

Betonarme Çerçeve ve Kolonlarda İtme Analizi

Aydın Özkarabulut¹ , Hasan Orhun Köksal² 

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çanakkale, Türkiye

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

Abstract – Bu makale, 1950'lerden bu yana betonarme çerçeve ve kolonların karmaşık davranışlarının modellenmesine yönelik devam eden deneysel ve analitik çalışmaların, günümüz yönetmeliklerindeki statik itme analizlerine olan etkileri üzerine odaklanmıştır. Bu noktada yapı elemanlarının moment eğrilik ilişkilerinin analizlere gerçekçi bir şekilde yansıtılması, davranışı belirleyici nitelik taşımaktadır. Bu çalışmada, Köksal-Erdogan tarafından önerilen çok eksenli basınç altındaki beton davranış modeli kullanılarak geliştirilen bir program aracılığıyla elde edilen moment-eğrilik ilişkileri, analizlerde kullanılmıştır. Geliştirilen yapısal analiz programı ise, tek açıklıklı ve tek katlı boş betonarme çerçeve ile ankastre tekil kolonların deneysel olarak belirlenmiş davranışlarını tahmin etmekte kullanılmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda, deney çerçeve ve kolonlarına ait yatay deplasmanlar ve kuvvetlerin, Köksal-Erdogan modeli ile birlikte karşılaştırmalı bir şekilde Mander modelinden elde edilen moment-eğrilik diyagramları kullanılarak başarıyla tahmin edilebildiği belirlenmiştir. Makalede ayrıca, Mander modeli ile Köksal-Erdogan modeli arasında gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri bakımından da karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçların oldukça uyumlu olduğu ancak Köksal-Erdogan modelinin biraz daha düşük gerilme değerleri verdiği belirtilmiştir. Geliştirilen moment-eğrilik programının geçerliliğini göstermek amacıyla, literatürde bulunan SEMAp programıyla bazı karşılaştırmalar yapılmış ve iki program arasında benzer sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Köksal ve Mander modellerine göre incelenen kolonlar ve çerçeve için elde edilen iç kuvvet şekil değiştirme tahminlerinin, deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Makale Tarihi

Gönderim: 01 Kasım 2023

Kabul: 06 Şubat 2024

Yayın: 25 Haziran 2024

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler – Bünyesel modeller, itme analizi, moment-eğrilik, sargılı beton

Pushover Analysis in Reinforced Concrete Frames and Columns

¹Department of Civil Engineering, School of Graduate Studies, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Türkiye

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Türkiye

Abstract – This article focuses on the effects of ongoing experimental and analytical studies on modeling the complex behavior of reinforced concrete frames and columns since the 1950s on the static pushover analyses in today's regulations. At this point, realistic consideration of the moment-curvature relationships of the structural elements in the analysis is decisive. In the study, moment-curvature relationships obtained through a program developed using the multi-axial compressive concrete behavior model proposed by Köksal-Erdogan were used in the analyses. The developed structural analysis program was used to predict the experimentally determined behavior of single-span and single-storey bare frame and fixed single columns. As a result of the analyses, it is found that the horizontal displacements and forces of the experimental frame and columns could be successfully predicted using the moment-curvature diagrams obtained from the Mander model, in a comparative manner with Köksal-Erdogan model. In the article, comparisons were also made between the Mander model and the Köksal-Erdogan model in terms of stress-strain relations, and it was stated that the results were quite similar to each other, but the Köksal-Erdogan model gave slightly lower stress values. In order to demonstrate the validity of the developed moment-curvature program, some comparisons were made with the SEMAp program found in the literature, and it was determined that similar results were obtained between the two programs. It was observed

Article History

Received: 01 Nov 2023

Accepted: 06 Feb 2024

Published: 25 Jun 2024

Research Article

that the internal force strain predictions obtained for the columns and frame examined according to the Koksal and Mander models agreed with the experimental results.

Keywords – Constitutive models, pushover analysis, moment-curvature, confined concrete

1. Giriş

Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışları ve modellenmesi ile ilgili araştırmaların başlangıcı 1950'li yıllara kadar uzanmaktadır. Modelleme çalışmalarındaki ilerleme, bilgisayar teknolojilerinin gelişimine bağlı olarak artmıştır [1-4]. Beton, özellikle çok eksenli basınç altında doğrusal olmayan davranış gösteren bir yapı malzemesidir. Çekme altında ise çatlaklar oluşmakta ve çatlak yüzeyleri boyunca taşınan kuvvetlerden dolayı beton davranışı daha da karışık bir hale gelmektedir. Bu nedenle, tasarım amaçlı kesit hesaplarında genellikle betonun çekme dayanımına ulaştıktan sonraki davranışı ihmal edilmektedir.

Beton yıllar içinde sırasıyla doğrusal elastik, doğrusal olmayan elastik, elasto-plastik teoriler kullanılarak modellenirken; donatı çeliği homojen yapısından ötürü pekleşmeli elasto-plastik malzeme olarak tanımlanmıştır. 1970li yıllarla birlikte betonda doğrusal olmayan davranışın en önemli nedenlerinden olan çatlak oluşumu ve modellenmesi için de pek çok farklı model ileri sürülmüştür [5, 6]. Hasar modeli yaklaşımı, betonda oluşan hasarı belirli bir yüzdeyle ifade etmeye çalışan, bu açıdan günümüzdeki etkin eğilme rijitliği kavramına benzetilebilecek bir teorik modellemeyi de betonun bünyesel modelleme çalışmalarına dahil etmiştir [7,8]. Ülkemizde ise 1985 yılında taşıma gücü yönteminin kullanılmasıyla birlikte beton basınç dayanımının tam kapasitesi dikkate alınarak davranışa uygun daha gerçekçi tasarımlar yapılmaya başlanmıştır. Deprem etkisindeki yapı tasarımı bakımından ise 2007 yılı deprem yönetmeliğinin kullanıma girmesi ile statik itme analizleri yardımıyla yapının son sınır durumuna yanal ötelemeler ile ulaşacağı kabulünden yola çıkılarak kapasite ve deplasman talebi kavramları betonarme yapı tasarımına dahil edilmiştir. Taşıma gücü yaklaşımında son sınır durumların belirlenmesi ancak beton için kullanılacak kırılma modelleri ile mümkün olmaktadır. Bu teorik modellerin en kapsamlılarından ve bilinenlerinden olan Willam-Warnke [9] modeli, daha sonraki yıllarda Mander vd. [10] tarafından beton için önerilen analitik bünyesel bağıntıların geliştirilmesinde kullanılmıştır. Söz konusu model TBDY 2018 kapsamında çok eksenli basınç etkisindeki beton gerilme birim şekil değiştirme ilişkilerinin elde edilmesi amacıyla önerilmektedir.

Başlangıçta üç boyutlu gerilme ve birim şekil değiştirme uzaylarında geliştirilen doğrusal olmayan analitik modellerin beton için kullanımının bireysel betonarme elemanlar dışında pek mümkün olamaması, araştırmacıları daha basite indirgenmiş pratik yaklaşımlar geliştirmeye yönlendirmiştir. Mander, Saatçioğlu-Razvi ve Sheikh-Uzumeri gibi sargılı beton modelleri bu soruna çözüm üretmek amacıyla geliştirilen sayısal modellerden en bilinenleridir [10-12]. Bu çalışmalarda, eksenel basınç etkisindeki bir betonarme kolon, etriyeler ve/veya başka yanal kuşatma mekanizmaları tarafından uygulanan basınç etkileriyle birlikte tek bir çubuk eleman olarak düşünülmüş ve bu çubuk elemana ait eksenel gerilme deformasyon ilişkileri elde edilmeye çalışılmıştır. Bir başka ifade ile üç boyutlu gerilme ve şekil değiştirme uzayında gerçekleşen yüklemeler ve gerilmeler betonarme eleman modellenmesinde tek bir boyuta indirgenmiştir. Benzer yaklaşım, yüklemeler boyunca sürekli bir değişkenlik gösteren eğilme davranış ve rijitliğinin yapısal analizlerde modellenmesinde eğilme davranışının karakteristik bazı noktaları için doğrusal kısımlara bölünerek tasarıma dahil edilmesinde de kullanılmıştır [13, 14].

Yukarıda belirtilen tüm bu çalışmalara paralel olarak iki boyutlu ve üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinin betonarme elemanlarda kullanılması ve bünyesel modellerin geliştirilmesi çalışmalarına devam edilmiştir [15]. Ancak sonlu eleman analizlerinin karmaşıklığı ve bilgisayar bakımından ağır yükü Mander vd. [10] tarafından önerilen model türü basitleştirilmiş yaklaşımlara olan ilgiyi giderek arttırmıştır. Günümüzde

söz konusu modeller itme analizlerinde ve moment-eğrilik ilişkilerinin tanımlanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Burada unutulmaması gereken nokta, elemanın akma momentine ulaşmasıyla birlikte TBDY'ye [16] göre doğrusal olmayan bütün davranışın elemanların uçlarında tanımlanan sonlu plastik şekil değiştirme bölgelerinde yığılı plastik davranış modeli biçiminde modellenmesi durumudur. Aynı yönetmelik, kolon ve kirişlerde plastik mafsalların kolon-kiriş birleşim bölgesinin hemen dışına bir başka deyişle elemanların net açıklıklarının uçlarına konulabileceğini de belirtmektedir. Bu şekildeki bir modelleme yaklaşımında, yükleme sırasında eleman boyunca gerçekleşecek çatlak yüzeyleri arası agrega kenetlenmesi, donatının kaldıraç etkisi ile çatlaklar arasında kalan sağlam betonun elemanın doğrusal olmayan davranışına olan tüm katkısı ihmal edilmektedir. Yönetmelikteki başka bir belirsizlik ise uçlarındaki plastik mafsallar arasında kalan uzunluk boyunca kolon ve kirişler için kullanılması istenilen etkin kesit rijitliği bağıntısının sadece akma momenti ve akma dönmesine dayandırılmış olmasıdır. Bu nedenle literatürde üç veya daha çok doğrusal parçaya ayrılmış moment-eğrilik ilişkilerinin kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [17]. Mafsallar elemanın iki ucunda aynı anda oluşamayacağı gibi başlangıç durumundan akmaya kadar olan tüm eleman davranışı için de böylesi genel bir eğilme rijitliği önerilmesinin gerçekçi olmayacağı ve sadece kaba bir tahminden öteye geçemeyeceği açıktır. İki ucunda akma momentine ulaşmasından sonra uçlarda tanımlanan mafsallar vasıtasıyla elemanın daha fazla eğilme momenti almasına izin verilmemekte, doğal olarak bu modellemeyle eleman çekme ya da basınç çubuğuna dönüşmektedir. Bu türden bir modellemenin, çerçeve ya da kolonun gerçek davranışına göre son derece basitleştirilmiş bir yaklaşım olduğu unutulmamalıdır.

Bu çalışmada betonun çok eksenli basınç altındaki davranışının modellenmesinde Koksal-Erdogan [18] ileri sürdüğü yeni bir model moment-eğrilik ilişkilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır [18, 19]. Deneysel olarak sonuçları mevcut betonarme çerçeve ve tekil kolonların itme analizleri, bu model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Mander modeliyle de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

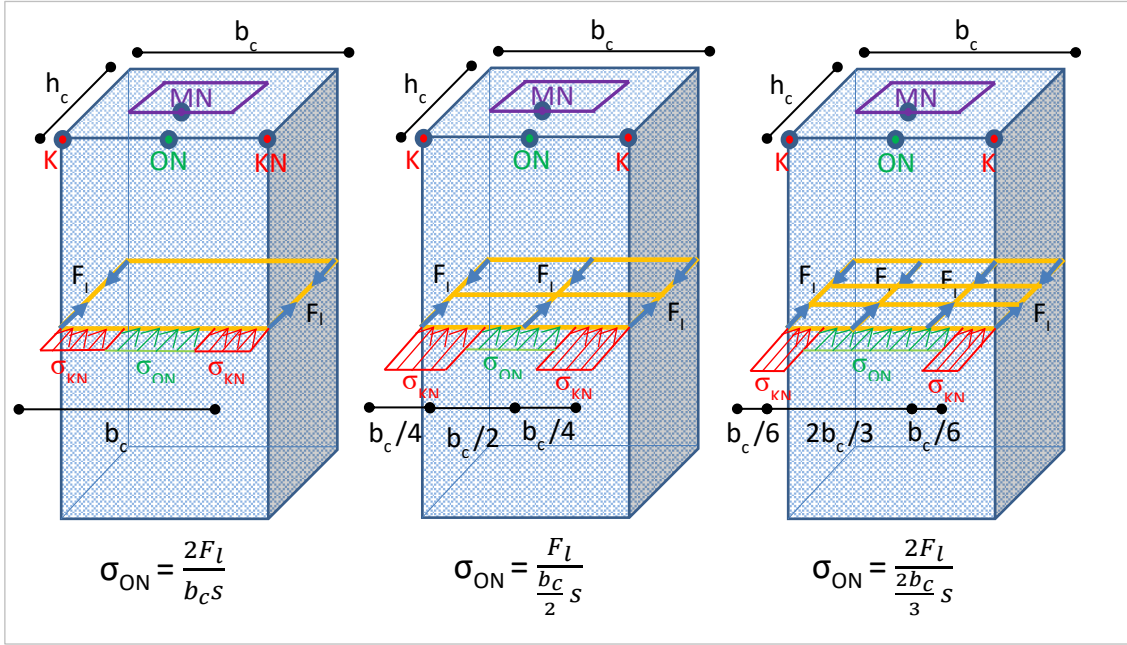
Koksal-Erdogan [18] modeli, yüksek dayanımlı beton sınıfları için önerilmiş ve bu makale kapsamında normal beton dayanım sınıfları için de uygulanmıştır. Mander ve Koksal sargılı beton modelleri kullanılarak moment-eğrilik ilişkilerinin elde edilebilmesi için Python programlama dilinde yazılım geliştirilmiştir. Ayrıca, betonarme düzlem çerçevelerin yapısal analizlerini matris deplasman metodunu kullanarak gerçekleştiren başka bir Python yazılımı geliştirilerek araştırma kapsamında kullanılmıştır.

2.1. Koksal-Erdogan Sargılı Beton Modeli

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [16] de önerilen Mander sargılı beton modeli, etriye ve çiroz gibi donatılar tarafından oluşturulan pasif kuşatma basınçlarını dikkate almaktadır. Bu ve benzeri modellere temel olan eksenel kısalma ve yanal şekil değiştirme değerlerinin deneysel olarak ölçüldüğü bölge, kolon yarı yüksekliğinde kabuk beton üzerinde yer alan ON orta noktalarıdır. Ancak bu kısım, etriyelere yakın beton kesit üzerinde olduğundan, ölçülen şekil değiştirme ve hesaplanan gerilme değerleri kolon kesitinin tümüne olduğu gibi aktarılamamaktadır. Araştırmacılar bu gerçekten yola çıkarak önerdikleri yanal kuşatma basıncı değerlerinde azaltmaya gitmişlerdir [11]. Mevcut tüm modellerde her ne kadar kuşatma basıncının çekirdek betonu çevreleyen yüzeydeki dağılımı temel alınsa da aslında çekirdek betonun tamamına yayılan ve özellikle en büyük basınç gerilmeleri etkisindeki kolon iç bölgesine doğru azalan bir gerilme durumu mevcuttur.

Bu durumda kolon eksenel dayanımı ile eşleşen yanal kuşatma basıncı değerleri, Şekil 1'de gösterilen kolon kenar orta noktası ON'de ölçülen değerler yerine daha iç bölgede yer alan bir MN noktasında belirlenmelidir.

Koksal-Erdogan [18] modelinde, bu gerçekliği temel olarak çekirdek betonun içindeki MN kısımda oluşan ortalama kuşatma gerilmesinin hesaplanması için bağıntılar önerilmiştir. Bu bağıntılarda kuşatma basıncı, etriye kol sayısı ile doğru orantılı bir şekilde iç bölgeye olan etkisini arttırmaktadır. Bu şekilde bulunacak beton çekirdeği temsil eden bir hacim üzerindeki en küçük kuşatma basıncı değeri, kritik yanıl kuşatma basıncı olarak dikkate alınmaktadır. Böylece kuşatılmış beton basınç dayanımı için, mühendislik açısından güvenli tarafta kalınmasını sağlayan sonuçlar hedeflenmiştir.



Şekil 1. Sargı donatısının her iki yönde 2, 3 ve 4 adet olması durumunda şematik gerilme dağılımı

Önerilen modelde, bir etriye kolunun beton çekirdek üzerinde oluşturacağı yanıl basınç kuvveti, (2.1) ile bulunabilir [18].

$$F_l = \frac{\pi D^2}{4} f_{syh} \quad (2.1)$$

ON noktasına uygulanan gerilme, F_l kuvvetinin etki alanı dikkate alınarak Şekil 1'deki gibi (2.2) ile hesaplanabilir [18].

$$\sigma_{ON} = \frac{NF_l}{b_c s} \quad (2.2)$$

Denklem 2.1'deki D yanıl donatı çapını, f_{syh} yanıl donatı akma dayanımını; (2.2)'deki b_c çekirdek beton boyutunu, s ise yanıl donatı aralığını göstermektedir. N ise etriye kolu sayısı n değerine bağılı olarak (2.3) ile bulunabilir [18].

$$\begin{aligned} n = 2 \text{ ise } N &= 2 \\ n > 2 \text{ ise } N &= n - 1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Mander modelinde olduğu gibi kuşatma gerilmelerindeki düzgün dağılımdan olan sapmayı yansıtacak şekilde, (2.4)'ten etkin sargılama basıncı katsayısı k_e hesaplanır [10].

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6b_c h_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2h_c}\right) \left(1 - \frac{A_{st}}{b_c h_c}\right)^{-1} \quad (2.4)$$

Ayrıca, Koksal-Erdogan [18] modelinde, sargılama basıncı için etriye kolu sayısına göre değişen k_r kat sayısı ile bir azaltma daha yapılarak MN iç noktası için yanal kuşatma basıncı değeri belirlenmektedir. Etriye kolu sayısı n' ye bağlı olarak bu katsayı, (2.5) kullanılarak elde edilebilir [18].

$$\begin{aligned} n = 2 \text{ ise } k_r &= 4, \\ n = 3 \text{ ise } k_r &= 3, \\ n = 4 \text{ ise } k_r &= 2, \end{aligned} \quad (2.5)$$

Kuşatılmış beton dayanımı hesabında beton çekirdeği üzerindeki MN iç noktasında oluşacak azaltılmış kuşatma basıncı f_{ier} ise (2.6) ile bulunabilir [18].

$$f_{ier} = \frac{k_e \sigma_{ON}}{k_r} \quad (2.6)$$

Tüm beton sınıfları için kuşatılmış beton basınç dayanımı f_{cc} ise (2.7)'de verilen basit ifade yardımı ile elde edilmektedir [18].

$$f_{cc} = 7.84 f_{ier} + f'_{co} \quad (2.7)$$

Burada; $f_{co} > 60$ MPa veya 35 MPa $< f_{co} < 60$ MPa ve $f_{syh} > 1000$ MPa ise $f_{co}' = 0.85 f_{co}$ alınacaktır. Diğer durumlarda $f_{co}' = f_{co}$ olarak dikkate alınabilir [18]. Sargılı beton gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesinde Saenz eğrisi kullanılmaktadır [20]:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 E_o}{1 + \left(\frac{E_o}{E_{sec}} - 2\right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{cc}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \quad (2.8)$$

(2.8)'de yer alan E_o ve E_s , (2.9) ile elde edilmektedir [18].

$$\begin{aligned} E_o &= 4750 \sqrt{f_{co}} \\ E_{sec} &= \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \\ \varepsilon_{cc} &= \varepsilon_{co} \left(1 + k_2 \frac{f_{ier}}{f_{cc}}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.2. Mander Sargılı Beton Modeli

Mander sargılı beton modeli, ülkemizdeki deprem yönetmeliğinde yer alan ve oldukça yaygın olarak bilinen sayısal bir beton modelidir. Bu modelde etkin kuşatma basıncı, etriye sıklığının, boyuna donatıların ve kesit malzeme ve geometrisinin bir fonksiyonudur. Mander vd. [10] tarafından önerilen sargısız beton modelinin, yanal kuşatma mekanizmasının dikkate alınarak modifiye edilmiş halidir. Modelde kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir. Sargılı beton basınç dayanımı f_{cc} ve maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme ε_{cc} sargısız durumdakine göre λ_c katsayısı ile arttırılma prensibine göre işlemektedir [10]. λ_c katsayısı, (2.10) ile bulunabilir [10].

$$\lambda_c = 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_e}{f_{co}} - \frac{2 f_e}{f_{co}}} - 1.254 \quad (2.10)$$

x ve y yönleri için etkin kuşatma gerilmeleri sırasıyla (2.11) ile elde edilmekteyken f_e ise iki yön için ortalama değer olarak alınmaktadır [10].

$$f_{ex} = \frac{A_{shx}}{sb} f_{syh} k_e \quad (2.11)$$

$$f_{ey} = \frac{A_{shy}}{sh} f_{syh} k_e$$

Çekirdek betonda gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (2.12) ile elde edilmektedir [10].

$$\sigma_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (2.12)$$

(2.12)'de f_{cc} çekirdek betonda oluşması beklenen en büyük basınç gerilmesidir ve sargısız beton dayanımının λ_c katsayısıyla arttırılmış halidir. r ise (2.13) ile bulunabilir [10].

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

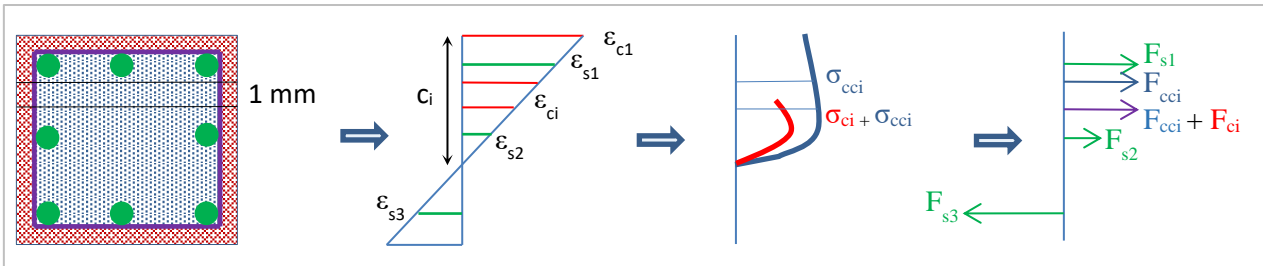
$$E_c = 5000\sqrt{f_{co}}$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} [1 + 5(\lambda_c - 1)] \quad (2.13)$$

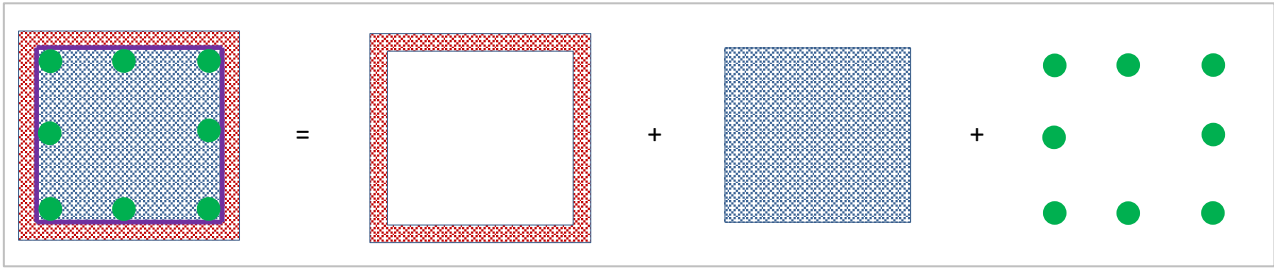
2.3. Moment Eğrilik Analizi Programı

Taşıyıcı sistem elemanlarının dış yükler altında nasıl davranacağını bilmesi güvenilir tasarımlar yapabilmek için gereklidir. Moment eğrilik ilişkileri, eleman davranışı hakkında oldukça önemli bilgiler vermektedir. Bu önemli ilişki, laboratuvar ortamında tekrarlı yüklemeler yapılarak gerçekçi şekilde elde edilebilmektedir. Ancak bu deneyler, çoğu zaman oldukça masraflı ve zaman kaybına neden olabilen yöntemlerdir. Gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde, bu amaca yönelik geliştirilen yazılımlar, deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu sonuçlar verebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Python programlama dili kullanılarak, betonarme elemanların moment eğrilik analizlerini gerçekleştiren bir yazılım geliştirilmiştir.



Şekil 2. Kesitin liflere ayrılması, şekil değiştirme dağılımının, gerilmelerin ve kuvvetlerin elde edilmesi

Daha sonra tarafsız eksen derinliği için varsayımlar yapılarak uygunluk denklemlerinden kesitteki şekil değiştirme dağılımı belirlenmektedir. Kesit, Şekil 3'deki gibi kabuk, çekirdek ve donatı olarak 3 kısma ayrılmaktadır [13].



Şekil 3. Kesitin kabuk, çekirdek ve donatı olarak ayrılması

Şekil 2’deki birim şekil değiştirmelerden liflerdeki gerilmelere; gerilmelerden de iç kuvvete gidilmektedir. Dış ve iç kuvvet dengesi sağlanana kadar iteratif olarak tarafsız eksen derinliği değiştirilmektedir. Çekirdek betonun dışında kalan kısım için Hognestad modeli, çekirdek kısım için Mander veya Koksal modeli, donatı çeliği için ise Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 de yer alan pekleşmenin dikkate alınabildiği model kullanılmaktadır. Bu üç ana kısımdan gelen etkiler süperpoze edilmektedir. Bağlı hata oranı olarak belirlenen 0.00001 değerinin altına düşüldüğünde ise o nokta için moment ve eğrilik değerleri hesaplanmaktadır.

2.4. Statik İtme Analizi Programı

Düzlem çerçeve olan her türlü taşıyıcı yapı sisteminin uç kuvvet ve deplasmanlarını hesaplamak amacıyla, matris deplasman yöntemi kullanılarak Python dilinde yapısal analiz programı geliştirilmiştir. Program, girilen nokta koordinatlarına göre taşıyıcı sistemi oluşturmakta ve eleman uzunluklarını, dönüşüm ve rijitlik matrislerini otomatik hesaplamaktadır. Daha sonra mesnet ve plastik mafsalları dikkate alınarak sistemdeki bilinmeyen deplasmanlar bulunmakta ve bu deplasmanlara göre uç kuvvetler elde edilmektedir. Program, plastik mafsalları oluşacağı elemanı, oluştuğu bölgeyi ve bu yatay yükü otomatik olarak bulmaktadır. Plastik mafsalları oluşumundan sonra manuel olarak gerekli mesnet ve mafsalları tanımlanmaktadır. Her adımın sonunda deplasman ile kesme kuvvetleri kaydedilerek sistemin statik itme eğrisi çıkarılmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde Koksal-Erdogan [18] modeli kullanılarak elde edilen moment eğrilik analizlerinden faydalanılarak önce tekil kolonlar için iç kuvvet – deplasman ilişkisi tahmin edilmiştir. Daha sonra mevcut deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Aynı şekilde başka mevcut bir deneysel çalışmanın betonarme çerçeve için uygulandığı bir başka deneyin verileri kullanılmıştır.

3.1. Modelin Tekil Kolonlara Uygulanması

Bu çalışmada CH [21], Tip 1 ve Tip 2 [22] olmak üzere 3 adet betonarme kolonun deneysel verilerinden faydalanılmıştır. Öncelikle bu kolonların analitik moment eğrilik ilişkileri, geliştirilen program aracılığıyla elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen verilere dayanarak, plastik mafsalları teorisine göre kolonların deplasmanları ve oluşacak kuvvetler tahmin edilmiştir. Ayrıca Mander modeliyle kıyaslanmıştır.

Kolonlarda oluşacak elastik ve plastik dönmeler (3.1) ve (3.2) yardımıyla elde edilmiştir [23].

$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y)l_p \quad (3.1)$$

$$\theta_e = 0.5(\phi_y)l \quad (3.2)$$

Burada θ_p plastik dönme, θ_e elastik dönme, l_p plastik mafsalları boyu ϕ_u ve ϕ_y ise sırasıyla kesitin maksimum ve akma eğriliği, l ise kolon toplam boyudur. l_p kolon yüksekliğinin yarısı alınmıştır. Kolonlarda oluşacak toplam

deplasman ise yaklaşık olarak (3.3) kullanılarak elde edilebilir [23].

$$\Delta_t = \theta_e \left(\frac{2l}{3} \right) + \theta_p \left(l - \frac{l_p}{2} \right) \quad (3.3)$$

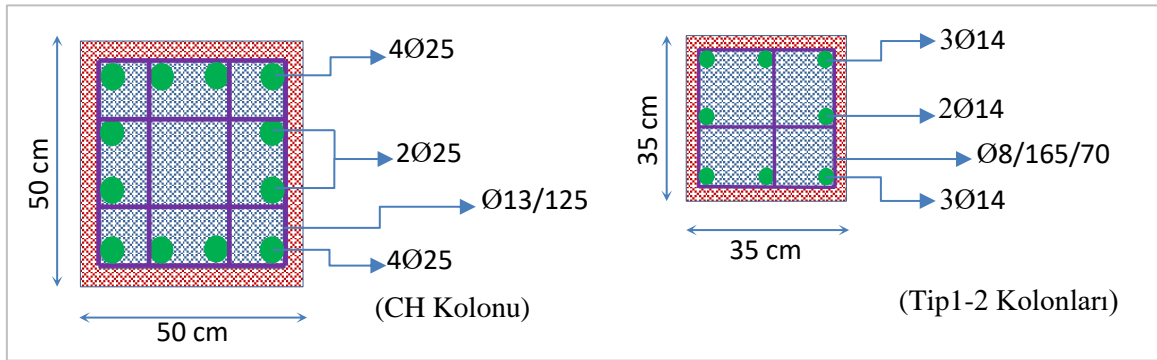
Bu çalışmada incelenen kolonlardan CH kolonunun net yüksekliği 1.5 m iken, Tip1 ve Tip2 kolonlarının yüksekliği 1.8 m dir [21,22]. Tablo 1 ve 2’de deney kolonları hakkında temel bilgiler; Şekil 4’te ise donatı yerleşimleri verilmiştir.

Tablo 1. Deney kolonlarının kesit ve geometrileri [21,22]

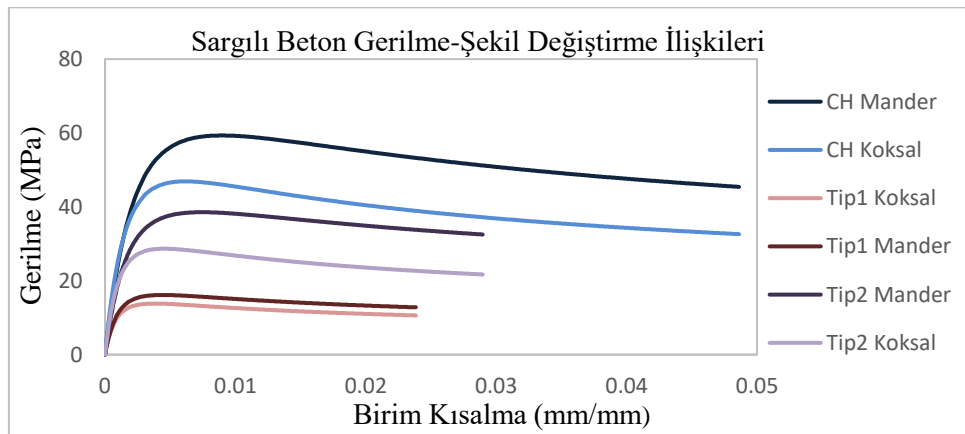
Kolon	b (cm)	h (cm)	Donatı Adeti / Çapı (mm)	Etriye Çapı (mm) / Aralığı (mm)
CH	50	50	12Ø25	Ø13/125
Tip 1	35	35	8Ø14	Ø8/165
Tip 2	35	35	8Ø14	Ø8/70

Tablo 2. Deney kolonları malzeme bilgileri [21,22]

Kolon	f_{ck} (MPa)	f_{sy} (MPa)	f_{su} (MPa)	f_{syh} (MPa)	E_s (MPa)	Eksenel Yük (kN)
CH	35	635	825	567	2E+05	1500
Tip 1	13	315	448	368	2E+05	318
Tip 2	25	454	604	469	2E+05	612



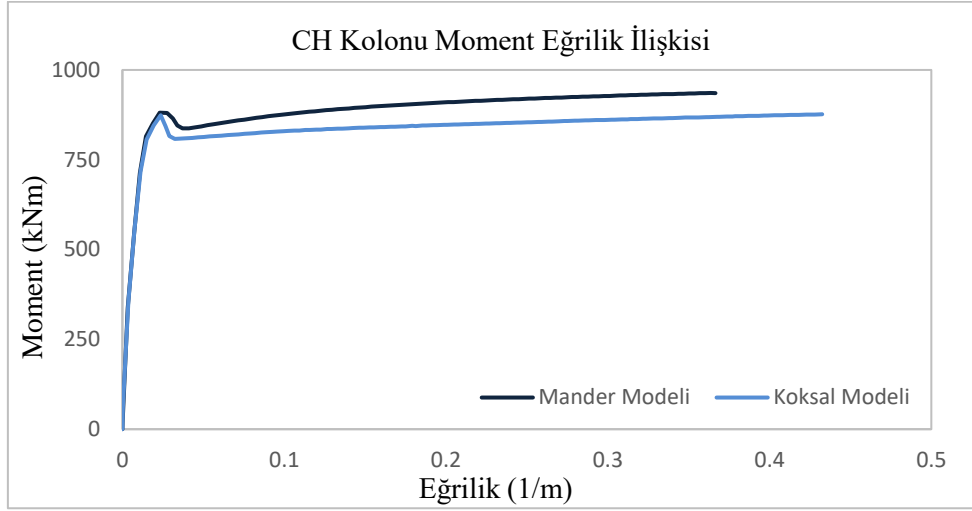
Şekil 4. CH ve Tip1-2 kolonu donatı şeması



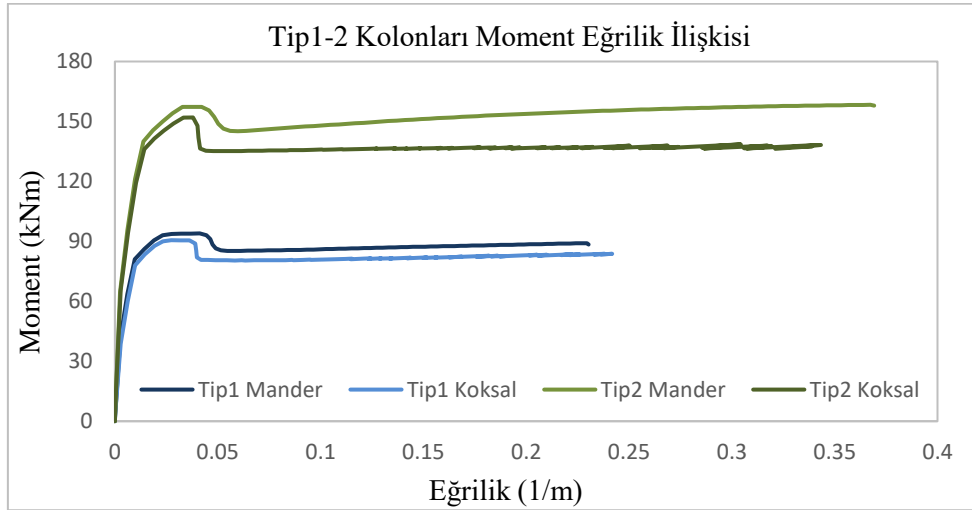
Şekil 5. Deney kolonlarının çekirdek beton için hesaplanan gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

Şekil 5’te, Mander ve Köksal sargılı beton modellerine göre sargılı beton için hesaplanan gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere Köksal sargılı beton modeli, Mander sargılı beton modeline kıyasla, betonda daha düşük basınç gerilmelerinin oluşacağını öngörmektedir. Bunun

temel sebebi Köksal modelinin, sargı donatısının betonarme elemana uygulayacağı yanal kuşatma basıncını hesaplarken, Şekil 1’de gösterilen ON noktasını değil MN noktasını dikkate almasıdır. Böylelikle daha düşük yanal kuşatma basınç gerilmeleri elde edilmiş, dolayısıyla betonda oluşacak maksimum basınç gerilmelerinde bir miktar azalma olmuştur.



Şekil 6. CH kolonu moment-eğrilik grafiği



Şekil 7. Tip1-2 kolonu moment-eğrilik grafiği

Şekil 6 ve 7’de bu çalışma kapsamında geliştirilen yazılımdan elde edilen moment-eğrilik ilişkileri verilmiştir. Görüldüğü üzere Mander ve Köksal modellerinde, kesitin akma öncesi durumu için moment ve eğrilik açısından herhangi bir fark bulunmamaktadır. Ancak kesit akma kapasitesine ulaştıktan sonra Köksal modelinden elde edilen eğri, Mander modelinden elde edilen eğriye göre biraz daha aşağıda seyretmektedir. Bu farkın asıl nedeni kesitin akmasından sonra eğriliğin artmasına paralel olarak sargılı beton davranışının önem kazanmasıdır. Köksal modelinde sargılı beton kısmında daha düşük maksimum beton gerilmeleri elde edildiği için doğal olarak Mander modeline kıyasla daha düşük moment değerleri elde edilmektedir. Ayrıca kesitin ulaşabileceği maksimum eğrilik olan θ_u değerleri, her iki modelde de birbirine oldukça yakındır. Moment eğrilik ilişkilerinden elde edilen akma (θ_y) ve maksimum eğrilikler (θ_u) ile akma (M_y) ve maksimum momentler (M_u) Tablo 3’te verilmiştir.

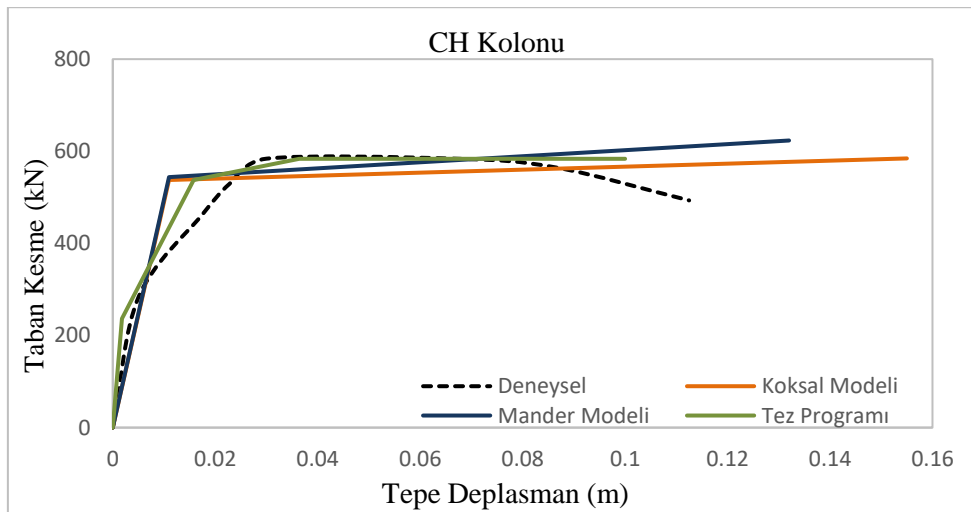
Tablo 3. Akma ve göçme öncesi durumda moment ve eğrilikler

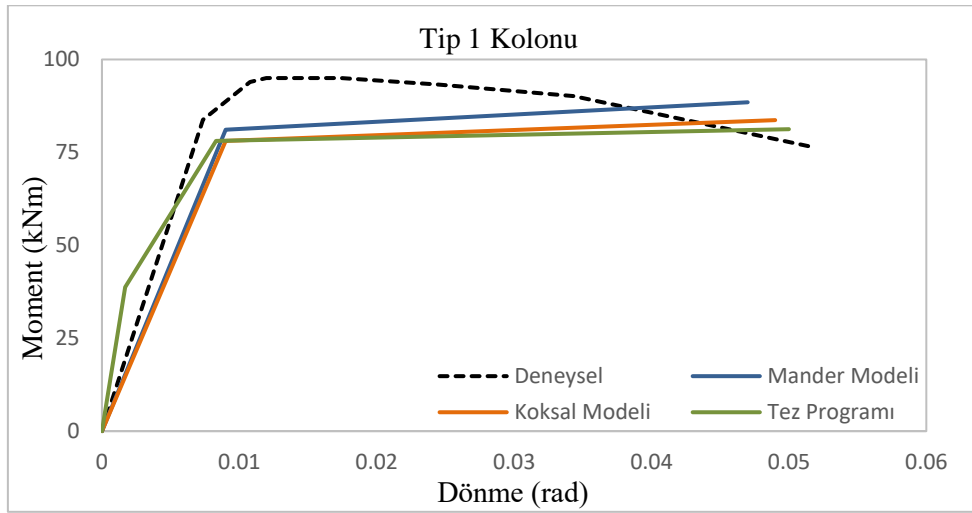
Mander Modeli				
Kolon	M_y (kNm)	M_u (kNm)	Θ_y (1/m)	Θ_u (1/m)
CH	815.25	935.06	0.0146	0.367
Tip 1	81.11	88.48	0.0097	0.231
Tip 2	139.92	157.97	0.0138	0.369
Koksal Modeli				
Kolon	M_y (kNm)	M_u (kNm)	Θ_y (1/m)	Θ_u (1/m)
CH	806.63	876.63	0.0149	0.432
Tip 1	78.06	83.68	0.0098	0.238
Tip 2	136.16	138.17	0.0144	0.343

Tablo 4. Elastik, plastik ve toplam dönme ile yer değiştirmeler

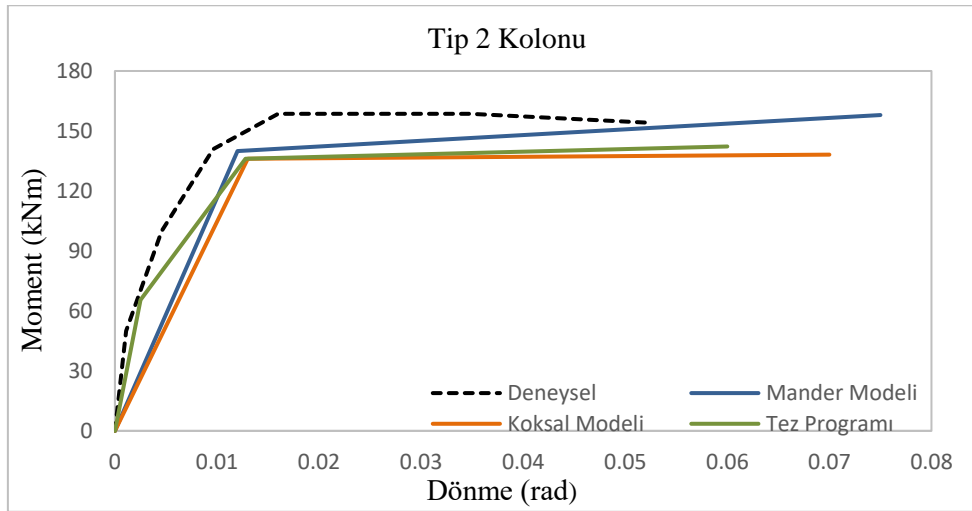
Mander Modeli						
Kolon	Θ_e (rad)	Θ_p (rad)	Θ_t (rad)	Δ_e (m)	Δ_p (m)	Δ_t (m)
CH	0.011	0.088	0.099	0.011	0.121	0.132
Tip 1	0.009	0.039	0.047	0.010	0.066	0.077
Tip 2	0.012	0.062	0.075	0.015	0.106	0.121
Koksal Modeli						
Kolon	Θ_e (rad)	Θ_p (rad)	Θ_t (rad)	Δ_e (m)	Δ_p (m)	Δ_t (m)
CH	0.011	0.104	0.115	0.011	0.143	0.155
Tip 1	0.009	0.040	0.049	0.011	0.068	0.079
Tip 2	0.013	0.058	0.070	0.016	0.098	0.114

Tablo 4’te elastik (Θ_e) ve plastik (Θ_p) dönmeler ile deplasmanlar (Δ_e , Δ_p) verilmiştir. Bu değerler (3.1), (3.2) ve (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Θ_t ve Δ_t ise toplam dönme ve deplasmanı temsil etmektedir.

**Şekil 8.** CH kolonu analitik-deneysel iç kuvvet-deplasman ilişkisi

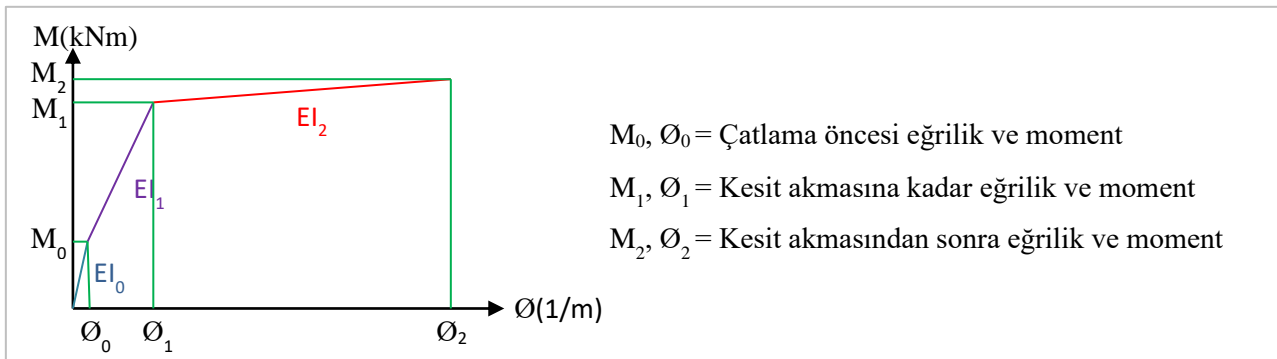


Şekil 9. Tip1 kolonu analitik-deneysel iç kuvvet-deplasman ilişkisi



Şekil 10. Tip2 kolonu analitik-deneysel iç kuvvet-deplasman ilişkisi

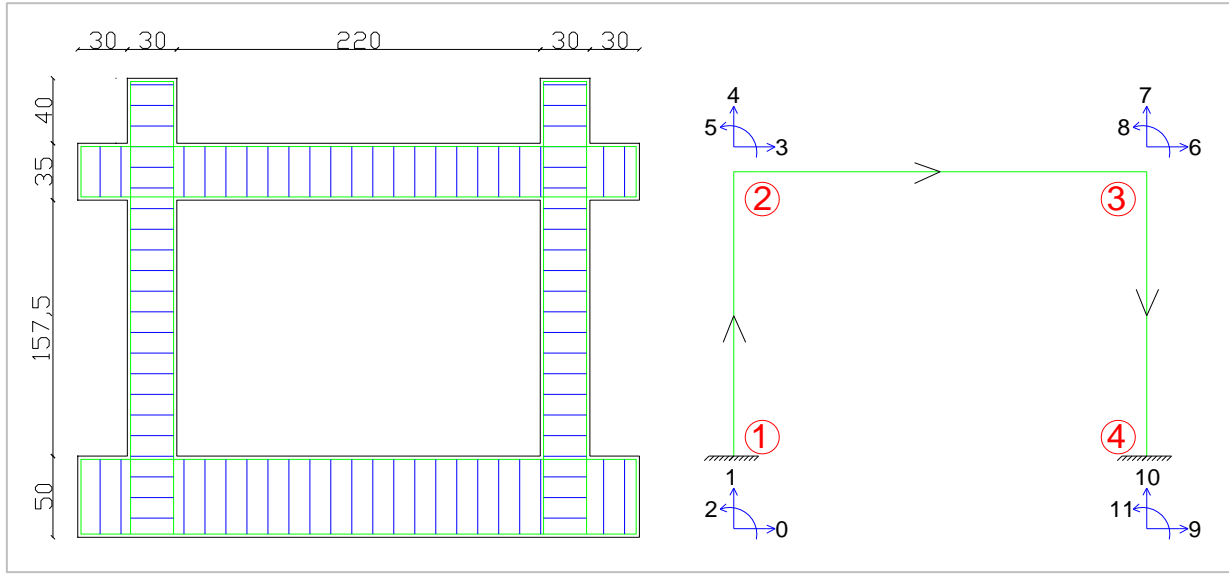
Şekil 8, 9 ve 10’da gösterilen Mander ve Koksals modeli eğrileri, Tablo 4’deki değerleri temsil etmektedir. Tez programı eğrisi ise matris deplasman metodu kullanarak geliştirilen programdan elde edilen itme analizinin sonuçlarını göstermektedir. Bu programa, moment eğrilik ilişkisinden faydalanarak elde edilen eğilme rijitlikleri girilmiştir. Üç farklı bölge için eğilme rijitliği hesaplanmıştır. Bu bölgeler Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Kolonların eğilme rijitliği hesaplanan bölgeleri

3.2. Modelin Düzlem Çerçeve Sisteme Uygulanması

Çalışmanın bu kısmında, Kim ve Yu tarafından test edilen betonarme bir çerçeve incelenmiştir [24]. Kim ve Yu yaptığı bu çalışmada, dolgu duvarların betonarme tek katlı tek açıklıklı bir taşıyıcı sistemin yatay yük taşıma performansına etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda, önerilen yeni sargılı beton modeli kullanılarak eleman kapasiteleri belirlenmiş ve analitik model kurularak yapı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar deney verileriyle kıyaslanmıştır. Deneyde kullanılan çerçevenin geometrisi Şekil 12’de verilmiştir. Bu deneyin sonuçları, Koksal-Erdogan [18] sargılı beton modeli kullanılarak yapılan statik itme analizi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Elde edilen analitik sonuçların deney verileriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir.



Şekil 12. Düzlem çerçevenin deneysel ve analitik modeli/serbestlik dereceleri

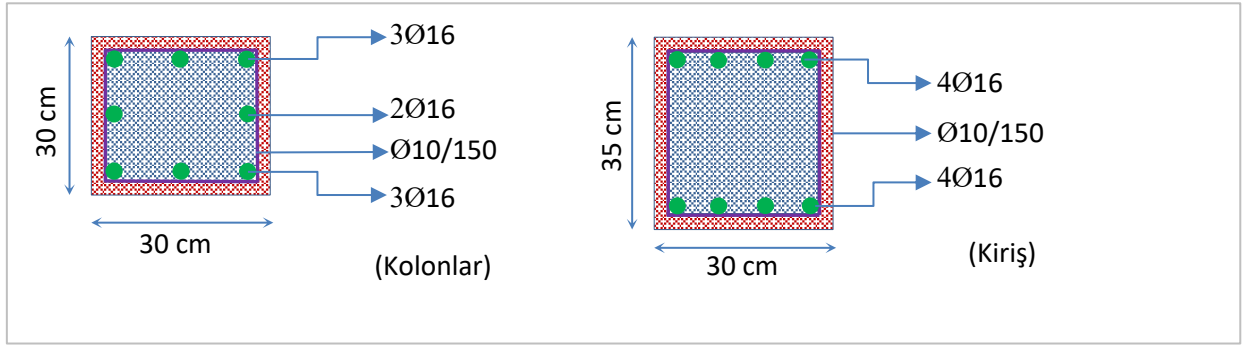
Şekil 12’de görüldüğü üzere deneye tabi tutulan düzlem betonarme çerçeve, tek katlı tek açıklıklı ve dolgu duvarsızdır. Kolonların boyutları 30x30 cm olup donatı düzenleri birbirinin aynıdır. Kirişin boyutları ise 30x35 cm dir. Kolon net yüksekliği 1575 mm iken kiriş net açıklığı 2200 mm dir. Beton basınç dayanımı ise 36 MPa olup, boyuna donatının akma dayanımı 430 MPa ‘dır.

Şekil 12’de analitik modelde görüleceği üzere başlangıçta 6 serbestlik derecesi vardır. Ancak her itme adımında plastik mafsall oluşacağı için serbestlik derecelerinde artış olmuştur. Akma dayanımına ulaşan kritik kesitlerin daha fazla yük alamayacağı kabulüyle eleman uçlarına mafsall konularak ilgili kesitlerin moment alması engellenmiştir.

Tablo 5’te elemanların kesit ve malzemelerin mekanik özellikleri, Şekil 13’te ise kolonların ve kirişin donatı planları verilmiştir.

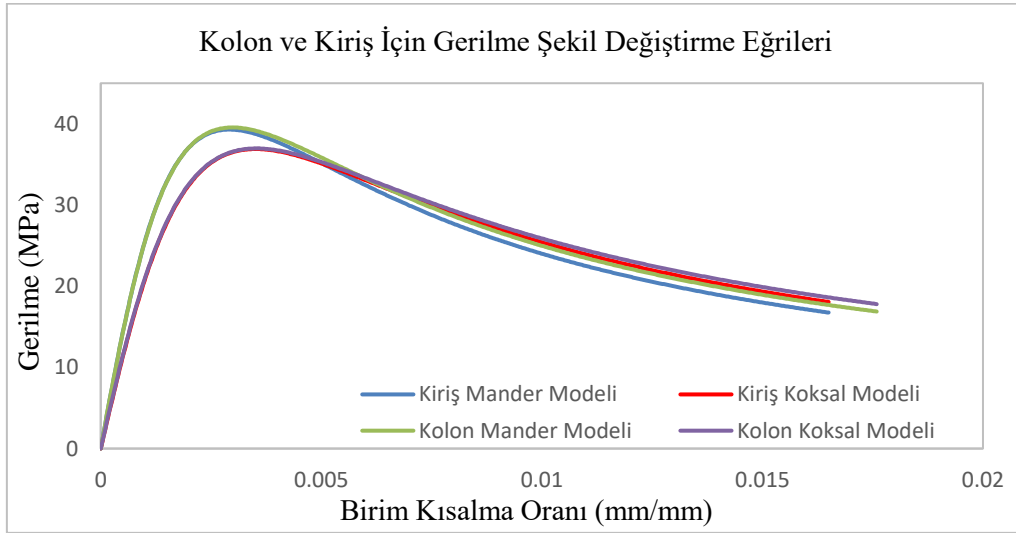
Tablo 5. Eleman kesit ve malzeme mekanik özellikleri [24]

Eleman	b (cm)	h (cm)	Donatı Çapı (mm)		Etriye Çapı (mm) / Aralığı (mm)	
Kolon	30	30	8Ø16		Ø10/150	
Kiriş	30	35	8Ø16		Ø10/150	
Eleman	f_{ck} (MPa)	f_{sy} (MPa)	f_{su} (MPa)	f_{syh} (MPa)	E_s (MPa)	Eksenel Yük (kN)
Kolon	36	429	550	441	2E+05	0
Kiriş	36	429	550	441	2E+05	0

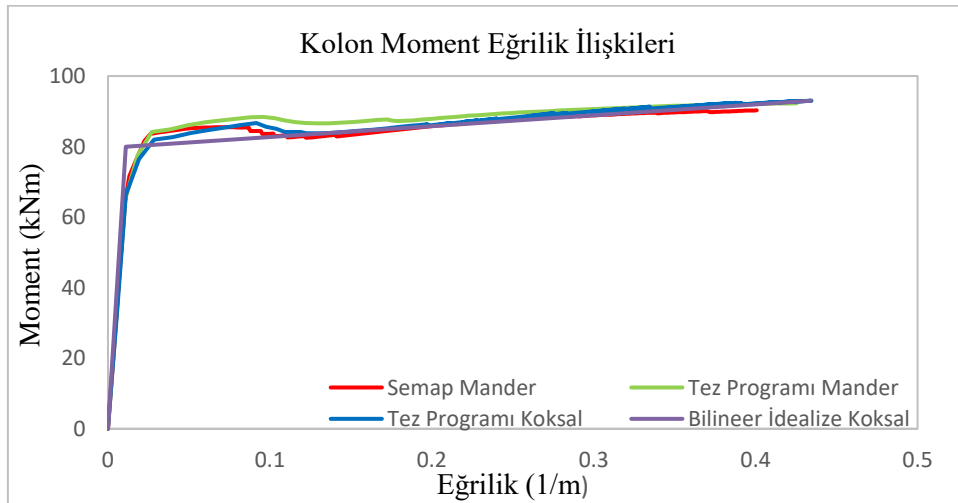


Şekil 13. Kolon ve kiriş donatı planı

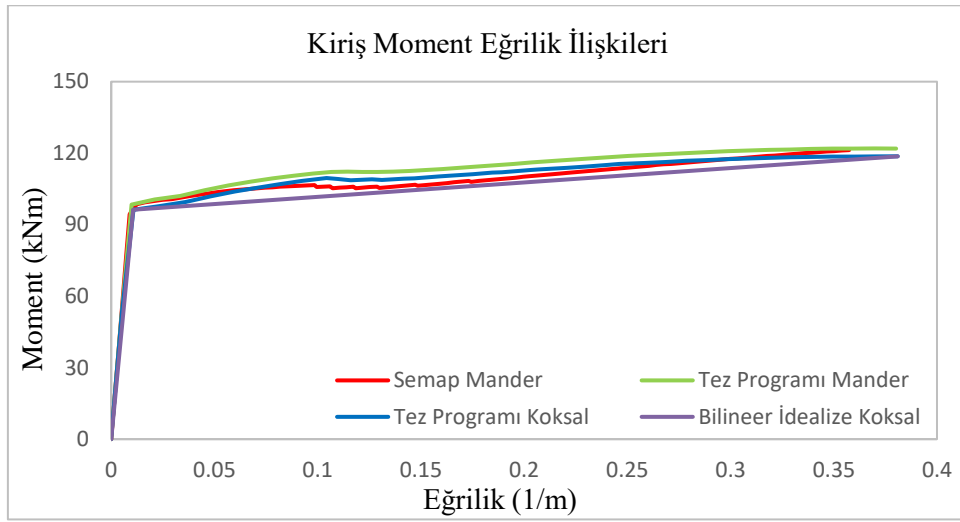
Çerçeve elemanların sargılı beton için gerilme şekil değiştirme ilişkileri Şekil 14’te sunulmuştur. Bu eğrilerin çizilebilmesi için de ayrı bir Python programı geliştirilmiştir. Görüldüğü üzere Koksal-Erdogan [18] modeli, Mander modeline göre sargılı betonda daha düşük gerilmelerin oluşacağını öngörmektedir. Bu kısımda, Moment-eğrilik analiz programının test edilmesi açısından İnel vd. [14] tarafından geliştirilen programla karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 14. Kolon ve kiriş için sargılı beton gerilme şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 15. Kolonların SEMAp ile kıyaslamalı moment eğrilik ilişkileri



Şekil 16. Kiriş için SEMAp ile kıyaslamalı moment eğrilik ilişkileri

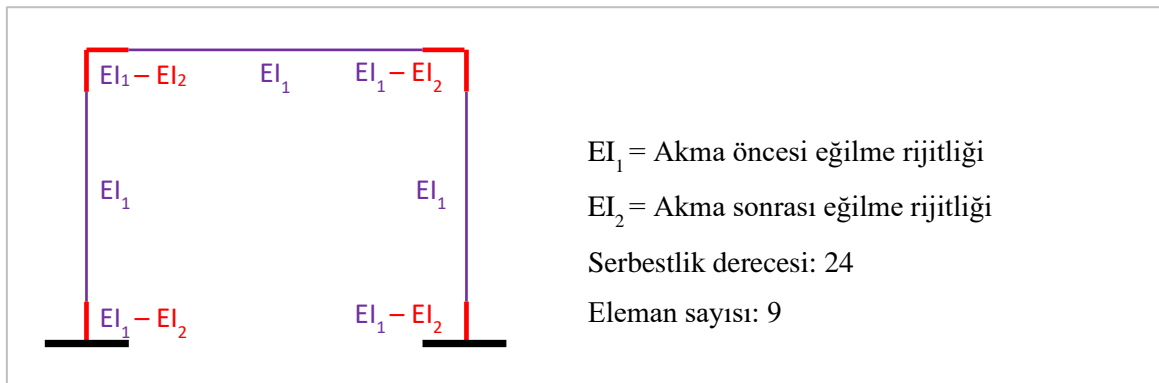
Sunulan betonarme çerçeve sistemde ilk yaklaşım olarak, Şekil 15 ve 16’da verilen ve bilineer olarak idealize edilen moment eğrilik ilişkisi grafiği verileri kullanılarak (3.4)’e göre etkin kesit rijitlikleri hesaplanmıştır [16]. Kesit akma dayanımına ulaştığında ise eleman uçlarına mafsal yerleştirilmiştir.

$$EI_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y} \frac{L_s}{3} \quad (3.4)$$

Burada M_y kesitin akma momentini, L_s kesme açıklığını, θ_y ise etkin akma dönmesini temsil ederken, (3.5) ile elde edilmektedir [16]

$$\theta_y = \frac{\theta_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\theta_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}} \quad (3.5)$$

(3.5)’te θ_y akma eğriliğini, h kesit yüksekliğini d_b ortalama donatı çapını f_{ye} ve f_{ce} beton ve donatının sırasıyla beklenen basınç ve akma dayanımlarını temsil etmekteyken, η kolon ve kirişler için 1 olarak dikkate alınmaktadır [16].



Şekil 17. Plastik mafsal uzunluğunda tanımlanan elemanlar

İkinci yaklaşım olarak ise Şekil 17’de gösterildiği gibi plastik mafsal uzunluğunda elemanlar yerleştirilmiş ve sistemdeki elemanların akma öncesi rijitlikleri (EI_1), bilineer moment eğrilik grafiklerinin birinci kısmının eğiminden hesaplanmıştır. Akma kapasitesine ulaşan elemanların rijitliği (EI_2) ise Şekil 15 ve 16’da gösterilen bilineer olarak idealize edilmiş eğrilerin ikinci kısmının eğimleri kullanılarak hesaplanmış ve bu rijitlikler programa girilerek itme analizi tekrarlanmıştır. Kullanılan kesit rijitlikleri, Tablo 6, 7 ve 8’de sunulmuştur.

Tablo 6. Akma öncesi ve sonrası idealize grafikten hesaplanan etkin kesit rijitliği katsayıları

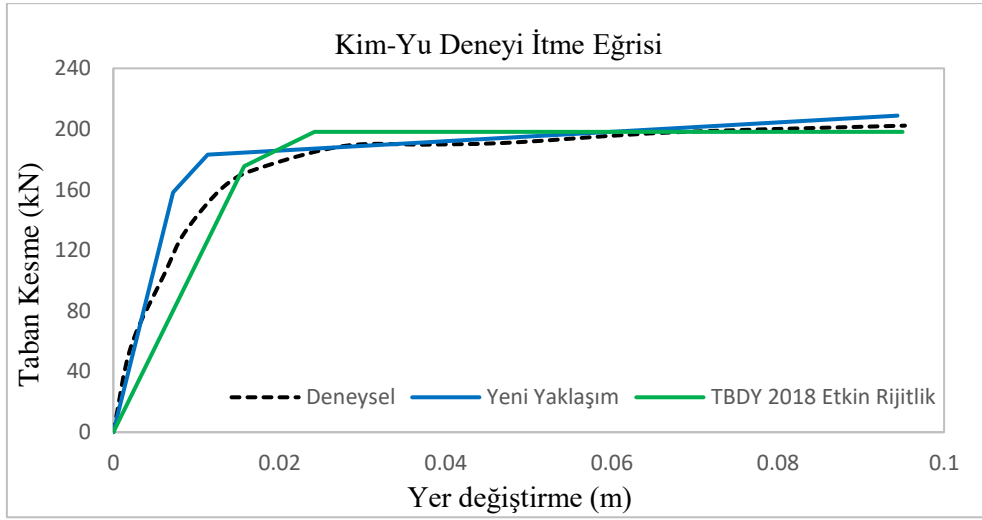
Eleman	E (kN/m ²)	I (m ²)	EI (kNm ²)	EI ₁ (kNm ²)	EI ₂ (kNm ²)	EI ₁ /EI	EI ₂ /EI
Kolon	3.00E+07	0.000675	20250	7273.73	30.71	0.359	0.0015
Kiriş	3.00E+07	0.001072	32156	9000.94	60.31	0.280	0.0019

Tablo 7. Bilinear idealize moment eğrilik grafiğinde akma ve maksimum momentler ile eğrilikler

Eleman	M _y (kNm)	M _u (kNm)	Ø _y (1/m)	Ø _u (1/m)
Kolon	80	92.99	0.011	0.434
Kiriş	96.31	118.64	0.0108	0.381

Tablo 8. TBDY 2018'e göre kolon-kiriş için mafsal bilgileri ve hesaplanan etkin kesit rijitlikleri

Mafsal	Ø _y (1/m)	L _s (m)	h (m)	d _b (m)	f _{sy} (Mpa)	f _{ck} (Mpa)	Ø _y (rad)	EI _e (kNm ²)
Kolon	0.011	0.7875	0.3	0.016	430	36	0.0083	3559.94
Kiriş	0.0108	1.1	0.35	0.016	430	36	0.0088	5023.19

**Şekil 18.** Deneysel ve analitik itme eğrileri

Şekil 18'de görüldüğü üzere TBDY 2018'deki etkin kesit rijitlikleri ile analiz yapıldığında deneysel sonuçlara göre akma durumuna kadar olan davranışta, yanal ötelemelerin daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun başlıca nedeni etkin kesit rijitliğinin elemanın akma noktasına göre hesaplanması ve beton çatladıktan sonra bir eğilme rijitliği kullanılmasıdır. Bu çalışmada, Şekil 11'de açıklandığı gibi iki veya üç parçalı model kullanıldığında deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde edildiği görülmüştür. Ancak moment eğrilik ilişkilerinden adım adım elde edilecek çok sayıda kesit rijitliklerinin kullanılması, gerçek davranışı belirlemede daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, ülkemizde oldukça yaygın olarak bilinen ve TBDY 2018'de yer alan Mander modeli ile Köksal modeli arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Sonuçların oldukça uyumlu olduğu ancak Köksal modelinin Mander modeline göre biraz daha düşük gerilme değerleri verdiği gözlenmiştir. Geliştirilen analitik moment eğrilik programının geçerliliğini göstermek amacıyla İnel vd. tarafından geliştirilen SEMAp programıyla kıyaslamalar yapılmış ve geliştirilen programla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Tekil kolonların analizleri için Acun ve Sucuoğlu [22] ile Eom vd. [21]'nin yaptığı çalışmalardan elde ettikleri deneysel veriler kullanılmış ve bu çalışmada seçilen analitik modellerle kıyaslamalar yapılmıştır. Köksal ve

Mander modellerinin kolonlar için uygulandığı 3 farklı analitik modelden edilen iç kuvvet şekil değiştirme tahminleri, deney sonuçlarıyla kıyaslandığında oldukça iyi sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. Daha sonra Kim ve Yu [24]'nin çalışmasındaki tek katlı tek açıklı boş çerçeve yükleme deneyi için deneysel ve analitik sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, TBDY 2018'de daha düşük eğilme rijitliği kullanılarak, akma noktasına kadar olan moment eğrilik değerleri için hem deneysel hem de bilineer modele göre daha büyük yanal deplasmanlar verdiği belirlenmiştir. Her üç durumda da en büyük yanal kuvvet açısından birbirine yakın değerler gözlenmiştir.

Taşıma gücü açısından en büyük yanal yükün gerek yönetmelik gerek bu çalışmadaki yaklaşımla çok yakın değerleri vermesi modellerin ve tasarımın güvenilirliği anlamına gelmez. Statik itme analizlerindeki bina performanslarının şekil değiştirme tabanlı olduğu unutulmamalıdır. Bu açıdan bakıldığında aynı yük değerine daha düşük bir rijitlikle ulaşılması betonarme bina kesit tasarımı açısından önemli farklar doğuracaktır. Bu noktanın irdelenmesi ve eğilme rijitliği değerlerinin modellemede yüke göre değişiminin dikkate alınması ileriki bir çalışmanın konusu olacaktır.

Yazar Katkıları

Birinci Yazar Python tabanlı programların geliştirilmesini ve analizlerin gerçekleştirilmesini, literatür araştırması yapılmasını, sonuçların raporlanmasını ve makalenin yazılmasını sağlamıştır. İkinci Yazar yeni sargılı beton modelinin kullanılmasını, analizlerin planlanmasını ve kontrolü gerçekleştirmiştir. Tüm yazarlar çalışmanın son hâlini okuyup onaylamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar hiçbir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- [1] L. Cedolin, S. Dei Poli, Y. R. J. Crutzen, *Triaxial stress-strain relationship for concrete*, Journal of the Engineering Mechanics Division 103 (3) (1977) 423–439.
- [2] E. Hognestad, *A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members*, University of Illinois Bulletin, Urbana, 1951.
- [3] H. Kupfer, H. Hisdorf, H. Rusch, *Behavior of concrete under biaxial stresses*, ACI Journal Proceedings 66 (8) (1969) 656–666.
- [4] N. Ngo, A. Scordelis, *Finite element analysis of reinforced concrete beams*, ACI Journal Proceedings 64 (3) (1967) 152–163.
- [5] P. Gambarova, C. Karakoc, *A new approach to the analysis of the confinement role in regularly cracked concrete elements*, 7th SMiRT Conference, Chicago, 1983, pp. 251–261.
- [6] A. Hillerborg, M. Modéer, P. -E. Petersson, *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*, Cement and Concrete Research 6 (6) (1976) 773–781.
- [7] B. Doran, H. O. Koksall, T. Turgay, *Nonlinear finite element modeling of rectangular/square concrete columns confined with FRP*, Materials & Design 30 (8) (2009) 3066–3075.
- [8] J. Olivier, C. Miguel, S. Oller, *Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete*, in: N. Bićanić, H. Mang (Eds.), Austria: II International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Zell Am See, 1990, 945–957.

- [9] K. Willam, E. Warnke, *Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete*, Structural Engineering Report 19 (1975) 1–30.
- [10] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, *Observed stress-strain behavior of confined concrete*, Journal of Structural Engineering 114 (8) (1988) 1827–1849.
- [11] S. A. Sheikh, S. M. Uzumeri, *Analytical model for concrete confinement in tied columns*, Journal of the Structural Division 108 (12) (1982) 2703–2722.
- [12] M. Saatcioglu, S. R. Razvi, *Strength and ductility of confined concrete*, Journal of Structural Engineering 118 (6) (1992) 1590–1607.
- [13] U. Ersoy, G. Özcebe, *Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İrdeleme*, Teknik Dergi 9 (44) (1998) 1799–1827.
- [14] M. İnel, H. Özmen, H. Bilgin, *Betonarme elemanların doğrusal ötesi davranışlarının bilgisayar ortamında modellenmesi*, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 2007, 207–216.
- [15] H. O. Köksal, B. Doran, *Beton ve betonarme elemanlarda doğrusal olmayan oktahedral elastik ve plastik bağıntılar kullanılarak yapılan sonlu eleman uygulamaları*, Teknik Dergi 8 (38) (1997) 1445–1455.
- [16] Afet ve Acil Durum Daire Başkanlığı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018), https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/2309/files/TBDY_2018.pdf.
- [17] A. Habibi, H. Moharrami, *Nonlinear sensitivity analysis of reinforced concrete frames*, Finite Elements in Analysis and Design 46 (7) (2010) 571–584.
- [18] H. O. Köksal, A. Erdogan, *Stress–strain model for high-strength concrete tied columns under concentric compression*, Structures 32 (2021) 216–227.
- [19] H. O. Köksal, *A failure criterion for RC members under triaxial compression*, Structural Engineering and Mechanics, 24 (2) (2006).137–154.
- [20] P. Desayi, S. Krishnan, *Equation for the stress-strain curve of concrete*, ACI Journal Proceedings 61 (3) (1964) 345–350.
- [21] T. -S. Eom, S. -M. Kang, H. -G. Park, T. -W. Choi, J.-M. Jin, *Cyclic loading test for reinforced concrete columns with continuous rectangular and polygonal hoops*, Engineering Structures 67 (2014) 39–49.
- [22] B. Acun, H. Sucuoğlu, *Betonarme kolonların şekil değiştirme performans sınırlarının deneysel gözlemlerle değerlendirilmesi*, Teknik Dergi 22 (108) (2011) 5523–5541.
- [23] Z. Celep, *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı*, Beta Basım Yayım A.Ş., İstanbul, 2021.
- [24] M. Kim, E. Yu, *Experimental study on lateral-load-resisting capacity of masonry-infilled reinforced concrete frames*, Applied Sciences 11 (21) (2021) 9950 17 pages.