

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

Hasan ELÇİ*

ÖZ

Bütün çerçeveleri ve düşey taşıyıcıları (kolon ve perdeleri) birbirine dik iki düzlem içinde bulunan yapılara ortogonal yapılar denir. Bu tanıma uymayan yapılara ise ortogonal olmayan yapılar denir. Çağdaş deprem yönetmeliklerinde ortogonal olmayan elemanlar içeren yapıların da deprem hesaplarının seçilen birbirine dik iki doğrultu için hesaplanan uç kuvvetlerine göre yapılabileceği belirtilmiştir. Bunun için özel birleştirme denklemleri verilmiştir. Ancak bu denklemlerde iki asal eksen için elde edilen uç kuvvetlerinin karşılıklı etkilerinin nasıl göz önüne alınacağı yeterince açık değildir. Bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmış, yeni birleştirme denklemleri önerilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, yapılan çalışmaların kapsamı ile sınırlıdır. Sonuçta, her durumda doğru sonuçlar veren bir birleştirme denklemi henüz elde edilememiştir. Bu çalışmanın amacı, daha önce önerilen bir birleştirme denkleminin iyileştirilmesidir. Bunun için genel bir çizelge geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ortogonalite, deprem, betonarme kolon

ABSTRACT

Determination of Reinforcement Ratios in Reinforced Concrete Columns

The structures, in which all frames and vertical structural elements (column and shear walls) are in two planes perpendicular to each other, are called as orthogonal structures. Structures which do not meet this definition are called as non-orthogonal structures. In contemporary earthquake-resistant design codes, it has been indicated that the earthquake analysis of the structures containing non-orthogonal elements can also be made according to end forces calculated for two directions perpendicular to each other. For this aim special combination formulae have been given. However, how the interaction of the end forces obtained for the two principal axes in these formulae will be taken into consideration has not been clearly explained. Several studies have been performed on this subject and new combination equations have been proposed. The results obtained from these studies are limited by the scope of them. As a result, a combination equation giving accurate results in each case has not been obtained yet. The aim of this study is to improve a combination equation which was proposed previously. For this aim a general table has been developed.

Keywords: orthogonality, earthquake, reinforced concrete column

Not: Bu yazı

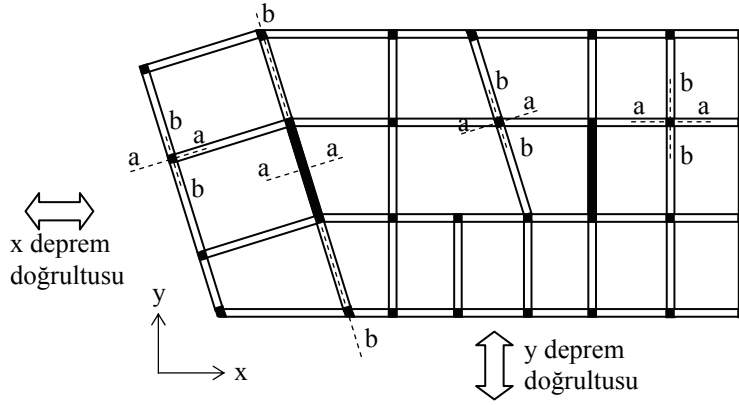
- Yayın Kurulu'na 02.12.2009 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - helci@balikesir.edu.tr

1. GİRİŞ

Bir bütün olarak yapıyı oluşturan taşıyıcı sistem, birbirinden bağımsız düzlem çerçevelerle ifade edilmek istendiğinde, her bir çerçevenin diğer çerçevelere paralel veya dik olması koşulunu sağlayan yapılara ortogonal yapılar denir. Asal eksenleri bu düzlemler içinde bulunan elemanlara da ortogonal elemanlar denir. Statik sistemin stabilitesi ve doğrusal elastik teori esas alınarak tasarıma esas statik hesapların yapı davranışını yansıtabilmesi bakımından ortogonal yapı yapmak en uygun çözüm yöntemidir. Ancak bazen mimari ve estetik kaygılarla bazen de kullanım ihtiyaçları nedeniyle ortogonal olmayan (OO) yapıların yapılması zorunlu olabilmektedir.

Ortogonal olma şartını sağlamayan yapılar ortogonal olmayan (OO) yapılar, elemanlar ise ortogonal olmayan (OO) elemanlar olarak adlandırılır. Şekil 1’de, OO bir yapıda bazı ortogonal ve OO düşey taşıyıcı elemanların asal eksen takımları gösterilmiştir.



Şekil 1. Deprem Doğrultuları ve Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Asal Doğrultuları [1]

Deprem yönetmeliklerinde, yapıların deprem hesaplarının, birbirlerine dik olarak seçilen iki doğrultuda yapılması ve tasarıma esas olacak çubuk uç kuvvetlerinin özel bir birleştirme denklemi ile elde edilmesi öngörülmektedir.

1.1 Literatür Özeti

1975 yılında yürürlüğe giren Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte; “Asal eksenleri hesap yapılan doğrultulara paralel olmayan elemanlarda, farklı bir doğrultu için daha elverişsiz iç kuvvetler doğabileceği göz önünde tutulmalıdır.” denmektedir. Ancak farklı doğrultu için hesabın nasıl yapılacağı net olarak belirtilmemiştir. Bunun yerine; “Taşıyıcı sistemi düzensiz olan veya temel üst kotundan ölçülen yüksekliği 75 m’yi geçen tüm yapıların depreme karşı emniyetleri, usulüne uygun ve güvenilir bir dinamik hesap yolu ile saptanmalıdır.” denmiştir [2].

01.01.1998 tarihinde yürürlüğe giren Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY), taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının plandaki asal eksenlerinin

göz önüne alınan birbirine dik yatay deprem doğrultularına paralel olmaması durumunu A4 türü düzensizlik olarak tanımlamıştır. Bu tür elemanların **a** ve **b** asal eksen doğrultularındaki B uç kuvvetleri, en elverişsiz sonucu verecek şekilde, (1) denklemi kullanılarak elde edilecektir [3].

$$B_a = \pm B_{ax} \pm 0.30 B_{ay} \quad (1a)$$

$$B_a = \pm 0.30 B_{ax} \pm B_{ay} \quad (1b)$$

B_{ij} katsayılarındaki B, uç kuvveti (moment, normal kuvvet vs.), i indisi asal eksenini (a veya b), j indisi de deprem doğrultusunu (x veya y) göstermektedir. Ancak, iki asal eksen için elde edilen eğilme momentlerinin karşılıklı etkilerinin nasıl göz önüne alınacağı açık değildir. Şekil 1’de olduğu gibi, ortogonal olmayan bir yapıda ortogonal elemanlar da bulunabilmektedir. ABYYHY’e göre bu tür elemanlar için (1) denkleminin kullanılmasına gerek yoktur. Bu elemanlarla ilgili hesaplar ortogonal yapılardaki gibi yapılabilmektedir [3].

Newmark [4], Rosenblueth ve Contreras [5] kombinasyon kurallarını ilk önerenler arasındadır. Önerilen “Yüzde Kuralı” (PR - Percentage Rule); deprem yükünün bir doğrultudaki bileşeninin %100’ünün, diğer iki doğrultudaki bileşenlerinin λ kadarının alınıp toplanmasına dayanmaktadır. (1) denkleminde olduğu şekilde, iki yatay bileşeni toplamak için, Newmark λ ’nın %40 olmasını, Rosenblueth ve Contreras ise %30 olmasını önermişlerdir [4, 5]. Bu kurallar sırasıyla “%40 Kuralı” ve “%30 Kuralı” olarak bilinir.

Yönetmelikler genel olarak %30 kuralını önermektedir [6-13]. Ancak bazı yönetmeliklerde, elverişsiz uç kuvvetlerinin hesabında %30 kuralı ile birlikte “Karelerin Toplamının Kare Kökü” (SRSS - Square-Root-of-Sum-of-Squares) yönteminin de kullanılabileceği belirtilmektedir [6, 7, 12-14]. SRSS yönteminin en büyük kesit tesirlerini veren bir yöntem olduğu uzun süreden beri bilinmektedir [15].

Smeby ve Der Kiureghian, serbest titreşim teoremini kullanarak, kritik yatay deprem doğrultusu belirlemek için bir denklem geliştirmiştir. Bunun için, CQC (Complete Quadratik Combination) kuralına, üç sismik bileşen nedeniyle modal davranışları birleştirmek için CQC3 kuralı olarak bilinen bir ekleme önermiştir. Dikdörtgen geometriye sahip bina türü yapılar için CQC3 kuralının uygunluğu örneklerle açıklanmıştır [16].

Lopez ve Torres, deprem için kritik doğrultuyu ve en elverişsiz kesit tesirlerini belirlemek için bir yöntem önermiştir. Bu yöntemin Smeby ve Der Kiureghian tarafından yapılan çalışma [16] ile aralarındaki temel fark; kritik doğrultu ve yapı davranışı için deprem analizinde kabul görmüş CQC3 ve SRSS yöntemlerinin eksikliklerinin giderilmesine yönelik olmasıdır [17].

Lopez ve diğ. tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, planda simetrik olan ve olmayan tek katlı sistemler ile iki adet çok katlı sistem üzerinde SRSS, %30 ve %40 kurallarından elde edilen davranış değerleri ile CQC3 kuralından elde edilen kritik davranış değerleri karşılaştırılmıştır [18]. Hernandez ve Lopez, ilave olarak, depremin düşey bileşeninin yapı davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır [19].

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

Reyes-Salazar ve diğ. tarafından yapılan parametrik çalışmada, her biri 1, 3, 8 ve 15 katlı olan üç boyutlu çelik çerçeveler üzerinde, 20 farklı deprem kaydı kullanılarak %30 kuralı ve SRSS yöntemlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerin eksenel kuvveti genellikle parametrik olarak hesaplanan değerden daha az bulduğu gösterilmiştir. Her iki yöntemle de elde edilen taban kesme kuvvetleri ise parametrik değere yakındır. Çalışmada, ister elastik ister inelastik analiz yapılsın, eksenel kuvvet ve kesme kuvvetlerinde önemli bir değişimin olmadığı istatistiksel olarak gösterilmiştir [20].

Özmen tarafından yapılan bir çalışmada, yatay deprem yükleri altındaki betonarme kolonların tasarımı için çeşitli birleştirme denklemleri kullanılarak, 6 farklı yapının statik-betonarme hesapları yapılmıştır. Bunun sonucunda ABYYHY’te önerilen denklemlerin kullanılmasıyla elde edilen donatı oranlarında önemli oranda hataların olduğu görülmüştür. Bütün taşıyıcı sistem elemanlarının ortogonal olması halinde bile, hesaplanan donatının genellikle güvensiz tarafta kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, ortogonal olan ve olmayan tüm kolonların donatı hesaplarında, uç momentlerin hesaplanması için yeni birleştirme denkleminin kullanılması önerilmiştir. Buna göre x ve y doğrultularında deprem yüklemeleri yapıp kolonların **a** ve **b** asal eksenleri etrafındaki M_{ax} , M_{ay} , M_{bx} , M_{by} eğilme momentleri saptandıktan sonra, kesit hesabında kullanılacak M_a ve M_b momentleri;

$$M_a = \pm\sqrt{M_{ax}^2 + M_{ay}^2} \quad M_b = \pm 0.30\sqrt{M_{bx}^2 + M_{by}^2} \quad (2a)$$

$$M_a = \pm 0.30\sqrt{M_{ax}^2 + M_{ay}^2} \quad M_b = \pm\sqrt{M_{bx}^2 + M_{by}^2} \quad (2b)$$

denklemleriyle hesaplanacaktır. Kesit hesabında (2a) ve (2b) denklemlerinden elde edilen değerler ayrı ayrı kullanılacak ve elverişsiz donatı oranları saptanacaktır [21].

Keskinkılıçyan tarafından yapılan çalışmada, merkezi simetriye sahip, ortogonal olmayan 6 farklı yapının kolonlarının tasarımı yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sonunda, ABYYHY’e göre daha düşük hata oranları veren 2 farklı birleştirme denklemi önerilmiştir. Bu denklemlerden ilki, (2) denklemindeki 0.30 katsayısı yerine 0.40 katsayısının konmasından ibarettir. İkincisi ise ABYYHY’te verilen (1) denkleminin 0.55 katsayısı ile çarpılması ile elde edilen ve etkileşimli birleştirme öneren (3) denklemdir.

$$M_a = \pm\left(|M_{ax}| + 0.30|M_{ay}|\right) \quad M_b = \pm\left(|M_{bx}| + 0.30|M_{by}|\right) \times 0.55 \quad (3a)$$

$$M_a = \pm\left(0.30|M_{ax}| + |M_{ay}|\right) \times 0.55 \quad M_b = \pm\left(0.30|M_{bx}| + |M_{by}|\right) \quad (3b)$$

Burada M eğilme momentini, **a** ve **b** indisleri elemanın asal eksenlerini, x ve y ise deprem doğrultularını göstermektedir. Buna göre M_{ax} ; x doğrultusunda etki eden deprem nedeniyle elemanın **a** asal eksenini etrafındaki eğilme momentidir. Önerilen denklemlerin kullanılmasıyla, seçilen örneklerdeki kolonların donatı oranlarının hesabında yapılan hatalar, güvensiz yönde -%12.9 ile güvenli yönde +%11.1 aralığındadır [22].

Yazıcı tarafından yapılan çalışmada da yine merkezi simetriye sahip, ortogonal olmayan 7 farklı yapıya ait kolonların tasarımı yapılmıştır. Etkileşimli Birleştirme, Etkileşimsiz Birleştirme ve Karelerin Toplamının Kare Kökü (SRSS) yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada, ilave olarak, değişik donatı yerleşim durumları da dikkate alınmıştır. Çalışma sonunda, Keskinliçyan tarafından da önerilen; (2) denklemindeki 0.30 katsayısı yerine 0.40 katsayısının yazılmasıyla elde edilecek birleştirme denkleminin kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Seçilen örneklerde, önerilen denklemin kullanılmasıyla elde edilen kolon donatı oranlarındaki en büyük hata yüzdeleri, güvensiz yönde -%17.6 ile güvenli yönde +%9.2 aralığındadır [23].

Özmen tarafından yapılan başka bir çalışmada, 6 adet “Tipik Yapı” üzerinde bir “Sayısal Deney” yöntemi uygulanmıştır. Tek katlı olan bu yapılara kütle merkezinden, parametrik olarak değiştirilen doğrultularda, deprem yükleri uygulanmıştır. Bu şekilde her kolon için maksimum donatı oranları saptanmış ve deprem yönetmeliklerinde verilen birleştirme denklemlerinin verdiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda (4) numaralı birleştirme denklemi önerilmiştir.

$$M_a = \pm\sqrt{M_{ax}^2 + M_{ay}^2} \quad M_b = \pm 0.35\sqrt{M_{bx}^2 + M_{by}^2} \quad (4a)$$

$$M_a = \pm 0.35\sqrt{M_{ax}^2 + M_{ay}^2} \quad M_b = \pm\sqrt{M_{bx}^2 + M_{by}^2} \quad (4b)$$

Sadece OO kolonlar için değil, OO yapılarıdaki ortogonal kolonlar ile ortogonal yapılara ait kolonlar için de donatı hesaplarında ortogonal doğrultulardaki yüklemelerden elde edilen eğilme momentlerinin kullanılmasının hatalı sonuçlar verdiği, geliştirilen yeni birleştirme denklemi ile bu kolonlar için de gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir [24].

Yukarıda kısaca özetlenen çalışmalarda farklı birleştirme denklemleri önerilmiştir. (2) ve (4) denklemleri, SRSS yöntemine dayanmaktadır ve etkileşimli birleştirme önerilmektedir.

ABYYHY’te 2006 yılında yapılan değişikliklerle yönetmeliğin adı Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) olarak değiştirilmiş, A4 türü düzensizlik tanımı da kaldırılmıştır. DBYBHY’te yapı elemanının ortogonal olup olmamasına bakılmaksızın, taşıyıcı sisteme ayrı ayrı etki ettirilen x ve y doğrultularındaki depremlerin ortak etkisi altında, taşıyıcı sistem elemanlarının **a** ve **b** asal eksen doğrultularındaki iç kuvvetlerinin, en elverişsiz sonucu verecek şekilde;

$$B_a = \pm B_{ax} \pm 0.30 B_{ay} \quad \text{veya} \quad B_a = \pm 0.30 B_{ax} \pm B_{ay} \quad (5a)$$

$$B_b = \pm B_{bx} \pm 0.30 B_{by} \quad \text{veya} \quad B_b = \pm 0.30 B_{bx} \pm B_{by} \quad (5b)$$

denklemleri ile hesaplanması öngörülmüştür [1]. Yönetmelikte verilen (5) denklemi yeterince açık değildir. Maksimum donatı oranını verecek şekilde iç kuvvetler hesaplanırken, B_a için (5a) denkleminde ilk terim alınırken B_b için (5b) denklemindeki 2. terimin alınabileceği gibi bir anlam çıkmaktadır. Ancak gerek daha önce yapılmış olan

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

çalışmalardan ve gerekse burada yapılan çözümlerde açıkça görülmüştür ki, böyle yapılması halinde hesaplanan donatı oranları kesitte bulunması gereken maksimum donatı oranından genellikle çok yüksek çıkmaktadır. Bu nedenle, (5a) denkleminde ilk terim alındığında (5b) denkleminde de ilk terimin alınması gerekir.

1.2 Amaç ve Kapsam

İki eksenli eğilme momenti ve eksenel normal kuvvet etkisi altında bulunan kolonlarda donatı oranlarının hesabı birçok değişkene bağlıdır. Kesite etkiyen normal kuvvetin değeri, dikdörtgen kesitlerde kesit boyutlarının oranı, donatının kesit içindeki dağılımı başlıca faktörlerdir. Yapılan çalışmaların hiç birinde bu etkiler birlikte dikkate alınmamış, genel olarak kare kesitli kolonlar üzerinde çalışılmış ve SRSS yöntemini esas alan çeşitli denklemler önerilmiştir. Bu nedenle, önerilen denklemlerin yapılan çalışmaların kapsamı ile sınırlı olduğu söylenebilir.

Burada kısaca özetlenen çalışmalarda yeni birleştirme denklemleri önerilmiştir. Bu çalışmada, diğer birleştirme denklemlerine göre daha uygun sonuçlar veren, Özmen tarafından önerilen (4) numaralı birleştirme denklemi esas alınmıştır [24]. Ancak bu denklem kullanılarak yapılan çözümlerde, kare ve kareye yakın kolonlarda yüksek donatı oranları (%3-%4) için %20'ye varan oranlarda güvensiz yönde sonuçlar elde edilmektedir. Kolon kesiti kareden uzaklaştıkça donatı hesabında yapılan hata azalmaktadır. Kolonda kenar oranları için sınır değer olan $h/b \leq 7$ için yapılan hata, güvenli yönde %3-%7 aralığında olmaktadır.

Bu çalışmada (4) denkleminin her zaman kullanılabilmesini sağlayacak bir çizelge geliştirmeye çalışılmıştır. Bu çizelge elde edilirken; kesite etkiyen eksenel normal kuvvet, kolon kesitinin kenar oranları ve deprem kuvvetinin etkisini göz önüne alabilmek için (4) denklemi yardımıyla bulunan donatı oranı esas değişkenler olarak alınmıştır. Bu 3 değişkene bağlı olarak çizelgeden okunan k katsayısı ile (4) denklemi yardımıyla bulunan donatı oranı çarpılacak böylece kesite konması gereken maksimum donatı oranı hesaplanabilecektir. Bu işlem, ortogonal olup olmamasına bakılmaksızın bütün yapılar ve kolonlar için yapılmalıdır.

Yazıcı tarafından yapılan çalışmada, aynı kolonlar için farklı donatı dağılımları halinde hata oranları;

Dört kenar boyunca eşit ve düzgün yayılı donatı hali	%4.8
Köşelerde ve kenar ortalarında toplanan 8 eşit donatı hali	%4.9
Donatının; köşelerde 3/16'sının, kenar ortalarında 1/16'sının bulunması hali	%4.7
Karşılıklı iki kenarda eşit ve düzgün yayılı donatı hali	%4.9

olarak elde edilmiştir [23]. Görüleceği gibi, donatının kesit içindeki dağılımının hata oranları üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek kadar azdır. Bu nedenle, betonarme hesapta donatının sadece kesit köşelerinde toplandığı kabul edilmiş, kesit içinde donatının farklı şekillerde dağılımı incelenmemiştir.

Bu çalışmanın kapsamı kare ve dikdörtgen kesitli kolonlarla sınırlıdır. Poligon kolonlar, perdeler ve kirişler bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, Özmen tarafından önerilen (4) numaralı birleştirme denkleminin bütün betonarme kolonlara uygulanabilmesi için bir çizelge elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, k katsayıları çizelgesini elde etmek için, diğer araştırmacılar tarafından da kullanılan bir “Sayısal Deney” yöntemi uygulanmıştır [21-28]. Sayısal deney yöntemi için 6 adet “Tipik Yapı” seçilip deprem doğrultuları parametrik olarak değiştirilmiş, ortogonal olup olmamasına bakılmaksızın bütün kolonların her iki asal doğrultudaki eğilme momentleri ile bunlara karşılık gelen donatı oranları hesaplanmış, kesite konması gereken maksimum donatı oranı belirlenmiştir. Bu şekilde elde edilen maksimum donatı oranları ile DBYBHY’te önerilen (5) denklemi ve Özmen tarafından önerilen (4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranları karşılaştırılmıştır.

Kolon kesitlerinin kenar oranları, kesite etkileyen eksenel normal kuvvet ve (4) numaralı birleştirme denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranları değiştirilerek sayısal çözümler yapılmıştır. Sonuçta, (4) denkleminde ve parametrik araştırmadan elde edilen donatı oranlarını eşitlemek için bir çizelge oluşturulmuştur.

2.1 Tipik Yapılar

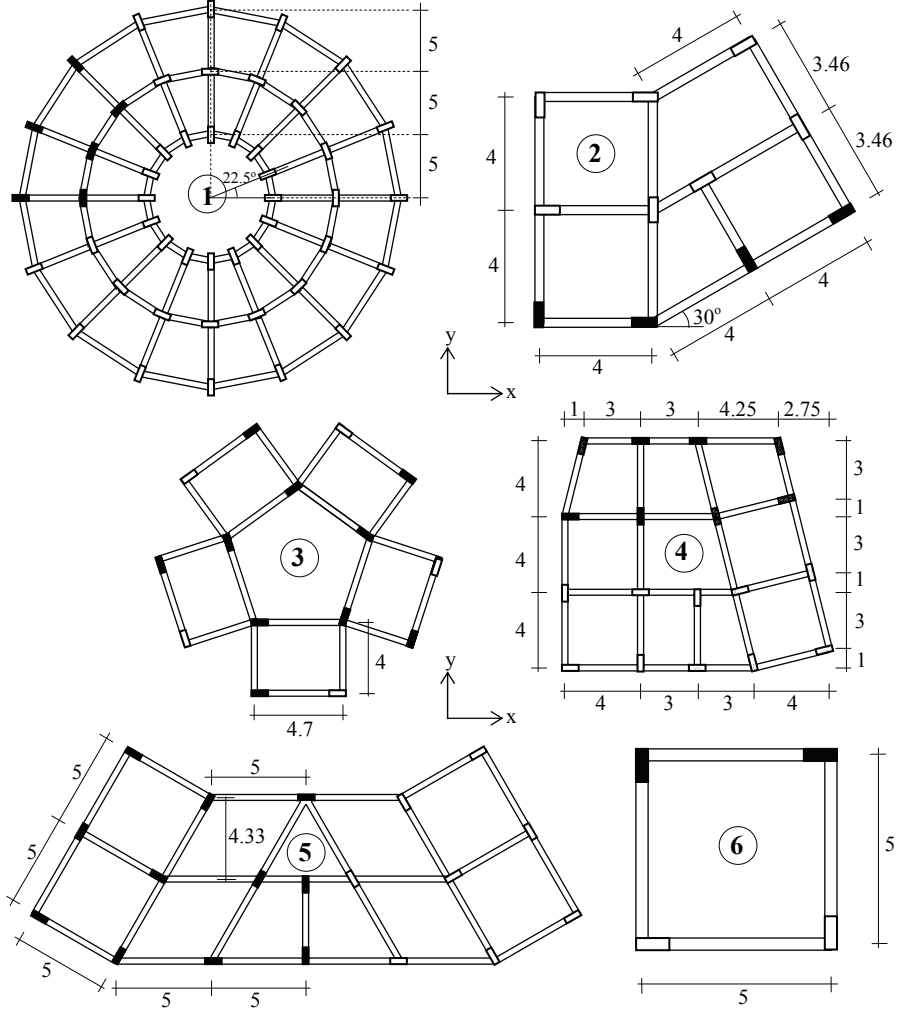
Tipik yapılar seçilirken, uygulamada karşılaşılabilecek durumlar olabildiğince geniş bir şekilde yansıtılmaya çalışılmıştır. Seçilen 6 adet tipik yapının kalıp planları Şekil 2’de gösterilmiştir.

2.2 Varsayımlar ve Yapıların Genel Özellikleri

Birçok değişkene bağlı olan, iki eksenli eğilme momenti ve eksenel normal kuvvet etkisi altındaki betonarme kolonlarda donatı oranlarının hesabı için bazı basitleştirici varsayımlarda bulunulmuştur. Tipik yapıların tümü için geçerli olan bu varsayımlar ve bu varsayımda bulunma nedenleri ile yapıların genel özellikleri kısaca aşağıda verilmiştir

- 1.) Bütün tipik yapılarda tüm düşey taşıyıcılar kolonlardır. Perdeli sistemler bu çalışmanın kapsamı dışındadır.
- 2.) Yönetmelikte öngörülen sınırlara uymak ve genel uygulamayı yansıtabilmek için, bütün örneklerde malzeme sınıfı olarak C25 betonu S420 çeliği kullanılmıştır. DBYBHY’ye göre, deprem bölgelerinde yapılacak bütün binalarda C20’den daha düşük dayanımlı beton kullanılamaz. Aynı yönetmeliğe göre, betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında S420’den daha yüksek dayanımlı çelik kullanılamaz [1].
- 3.) Sayısal çözümlemede tüm örnekler tek katlı olarak seçilmiş olup kat yükseklikleri 4.0 m olarak alınmıştır.
- 4.) Statik hesaplarda ve buna bağlı olarak betonarme hesaplarda düşey yükler nedeniyle oluşacak eğilme momentlerinin etkisi göz önüne alınmamıştır. Bu varsayımın nicesel sonuçları biraz değiştireceği, ancak karşılaştırmalara ve irdelemelere etkisinin ihmal edilebilecek nitelikte olduğu düşünülmüştür [24].

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi



Şekil 2. Tipik Yapıların Şematik Kalıp Planları

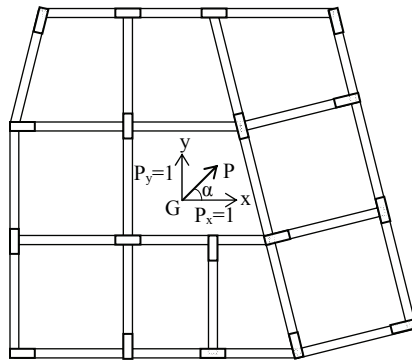
- 5.) Kolon kesitleri kareden başlayarak, perde kesit için sınır değer olan 1/7'ye kadar değişmektedir. Kare kolonlar $400 \times 400 \text{ mm}^2$ olarak alınmıştır. Dikdörtgen kolonların kısa kenarı sabit ve 250 mm alınmış, kolon kesiti kenar oranları 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 3.0, 4.0 ve 7.0 olacak şekilde uzun kenarları değiştirilmiştir. Bunun nedeni, kolonlar için minimum kesit genişliğinin 250 mm olması zorunluluğudur [1, 29]. Ayrıca, uygulamada da bu ölçüler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
- 6.) Kiriş genişlikleri bütün örneklerde sabit ve 250 mm olarak alınmıştır. DBYBHY'e göre kiriş gövde genişliği en az 250 mm olmalıdır [1]. Kiriş yükseklikleri ise 1. örnekte,

kiriş hesap açıklığına bağlı olarak, 400 mm, 500 mm ve 600 mm, diğer örneklerde ise sabit ve 500 mm'dir.

- 7.) Normal kuvvet olarak gerçek değerler kullanılmamıştır. Tasarım normal kuvveti yerine, en genel hali yansıtabilme için, normal kuvvetin $0.1bh_f_{ck}$ ile $0.5bh_f_{ck}$ arasında değiştiği kabul edilmiştir. Bilindiği gibi, aksel basınç değeri $N_d \leq 0.1bh_f_{ck}$ olan elemanlar eğilme elemanları olarak tanımlanmıştır [29]. DBYBHY'e göre, kolonun brüt enkesit alanı, N_{dm} düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan aksel basınç kuvvetlerinin en büyüğü olmak üzere, $A_c \geq N_{dm}/(0.5f_{ck})$ koşulunu sağlayacaktır [1]. Bu nedenle, normal kuvvet değeri sırasıyla; $0.1bh_f_{ck}$, $0.2bh_f_{ck}$, $0.3bh_f_{ck}$, $0.4bh_f_{ck}$, $0.5bh_f_{ck}$ olacak şekilde 5 farklı normal kuvvet değeri göz önüne alınmıştır.
- 8.) Deprem yükü olarak DBYBHY'te verilen eşdeğer deprem yükleri kullanılmamıştır. Bunun yerine, her bir kolon kesiti ve normal kuvvet değeri için, (4) denklemden faydalanarak hesaplanacak donatı oranlarının %1 ile %4 arasında olmasını sağlayacak şekilde yatay deprem yükleri ardışık yaklaşımla belirlenmiştir. Donatı oranları için sınır değerlerin bu şekilde seçilmesinin nedeni, betonarme kolonlar için minimum donatı oranının %1, maksimum donatı oranının %4 olmasıdır [1, 29]. Bu nedenle, donatı oranları sırasıyla; %1, %2, %3 ve %4 olacak şekilde 4 farklı çözüm göz önüne alınmıştır.

2.3 Parametrik Araştırma

Sayısal deney yönteminin uygulanmasında 6 adet tipik yapı seçilip deprem doğrultusu 0.5° 'er derecelik artımlarla parametrik olarak değiştirilmiştir. Şekil 2'de taralı olarak gösterilmiş olan 41 kolonun her iki doğrultudaki eğilme momentleri ile bunlara karşı gelen donatı oranları hesaplanmış ve maksimum donatı oranları saptanmıştır. Bunun için, ele alınan her bir tipik yapıya, yapının kütle merkezinden, $P_x=1$ ve $P_y=1$ birim yüklemeleri uygulanmıştır (Şekil 3). Şekilde G, yapının kütle merkezidir.



Şekil 3. Yüklemeler ve Kolon Asal Eksenleri

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

Bu birim yüklemeler sonucunda herhangi bir kolonda oluşan, **a** ve **b** asal eksenleri etrafındaki eğilme momentleri;

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{ax} & m_{ay} \\ m_{bx} & m_{by} \end{bmatrix} \quad (6)$$

“Birim Yükleme Sabitleri Matrisi”nin katsayıları olarak ifade edilmiştir. m_{ij} katsayılarında *i* indisi asal eksen, *j* indisi ise deprem doğrultularını göstermektedir. Buna göre *x* eksenine ile α açısı yapan bir kolonun **a** ve **b** asal doğrultularında oluşan eğilme momentleri;

$$M_a = P(m_{ax} \cos \alpha + m_{ay} \sin \alpha) \quad (7a)$$

$$M_b = P(m_{bx} \cos \alpha + m_{by} \sin \alpha) \quad (7b)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada *P*; yatay deprem yükü, α ise deprem yükünün doğrultusu ile *x* eksenine arasındaki açıdır. Tüm parametrik araştırmalarda bu temel denklemler kullanılmıştır [24].

Birim yükleme sabitlerinin elde edilmesi için SAP2000 yazılımı kullanılarak statik çözüm yapılmıştır [30]. (7) denkleminde hesaplanan kolon uç momentleri ve seçilen eksenel normal kuvvete bağlı olarak, kolon betonarme hesapları Çakıroğlu ve Özer tarafından önerilen yaklaşık yöntemle yapılmıştır [31, 32]. Bu amaçla FORTRAN programlama dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır.

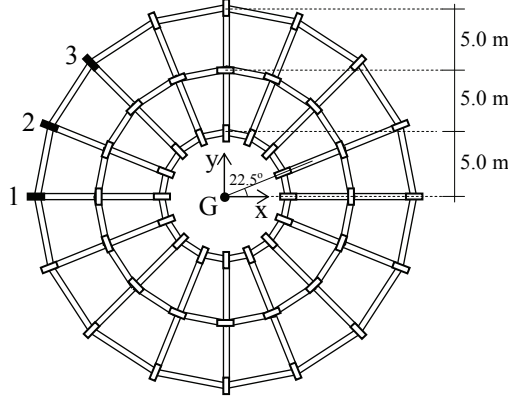
Her bir yapının statik hesabı, 8 farklı kolon enkesiti nedeniyle 8 kez tekrarlanmıştır. Bu şekilde her bir kolon için elde edilen birim yükleme sabitleri yardımıyla betonarme hesabı yapılmıştır. Betonarme hesabı için, kolonların eksenel normal kuvvet değerleri sırasıyla $0.1bh_{ck}$, $0.2bh_{ck}$, $0.5bh_{ck}$ olarak değiştirilmiştir. Her bir normal kuvvet değeri için, kolon kesitindeki donatı oranı sırasıyla %1, %2, %3 ve %4 çıkacak şekilde *P* yatay deprem kuvvetleri ardışık yaklaşımla belirlenmiştir. Şekil 2’de görüldüğü gibi 6 farklı yapıda bulunan 41 kolon için bu işlemler yapılmıştır. *k* katsayıları çizelgesini oluşturmak için 8 farklı kolon enkesiti göz önüne alındığından, çizelgeyi oluşturmak için kullanılan çözüm sayısı; 41 farklı kolon×8 kolon enkesiti×5 normal kuvvet×4 donatı oranı=6560’tır.

3. SAYISAL UYGULAMA

k katsayıları çizelgesinin nasıl oluşturulduğunu açıklamak için örnek çözüm olarak seçilen tek katlı yapının şematik kat planı Şekil 4’te gösterilmiştir. Şekil 4’e göre 1 numaralı kolon ortogonal, 2 ve 3 numaralı kolonlar ise ortogonal değildir. Çözümde bu 3 kolonun sonuçları verilmiştir.

Örnek çözüm için, yapının bütün kolonları $250 \times 600 \text{ mm}^2$ olarak alınmıştır. Dış çemberi oluşturan kirişler $250 \times 600 \text{ mm}^2$ (5.85 m), orta çemberi oluşturan kirişler $250 \times 500 \text{ mm}^2$ (3.90 m) ve iç çemberi oluşturan kirişler $250 \times 400 \text{ mm}^2$ (1.95 m), radyal doğrultudaki kirişler ise $250 \times 600 \text{ mm}^2$ (5.00 m) olarak alınmıştır. Tek katlı olan yapının kat yüksekliği

4.00 m'dir. SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılan deprem hesabında rijit diyafram kabulü yapılmıştır [30]. Deprem hesabında, x ve y eksenleri doğrultusunda uygulanan $P_x=1$ ve $P_y=1$ birim yüklemeleri yapının G kütle merkezinden uygulanmıştır. Malzeme olarak C25 betonu ve S420 çeliği kullanılmıştır. Paspayı $h'=50$ mm'dir.



Şekil 4. Sayısal Uygulama Örneğinin Şematik Kalıp Planı

3.1 Maksimum Donatı Oranının Parametrik Olarak Araştırılması

x ve y eksenleri doğrultusunda uygulanan $P_x=1$ ve $P_y=1$ birim yüklemeleri sonucunda bu 3 kolona ait Birim Yükleme Sabitleri Matrisleri sırasıyla;

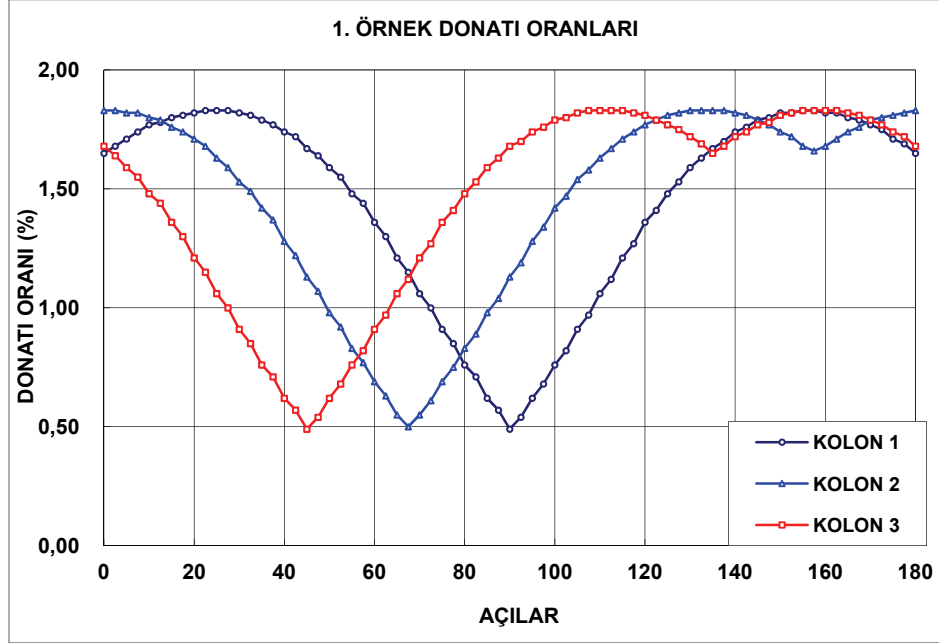
$$[m_1] = \begin{bmatrix} -0.0749 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0181 \end{bmatrix}, \quad [m_2] = \begin{bmatrix} -0.0692 & 0.0287 \\ 0.0069 & 0.0167 \end{bmatrix}, \quad [m_3] = \begin{bmatrix} -0.0530 & 0.0530 \\ 0.0128 & 0.0128 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilmiştir. 1 birimlik P deprem yükünün x eksenine yaptığı α açısının değerleri $\alpha=0, 0.5, 1, 1.5, \dots, 180^\circ$ arasında parametrik olarak değiştirilerek, (7) denklemi yardımıyla kolonlar için M_a ve M_b eğilme momentleri elde edilmiştir. Kolonlar için normal kuvvet değerleri, daha önce açıklandığı gibi, parametrik olarak değiştirilmiştir. P yatay deprem yükü, (4) denklemi yardımıyla hesaplanan kolon uç momentleri kullanılarak bulunan donatı miktarı istenen oranı sağlayacak şekilde, ardışık yaklaşımla belirlenmiştir. Betonarme hesapta, donatının köşelerde toplandığı kabul edilmiş ve çözüm için Kaynak [31, 32]'de verilen denklemlerden yararlanılmıştır. Burada örnek çözüm olarak, normal kuvvetin $0.3bh_f_{ck}=1125$ kN, donatı oranının ise %2 olması hali gösterilmiş ve P yatay deprem yükü ardışık yaklaşım sonucu 4910 kN olarak elde edilmiştir. Bu işlemler, hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla yapılmıştır.

Parametrik araştırma sonucu elde edilen donatı oranları (ρ_p) Şekil 5 ve Çizelge 1'de gösterilmiştir. Buna göre, 3 kolon için de maksimum donatı oranı eşit olup $\rho_p = \%1.83$ 'tür. Maksimum donatı oranını veren yükleme doğrultuları sırasıyla $\alpha_1=156^\circ$ (21°), $\alpha_2=133.5^\circ$ (178.5°), $\alpha_3=111^\circ$ (156°) olarak elde edilmiştir. Bu kolonlar yapının kütle merkezinden

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

geçen eksenlere göre simetriktir. Kolonların asal eksenleri arasında 22.5° 'lik açı farkı vardır. Bu nedenle maksimum donatının bulunduğu deprem doğrultuları arasında da 22.5° 'lik farklar olmaktadır.



Şekil 5. Seçilen Kolonlara Ait Donatı Oranlarının Değişimi

Çizelge 1. Seçilen Kolonlar için Eğilme Momentleri ve Donatı Oranları

α Derece	KOLON 1			KOLON 2			KOLON 3		
	M_a (kNm)	M_b (kNm)	ρ (%)	M_a (kNm)	M_b (kNm)	ρ (%)	M_a (kNm)	M_b (kNm)	ρ (%)
0.	-367.76	.00	1.65	-339.77	33.88	1.83	-260.23	62.85	1.68
10.	-362.17	15.43	1.77	-310.14	47.60	1.80	-211.09	72.81	1.48
20.	-345.58	30.40	1.82	-271.08	59.88	1.71	-155.53	80.55	1.21
30.	-318.49	44.44	1.82	-223.79	70.34	1.53	-95.25	85.85	0.91
40.	-281.72	57.13	1.74	-169.70	78.66	1.28	-32.08	88.54	0.62
50.	-236.39	68.08	1.59	-110.45	84.59	0.98	32.08	88.54	0.62
60.	-183.88	76.96	1.36	-47.85	87.95	0.69	95.25	85.85	0.91
70.	-125.78	83.51	1.06	16.21	88.64	0.55	155.53	80.55	1.21

Çizelge 1. Seçilen Kolonlar için Eğilme Momentleri ve Donatı Oranları (devam)

α Derece	KOLON 1			KOLON 2			KOLON 3		
	M_a (kNm)	M_b (kNm)	ρ (%)	M_a (kNm)	M_b (kNm)	ρ (%)	M_a (kNm)	M_b (kNm)	ρ (%)
80.	-63.86	87.52	0.76	79.78	86.63	0.83	211.09	72.81	1.48
90.	0.00	88.87	0.49	140.92	82.00	1.13	260.23	62.85	1.68
100.	63.86	87.52	0.76	197.78	74.87	1.42	301.46	50.98	1.79
110.	125.78	83.51	1.06	248.63	65.46	1.63	333.54	37.56	1.83
120.	183.88	76.96	1.36	291.92	54.07	1.77	355.48	23.00	1.81
130.	236.39	68.08	1.59	326.35	41.04	1.83	366.62	7.75	1.72
140.	281.72	57.13	1.74	350.86	26.75	1.82	366.62	-7.75	1.72
150.	318.49	44.44	1.82	364.71	11.66	1.74	355.48	-23.00	1.81
160.	345.58	30.40	1.82	367.48	-3.79	1.68	333.54	-37.56	1.83
170.	362.17	15.43	1.77	359.08	-19.13	1.79	301.46	-50.98	1.79
180.	367.76	0.00	1.65	339.77	-33.88	1.83	260.23	-62.85	1.68
Max.	$\rho_{p1}=\%1.83$			$\rho_{p2}=\%1.83$			$\rho_{p3}=\%1.83$		

3.2 Deprem Yönetmeliğine Göre Maksimum Donatı Oranının Hesabı

DBYBHY’te önerilen, eğilme momentlerinin karşılıklı etkilerinin göz önüne alındığı (5) denkleminin kullanılması halinde bu 3 kolon için donatı oranları (ρ_d) aşağıdaki şekilde elde edilir.

1 numaralı kolon için:

$$M_a=367.76+0.30 \times 0=367.76 \text{ kNm} \quad M_b=0+0.30 \times 88.87=26.66 \text{ kNm} \quad \rho=\%1.94$$

$$M_a=0.30 \times 367.76+0=110.33 \text{ kNm} \quad M_b=0.30 \times 0+88.87=88.87 \text{ kNm} \quad \rho=\%1.06$$

2 numaralı kolon için:

$$M_a=339.77+0.30 \times 140.92=382.05 \quad M_b=33.88+0.30 \times 82.00=58.48 \quad \rho=\%2.51$$

$$M_a=0.30 \times 339.77+140.92=242.85 \quad M_b=0.30 \times 33.88+82.00=92.16 \quad \rho=\%2.10$$

3 numaralı kolon için:

$$M_a=260.23+0.30 \times 260.23=338.30 \quad M_b=62.85+0.30 \times 62.85=81.71 \quad \rho=\%2.60$$

$$M_a=0.30 \times 260.23+260.23=338.30 \quad M_b=0.30 \times 62.85+62.85=81.71 \quad \rho=\%2.60$$

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

1, 2 ve 3 numaralı kolonlar için maksimum donatı oranları sırasıyla; $\rho_{d1}=\%1.94$, $\rho_{d2}=\%2.51$ ve $\rho_{d3}=\%2.60$ olarak elde edilmiştir.

Merkezi simetri nedeniyle 3 kolonda da eşit çıkması gereken maksimum donatı oranları farklı çıkmıştır. Parametrik araştırma sonucu bulunan $\rho_p = \%1.83$ 'lük maksimum donatı oranı göz önüne alındığında, bu kolonların donatı hesabında yapılan hata oranları; ortogonal olan 1 numaralı kolonda +%6.0, ortogonal olmayan 2 ve 3 numaralı kolonlarda sırasıyla +%36.6 ve +%42.1 olarak elde edilmiştir.

3.3 (4) Denklemi Yardımıyla Maksimum Donatı Oranının Hesabı

Özmen tarafından önerilen, SRSS yöntemine dayanan (4) denkleminin kullanılması halinde bu 3 kolon için donatı oranları (ρ_4) aşağıdaki şekilde elde edilir.

1 numaralı kolon için:

$$M_a = \sqrt{367.76^2 + 0} = 367.76 \quad M_b = 0.35\sqrt{0 + 88.87^2} = 31.10 \quad \rho = \%2.00$$

$$M_a = 0.35\sqrt{367.76^2 + 0} = 128.72 \quad M_b = \sqrt{0 + 88.87^2} = 88.87 \quad \rho = \%1.17$$

2 numaralı kolon için:

$$M_a = \sqrt{339.77^2 + 140.92^2} = 367.83 \quad M_b = 0.35\sqrt{33.88^2 + 82.00^2} = 31.05 \quad \rho = \%2.00$$

$$M_a = 0.35\sqrt{339.77^2 + 140.92^2} = 128.74 \quad M_b = \sqrt{33.88^2 + 82.00^2} = 88.72 \quad \rho = \%1.17$$

3 numaralı kolon için:

$$M_a = \sqrt{260.23^2 + 260.23^2} = 368.02 \quad M_b = 0.35\sqrt{62.85^2 + 62.85^2} = 31.11 \quad \rho = \%2.00$$

$$M_a = 0.35\sqrt{260.23^2 + 260.23^2} = 128.81 \quad M_b = \sqrt{62.85^2 + 62.85^2} = 88.88 \quad \rho = \%1.17$$

Bütün kolonlarda maksimum donatı oranları, seçilen yatay deprem yüküne uygun olarak, $\rho_4 = \%2.00$ olarak elde edilmiştir.

Merkezi simetri nedeniyle 3 kolonda da maksimum donatı oranları eşit çıkmıştır. Parametrik araştırma sonucu bulunan $\rho_p = \%1.83$ 'lük maksimum donatı oranı göz önüne alındığında, bu kolonların donatı hesabında yapılan hata oranları birbirine eşit olup +%9.3 olarak elde edilmiştir.

Başlangıç noktası yine yapının kütle merkezi olmak üzere, deprem yüklerinin farklı bir eksen takımına göre etkilmesi halinde de (4) numaralı birleştirme denklemi yardımıyla elde edilen donatı oranları değişmemektedir [21, 24].

Benzer işlemler yapılarak, bu sonuçlarla birlikte, aynı örneğin farklı normal kuvvet ve donatı oranları için yapılan çözümlerinin sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Örnek 1’deki 3 Kolon için Donatı Oranları (Kolon Boyutları: 250/600 mm²)

Donatı Oranı	$\frac{N}{bh f_{ck}}$	Yatay Yük P (kN)	KOLON 1			KOLON 2			KOLON 3		
			ρ_p (%)	ρ_4 (%)	ρ_d (%)	ρ_p (%)	ρ_4 (%)	ρ_d (%)	ρ_p (%)	ρ_4 (%)	ρ_d (%)
%1	0.1	2800	0.91	1.00	0.98	0.91	1.00	1.21	0.91	1.00	1.16
	0.2	3265	0.89	1.00	0.96	0.89	1.00	1.32	0.89	1.00	1.33
	0.3	3341	0.88	1.00	0.96	0.88	1.00	1.31	0.88	1.00	1.33
	0.4	2721	0.91	1.00	0.98	0.91	1.00	1.23	0.91	1.00	1.21
	0.5	1985	0.94	1.00	0.99	0.94	1.00	1.14	0.94	1.00	1.10
%2	0.1	4444	1.85	2.00	1.96	1.85	2.00	2.34	1.85	2.00	2.29
	0.2	4815	1.84	2.00	1.94	1.84	2.00	2.48	1.84	2.00	2.50
	0.3	4910	1.83	2.00	1.94	1.83	2.00	2.51	1.83	2.00	2.60
	0.4	4310	1.85	2.00	1.96	1.85	2.00	2.40	1.85	2.00	2.42
	0.5	3600	1.88	2.00	1.97	1.88	2.00	2.28	1.88	2.00	2.25
%3	0.1	6100	2.79	3.00	2.95	2.79	3.00	3.50	2.80	3.00	3.46
	0.2	6360	2.78	3.00	2.92	2.79	3.00	3.65	2.79	3.00	3.69
	0.3	6460	2.79	3.00	2.92	2.79	3.00	3.73	2.79	3.00	3.93
	0.4	5890	2.80	3.00	2.94	2.80	3.00	3.60	2.80	3.00	3.70
	0.5	5210	2.82	3.00	2.95	2.82	3.00	3.46	2.82	3.00	3.47
%4	0.1	7735	3.73	4.00	3.92	3.73	4.00	4.66	3.73	4.00	4.66
	0.2	7910	3.74	4.00	3.90	3.74	4.00	4.82	3.74	4.00	4.90
	0.3	7995	3.77	4.00	3.89	3.77	4.00	4.98	3.77	4.00	5.33
	0.4	7455	3.75	4.00	3.91	3.75	4.00	4.82	3.75	4.00	5.04
	0.5	6810	3.76	4.00	3.93	3.76	4.00	4.66	3.76	4.00	4.76

Burada; ρ_p parametrik çözümden elde edilen, ρ_4 (4) denklemi yardımıyla hesaplanan, ρ_d DBYBHY’te önerilen (5) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranını, P ise yatay deprem yükünü ifade etmektedir.

3.4 Değerlendirme

Çizelge 2’de görüldüğü gibi, DBYBHY’te önerilen (5) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranları (ρ_d) doğru değildir. Merkezi simetri nedeniyle 3 kolonda da eşit çıkması gereken maksimum donatı oranları farklı çıkmıştır. Burada gösterilen çözüm sonuçları aşırı güvenlidir yani ekonomik değildir. Fakat aynı denklemlerin kullanılması halinde, 2 numaralı örnekteki bir kolonda $N=0.3bh_{fck}$ ve donatı oranı %4 için bulunan donatı miktarı %18 oranında güvensiz taraftadır. Bu nedenlerle, donatı hesabında (5) numaralı birleştirme denkleminin kullanılması uygun değildir.

Özmen tarafından önerilen (4) numaralı birleştirme denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranları (ρ_4) parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlara çok yakındır ve hepsi güvenli taraftadır. Merkezi simetriye sahip kolonlardaki donatı oranları eşit çıkmaktadır. Bu yüzden “Karelerin Toplamının Kare Kökü” (SRSS) yöntemine dayanan bu denklemin kullanılması daha uygundur.

SRSS yöntemi elverişsiz kiriş uç momentlerinin hesabında kullanılan güvenli bir yöntemdir [21]. Ancak, bu yöntemi esas alan (4) denkleminin kullanılması halinde, özellikle kare ve kareye yakın kolonlarda, $N=(0.3-0.4)bh_{fck}$ ve donatı oranının %3-%4 arasında olması hali için hata oranları hep güvensiz tarafta kalmakta ve %20 mertebesine kadar ulaşabilmektedir. Bu sakıncanın ortadan kaldırılabilmesi, güvenli ve ekonomik çözüm sonuçlarının elde edilebilmesi için, (4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranlarının yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için de bir düzeltme katsayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Kirişlerden farklı olarak kolonlarda eksenel normal kuvvet bulunmaktadır. Bu nedenle, düzeltme katsayısını belirlerken en önemli değişkenlerden birisi de kesite etki eden eksenel normal kuvvet olacaktır. Diğer değişkenler ise kolon kesitinin kenar oranları ve (4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranıdır.

3.5 Çizelgenin Hazırlanması ve Karşılaştırmalar

Çizelgeyi hazırlamak için, 6 farklı yapıda bulunan 41 farklı kolona ait toplam 6560 çözümden yararlanılmıştır. Çözümler, yukarıda kısaca hesap adımları gösterilen, 1 numaralı örnekte açıklandığı şekilde yapılmıştır. Yukarıda 1 numaralı örneğin çözümü sadece 250/600 mm²’lik kolonlar içindir. Bütün örnekler, daha önce açıklanmış olduğu gibi farklı kolon kenar oranları ile de çözülmüştür.

Çözümlerden elde edilen sonuçlar EXCEL tabloları haline getirilmiştir. Tablolarda her bir çözüm için ayrı ayrı hata oranları hesaplanmıştır. Bu hata oranlarından faydalanarak, (4) denklemi yardımıyla hesaplanacak donatı oranı, parametrik çözümden elde edilecek donatı oranına eşitlenecek şekilde katsayılar belirlenmiştir (Çizelge 3). Bu işlem sırasında, herhangi bir kolondaki hata oranının güvensiz yönde %5’ten ve güvenli yönde %10’dan büyük olmamasına dikkat edilmiştir. Gerek güvenli ve gerekse güvensiz yönde elde edilen en büyük hata yüzdeleri genellikle farklı yapılarda ve farklı kolonlarda elde edilmiştir. Bu yüzden seçilen bu örneklerin genel bir çizelge elde etmek için yeterli olduğu söylenebilir.

(4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranları, kolon kenar oranlarına ve kesite etkiyen eksenel normal kuvvete bağlı olarak Çizelge 3’ten okunan bir k katsayısı ile çarpılacak ve tasarıma esas donatı oranı elde edilecektir. Çizelgedeki ilk sütun (4) numaralı

denklem yardımıyla hesaplanan donatı oranını göstermektedir. Ara değerler için doğrusal enterpolasyon yapılabilir.

Çizelge 3. k katsayıları çizelgesi

Donatı Oranı	$\frac{N}{bh f_{ck}}$	Kolon Kesitleri Kenar Oranları (h/b, cm/cm)							
		1.0 40/40	1.2 30/25	1.6 40/25	2.0 50/25	2.4 60/25	3.0 75/25	4.0 100/25	7.0 175/25
%1	0.1	0.96	0.93	0.92	0.93	0.94	0.94	0.95	0.96
	0.2	1.05	0.98	0.95	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	0.3	1.07	0.97	0.93	0.92	0.92	0.92	0.93	0.94
	0.4	0.99	0.94	0.93	0.93	0.93	0.94	0.95	0.96
	0.5	0.96	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97
%2	0.1	0.99	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96	0.97
	0.2	1.05	0.99	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	0.3	1.11	1.02	0.97	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95
	0.4	1.03	0.98	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96	0.96
	0.5	0.98	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.97
%3	0.1	0.99	0.96	0.95	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97
	0.2	1.05	1.00	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.96
	0.3	1.15	1.05	0.99	0.97	0.96	0.95	0.96	0.96
	0.4	1.08	1.00	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
	0.5	1.02	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.97
%4	0.1	1.01	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	0.96	0.97
	0.2	1.05	1.00	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
	0.3	1.19	1.09	1.01	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96
	0.4	1.12	1.04	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.97
	0.5	1.06	0.99	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.97

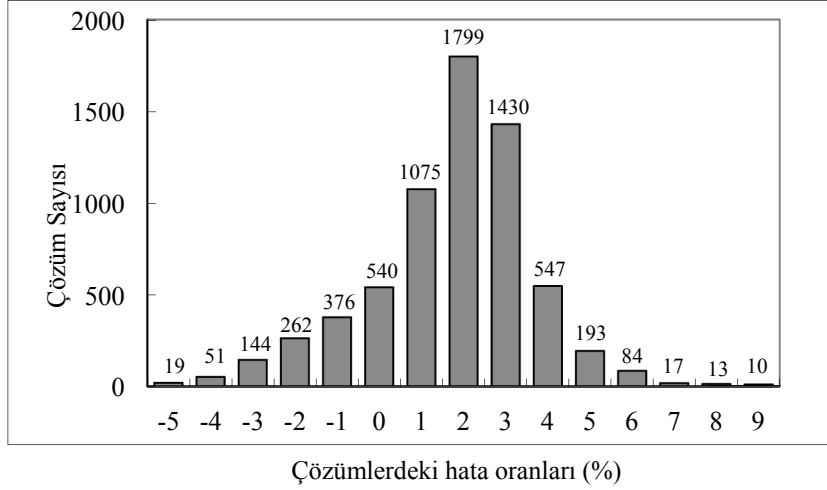
Çizelge 3'te görüldüğü gibi, kare ve kareye yakın kesitli kolonlarda, (4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranına bağlı olarak, k katsayıları genellikle 1'den büyüktür.

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

Yüksek donatı oranları için güvensiz yönde %20'ye yaklaşan hatalar bulunmaktadır. Kolon kesiti kenar oranlarının 1.6'dan büyük olması halinde ise k katsayıları 1'den küçük ama 1'e yakındır. Yani (4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranları güvenli tarafta kalmaktadır ve parametrik çözümden elde edilen sonuçlara yakındır.

6560 çözüm sonucu elde edilen Çizelge 3'teki katsayıların kullanılmasıyla hesaplanan donatı oranları parametrik araştırma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Donatı oranlarındaki göreceli hata oranları -%5.31 ile +%9.18 arasında değişmektedir. 939 çözümden elde edilen sonuçlar güvensiz yöndedir ve ortalama hata -%1.703'tür. 5621 çözüm güvenli yöndedir ve ortalama hata +%2.306'dır. Bütün çözümler için ortalama hata +%1.73'tür. Hata oranları ve buna karşılık gelen çözüm sayıları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Deprem hesaplarındaki çeşitli belirsizlikler göz önüne alındığında, burada bulunan hata oranlarının pratik uygulamalar bakımından kabul edilebilir mertebede oldukları söylenebilir.



Şekil 6. Hata oranları ve buna karşılık gelen çözüm sayıları

Bir karşılaştırma yapmak için, k katsayılarının kullanılmasıyla, Kaynak (24)'te verilen sonuçların hata oranlarındaki değişim Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgede verilen çözümlerde normal kuvvet yaklaşık $0.1bh_{fk}$, donatı oranı ise yaklaşık %1.5 olduğundan k katsayıları 1'e yakındır. Bunun sonucunda hata oranlarındaki değişim çok azdır. (4) denkleminin kullanılmasıyla yapılan ortalama hata +%1.83, ilave olarak k katsayılarının kullanılması halinde yapılan ortalama hata ise -%0.21'dir.

Aynı örnekte diğer bütün veriler sabit kalarak, kolonlara etki eden aksel normal kuvvet $N=0.3bh_{fk}=675.0$ kN, 320 kN olan yatay deprem yükü ise $P=500$ kN olarak alındığında donatı ve hata oranlarındaki değişim Çizelge 5'te verilmiştir. (4) denklemi yardımıyla hesaplanan kolon donatı oranları bütün elemanlar için güvensiz taraftadır. En büyük hata

oranı $-\%19,56$ ve ortalama hata $-\%12,27$ 'dir. İlave olarak k katsayılarının kullanılması halinde yapılan çözümlerin dördü güvenli tarafta, beşi güvensiz taraftadır, en büyük hata oranları $\pm\%9,10$, ortalama hata ise $-\%0,17$ 'dir.

Çizelge 4. Kaynak (24)'te verilen çözüm sonuçlarının k katsayıları ile düzenlenmesi

Kolon No	$\frac{N}{bh_{ck}^2}$	Parametrik	Kaynak (24)		Önerilen k katsayıları ile		
		ρ_p (%)	ρ_4 (%)	hata (%)	k	$k \times \rho_4$ (%)	hata (%)
1	0.09	1.42	1.41	-0.70	0.97	1.37	-3.68
2	0.11	1.51	1.44	-4.64	0.99	1.43	-5.59
3	0.10	1.61	1.62	0.62	0.98	1.59	-1.39
4	0.09	1.79	1.80	0.56	0.98	1.76	-1.45
5	0.10	1.40	1.46	4.29	0.97	1.42	1.16
6	0.13	1.39	1.46	5.04	1.00	1.46	5.04
7	0.09	1.46	1.53	4.79	0.97	1.48	1.65
8	0.10	1.67	1.68	0.60	0.98	1.65	-1.41
9	0.09	1.70	1.80	5.88	0.98	1.76	3.76
Ortalama hata %'leri				+1.83			-0.21

Çizelge 5. Kaynak (24)'te verilen yapının farklı N ve P için çözümleri

Kolon No	$\frac{N}{bh_{ck}^2}$	Parametrik	Kaynak (24)		Önerilen k katsayıları ile		
		ρ_p (%)	ρ_4 (%)	hata (%)	k	$k \times \rho_4$ (%)	hata (%)
1	0.30	2.73	2.32	-15.02	1.12	2.60	-4.82
2	0.30	3.17	2.55	-19.56	1.13	2.88	-9.10
3	0.30	3.25	2.77	-14.77	1.14	3.16	-2.84
4	0.30	3.47	2.98	-14.12	1.15	3.43	-1.24
5	0.30	2.80	2.50	-10.71	1.13	2.83	0.89
6	0.30	2.96	2.68	-9.46	1.14	3.06	3.22
7	0.30	2.71	2.51	-7.38	1.13	2.84	4.66
8	0.30	3.37	2.89	-14.24	1.15	3.32	-1.38
9	0.30	3.12	2.96	-5.13	1.15	3.40	9.10
Ortalama hata %'leri				-12.27			-0.17

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Özmen tarafından yapılan çalışmanın [24] devamı niteliğinde sayılabilecek bu çalışmada, değişik kesit oranları olan dikdörtgen kolonlu sistemler incelenmiştir. Bu kolonların, standart ve yönetmeliklerin izin verdiği sınırlar içinde, farklı eksenel normal kuvvet ve donatı oranları için tasarımları yapılmıştır.

Bu bölümde, yatay deprem yükleri altındaki betonarme kolon donatılarının hesabında, güvenli ve ekonomik bir çözüm için önerilerde bulunulacaktır.

1. DBYBHY’te önerilen (5) denklemi genel olarak ekonomik olmayan çözümler vermektedir. Merkezi simetriye sahip kolonlarda farklı donatı oranları elde edilmektedir. Bu nedenle, güvenli ve ekonomik bir çözüm için (5) numaralı birleştirme denkleminin kullanılması uygun değildir.
2. Özmen tarafından önerilen (4) denklemi, kenar oranları 1.6’dan büyük dikdörtgen kolonlar için, güvenli ve ekonomik çözümler sunmaktadır. Ancak, özellikle kare ve kareye yakın kesitli kolonlarda, $N=(0.3-0.4)bh_f_{ck}$ ve donatı oranının %3-%4 arasında olması hali için hata oranları hep güvensiz tarafta kalmakta ve %20 mertebesine kadar ulaşabilmektedir (Çizelge 3). Bu sakıncanın ortadan kaldırılabilmesi, bu tür kesitler için de güvenli ve ekonomik çözüm sonuçlarının elde edilebilmesi için, (4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranlarının yeniden değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.
3. (4) denklemi yardımıyla hesaplanan donatı oranlarının Çizelge 3’te verilen k katsayıları ile çarpılması sonucu daha güvenli ve ekonomik çözümler elde edilebilecektir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde olarak aşağıdaki araştırmalar yapılabilir.

- Farklı beton ve çelik sınıfları kullanılarak, betonarme hesaplar yeniden yapılabilir. Çizelge 3’te verilen katsayıların değişip değişmediği veya hangi oranda değiştiği araştırılabilir.
- Çizelge 3’te görüldüğü gibi, özellikle kare kolonlarda, komşu katsayılar arasındaki fark diğer sütunlardakilerden daha fazladır. Bu nedenle, gerek normal kuvvet ve gerekse hesaplanan donatı oranlarının ara değerleri için de hesaplar yapılarak daha doğru çözümler elde edilebilir.
- Çok katlı çerçeve yapılar ile perdeli yapılar için de çözümler yapılabilir.

Semboller

- A_c : Kolon kesit alanı (mm^2)
 a, b : Kolon için asal eksen takımı
 B : İç kuvvet büyüklüğü
 b, h : Kolon kesiti boyutları (mm)
 f_{ck} : Betonun karakteristik basınç mukavemeti (N/mm^2)

- G : Yapının kütle merkezi
k : Katsayı
M : Eğilme momenti (kNm)
[m] : Birim Yükleme Sabitleri Matrisi
N : Eksenel normal kuvvet (kN)
P : x eksenine ile α açısı yapan deprem yükü (kN)
P_x : x eksenine doğrultusundaki deprem yükü (kN)
P_y : y eksenine doğrultusundaki deprem yükü (kN)
x, y : Yapı için asal eksen takımı
 α : Deprem yükü ile x eksenine arasındaki açı
 λ : Katsayı (%)
 ρ_d : DBYBHY'e göre donatı oranı (%)
 ρ_p : Parametrik çözümden elde edilen donatı oranı (%)
 ρ_4 : (4) denkleminin yardımıyla hesaplanan donatı oranı (%)

Kaynaklar

- [1] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Mart 2006.
- [2] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İmar ve İskân Bakanlığı, Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara, 1975.
- [3] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Ağustos 1997.
- [4] 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 Institute, 94-103, 1975.
- [5] Rosenblueth, E. and Contreras, H., Approximate Design for Multicomponent Earthquakes, Journal of Engineering Mechanics Division ASCE, Vol. 103, 895-911, 1977.
- [6] Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273), October 1997.
- [7] Federal Emergency Management Agency, NEHRP Commentary on the Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 274), October 1997.

Betonarme Kolonlarda Donatı Oranlarının Belirlenmesi

- [8] Federal Emergency Management Agency, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (FEMA 302), 1997 Edition.
- [9] Federal Emergency Management Agency, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 2: Commentary (FEMA 303), 1997 Edition.
- [10] Federal Emergency Management Agency, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356), November 2000.
- [11] Federal Emergency Management Agency, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (FEMA 450), 2003 Edition.
- [12] International Code Council, Uniform Building Code (UBC 1997), Vol. 2: Structural Engineering Design Provisions, 1997.
- [13] International Code Council, International Building Code (IBC 2003), Falls Church, VA, 2003.
- [14] Earthquake Resistant Regulations – A World List, International Association for Earthquake Engineering, Tokyo, 1996.
- [15] Çakıroğlu, A., En Büyük Tesirleri Veren Deprem Doğrultularının Tayini, İ.T.Ü. Dergisi, Cilt 33, Sayı 3, 1975.
- [16] Smeby, W. and Der Kiureghian, A., Modal Combination Rules for Multi-Component Earthquake Excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, 1-12, 1985
- [17] Lopez, O. A. and Torres, R., The Critical Angle of Seismic Incidence and the Maximum Structural Response, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 881-894, 1997
- [18] Lopez, O. A. Chopra, A. K. and Hernandez, J. J., Evaluation of Combination Rules for Maximum Response Calculation in Multi-Component Seismic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, 1379-1398, 2001
- [19] Hernandez, J. J. and Lopez, O. A., Evaluation of Combination Rules for Peak Response Calculation in Three-Component Seismic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, 1585-1602, 2003
- [20] Reyes-Salazar, A., Lopez-Barraza, A., Lopez-Lopez, A. and Haldar, A., Multi-Component Seismic Response Analysis – A Critical Review, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 12, 779-799, 2008.
- [21] Özmen, G., Ortogonal Olmayan Yapılarda Maksimum Donatı Oranlarının Tayini, Teknik Rapor No: TDV/TR 049-85, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul, Ekim 2003.
- [22] Keskinılıçyan, A., Asal Eksenleri Deprem Doğrultularına Paralel Olmayan Taşıyıcı Sistemlerdeki Kolonlarda Donatı Hesabı için Elverişsiz İç Kuvvetlerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.

- [23] Yazıcı, U., Ortogonal Olmayan Betonarme Taşıyıcı Sistemlerdeki Kolonlarda Donatı Hesabı için Elverişsiz İç Kuvvetlerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005
- [24] Özmen, G., Ortogonal Olmayan Yapılarda Maksimum Donatı Oranlarının Tayini, İMO Teknik Dergi, Cilt 16, Sayı.1, 3445-3466, 2005.
- [25] Özmen, G., Pala, S., Özden, L., Reliability of Equivalent Static Loading in Earthquake-Resistant Design of Multi-Story Structures, XIth European Conference on Earthquake Engineering, Paris, September 1998.
- [26] Özmen, G., Pala, S., Gülay, G., Orakdöğen, E., Çok Katlı Yapılarda Yapısal Düzensizliklerin Deprem Hesabına Etkisi, Teknik Rapor No: TDV/TR 017-28, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul, Kasım 1998.
- [27] Özmen, G., Çok Katlı Yapılarda Burulma Düzensizliği, Teknik Rapor No: TDV/TR 036-61, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul, Ocak 2001.
- [28] Özmen, G., Aşırı Burulma Yapan Çok Katlı Yapılar, Teknik Rapor No: TDV/TR 039-68, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul, Temmuz 2001.
- [29] Anonim, TS 500 Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara, Şubat 2000.
- [30] SAP2000, Integrated Structural Analysis and Design Software, Computers & Structures, Inc., Berkeley, California, USA, (1998).
- [31] Çakıroğlu, A., Özer, E., Eğik Eğilme ve Eksenel Kuvvet Etkisindeki Dikdörtgen Betonarme Kesitlerde Taşıma Gücü Denklemleri, Yasa Yayınları, No:1, İstanbul, 1983.
- [32] Çakıroğlu, A., Özer, E., Dikdörtgen ve Daire Betonarme Kesitlerde Taşıma Gücü Denklemleri ve Yaklaşıklık Mertebeleri, İMO Teknik Dergi, Cilt 1, Sayı 1, 25-48, Ocak 1990.