



Investigation of Shear Strength and Deformation Capacity Models of Reinforced Concrete Columns

Saeid Foroughi¹, S. Bahadır Yuksel¹

¹ Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-7556-2118, 0000-0002-4175-1156

Keywords

Reinforced concrete structures, Shear strength, Displacement ductility, Seismic evaluation, Axial load

Highlights

* To classify a reinforced concrete column as a ductile element, the flexural and shear strength must be estimated and the collapse type must be defined.

* With increasing displacement ductility, both the concrete and the reinforcement and the interaction between concrete and reinforcement contributed to the progression of strength degradation.

* To define the shear strength of reinforced concrete members, the seismic performance level and the imposed force-displacement history must be specified.

Aim

The shear strength and deformation capacity relations of reinforced concrete circular columns were investigated according to different design parameters.

Location

--

Methods

The shear behavior and deformation capacity of the designed reinforced concrete columns were investigated according to the models proposed by ASCE/SEI-41 (2017) and the researchers.

Results

It is seen that the shear strength obtained from the analysis for reinforced concrete columns is affected by the axial load level, concrete compressive strength, spiral reinforcement ratio, and displacement ductility values.

Supporting Institutions

--

Financial Disclosure: The author declares that this study has received no financial support.

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest: The author has no conflicts of interest to declare

How to cite:

Foroughi S., Yuksel S., 2022. Investigation of Shear Strength and Deformation Capacity Models of Reinforced Concrete Columns, Turk. J. Earthq. Res. 4(1), 26-41, <https://doi.org/10.46464/tdad.1008476>

Manuscript

Research Article

Received: 12.10.2021

Revised: 24.12.2021

Accepted: 01.02.2022

Printed: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1008476



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Saeid Foroughi

Email: saeid.foroughi@yahoo.com

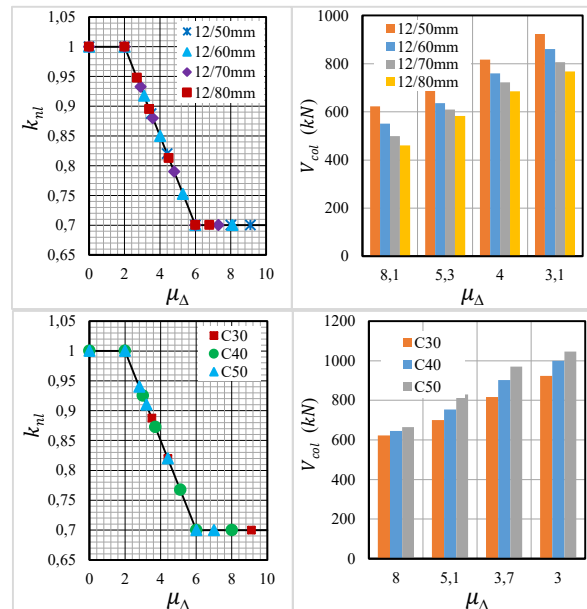


Figure
Shear strength and deformation capacity relations of reinforced concrete columns



Betonarme Dairesel Kolonların Kesme Dayanımı ile Deformasyon Kapasite Modellerinin Araştırılması

Saeid Foroughi¹, S. Bahadır Yüksel¹

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-7556-2118, 0000-0002-4175-1156

ÖZET

Göçme öncesi sismik performans seviyesinde, kesmeye maruz betonarme kolonların yatay yük ve eksenel yük taşıma kapasitelerindeki azalmayı ve bu davranışların tüm yapıya etkilerini modellemeye ve tahmin etmeye ihtiyaç vardır. Kesme dayanımı ile deformasyon kapasite davranışlarının incelenmesi için farklı beton basınç dayanımı, eksenel yük seviyesi ve spiral donatı oranlarında betonarme dairesel kolon modelleri tasarlanmıştır. Tasarlanan betonarme kolonların kesme davranışı ile deformasyon kapasiteleri, ASCE/SEI 41 (2017) ve araştırmacılar tarafından önerilen modellere göre araştırılmıştır. Betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen karakteristik değerlere göre elastik, plastik ve toplam yer değiştirme değerleri hesaplanarak yer değiştirme süneklik ilişkileri incelenmiştir. Betonarme kolonlar için analizlerden elde edilen kesme dayanımlarının eksenel yük seviyesi, beton basınç dayanımı, spiral donatı oranı ve yer değiştirme süneklik değerlerinden etkilendiği görülmektedir.

Anahtar kelimeler

Betonarme yapılar, Kesme mukavemeti, Yer değiştirme sünekliği, Sismik değerlendirme, Eksenel yük

Öne Çıkanlar

- * Betonarme kolonu sünek eleman olarak sınıflandırmak için, eğilme ve kesme dayanımı tahmin edilmeli ve göçme tipi tanımlanmalıdır.
- * Artan yer değiştirme sünekliği ile hem beton hem de donatı ve beton ile donatı arasındaki etkileşimin dayanım kaybının ilerlemesine katkıda bulunduğu kaydedilmiştir.
- * Betonarme elemanların kesme dayanımını tanımlamak için sismik performans seviyesi ve empoze edilen kuvvet- yer değiştirme geçişinin belirtilmesi gerekir.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.10.2021
Düzeltilme: 24.12.2021
Kabul: 01.02.2022
Basım: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1008476

Sorumlu yazar

Saeid Foroughi
Eposta:
saeid.foroughi@yahoo.com

Investigation of Shear Strength and Deformation Capacity Models of Reinforced Concrete Columns

Saeid Foroughi¹, S. Bahadır Yüksel¹

¹ Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-7556-2118, 0000-0002-4175-1156

ABSTRACT

At the pre-collapse seismic performance level, there is a need to model and estimate the decrease in the lateral load and axial load carrying capacities of the shear-sensitive reinforced concrete columns the effects of such behavior on the entire structure. In order to investigate the shear strength and deformation capacity behaviors, reinforced concrete circular column models with different concrete compressive strength, axial load level and spiral reinforcement ratios were designed. The shear behavior and deformation capacity of the designed reinforced concrete columns were investigated according to the models proposed by ASCE/SEI 41 (2017) and the researchers. According to the characteristic values obtained from moment-curvature relations of reinforced concrete columns, elastic, plastic and total displacement values were calculated and the displacement ductility relations were examined. It is seen that the shear strength obtained from the analysis for reinforced concrete columns is affected by the axial load level, concrete compressive strength, spiral reinforcement ratio and displacement ductility values.

Keywords

Reinforced concrete structures, Shear strength, Displacement ductility, Seismic evaluation, Axial load

Highlights

- * To classify a reinforced concrete column as a ductile element, the flexural and shear strength must be estimated and the collapse type must be defined.
- * With increasing displacement ductility, both the concrete and the reinforcement and the interaction between concrete and reinforcement contributed to the progression of strength degradation.
- * To define the shear strength of reinforced concrete members, the seismic performance level and the imposed force-displacement history must be specified.

Manuscript

Research Article

Received: 12.10.2021
Revised: 24.12.2021
Accepted: 01.02.2022
Printed: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1008476

Corresponding Author

Saeid Foroughi
Email:
saeid.foroughi@yahoo.com

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda, betonarme kolonlar deprem yükleri altında en önemli taşıyıcı sistemlerden biridir. Kolon mekanizmaları depremlerde toptan çökmeyi önlemek için çok önemlidir (Dok ve diğ. 2017). Betonarme yapılarda depremler sonrası kolonlarda oluşan hasarlar nedeniyle yapıların objektif performans seviyeleri sağlanamamaktadır. Bu nedenle, depreme dayanıklı yapı tasarım için yapısal elemanların davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir (Foroughi ve Yuksel 2019). Kolonlar aksel yükleri taşıyacak şekilde tasarlanır, ancak deprem gibi yanal yüklerin bir sonucu olarak, olası kesme kırılmalarını önleyecek şekilde tasarlanmalıdır (Fiore ve diğ. 2014). Betonarme kolonların kesme dayanımı ve deformasyon kapasiteleri, kolonların tasarım ve yapımında kullanılan donatı çeliğinin ve betonun malzeme özelliklerinden etkilenir. Bir deprem sırasında bir yapıya uygulanan döngüsel yanal yüklemenin eklenmesi, yük döngüleri devam ederken kesme mukavemetinde ve süneklilikte ciddi hasarlara neden olabilir. Kolonun kesme kırılması nispeten düşük deformasyonlarda meydana geldiğinden ve yapının yanal yüklemeye direnme kabiliyetini önemli ölçüde etkileyebildiğinden, bu durum performansı tahmin etmenin karmaşıklığını daha da artırabilir.

Düşük deformasyonlarda kesme göçmesi olasılığının yüksek olması nedeniyle, düşük yer değiştirme seviyelerinde aşırı muhafazakâr sonuçlar elde edilir ve daha yüksek deformasyon seviyelerinde oldukça muhafazakâr olmayan sonuçlar görülür (Gordon 2015). Daha yakın zamanlarda, yer değiştirme ve döngüsel yükleme ile ilişkili kesme mukavemeti azalmasını içeren yeni modeller geliştirilmiştir. Bu modeller genellikle deneysel sonuçlara dayalı olarak kesme dayanımına beton katkısını etkileyen bir katsayı tanımlayarak kesme dayanımının azalmasını ele alır. Bu katsayı, yapısal bir elemanın yer değiştirme sünekliliğini, genellikle akma durumu için yer değiştirmenin, göçme durumunda nihai yer değiştirmesine oranı olarak tanımlar. Sünek kırılma, depreme dayanıklı yapı tasarım için amaçlanmıştır ve performans dayalı deprem mühendisliğinin temel gerekliliğidir. Bir elemanı sünek eleman olarak sınıflandırmak için, eğilme ve kesme dayanımı tahmin edilmeli ve göçme tipi tanımlanmalıdır.

Betonarme kolonlarda kesme kırılması, eğilme kırılması ve eğilme-kesme kırılması olarak üç tür kırılma modu tanımlanır. Kesme kırılması, istenmeyen ve ani kırılma modunun gevrek bir türüdür. Bir kolonun kesme mukavemeti, eğilme mukavemetinin gelişebilmesi için yeterli değilse, bu kolon neredeyse hiç deforme olmadan bir kesme kırılması oluşur. Hâkim eğimli bir çatlak açılır ve aynı anda yanal ve aksel kapasitelerde ani kayıp meydana gelene kadar genişler. Deneysel test sonuçları, kesme aralığının derinlik oranına (a/d), ikiden küçük veya a/d oranına bakılmaksızın yetersiz enine donatı oranına sahip kolonların kesme kırılmasına duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Eğilme kırılma modu genellikle sünek bir kırılma türüdür. Kolon yeterli kesme dayanımına sahip olduğunda, eleman yüksek kesme talepleri altında kırılmadan önce eğilme dayanımına ulaşabilir. Kolon, detaylandırılmasının uygun olması koşuluyla, yük taşıma kapasitesinde önemli bir kayıp olmaksızın en yüksek moment bölgelerinde elastik olmayan deformasyonlar oluşur. Çatlama momentinin aşıldığı bölgelerde eğilme çatlakları görülmektedir. Test veri tabanı incelendiğinde (Saatcioglu ve Ozcebe 1989, Lynn ve diğ. 1996, Sezen 2002, Elwood 2003) 3.5'ten büyük a/d oranına sahip ve yeterli enine donatıya sahip kolonlarda eğilme kırılması yaşandığı görülmektedir. Kırılma modunun üçüncü tipi, eğilme-kesme kırılması olarak adlandırılır. Enine donatı miktarı, betondaki ana çekme gerilmelerinin yatay bileşenini taşımaya yeterli değildir. Eleman gövde çatlamasına neden olan diyagonal çekme kuvvetinin dikey bileşeni, diyagonal çatlaklar arasındaki diyagonal basınç desteğinin basınç kapasitesinden daha büyüktür. Eleman gövde çatlamasına neden olan çapraz çekme kuvvetinin dikey bileşeni, boyuna donatının dayanımından daha büyüktür. Bu tür bir kırılma, kesme kırılması kadar gevrek değildir. Test sonuçları, eğilme-kesme kırılmasının çoğunlukla 2 ile 3.5 arasında bir kesme aralığının derinlik oranına (a/d), sıfır ile 0.018 arasında değişen hacimsel enine donatı oranına ve dengeli yüke yakın veya altında bir aksel yük seviyesine sahip kolonlarda meydana geldiğini göstermektedir (Ergüner 2009). Betonarme binaların performans dayalı değerlendirme işlemlerinin en önemli adımlarından

biri, doğrusal olmayan yapısal analizlerden (statik veya dinamik) elde edilen deformasyonların performans limitleri veya diğer bir deyişle kabul kriterleri ile karşılaştırılmasına dayanır (Xinxian 2016). Sismik yüklere maruz kalan betonarme elemanların davranışı, esas olarak betonun nihai dayanımına ve sünekliğine dayanmaktadır. Süneklik, yapıların sismik tepkisinin tasarlandıkları ilk hedeflere uygun olup olmadığının belirlenmesine yol açan önemli bir özelliktir (Yuksel ve Foroughi 2019). Yer değiştirme sünekliği, yapıların sismik tepkisini karakterize eden bir parametredir. Ayrıca, belirli sismik yönetmeliklere göre yapılan bir yapısal tasarımın sismik tasarımın ana amacına ulaşip ulaşamayacağını belirlemek için yer değiştirme sünekliği kullanılabilir (Perez ve Mulder 2018). Bir betonarme elemanın kesme dayanımı; basınç dayanımı, kemer etkisi (a/h), eksenel yük seviyesi, yer değiştirme sünekliği, enine donatı oranı, boyuna donatı oranı, sismik performans seviyesi ve uygulanan kuvvet- yer değiştirme geçmiş gibi birçok parametreye bağlıdır (Sasani 2007).

2. BETONARME KOLONLARIN DAYANIMI İÇİN ÖNERİLEN MODELLER

Betonarme kolonların kesme dayanımı, son yıllarda araştırmalarda büyük ilgi görmektedir. Yeni binaların tasarımı ve mevcut binaların değerlendirilmesi için betonarme kolonların kesme dayanımı için çeşitli modeller önerilmiş ve kullanılmıştır. Betonarme elemanda eğilme kırılmasının olmasını sağlamak için kesme donatıları kullanılır. Kesme donatıları, çatlaklar boyunca çekme gerilmelerini karşılar, sarılma bölgesi betonunu sınırlayarak kesme kapasitesini artırır. Bu bölümde, betonarme kolonlar için ASCE/SEI 41 (2017) ile Sezen ve Moehle (2004) tarafından önerilen kesme dayanımı modellerinin incelemesi yapılmıştır. Betonarme kolonların kesme davranışı ile deformasyon kapasitesi araştırılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Önerilen bağıntılar ile ilgili açıklamalar aşağıda detaylı olarak özetlenmiştir.

2.1) Sezen ve Moehle (2004)

Bazı çalışmalarda kesme dayanımına beton katkısının artan yer değiştirme süneklik talebi ile azaldığı kesme dayanımı modelleri önermiştir. Bazı çalışmalarda ise kolon kesme dayanımının yer değiştirme süneklik talebinden bağımsız olduğunu bulmuşlardır. Daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen gözlemlere dayanarak, artan yer değiştirme sünekliği ile hem beton hem de donatı ve beton arasındaki etkileşimin mukavemet azalmasına sebep olduğu kaydedilmiştir. Bu nedenle, kesme dayanımına hem beton hem de donatı katkılarına bir dayanım azaltma faktörü uygulanır. Önerilen kesme dayanımı modeli Denklem (1a ve 1b) ile ifade edilir. Denklem (1a ve 1b), süneklikle ilişkili dayanım azalmasını hesaba katmak için k faktörünü içeren kesme dayanımı modelini ifade eder.

$$V_c = k \left(\frac{0.5\sqrt{f'_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5\sqrt{f'_c} A_g}} \right) 0.8A_g \quad (1a)$$

$$V_s = k \left(\frac{A_v f_y d}{s} \right)$$

$$V_n = k (V_s + V_c)$$

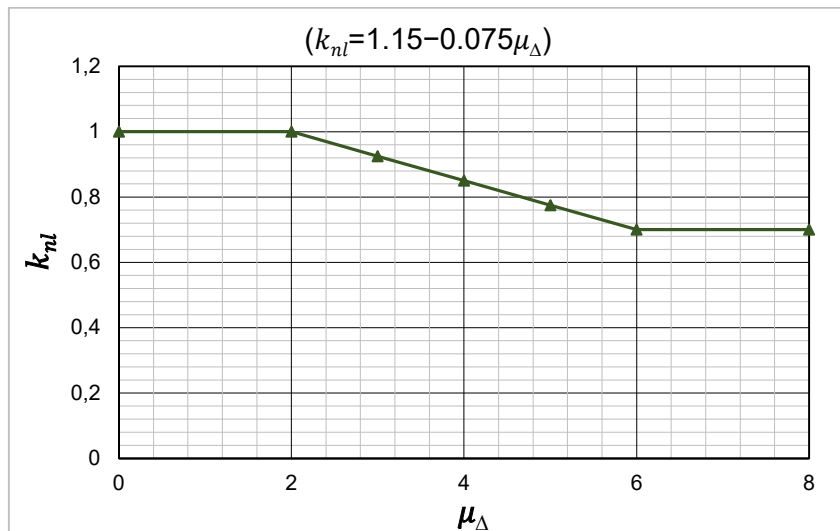
$$V_n = k \left[\left(\frac{A_v f_y d}{s} \right) + \left(\frac{0.5\sqrt{f'_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5\sqrt{f'_c} A_g}} \right) 0.8A_g \right] \quad (1b)$$

2.2) ASCE Standard (2017)

Betonarme kolonların kesme dayanımı ve deformasyon kapasiteleri, kolonların tasarımında ve yapımında kullanılan donatı çeliği ve betonun malzeme özellikleriyle ilgili çok sayıda değişkenden etkilenir. Bir betonarme kolonun deformasyon kapasitesini belirlemek için ASCE/SEI 41 (2017), kolonları düşük süneklik talebindeki kesme dayanımının (V_0) plastik kesme talebi (V_p) oranına bağlı olarak üç farklı göçme modunda sınıflandırır. Plastik kesme talebi (V_p), plastik mafsalların eğilme akmasına karşılık gelen kesme kuvvetidir. V_p , kesit analizinden elde edilen maksimum moment dayanımının kesme açıklığına ($a = L/2$) bölünmesiyle hesaplanır ($V_p = 2M_p/L$). ASCE/SEI 41 (2017), Sezen ve Moehle (2004) tarafından geliştirilen kesme dayanımı modelini benimser ve Denklem (2)'de gösterildiği gibi beton (V_c) ve enine donatının (V_s) katkısını toplayarak kolon kesme dayanımının (V_{Col}) hesaplanmasını önerir. $V_{Col0} = V_{Col}/k_{nl}$ süneklik talebiyle ilgili indirgeme faktörü hariç kolon kesme dayanımıdır.

$$V_{Col} = k_{nl}V_{Col0} = k_{nl} \left[\alpha_{Col} \left(\frac{A_v F_{ytL/E} d}{s} \right) + \lambda \left(\frac{0.5 \sqrt{f'_{cL/E}}}{M_{UD} / V_{UD} d} \sqrt{1 + \frac{N_{UG}}{0.5 A_g \sqrt{f'_{cL/E}}}} \right) 0.8 A_g \right] (MPa) \quad (2)$$

Denklem (2)'de, V_{Col} kuvvet kontrollü veya deformasyon kontrollü davranışlar için geçerli olan alt sınır veya beklenen malzeme özellikleri kullanılarak değerlendirilen betonarme kolonların kesme dayanımıdır. V_{Col0} , 2.0'yi geçmeyen bir yer değiştirme süneklik talebinde betonarme kolonların kesme dayanımıdır. Yer değiştirme sünekliğinin 2'ye eşit veya daha az olduğu bölgelerde $k_{nl} = 1.0$, yer değiştirme sünekliğinin 6'ya eşit veya daha büyük olduğu bölgelerde $k_{nl} = 0.7$ ve yer değiştirme sünekliği için 2 ile 6 arasında doğrusal olarak değişir (Şekil 1). $s/d \leq 0.75$ sınırı için $\alpha_{Col} = 1$, $s/d \geq 1$ için $\alpha_{Col} = 0$ ve 0.75 ile 1.0 arasında s/d için doğrusal olarak değişir. A_v kesme donatısı alanıdır, $F_{ytL/E}$ enine donatıların beklenen akma dayanımıdır, $f'_{cL/E}$ beklenen beton basınç dayanımıdır, d en dış basınç lifinden çekme donatısının ağırlık merkezine olan mesafe (faydalı yükseklik), s kesme donatı aralığı ve A_g betonarme kolonun bürüt en-kesit alanıdır. Hafif agregalı beton için $\lambda = 0.75$ ve normal agregalı beton için $\lambda = 1.0$. N_{UG} eksenel basınç kuvvetidir ve $M_{UD}/(V_{UD} d)$ 4'ten büyük veya 2'den az olarak alınmamalıdır.



Şekil 1: $k_{nl} - \mu_{\Delta}$ ilişkisi
Figure 1: Relationship between $k_{nl} - \mu_{\Delta}$

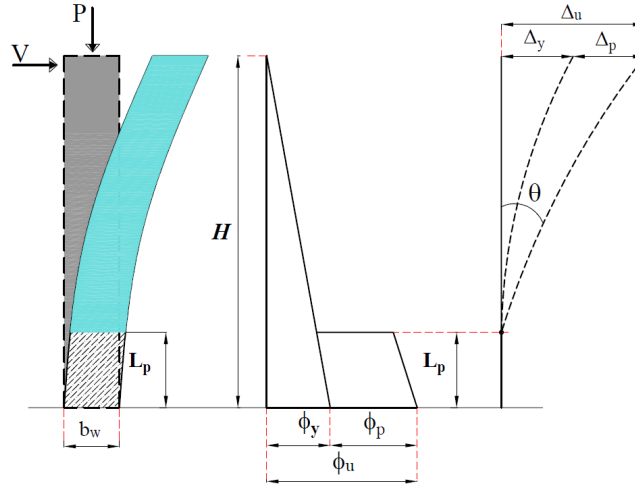
3. BETONARME KOLONLARDA DOĞRUSAL OLMAYAN YER DEĞİŞTİRME KAPASİTESİ

Yanal kuvvetlere dayanaklı elemanlar olarak, betonarme kolonların sünek deformasyon kapasitesi, yapılarda daha iyi bir sismik performans elde etmek için önemli bir faktördür. Performans/yer değiştirme tabanlı sismik tasarımın geliştirilmesiyle, yapısal deformasyon kapasitesi önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Kolonlar tipik olarak yapıların gevrek kırılmaya karşı koruması için yeterli süneklilikte tasarlanmalıdır. Yapısal sismik tasarım yalnızca dayanıma odaklanmamalı, aynı zamanda sünekliliği de hesaba katmalıdır. Sünek sismik tasarımın daha iyi anlaşılması ve gerçekleştirilmesi için şiddetli depremler altında yapısal deformasyon kapasitesinin tahmin edilmesi gerekir. Plastik mafsal analizinde, bir konsolun toplam tepe yer değiştirmesi (Δ_u), akma yer değiştirmesi (Δ_y) ve plastik yer değiştirmesi (Δ_p) bileşeninin toplamı olarak elde edilir (Denklem 3). Denklemlerde H_w , kolon yüksekliğidir. $(\phi_u - \phi_y)L_p$ terimi, plastik dönmeyi ifade eder ve plastik eğriliğin eşdeğer plastik mafsal uzunluğunun (L_p) merkezinde toplandığı varsayımına dayanır. Plastisitenin yayıldığı gerçek fiziksel uzunluk daha büyüktür ve plastik bölge olarak adlandırılır. Plastik bölge üzerindeki kolonlarda elastik olmayan eğriliklerin doğrusal olarak değiştiği varsayılmaktadır. Her iki yer değiştirme hesaplandıktan sonra, yer değiştirme sünekliliği (μ_Δ) tepe yer değiştirmesinin akma yer değiştirmesine oranı (Δ_u/Δ_y) olarak belirlenir. Yiğil plastik davranış modelinde iç kuvvetlerin plastik kapasitelerine eriştiği sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca, plastik şekil değiştirmelerin düzgün yayılı biçimde olduğu varsayılmaktadır. Plastik mafsal boyu olarak adlandırılan plastik şekil değiştirme bölgesinin uzunluğu (L_p), çalışan doğrultudaki kesit boyutunun (h) yarısına eşit alınacaktır ($L_p = 0.5h$).

$$\Delta_u = \Delta_y + \Delta_p$$

$$\Delta_y = (\phi_y H^2) / 3, \quad \Delta_p = \theta_p (H - 0.5L_p) \quad (3)$$

$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y) L_p$$



Şekil 2: Betonarme kolonun doğrusal olmayan davranış ve moment-eğrilik-tepe yer değiştirme ilişkisi
Figure 2: Nonlinear behavior and displacement relationship for moment-curvature-peak of reinforced concrete column

Bu çalışmada, Denklem (3)'te verilen akma ve nihai eğrilik değerleri, Mander sargısız ve sargılı beton modeli (Mander ve diğ. 1988) ve donatı çeliği modelleri dikkate alınarak moment-eğrilik analizlerinden hesaplanmıştır. Mevcut eğilme momentini ve sünekliliği gösteren betonarme kolonlar için teorik moment-eğrilik analizi hem beton hem de çelik için gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin bilinmesi şartıyla yapılabilir. Akma eğriliği, donatı çeliğinin akması veya betonun

maksimum gerilmeye karşı gelen birim şekil değiştirme değeri 0.002'ye ulaştığı varsayılarak hesaplanır (hangisi önce ulaştıysa). Nihai eğrilik, sargılı betondaki maksimum basınç gerilmesinin, enine donatının sargı etkilerini açıklayan en büyük birim şekil değiştirme değerine (ε_{cu}) ulaştığını varsayarak hesaplanır. Betondaki en büyük birim şekil değiştirme değeri ε_{cu} enine donatıda oluşan ilk kopma anındaki değere karşılık gelir. Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi ε_{cu} Denklem (4)'ten hesaplanabilmektedir. Denklemde ρ_s toplam enine donatının hacimsel oranını, f_{yw} ; enine donatı akma dayanımı ifade etmektedir (Paulay ve Priestley 1992). Etkili sargı basıncı, sargısız beton basınç dayanımı ifadelerinin de bilinmesi ile birlikte, sargılı beton basınç dayanımı (f'_{cc}) için Denklem (5) kullanılmaktadır (Mander ve diğ. 1988).

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (4)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (5)$$

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Dairesel kolonlar, rüzgâr ve sismik yükler altındaki mukavemet özelliklerinin herhangi bir yönde benzer olması nedeniyle yapılarda kolon tasarımı için popülerdir. Dairesel elemanlar ayrıca binalarda kolonlar olarak, temeller için kazıklar veya diyafram duvarlar için yaygın olarak kullanılır (Fiore ve diğ. 2014). Uygulamada sık sık ortaya çıkmalarına rağmen, betonarme daireselelemanların kesme davranışı üzerine sadece sınırlı araştırma yapılmıştır. Kesme dayanımı ile deformasyon kapasite modellerinin araştırılması için farklı tasarım parametrelerinde daireselelebetonarme kolon modelleri tasarlanmıştır. Farklı tasarım parametreleri; beton basınç dayanımı, spiral donatı oranı ve eksenel yük seviyeleridir. Betonarme kolonların elastik ve plastik yer değiştirmeleri ile toplam yer değiştirme değerlerinin hesaplanması için kolonların moment-eğrilik ilişkileri elde edilerek karakteristik değerleri hesaplanmıştır. Karakteristik değerlere ait yer değiştirme değeri elde edilerek yer değiştirme süneklikleri hesaplanmıştır. Analizlerden elde edilen değerler farklı parametrelere göre incelenerek yorumlanmıştır.

Dairesel en-kesitli betonarme kolonların tasarımında TBDY (2018) ve ACI318 (2014) yönetmelikleri dikkate alınmıştır. 565mm çapında daireselele en-kesit boyutlarına sahip kolon modellerinin kesit özellikleri Şekil 3'te verilmiştir. Betonarme kolon kesitlerinde spiral donatı çapları; $\Phi 10$ mm ve $\Phi 12$ mm ve spiral aralığı 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm olarak seçilmiştir. Tüm modellerde kolon boyuna donatısı $8\Phi 20$ mm olarak dikkate alınmıştır. Kolon modelleri için C30, C40 ve C50 beton sınıfı ve B420C donatı çeliği seçilmiştir. Moment-eğrilik analizlerinde, beton ve donatı çeliği için malzeme modelleri Şekil 4'te verilmiştir.

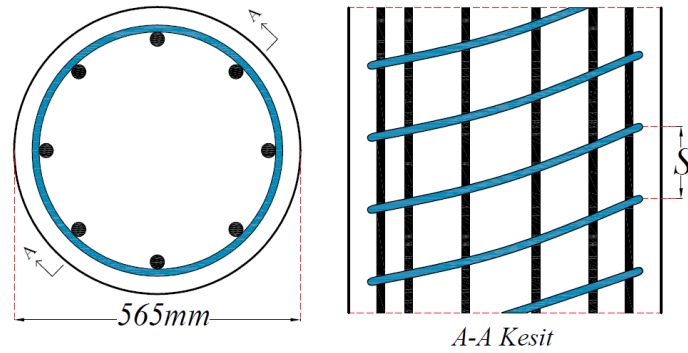
Spiral donatısı, özellikle şiddetli yer hareketine maruz kaldıklarında kolonların mukavemetinin ve sünekliğinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. Betonarme kolonlardaki spiral donatı, kesme kuvvetlerini karşılamak, ani kesme kırılmalarını önlemek, mukavemet ve sünekliği artırmak için betonu sınırlamak amacı ile kullanılabilir. Dairesel kolon modellerinde spiral donatının hacimsel oranı ve minimum hacimsel oranı TBDY (2018) ve ACI318 (2014) yönetmeliklerine göre hesaplanmıştır. TBDY (2018) ve ACI318 (2014), spiral donatı oranının Denklem (6)'dan az olmayacağını belirtir.

$$\rho_s \geq 0.45 \left[\left(\frac{A_c}{A_{ck}} \right) - 1 \right] \left(\frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \right) \quad (6)$$

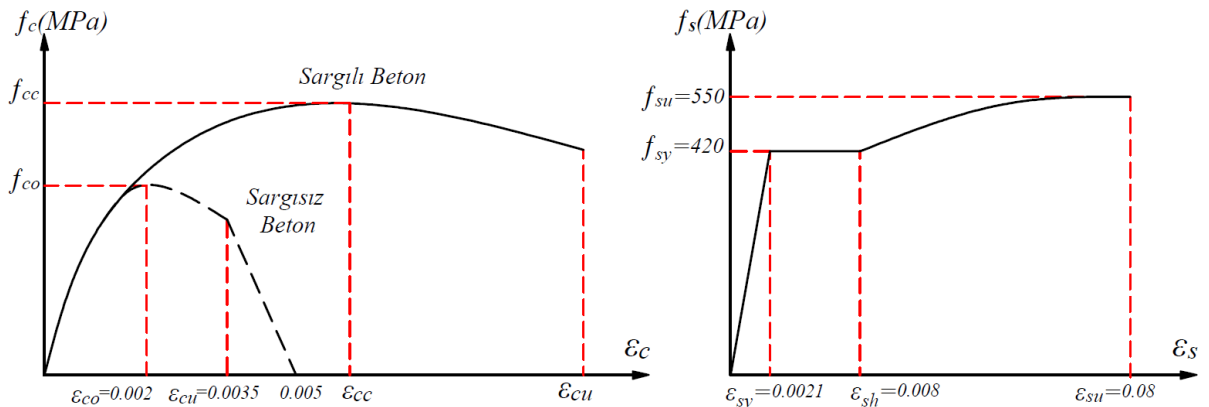
$$\rho_s \geq 0.12 \left(\frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \right)$$

Düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyüğü olmak üzere, $A_c \geq N_{dmax}/0.40f_{ck}$ koşulu sağlanmalıdır (TBDY 2018). Betonarme kolon kesitlerinde, $N_{max} = A_c \times f_{ck}$ olmak üzere N/N_{max} oranının 0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri için moment-eğrilik ilişkileri SAP2000 programı ile elde edilmiştir. Farklı parametrelere göre moment-eğrilik ilişkilerinden akma ve kırılma koşulları için moment (M_y , M_u) ve eğrilik (ϕ_y , ϕ_u) değerleri hesaplanmıştır. Plastik mafsal uzunluğuna göre, betonarme kolonların akma yer değiştirme (Δ_y) ve plastik yer değiştirme (Δ_p) değerleri hesaplanarak kolonlarının toplam tepe yer değiştirme (Δ_u) değerleri elde edilmiştir. Yer değiştirme sünekliği (μ_Δ), yapısal bir sistem veya eleman konfigürasyonu ve kesit sünekliği ile ilgilidir ve yük- yer değiştirme eğrisine dayanır. Moment-eğrilik ilişkisindeki ϕ_y ve ϕ_u değerlerine ait yer değiştirme değeri hesaplanmıştır. Farklı eksenel yük seviyelerine göre, μ_Δ değerleri betonarme kolonlarının Δ_y , Δ_p ve Δ_u değerleri elde edilerek hesaplanmıştır.

Bazı araştırmacılar ve yönetmelikler (Sezen ve Moehle 2004, ASCE/SEI 41 2017), kesme dayanımına beton katkısının artan yer değiştirme süneklik talebi ile azaldığı kesme dayanımı modelleri önermişlerdir. Bazı yönetmelikler (TBDY 2018, ACI318 2014) ise betonarme kolonların kesme dayanımının yer değiştirme süneklik talebinden bağımsız olduğunu bulmuşlardır. Kolon kesitlerinden elde edilen kesme dayanımı bağıntılarına dayanarak, artan yer değiştirme sünekliği ile hem beton hem de donatı ve beton arasındaki etkileşimin dayanım kaybının ilerlemesine katkıda bulunduğu kaydedilmiştir. Böylece, kesme dayanımına hem beton hem de donatı katkılarına bir dayanım azaltma faktörü uygulanır. Bazı bağıntılarda ve yönetmeliklerde (Sezen ve Moehle 2004, ASCE/SEI 41 2017), süneklikle ilişkili dayanım azalmasını hesaba katmak için k faktörünü içeren kesme dayanımı modeli ifade edilmektedir.



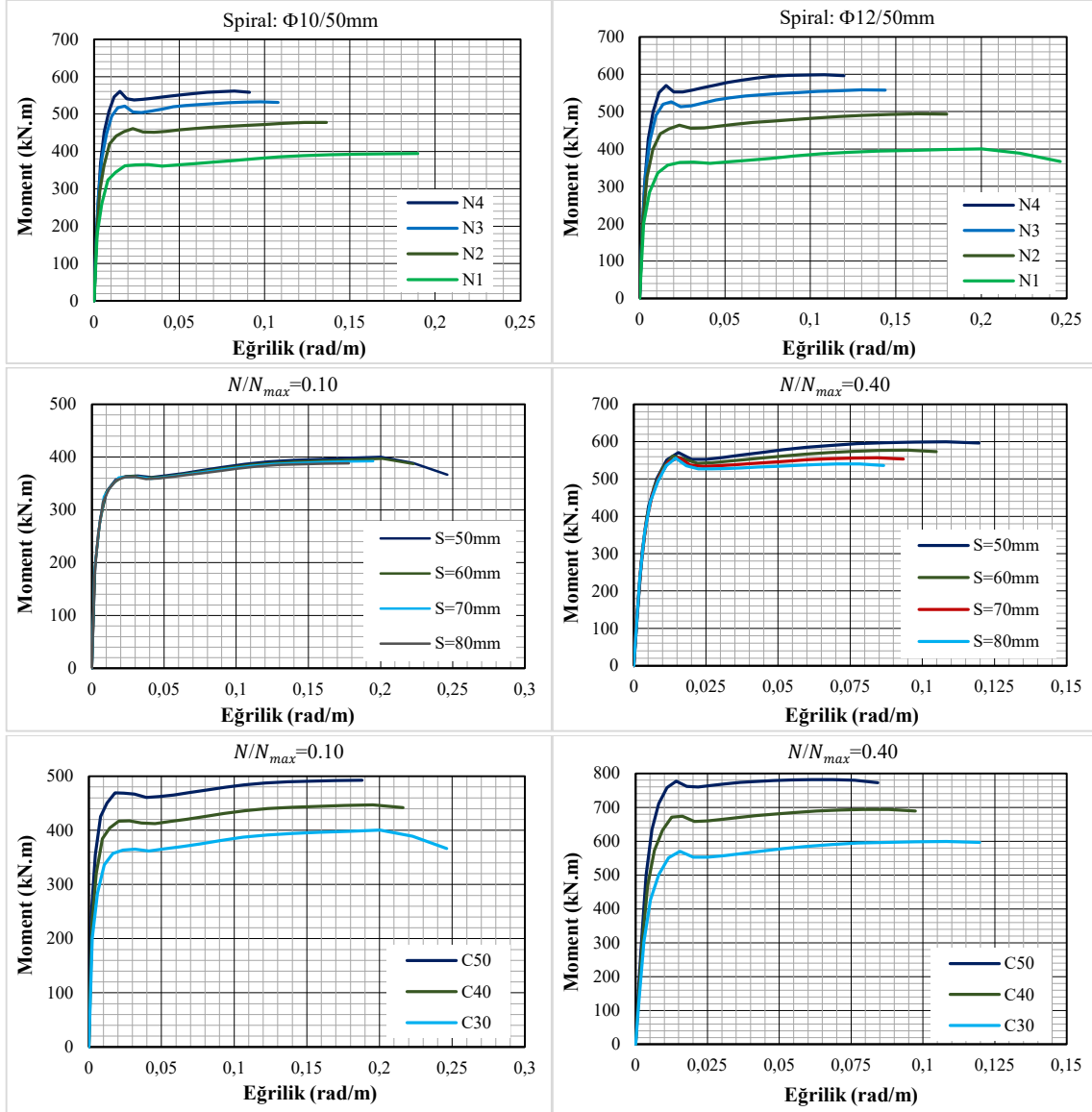
Şekil 3: Tasarlanan betonarme kolonların kesit geometrisi ve donatı yerleşim görünüşü
Figure 3: Sectional geometry and reinforcement layout view of the designed reinforced concrete columns



Şekil 4: Beton ve donatı çeliği için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri (TBDY 2018)
Figure 4: Stress-strain relationships for concrete and reinforcement steel (TBDY 2018)

5. SAYISAL ÇALIŞMA

Betonarme dairesel kolon modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinde incelenen parametreler spiral donatı çapı, spiral donatı aralığı, beton basınç dayanımı ve eksenel yük seviyeleridir. Analitik sonuçlardan elde edilen moment-eğrilik ilişkileri farklı tasarım parametrelerine göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5: Farklı spiral donatı oranı, beton sınıfı ve eksenel yük seviyeleri için moment-eğrilik ilişkileri
Figure 5: Moment-curvature relations for different spiral reinforcement ratio, concrete grade and axial load levels

Bazı bağıntılarda ve yönetmeliklerde (Sezen ve Moehle 2004, ASCE/SEI 41 2017), süneklik ilişkili dayanım azalmasını hesaba katmak için k faktörünü içeren kesme dayanımı modeli kullanılmaktadır. Yer değiştirme süneklik taleplerine bağlı kesme dayanımını hesaplamak için kolon modellerinin akma eğriliği ile plastik mafsallı uzunluğuna göre akma yer değiştirme ve plastik yer değiştirme değerleri hesaplanarak tepe yer değiştirme değeri elde edilmiştir. Hesaplanan akma yer değiştirme ile tepe yer değiştirme değerlerine göre yer değiştirme süneklik değerleri hesaplanmıştır. Yer değiştirme süneklik değerlerine göre dayanım azaltma

faktörünün değerleri hesaplanarak kolonların kesme dayanımları hesaplanmıştır. Betonarme dairesel kolon elemanların Δ_y , Δ_p , Δ_u ve μ_Δ değerleri plastik mafsallı uzunlukları farklı parametrelere göre hesaplanmıştır (Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3). Farklı parametrelerin yer değiştirme sünekliliği üzerindeki etkisi Şekil 6'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 1: Farklı spiral çapı için betonarme dairesel kolonların yer değiştirme değerleri
Table 1: Displacement values of reinforced concrete circular columns for different spiral diameters

Malzeme	Spiral	ρ_s	N/N_{max}	Δ_y	Δ_p	Δ_u	μ_Δ
C30	Φ10/50mm	0.0124	0.10	28.2	173.5	201.7	7.2
			0.20	32.3	121.8	154.1	4.8
			0.30	36.8	93.9	130.7	3.6
			0.40	42.5	76.6	119.0	2.8
	Φ12/50mm	0.0180	0.10	28.2	227.1	255.2	9.1
			0.20	32.7	163.1	195.8	6.0
			0.30	37.2	127.8	165.0	4.4
			0.40	42.1	103.8	145.9	3.5

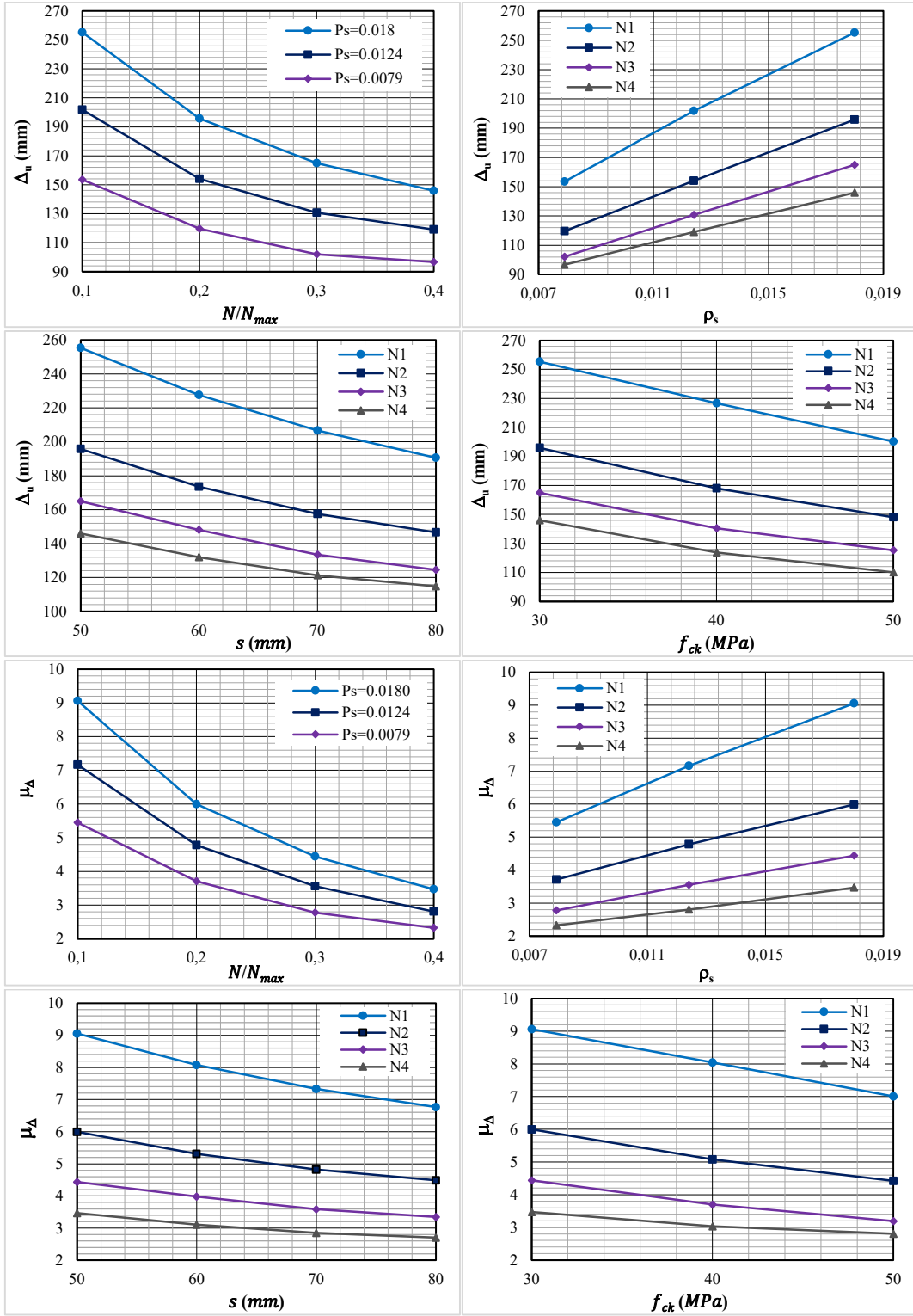
Tablo 2: Farklı spiral aralığı için betonarme dairesel kolonların yer değiştirme değerleri
Table 2: Displacement values of reinforced concrete circular columns for different spiral spacing

Malzeme	Spiral	ρ_s	N/N_{max}	Δ_y	Δ_p	Δ_u	μ_Δ
C30	Φ12/60mm	0.0150	0.10	28.2	199.4	227.5	8.1
			0.20	32.7	140.9	173.6	5.3
			0.30	37.2	110.8	148.0	4.0
			0.40	42.5	89.6	132.0	3.1
	Φ12/70mm	0.0128	0.10	28.2	178.4	206.6	7.3
			0.20	32.7	124.9	157.5	4.8
			0.30	37.2	96.2	133.4	3.6
			0.40	42.5	78.8	121.2	2.9
	Φ12/80mm	0.0112	0.10	28.2	162.4	190.6	6.8
			0.20	32.7	113.9	146.5	4.5
			0.30	37.2	87.4	124.5	3.4
			0.40	42.5	72.3	114.8	2.7

Tablo 3: Farklı eksenel yük seviyesi ile beton basınç dayanımı için betonarme dairesel kolonların yer değiştirme değerleri

Table 3: Displacement values of reinforced concrete circular columns for concrete compressive strength with different axial load level

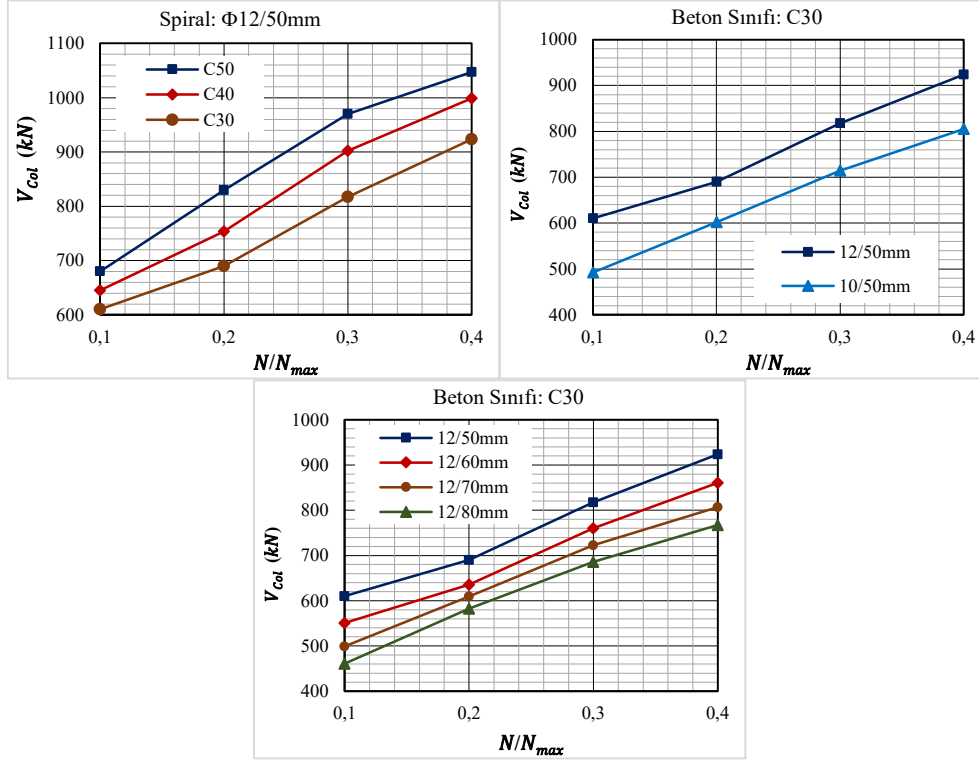
N/N_{max}	Spiral	ρ_s	Malzeme	Δ_y	Δ_p	Δ_u	μ_Δ
0.10	Φ12/50mm	0,0180	30	28.2	227.1	255.2	9.1
			40	28.2	198.5	226.7	8.0
			50	28.6	171.6	200.2	7.0
0.20			30	32.7	163.1	195.8	6.0
			40	33.1	134.8	167.9	5.1
			50	33.5	114.6	148.1	4.4
0.30			30	37.2	127.8	165.0	4.4
			40	38.0	102.4	140.4	3.7
			50	39.2	86.0	125.2	3.2
0.40	30	42.1	103.8	145.9	3.5		
	40	40.8	82.8	123.7	3.0		
	50	39.2	70.9	110.1	2.8		



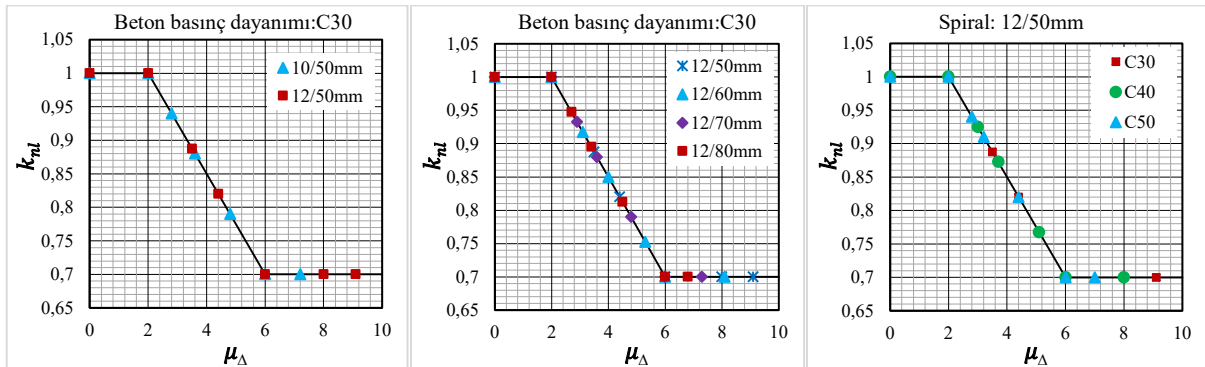
Şekil 6: Farklı parametrelerin yer değiştirme sünekliği üzerindeki etkisi
Figure 6: Effect of different parameters on displacement ductility

Sayısal çalışmanın bu bölümünde analiz sonuçlarından farklı parametrelerde tasarlanan dairesel en-kesitli betonarme kolonların ASCE/SEI 41 (2017)'ye göre kesme dayanımına eksenel yük seviyesinin, beton basınç dayanımının, spiral donatı oranının ve yer değiştirme sünekliğinin etkisi elde edilmiştir. Analiz sonuçları farklı parametrelere göre karşılaştırmalı

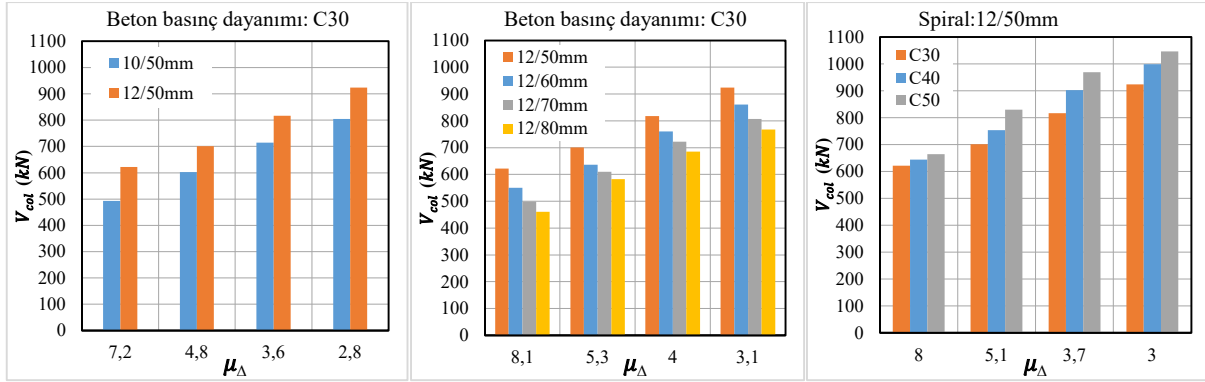
olarak aşağıda sunulmuştur (Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10). TBDY (2018) ve ACI318 (2014) yönetmeliklerinde kesme dayanımı için önerilen ilişkilerin yer değiştirme sünekliliğinden bağımsız oluşu ve ASCE/SEI 41 (2017), Sezen ve Moehle (2004) tarafından geliştirilen kesme dayanımı modelini benimsediği için bu bölümde ASCE/SEI 41 (2017) yönetmeliği dikkate alınmıştır.



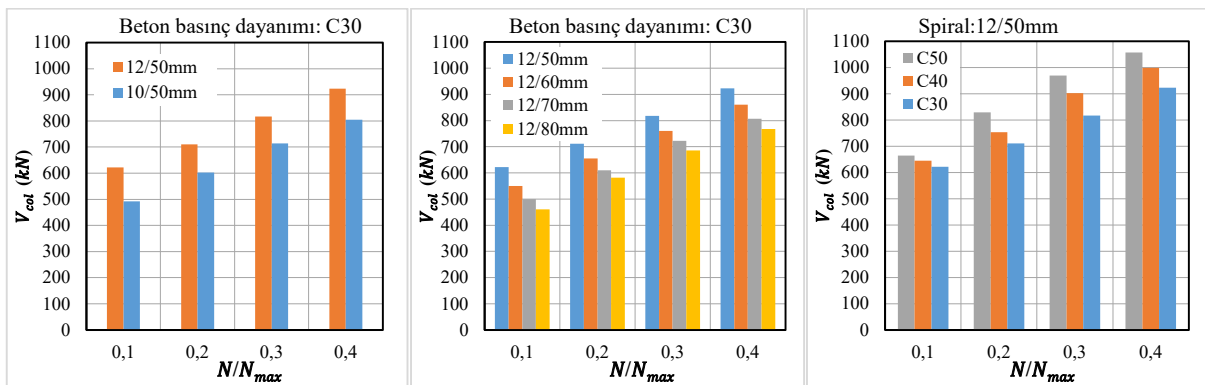
Şekil 7: Betonarme kolonların farklı parametrelere göre elde edilen $V_{col} - N/N_{max}$ ilişkileri
Figure 7: $V_{col} - N/N_{max}$ relations of reinforced concrete columns obtained according to different parameters



Şekil 8: Betonarme kolonların farklı parametrelere göre elde edilen $k_{nl} - \mu_{\Delta}$ ilişkileri
Figure 8: $k_{nl} - \mu_{\Delta}$ relations of reinforced concrete columns obtained according to different parameters



Şekil 9: Betonarme kolonların farklı parametrelere göre elde edilen $V_{col} - \mu_{\Delta}$ ilişkileri
Figure 9: $V_{col} - \mu_{\Delta}$ relations of reinforced concrete columns obtained according to different parameters



Şekil 10: Betonarme kolonların farklı parametrelere göre elde edilen $V_{col} - N/N_{max}$ ilişkileri.
Figure 10: $V_{col} - N/N_{max}$ relations of reinforced concrete columns obtained according to different parameters

6. SONUÇLAR

Betonarme kolonların kesme dayanımı ve deformasyon kapasiteleri, kolonların tasarım ve yapımında kullanılan donatı çeliğinin ve betonun malzeme özellikleriyle ilgili çok sayıda değişken tarafından etkilenir. Bu tür yapısal elemanlar için kesme dayanımı ve süneklik tahmini, farklı tasarım parametrelerinden elde edilmiştir.

Analiz sonuçları incelendiğinde, eksenel yük, spiral donatı çapı ve spiral donatı aralığının değişiminin betonarme dairesel kolonların moment-eğrilik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Eksenel yük, spiral donatı çapı ve aralığı, kesitin sünekliğini etkileyen çok önemli parametrelerdir. Spiral donatı oranı arttıkça dairesel kolon kesitlerin akma ve nihai moment kapasiteleri artar. Spiral donatı oranının artmasıyla kesit sünekliği ve eğrilik sünekliğinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.

Farklı eksenel yük seviyelerine göre hesaplanan akma eğriliği, maksimum eğrilik, akma yer değiştirmesi, plastik yer değiştirme, toplam tepe yer değiştirmesi ve yer değiştirme süneklik değerlerinde farklılıklar bulunmaktadır. Eksenel yük seviyeleri arttıkça plastik yer değiştirme, toplam tepe yer değiştirmesi ve yer değiştirme süneklik değerleri azalır. Spiral donatı çapı arttıkça toplam tepe yer değiştirmesi ve yer değiştirme süneklik değerleri artar. Spiral aralığının artmasıyla toplam tepe yer değiştirmesi ve yer değiştirme süneklik değerleri azalmaktadır. Yer değiştirme süneklik değeri, akma yer değiştirme değerlerinin artması ve toplam tepe yer değiştirme değerlerinin azalması ile azalmaktadır.

$\mu_{\Delta} \leq 2$ ve $\mu_{\Delta} \geq 6$ değerleri için dayanım azalma faktörü (k_{nl}) sabit bir değer ve yer değiştirme sünekliği 2 ile 6 arasında doğrusal olarak azalmaktadır. Betonarme kolonlar için analizlerden elde edilen kesme dayanımlarının eksenel yük seviyesi, beton basınç dayanımı, spiral donatı oranı ve yer değiştirme süneklik değerlerinden etkilendiği görülmektedir. Betonarme dairesel kolon için hesaplanan yer değiştirme sünekliğinin artması durumunda, hesaplanan kesme dayanımı değerleri doğrusal olarak azalmaktadır. Spiral çapının, beton basınç dayanımının ve eksenel yük seviyesinin artması ile kesme dayanım değerleri artmaktadır. Spiral aralığının artması ile hesaplanan kesme dayanım değerleri azalmaktadır. Eksenel yük seviyesinin artması ile yer değiştirme süneklik değerleri azaldığı için k_{nl} değeri artmakta, buna göre kesme dayanım değerleri artmaktadır. Spiral donatı aralığı ve beton basınç dayanımının artması ile k_{nl} değeri artmakta, spiral donatı çapının artması ile k_{nl} değeri azalmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, zaman ayırdıkları, kıymetli yorum ve önerilerde buldukları için makaleyi değerlendiren hakemlere teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

ASCE/SI 41, 2017. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, (ASCE/SEI 41), Published by the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 576 p.

Erişim adresi: <https://searchworks.stanford.edu/view/12367863>

ACI318, 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, USA, 520 p.

Erişim adresi: <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U14&Language=English>

Dok G., Ozturk H., Demir A., 2017. Determining moment-curvature relationship of reinforced concrete columns, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics* 1, 52-58.

Ergüner K., 2009. Analytical examination of performance limits for shear critical reinforced concrete columns, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 127 p.

Erişim adresi:

https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=15WslwLDhr_mAmafP9wUUQ&no=Z7uBEeFp_AUTRS0qYIFNiQ

Elwood J.K., 2003. Shake table tests and analytical studies on the gravity collapse of reinforced concrete frames, Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, California, 346 p. Erişim adresi: <https://searchworks.stanford.edu/view/5579258>

Foroughi S., Yuksel S.B., 2019. Betonarme kolonların şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının araştırılması, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 11(2), 584-601.

Fiore A., Marano G.C., Laucelli D., Monaco P., 2014. Evolutionary modeling to evaluate the shear behavior of circular reinforced concrete columns, *Advances in Civil Engineering* 2014(1), 1-14. Erişim adresi: [1008476-SF-sayı7-sonkapaklı-c.docx](https://www.researchgate.net/publication/260476507-Evolutionary-modeling-to-evaluate-the-shear-behavior-of-circular-reinforced-concrete-columns)

Gordon N.P., 2015. Prediction of shear strength and ductility of cyclically loaded reinforced concrete columns using artificial intelligence. Master of Science in Engineering-Civil and Environmental Engineering. University of Nevada, Las Vegas, 76 p.

Erişim adresi: <http://dx.doi.org/10.34917/7645900>

Lynn A.C., Moehle J.P., Mahin S.A., Holmes W.T., 1996. Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns, *Earthquake Spectra* 124(4), 715-739.

Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R., 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete, *ASCE Journal of Structural Engineering* 114(8), 1804-1826

Paulay T., Priestley M.J.N., 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley and Sons, Inc, New York, USA., 744 p.
Erişim adresi: <http://dx.doi.org/doi:10.1002/9780470172841>

Perez J.C.V., Mulder M.M., 2018. Improved Procedure for Determining the Ductility of Buildings under Seismic Loads, *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria* 34(1), 9-27.

Saatcioglu M., Ozcebe G., 1989. Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading, *ACI Structural Journal* 86(1), 3-12.

SAP2000., 2020. Structural Software for Analysis and Design, Version 20.2.0, Computers and Structures, USA, (2020).

Sasani M., 2007. Life-safety and near-collapse capacity models for seismic shear behavior of reinforced concrete columns , *ACI Structural Journal* 104(1), 30-38.

Sezen H., 2002. Seismic behavior and modeling of the reinforced concrete building columns, Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, California, USA, 670 p.

Erişim adresi:

<http://www.proquest.com/openview/67b8d565762e463699fa8fd7ead54d5f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>

Sezen H., Moehle J., 2004. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns, *ASCE Journal of Structural Engineering* 130(11), 1692-1703.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Xinxian Z., Xiaolei H., Jing Ji., Yongle Qi., Chao H., 2016. Component-level Performance-based Seismic Assessment and Design Approach for Concrete Moment Frames, *The Open Civil Engineering Journal* 10, 25-39.

Yuksel S.B., Foroughi S., 2019. Betonarme Kolonların Sargısız ve Sargılı Beton Dayanımının Analitik Olarak Araştırılması, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7(3), 611-629.

ARAşTIRMA VERİSİ (Research Data)

Çalışma kapsamında yapılan modelleme ve analizler doktora tezi olarak çalışılmakta ve gereken veriler doktora Tik çalışmasından alınmaktadır. Yapılan bu çalışmadan elde edilen analiz sonuçları ve analiz verileri doktora tezinde yer alacaktır.

ÇIKAR ÇATIřMASI / İLİşKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çikar çatışması/ilışkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): S.F., B.Y.
- Literatür araştırması (*Literature research*): S.F., B.Y.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): S.F., B.Y.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): S.F., B.Y.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): S.F., B.Y.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): S.F., B.Y.