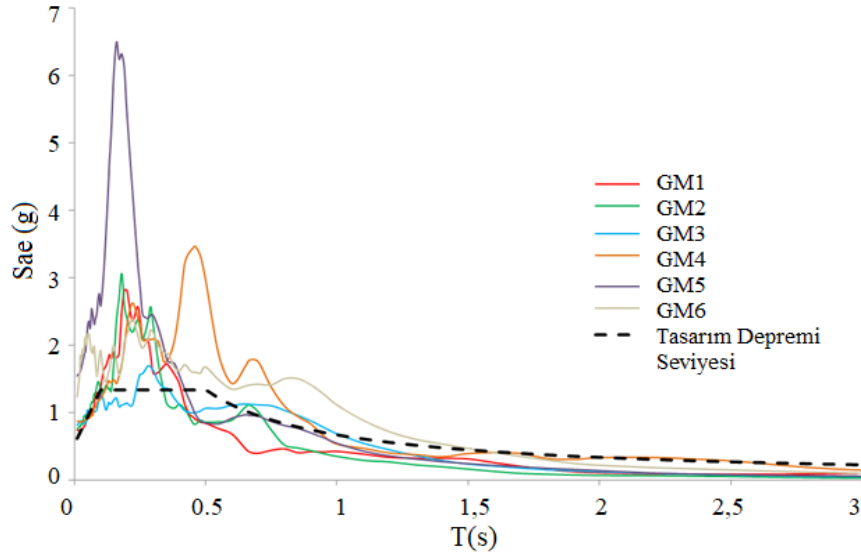
İsim	NGA#	Kayıt	Ölçekleme Katsayısı	Süre (s)	PGA (cm/s ²)
GM 1 (%10)	1612	Düzce	3,5588	41,00	531,890
GM 2 (%10)	4284	Basso,Tirreno	3,9035	29,00	572,000
GM 3 (%10)	451	Morgan Hill	0,8357	41,00	317,059
GM 4 (%2)	1111	Kobe	1,3103	41,00	620,973
GM 5 (%2)	4099	Park Field	2,2397	21,00	1047,708
GM 6 (%2)	4481	L’Aquila	1,7551	61,00	828,945



Şekil 12. Aşılma olasılığı %10 olan yer hareketleri için ivme zaman kayıtları
(Acceleration time histories of ground motion with 10% probability of exceedance)



Şekil 13. Aşılma olasılığı %2 olan yer hareketleri için ivme zaman kayıtları
(Acceleration time histories of ground motion with 2% probability of exceedance)



Şekil 14. Aşılma olasılığı 50 yılda %10 ve %2 için PEER veri tabanından seçilen yer hareketleri için ölçeklendirilmiş davranış spektrumları

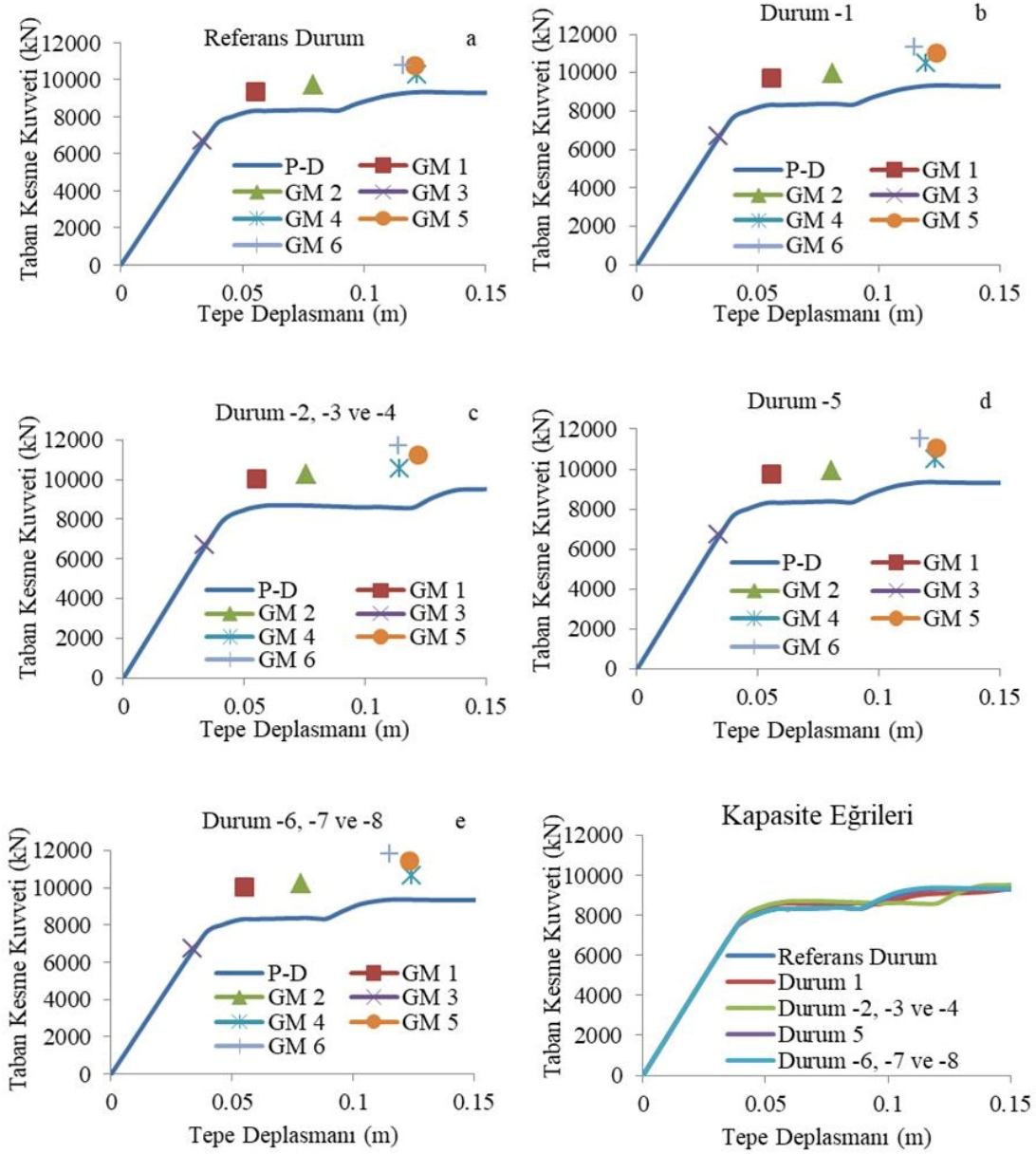
(Scaled response spectrum of ground motions selected from PEER database for 2% and 10% probability of exceedance in 50 years)

edilmiş ve elde edilen göreceli kat ötelemesi oranları şeklinde belirtilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi ile yapılan analizlerde çapraz dayanımının RyFy ile 1,2RyFy (%20 daha fazla olması durumu) arasında değiştiği kabul edilmiştir. Çerçevelerin doğrusal olmayan burulma davranışı için Tablo 4'te belirtilen 8 durum tasarlanmıştır. Örnek olarak, Durum-1'de Çerçeve-1'deki çaprazların her kattaki beklenen akma gerilmesinin 1,2RyFy, Durum-5, -6, -7, ve -8'de ise sadece ilk katta 1,2RyFy olduğu kabul edilmiştir. 3 ve 9 katlı merkezi çelik ters V çaprazlı yapıdaki çaprazların beklenen akma gerilmeleri için farklı senaryolar belirlenmiş ve yapılarda oluşabilecek burulma etkileri zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi ile yapılan analizlerle incelenmiştir. Analizler sonucunda taban kesme kuvveti ile tepe deplasman grafikleri (kapasite diyagramı),

göreceli kat ötelemesi oranları belirlenmiştir. Sonuçlara göre Durum-2, -3, ve 4 arasında belirgin bir fark oluşmazken, benzer şekilde Durum-6, -7, ve 8'in sonuçları arasında da belirgin bir farklılığa rastlanılmamıştır. Bu durum, uygulanan deprem doğrultusundaki çaprazların aynı dayanıma sahip olması ve yapıda burulma düzensizliğinin olmaması sebebiyle diğer doğrultudaki çaprazların yapı davranışına etki etmemesinden kaynaklanmaktadır. Burulma düzensizliği oluşturan Durum-1 ve -5'dir. 3 Katlı bina için taban kesme kuvveti ve tepe noktası deplasman grafikleri çeşitli durumlar için ve çapraz dayanım farklılığının olmadığı referans durum için Şekil 15'de gösterilmiştir. Referans yapının yanal dayanımı 7,500 kN iken Durum-1, -5, -6, -7, ve -8'de yanal dayanımda az da olsa bir artış gözlenmiştir.

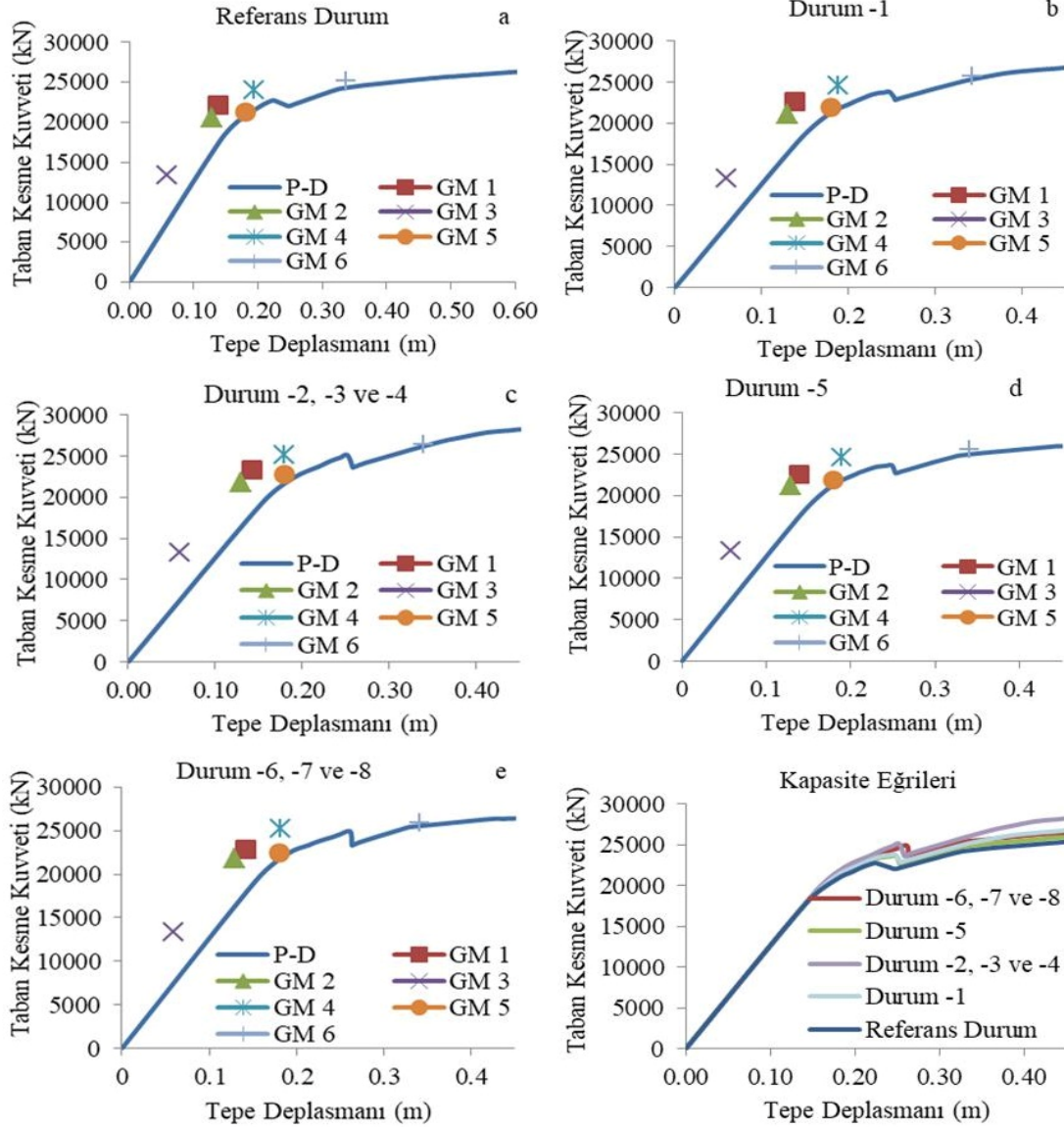
Tablo 4. Çaprazlardaki dayanım farklılığı durumları (Cases for braced strength)

Durum	Çaprazın Dayanımı	Uygulanan Çerçeve	Uygulanan Kat
Referans Durum	$R_y F_y$	Çerçeve – 1,2,3,4	Kat- 1,2,3
Durum- 1	$1,2R_y F_y$	Çerçeve – 1	Kat- 1,2,3
Durum- 2	$1,2R_y F_y$	Çerçeve - 1,2	Kat- 1,2,3
Durum- 3	$1,2R_y F_y$	Çerçeve - 1,2,3	Kat- 1,2,3
Durum- 4	$1,2R_y F_y$	Çerçeve – 1,2,3,4	Kat- 1,2,3
Durum- 5	$1,2R_y F_y$	Çerçeve - 1	Kat- 1
Durum- 6	$1,2R_y F_y$	Çerçeve - 1,2	Kat- 1
Durum- 7	$1,2R_y F_y$	Çerçeve - 1,2,3	Kat- 1
Durum- 8	$1,2R_y F_y$	Çerçeve – 1,2,3,4	Kat- 1

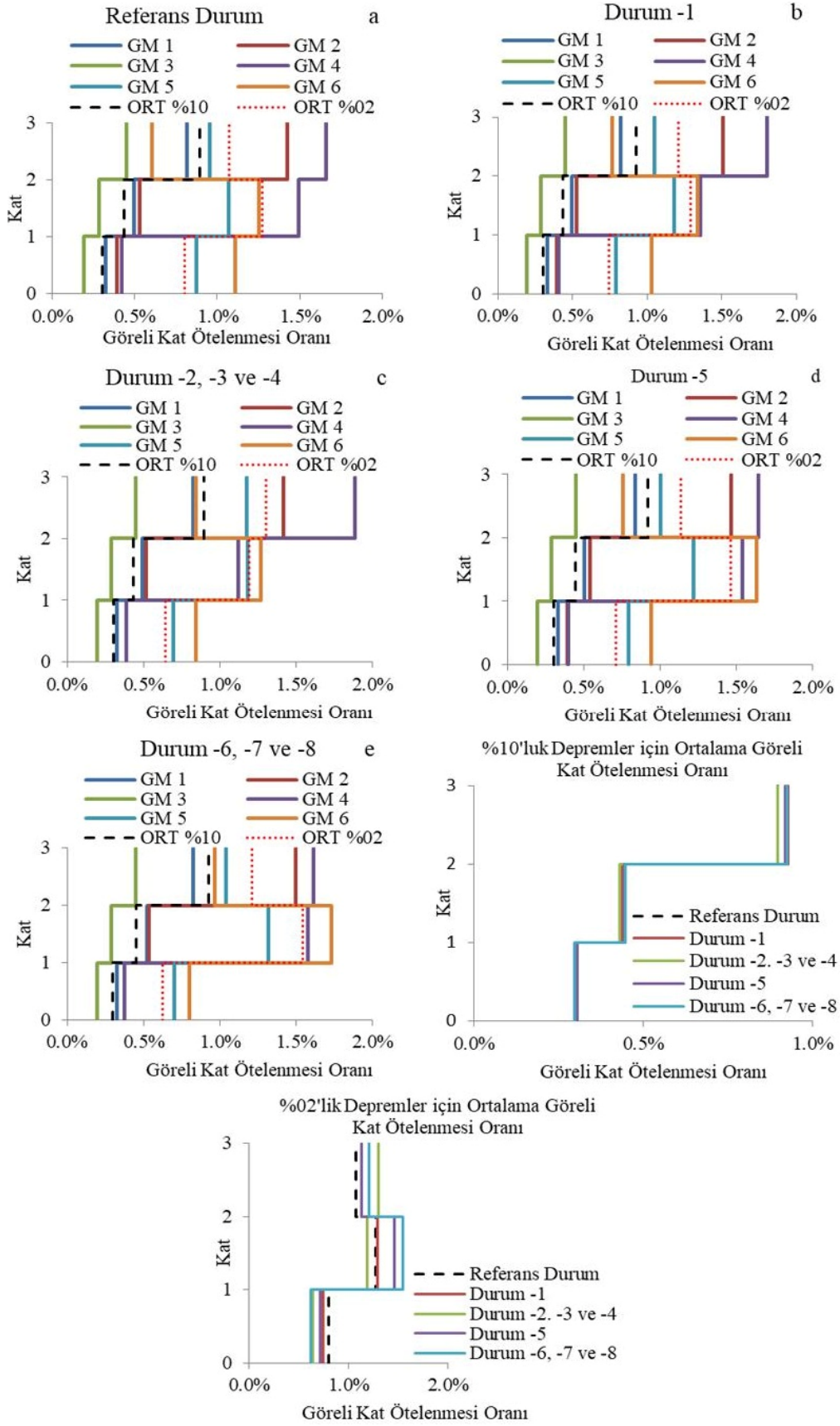
**Şekil 15.3** 3 Katlı bina taban kesme kuvveti – tepe deplasman diyagramı, kapasite eğrisi (base shear – roof displacement for 3 story building, capacity curve)

Durum-1'de Çerçeve-1 ve Çerçeve-2'deki çapraz dayanımları her katta sırasıyla, 1,2RyFy ve RyFy iken Durum-5 te sadece ilk katlarda sırasıyla 1,2RyFy ve RyFy ve üst katlarda RyFy, Durum-6, -7, ve -8'de sadece 1nci kattaki çaprazların dayanımı 1,2RyFy'dir. Buna karşın, yapının yanal dayanımında benzer davranış görülmektedir. Bununla birlikte, Çerçeve-1 ve Çerçeve-2'de dayanımları her katta 1,2RyFy olan çaprazların kullanıldığı Durum-2, -3, ve -4'de yapının yanal dayanımı diğer durumlar ile karşılaştırıldığında %3,2'ye varan (234 kN) bir artış görülmektedir. Seçilen deprem yüklemeleri altında maksimum yanal deplasman tüm durumlarda yaklaşık 12 cm olmaktadır. 9 Katlı bina için ise taban kesme kuvveti ve tepe noktasının deplasman grafikleri çeşitli durumlar için ve çapraz dayanım farklılığının olmadığı referans durum için Şekil 16'da gösterilmiştir.

Referans yapının yanal dayanımına kıyasla (20,000 kN) Durum-1, -5, -6, -7 ve -8'de yanal dayanımda az da olsa bir artış olduğu gözlenmiştir. Durum-1'de yapının yanal dayanımının yaklaşık aynı değerlerde kaldığı görülmekte iken, Durum-2, -3 ve -4'de yapının yanal dayanımı diğer durumlara kıyasla %7,8 civarında (1482 kN) artış göstermektedir. Seçilen deprem yüklemeleri altında maksimum yanal deplasman tüm durumlarda yaklaşık 35 cm olmaktadır. Şekil 17'de 3 katlı binanın görel kat ötelenmesi grafikleri incelendiğinde, referans yapının maksimum ortalama görel kat ötelenme oranı, 50 yılda aşılma olasılığı %10 ve %2 olan deprem yer hareketleri için sırasıyla, en alt katta için %0,30 ve %0,80 olmaktadır. Bununla birlikte 50 yılda aşılma olasılığı %10 ve %2 olan deprem yer hareketlerinde en alt katta ortalama görel kat ötelenme oranları tüm dayanım farklılığı düzensizliklerindeki durumlarda sırasıyla, %0,30 ve %0,73 olarak görülmektedir.



Şekil 16. 9 katlı bina taban kesme kuvveti – tepe deplasman diyagramı, kapasite eğrisi
(base shear – roof displacement for 9 story building, capacity curve)



Şekil 17. 3 Katlı Bina görelî kat ötelenme oranları (%) (Relative story displacement for 3 story building)

Ortalama görelî kat ötelenme oranı 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler altında bir miktar farklılık göstermektedir. Şekil 18'deki sonuçlar incelendiğinde dokuz katlı çözümlenmelerde sekizinci kattaki ötelenme oranının diğer katlara göre fazla çıkmasının sebebinin giriş kesitlerindeki değişiklikten kaynaklandığı düşünülmektedir.

9- katlı binanın görelî kat ötelenmesi grafiklerine göre (Şekil 18), 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareketlerinde ortalama görelî kat ötelenme oranları referans yapı ile tüm dayanım farklılığı düzensizliklerindeki durumlarda en alt katta %0,4 değerindedir. Aşılma olasılığı 50 yılda %2 olan deprem yer hareketlerinde ise bu değerler referans yapı ve tüm dayanım farklılığı durumları için sırasıyla %0,60 ve %0,80 olup bir miktar farklılık göstermektedir. 3- ve 9- katlı binalarda tüm yüklemeler ve durumlar için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi sonucunda elde edilen görelî kat ötelenmeleri incelendiğinde elde edilen sonuçların TDY 2007 ve AISC 341-10 'da tanımlanan sınırlar içinde kaldığı belirlenmiştir.

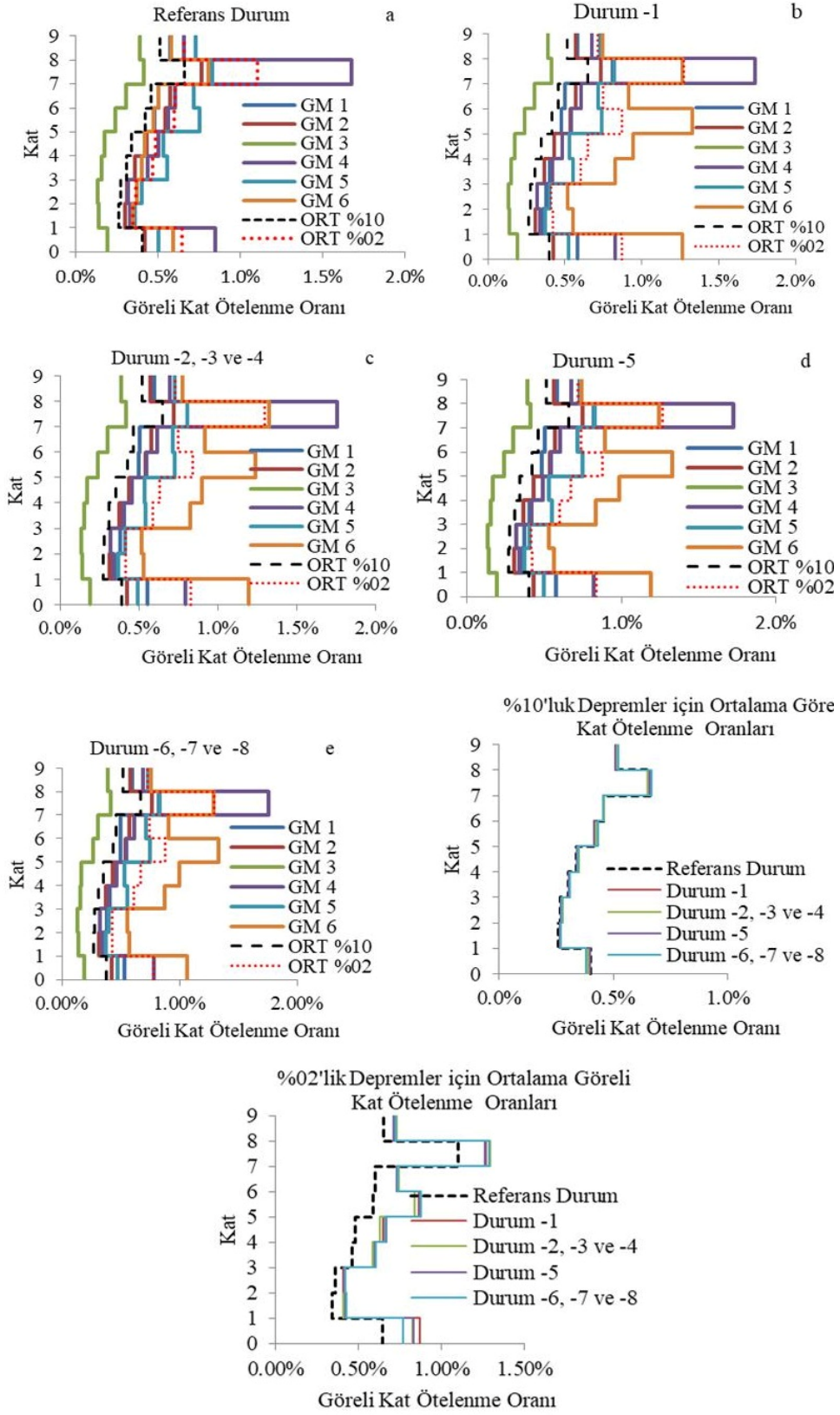
Her iki binada da tüm durumlar için en büyük görelî kat ötelenme oranı GM 6 yer hareketi altında elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre bir yapıda deprem doğrultusunda bir bölümdaki ya da tüm çaprazlardaki dayanım farklılığından ötürü oluşan burulma etkilerinin, tepe deplasmanına önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu durum her iki binaya ait tepe deplasman – zaman grafiği olarak GM 6 depremi için Şekil 19 ve 20'de görülmektedir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi sonucunda elde edilen zamana bağlı görelî kat ötelenmeleri, TDY 2007'de burulma düzensizliği için verilen sınır koşuluna (Şekil 21) göre 3- ve 9- Katlı yapılar için incelenmiş ve referans durum, Durum-2, -3, -4, -6, -7 ve -8 için tüm deprem yüklemeleri altında burulma düzensizliği davranışı gözlemlenmemiştir. Bunun yanı sıra Durum -1 ve -5 'te burulma düzensizliği görülmüştür. Bu iki durumda görülen burulma gözlemlenmesinin ana sebebi, aynı doğrultudaki iki çerçevede bulunan çaprazlarının farklı dayanıma sahip olmasından dolayı diğerlerine göre nispeten düşük dayanıma sahip çapraz çubukların deprem sırasında akması ile yapıdaki görelî kat ötelenmelerini ani değişmesidir. Durum -1 ve -5'te çapraz çubuklarda plastik sınırın aşılmadığı yüklemelerde burulma gözlemlenmemiştir. Durum -1 ve -5'te seçilen deprem yüklemeleri altında her katta elde edilen en büyük burulma düzensizliği katsayıları Tablo 5 ve 6'da verilmiştir. Şekil 22 ve 23'de sırasıyla 3- ve 9-Katlı yapılar için burulma düzensizliği katsayısının zamana bağlı değişimi, TDY 2007 hükümlerine uyan ve uymayan yüklemelerden bazıları için verilmiştir.

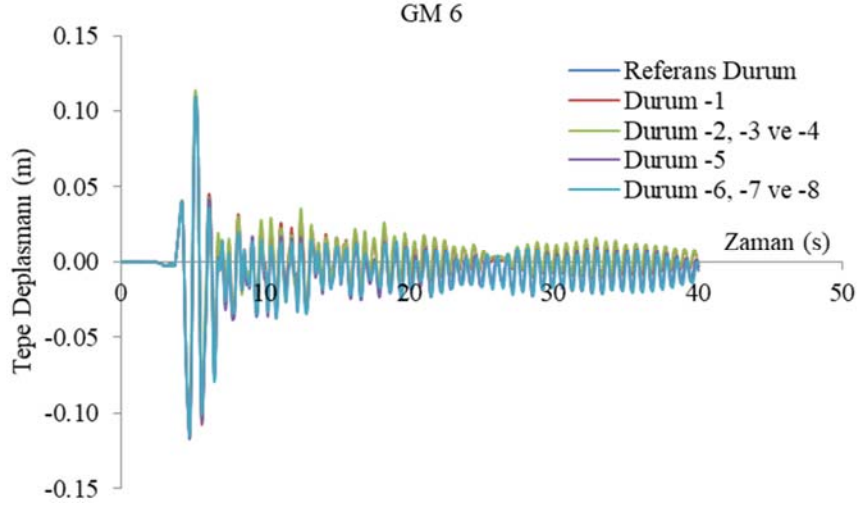
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, merkezi ters V çelik çapraz çerçeveli 3 ve 9 katlı iki yapının çaprazlardaki dayanım farklılığından kaynaklanabilecek burulma etkileri zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler ile incelenmiştir. Çapraz dayanımının R_yF_y ile $1,2R_yF_y$ arasında değiştiği kabulü

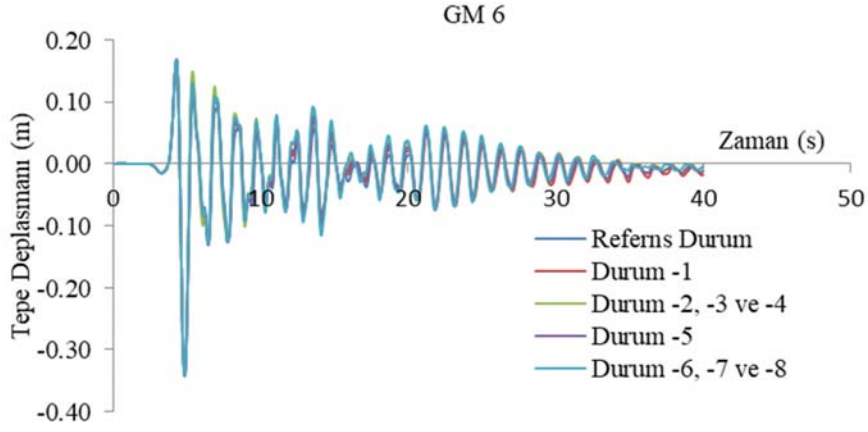
yapılmıştır. Aşılma olasılığı 10% ve 2% olan iki grup deprem yer hareketleri analizlerde kullanılmıştır. Çalışma sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir. 3 ve 9 katlı binalarda 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem seviyeleri için, çaprazlardaki dayanım farklılığının olduğu ve olmadığı durumlardaki ortalama görelî kat ötelenme oranının yaklaşık aynı değerlerde olduğu görülmüştür. 9 katlı binalar için 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem seviyelerinde, çaprazlardaki dayanım farklılığının olduğu durumlar içerisinde ortalama görelî kat ötelenme oranının yaklaşık aynı sonuçlar vermesine karşın, referans durumuna göre görelî kat ötelenme oranı artış göstermiştir. Her iki bina içinde deprem doğrultusuna dik yöndeki çaprazın dayanım farklılığı, kütle eksantrisitesinin olduğu durumlar hariç, yapının deprem doğrultusundaki yanal hareket davranışını etkilememiştir. 3 Katlı binalarda referans durumuna göre yapının yanal dayanımı, deprem doğrultusundaki iki çerçevenin her katındaki çaprazların dayanımının $1,2R_yF_y$ olduğu durumlarda (Durum-2, -3 ve -4) %3,2'ye varan (234 kN) bir artış gösterirken diğer durumlarda önemli bir artış olmamıştır. Maksimum yanal deplasman tüm durumlarda yaklaşık 12 cm olmaktadır. 9 katlı binalarda referans duruma kıyasla, Durum-2, -3 ve -4'de yapının yanal dayanımı %7,8 civarında (1482 kN) artış göstermektedir. Diğer durumlar göz önüne alındığında referans duruma göre yanal dayanımda önemli bir artış olmamıştır. Maksimum yanal deplasman tüm durumlarda yaklaşık 35 cm olmaktadır. Elde edilen deplasman değerleri çalışmada göz önüne alınan çerçeveler ve yüklemeler altında gerçekleştirilen analizler sonucundan elde edilmiştir. Dolayısıyla sonuçların genelleştirilmesinin uygun olmadığı düşünülmektedir. Bu nedenle yüklemeler ve durumların sayısı artırılarak analizlerin gerçekleştirilip, yeni elde edilecek sonuçlar ile birlikte değerlendirilmesinin daha sağlıklı olacağı düşünülmektedir. Her iki deprem doğrultusundaki çerçevelerde bulunan çapraz çubukların akma dayanımlarının farklı olması deprem sırasında bir çerçevedeki çaprazların diğer çerçevedekilerden önce plastik bölgeye geçmesine ve yapıda burulma davranışı meydana getirebileceği için kullanılan çaprazların akma dayanımlarının aynı olmasına dikkat edilmelidir. 3- ve 9- katlı binalarda görelî kat ötelenme oranları incelendiğinde elde edilen değerlerin tamamı hem TDY 2007 hem de AISC 341-10'de yer alan koşulları sağlamaktadır. Çaprazlardaki beklenen yüksek dayanımdan kaynaklı burulma düzensizliğinin oluştuğu yada oluşmadığı durumda da, yanal deplasman artışının önemli ölçüde olmadığı görülmektedir. Bu durumun çalışma kapsamında ele alınan çerçeveler ve deprem senaryoları altında gerçekleştirilen analizler sonucundan elde edilmesi nedeniyle sonuçların genelleştirilmesinin zor olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle daha fazla yüklemeler ve durum altında analizlerin gerçekleştirilerek yeni elde edilecek sonuçlar ile birlikte değerlendirilmesinin daha sağlıklı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın bir sonraki aşamalarında, yanal deplasman ve görelî kat ötelenme oranlarının farklı çapraz dayanım durumları için ele alınması ve farklı deprem karakteristiklerine sahip yer hareketleri altında incelenmesine yönelik çalışmalar yapılması planlanmaktadır.



Şekil 18.9 Katlı Bina görel kat ötelenme oranları (Relative story displacement for 9 story building)



Şekil 19. 3 Katlı bina tepe deplasmanın zamana bağlı değişimi (GM 6) (Roof displacement time histories for 3 story building)



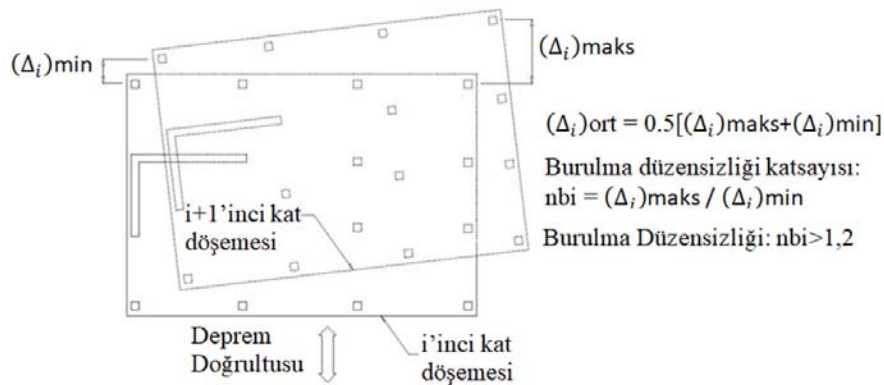
Şekil 20. 9 Katlı bina tepe deplasmanın zamana bağlı değişimi (GM 6)
(Roof displacement time histories for 9 story building)

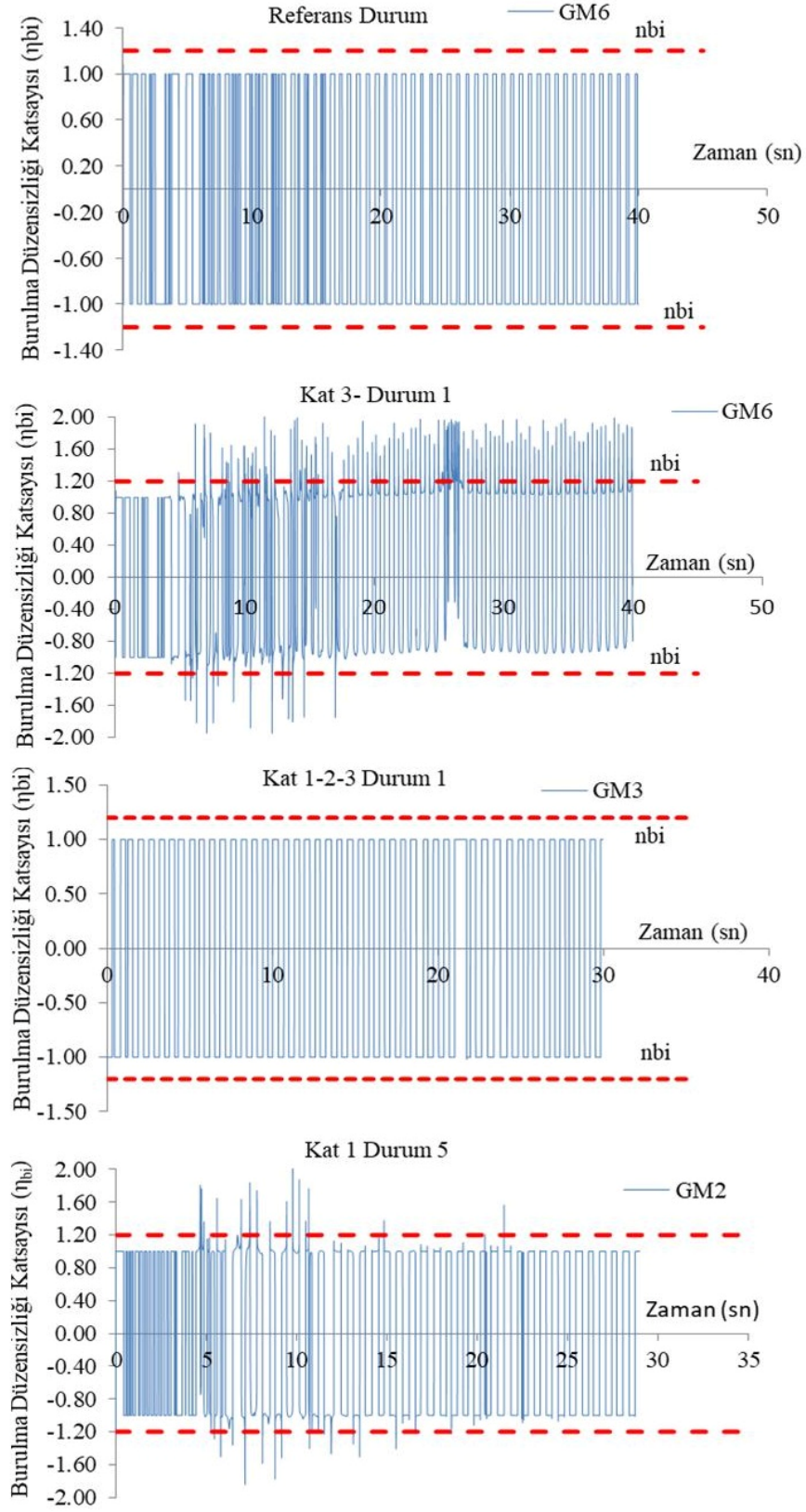
Tablo 5. 3 Katlı yapı için elde edilen en büyük burulma düzensizliği katsayıları
(Highest values for torsional irregularity coefficient in 3 story frames)

Durum	Kat	Burulma Düzensizliği Katsayıları (η_{bi})					
		GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	GM6
Durum 1	3	1,92	1,99	1,12	1,80	1,88	2,00
	2	1,97	1,96	1,01	1,99	1,97	2,00
	1	1,92	1,99	1,02	1,99	2,00	2,00
Durum 5	3	1,63	1,98	1,12	1,96	1,95	1,99
	2	1,99	1,74	1,01	1,88	1,97	1,99
	1	1,96	1,96	1,02	1,84	1,99	1,99

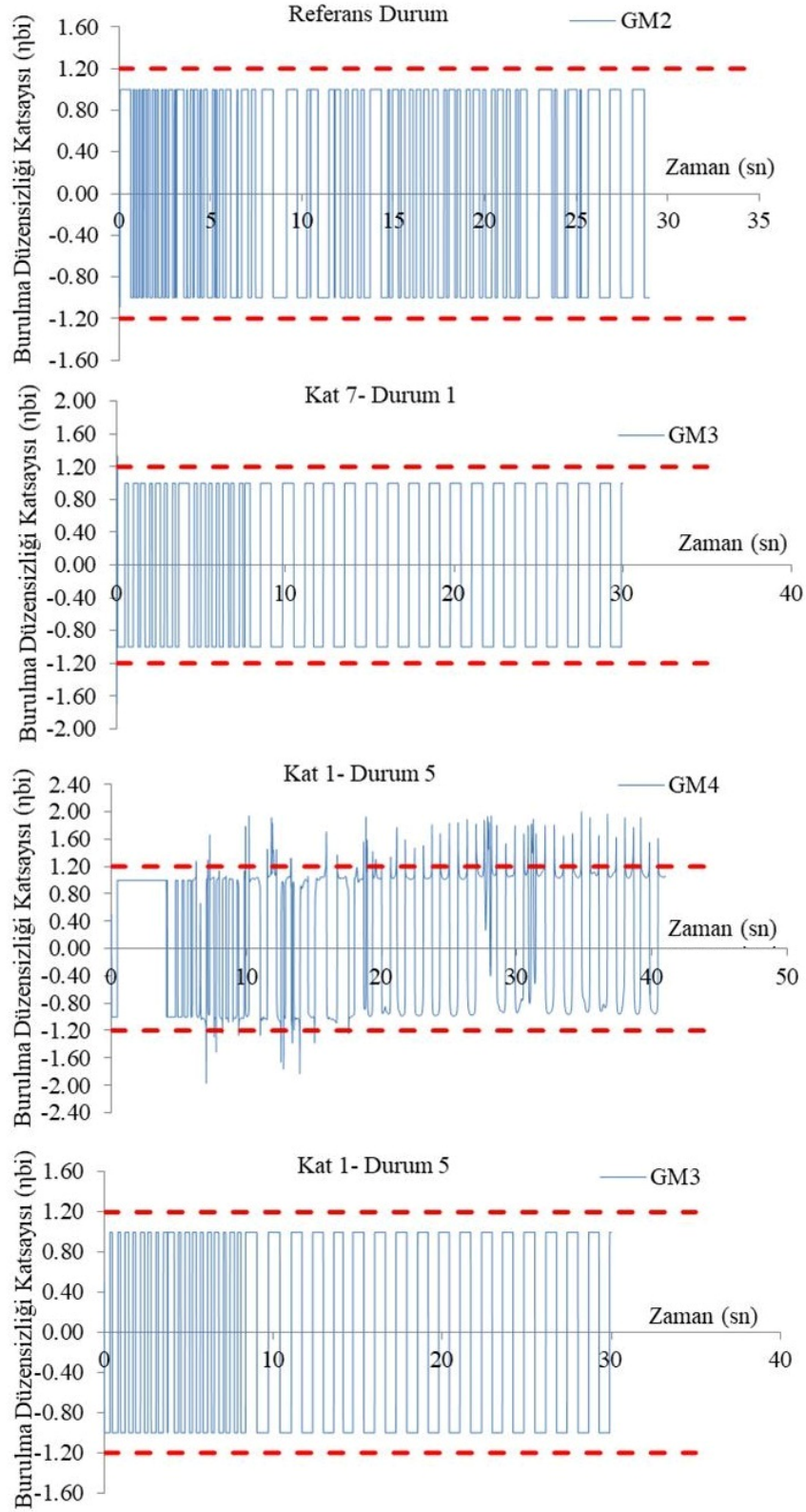
Tablo 6. 9 Katlı yapı için elde edilen en büyük burulma düzensizliği katsayıları
(Highest values for torsional irregularity coefficient in 9 story frames)

Durum	Kat	Burulma Düzensizliği Katsayıları (η_{bi})					
		GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	GM6
Durum 1	9	1,98	1,99	1,08	1,98	2,00	2,00
	8	1,98	1,99	1,08	2,00	1,96	1,98
	7	1,95	2,00	1,00	1,95	1,99	1,99
	6	1,93	1,99	1,00	1,94	1,99	2,00
	5	1,90	1,94	1,01	1,85	1,97	2,00
	4	1,93	1,98	1,00	1,82	1,98	2,00
	3	1,99	1,99	1,00	1,95	1,98	1,99
	2	1,99	1,99	1,00	1,98	1,92	2,00
	1	1,95	2,00	1,00	2,00	1,98	2,00
Durum 5	9	1,98	2,00	1,00	1,99	1,99	1,98
	8	1,98	1,99	1,03	1,84	1,99	2,00
	7	1,84	2,00	1,33	2,00	1,87	1,99
	6	1,92	1,97	1,00	1,85	1,92	2,00
	5	1,94	1,99	1,00	1,98	1,99	1,99
	4	1,91	1,99	1,00	1,97	1,99	2,00
	3	1,91	2,00	1,00	1,99	1,99	1,91
	2	1,84	1,98	1,00	1,84	1,91	1,99
	1	1,99	1,99	100	1,99	1,90	1,99

**Şekil 21.** TDY 2007'ye göre burulma düzensizliği (Torsional irregularity according to TDY2007)



Şekil 22. 3 Katlı yapıda burulma düzensizliği katsayısının zamana bağlı değişimi
(Time-dependent variation of torsional irregularity coefficient in 3 story building)



Şekil 23. 9 Katlı yapıda burulma düzensizliği katsayısının zamana bağlı değişimi
(Time-dependent variation of torsional irregularity coefficient in 9 story building)

4. SİMGELER (SYMBOLS)

A_g	: Profil kesit alanı
C_d	: Yer değiştirme büyütme katsayısı
F_y	: Malzemenin akma gerilmesi
K	: Etkili boy çarpanı
L	: Eleman boyu
P_{cr}	: Nominal basınç dayanımını
$P_{residual}$: Burkulma sonrası basınç kapasitesi
P_y	: Nominal çekme dayanımını
R	: Atalet yarıçapı
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_y	: Arttırılmış gerilme katsayısı
S_s	: Referans zemin sınıfı için kısa periyotlu spektral ivme
S_1	: Referans zemin sınıfı için 1 saniye periyotlu spektral ivme
δ_y	: Eksenel akma birim deformasyonu
Ω_o	: Dayanım fazlalığı (veya büyütme) katsayısı
η_{bi}	: Burulma düzensizliği katsayısı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Comlek R., Akbas B., Shen J., Sutchiewcharn N., Wen R., Umut O., Inelastic Torsional Response of Steel Concentrically Braced Frames, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon-Portugal, Paper no: 3917, 24-28 September, 2012.
- Deger Z.T., Damage assessment of a reinforced concrete test building based on Turkish Seismic Code 2007, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 481-488, 2017.
- Er Ş.B., Aykaç S., Can H., Behaviour of Reinforced Concrete Weak Column-Beam Connections, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 537-547, 2014.
- Beyen K., Damage simulation by finite element updating using vibration characteristics, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 403-415, 2017.
- Gerek A.E., Soyluk A., Investigation of earthquake resistance at primary school buildings in Turkey, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 485-490, 2016.
- Tremblay R., Archambault M.H., Filiatrault A., Seismic Response of Concentrically Braced Steel Frames Made with Rectangular Hollow Bracing Members, Journal of Structural Engineering, 129 (12), 1626-1636, 2003.
- Tremblay R., Poncet L., Seismic Performance of Concentrically Braced Steel Frames in Multistory Buildings with Mass Irregularity, Journal of Structural Engineering, 131 (9), 1363-1375, 2005.
- Erduran E., Ryan K.L., Effect of Torsion on the Behavior of Peripheral Steel-Braced Frame Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 40, 491-507, 2011.
- Cakir F., Kaya E.S., Aksar B., Shen J., Seker O., Akbas B., Merkezi Çaprazlı Çerçevelerde Çapraz Elemanlarda Sayısal Modelleme Teknikleri, 6ncı Çelik Yapılar Sempozyumu, Eskişehir, 15-17 Ekim, 2015.
- FEMA, Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P695, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2009.
- Kaymak F., Tuna M.E., Investigation of the behaviour of steel frames with the partial and full infill walls under horizontal loads with elasto-plastic methods, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (2), 435-445, 2011.
- Akbas B., Sutchiewcharn N., Cai W., Wen R., Shen J., Comparative study of special and ordinary braced frames, Struct. Design Tall Spec. Build. 22 (13), 989-1022, 2013
- AISC 341-10, Seismic Provisions for Steel Structural Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2010.
- SAP2000, Structural Analysis Program, Version 14.2.2, 1995.
- PERFORM-3D, Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, Version 5.0.0, 2011.
- Nip K.H., Gardner L., Elghazouli A.Y., Cyclic testing and numerical modelling of carbon steel and stainless steel tubular bracing members, Engineering Structures, 32, 424-441, 2010.
- Peer Strong Ground Motion, http://peer.berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html.
- ASCE 7, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-10, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010.