

## Yapısal Parametrelerin Betonarme Kolonların Eğrilik Sünekliğine Etkileri

Emrah MERAL<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye

### YAYIN BİLGİSİ

**Tarihçe:**

Alınış: Kasım 2018  
Kabul: Aralık 2018  
Online Yayınlanma: Aralık 2018

**Anahtar Kelimeler:**

Sargılı ve sargısız beton modelleri  
Moment-eğrilik analizi  
Kesit eğrilik sünekliği  
Yapısal parametreler

### ÖZET

Çalışma kapsamında, yapısal parametrelerin betonarme kolonların eğrilik sünekliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Eksenel yük, beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı, boyuna donatı akma dayanımı, enine donatı aralığı, enine donatı çapı, enine donatı akma dayanımı ve enine donatının hacimsel oranı gibi parametrelerin kolon kesitlerinin eğrilik sünekliğine olan etkileri araştırılmıştır. Bu sebeple, kolonların uzun boyut doğrultuları göz önüne alınarak tek eksen etrafında toplam 512 adet moment-eğrilik analizi yapılmıştır. Değişkenlerin kesit eğrilik sünekliğine olan etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için incelenen parametrenin tüm değerleri ile diğer değişkenler sabit tutularak eğrilik sünekliği değerleri karşılaştırılmıştır. Değişkenler arasındaki ilişkinin büyüklüğünü ölçmek ve bağımsız değişkenler yardımıyla elde edilen bağımlı değişken değerini bulmak için çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ile ayrıca süneklik değerini denklemlerle elde etmek için denklem katsayıları bulunmuştur. Elde edilen süneklik denklemleriyle moment-eğrilik analizi yapılmaksızın göz önüne alınan parametreler yardımıyla kesitin eğrilik sünekliği değeri moment-eğrilik analizi sonuçlarına göre %15 dolayında farkla yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

## Effects of Structural Parameters on Curvature Ductility of Reinforced Concrete Columns

### ARTICLE INFO

**History:**

Received: November 2018  
Accepted: December 2018  
Available online: December 2018

**Keywords:**

Confined and unconfined concrete models  
Moment-curvature analysis  
Section curvature ductility  
Structural parameters

### ABSTRACT

Within the scope of the study, the effects of structural parameters on the curvature ductility of reinforced concrete columns are examined. The effects of parameters such as axial load, concrete compression strength, longitudinal reinforcement ratio, longitudinal reinforcement yield strength, transverse reinforcement spacing, transverse reinforcement diameter, transverse reinforcement yield strength and volumetric ratio of transverse reinforcement to curvature ductility of column sections were investigated. For this reason, a total of 512 moment-curvature analyzes were performed around the single axis in consideration of the long dimension directions of the columns. For better understanding of the effects of variables on section curvature ductility, the values of curvature ductility are compared with all values of the examined parameters and other variables being kept constant. Multiple linear regression analysis was performed to measure the magnitude of the relationship between the variables and to find the value of the dependent variable obtained with the independent variables. By means of regression analysis, equation coefficients were also found to obtain ductility value with equation. With the ductility equation obtained, the curvature ductility value of the section can be calculated 15% with difference approximately according to the moment-curvature analysis results by the help of parameters considered without moment-curvature analysis.

\*Sorumlu yazar: emrahmeral@osmaniye.edu.tr

## 1. Giriş

Depreme dayanıklı yapı tasarımının rijitlik, dayanım ve süneklik olmak üzere üç tane temel prensibi vardır. Süneklik, bir yapının, bir yapı elemanının veya bir kesitin, taşıma kapasitesinde önemli bir düşüş olmadan elastik ötesi deformasyon yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir [1]. Sünekliğin analitik olarak belirlenebilmesi için yapıların doğrusal olmayan davranışlarının incelendiği yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılan bu yöntemler, doğrusal olmayan yapı davranışının gerçekçi bir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Depreme dayanıklı yapı tasarımının felsefesinde, şiddetli bir depremde yapıyı oluşturan elemanlarda hasar ve doğrusal elastik olmayan davranış en büyük kesit tesirlerinin bulunduğu uç bölgelerde meydana gelmekte olup bu noktalarda plastik mafsallar oluşacağı kabul edilmektedir. Bu tür şiddetli depremlerde yapının deprem performansı açısından temel hedef, yapının sistem bazında göçmemesidir. Bundan dolayı yapının göçmeden ayakta kalması, plastik mafsallarda yeterli enerjinin tüketilebilmesine bağlıdır [2].

Plastik mafsallarda bir elemanın taşıma kapasitesine ulaşarak daha fazla moment alamaması ile artan yük değerleri altında mafsallarda davranmasıdır. Normal mafsallarda sıfır moment altında dönme yapabilirken plastik mafsallarda (veya sabite yakın) moment altında dönme yapabilmektedir. Bu bölge her ne kadar daha fazla moment alamasa da henüz deformasyon yapabilme yeteneğini kaybetmediğinden sabit moment altında dönme yapmaya devam edebilmektedir. Bu sebeple göçme deformasyonuna ulaşana kadar bir miktar daha dönme yapacağından enerji sönümlenme kapasitesine sahiptir. Yapılarda depremin yapı dayanımını aşan enerji talepleri bu mafsallarda sönümlenebilmektedir [3]. Tüketilen enerji miktarı, yük-deplasman veya moment-eğrilik grafikleri altında kalan alanla doğru orantılıdır. Doğal olarak dayanımda önemli bir azalma olmaksızın büyük deformasyon (eğrilik) yapabilen bir kesit, daha fazla enerji tüketebilecektir. Yeterli enerjinin tüketilebilmesi, önemli ölçüde plastik mafsalların oluştuğu kesitlerin sünekliğine bağlıdır [4].

Yapıyı oluşturan elemanların süneklik özelliklerinin incelenmesi adına moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen kesit sünekliği ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [5-7]. Kaltakçı ve diğ., basit eğilme etkisindeki tek çeşit

betonarme kirişin dayanım ve davranışına beton basınç dayanımı, çekme donatısı akma dayanımı ve oranı, basınç donatısı oranı, etriye oranı ve sıklığı, etriye donatısı akma dayanımı ve donatıda pekleşmenin etkisini incelemiştir. Çalışmada 43 adet örnek için deneysel sonuç ile analitik metottan elde edilen moment-eğrilik grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir [8]. Kolgu ve Peker, bir adet betonarme kolon kesitinde 6 farklı aksel yük, 2 farklı malzeme modeli ve 5 farklı sargı donatı aralığı ele alınarak 40 durum için değişkenlerin kesit davranışına etkisini incelemiştir. Kesit davranışı, bahsedilen tasarım değişkenleri için moment-eğrilik ilişkisi, plastik dönme kapasitesi ve eğrilik sünekliği karşılaştırılarak bulunmuştur [9]. Kiracı ve diğ., bir adet betonarme kiriş kesiti olarak beton basınç dayanımı, çekme donatısı akma dayanımı, çekme donatısı oranı, basınç donatısı oranı, etriye oranı ve sıklığı gibi parametreleri dikkate alınarak moment-eğrilik eğrilik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Moment-eğrilik diyagramlarından yararlanarak 51 adet numunenin süneklik değerleri hesaplanmış ve göz önüne alınan değişkenlerin sünekliğe olan etkisi incelenmiştir [10]. Akkaya, betonarme kolon davranışına, aksel kuvvet, boyuna donatı oranı, enine donatı oranı ve beton basınç dayanımının etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla kare, dikdörtgen ve daire kesitli 400 adet betonarme kolon modeli oluşturmuştur. Kesitlerin moment-eğrilik ilişkileri elde edilerek değişkenlerin kolonların davranışı üzerindeki etkileri, etkin eğilme rijitliği, eğrilik sünekliği ve kesit dayanımı üzerinden belirlenmiştir [11]. Merter ve Uçar, 4 farklı betonarme kolon kesiti seçerek 3 farklı boyuna donatı oranı, 3 farklı sargı donatısı aralığı ve 4 farklı aksel yük için toplamda 144 adet moment-eğrilik analizi yapmışlardır. Moment-eğrilik ilişkisi alanından yararlanarak kesitlerde tüketilen enerjiyi hesaplayıp kesit enerji tüketimine boyuna donatı oranının, enine donatı adım aralığının ve aksel yükün etkisini araştırmışlardır [12].

Yapılan çalışmalarda betonarme kiriş ve kolon kesitleri moment-eğrilik eğrilik analizine tabi tutulmuş ve farklı parametrelerin kesit sünekliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, diğer çalışmalara göre daha fazla parametre dikkate alınarak farklı betonarme kolon kesitleri için daha fazla sayıda moment-eğrilik eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dikkate alınan her bir parametrenin eğrilik sünekliği üzerindeki etkisi diğer parametreler sabit tutularak incelenmiştir. Bir parametre ile diğer her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliği üzerindeki katkısı irdelenmiştir. Ayrıca diğer çalışmalardan farklı

olarak göz önüne alınan parametreler ve moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar yardımıyla çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ile süneklik denklemi elde edilmiş ve bu sayede moment-eğrilik analizi yapılmadan dikkate alınan değişkenlerle kesitin eğrilik sünekliğinin bu denklemle yaklaşık olarak hesaplanmasına olanak sağlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

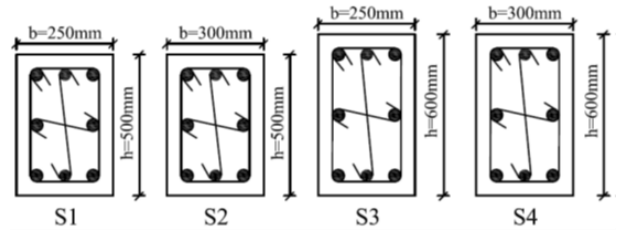
Betonarme yapı tasarımında elemanların kesitlerinin davranışını ve bu davranışı etkileyen parametrelerin bilinmesi öncelikle elemanları ve sonra özelden genele doğru tüm yapı sistemini etkileyeceğinden deprem performansı açısından çok önemlidir. Yapısal elemanların kesitlerine ait davranış özellikleri moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilebilmektedir. Bu çalışmanın amacı, betonarme kolon kesitlerinin moment-eğrilik ilişkilerini etkileyen eksenel yük, beton dayanımı, boyuna donatı oranı, boyuna donatı akma dayanımı, enine donatı aralığı, enine donatı çapı, enine donatı akma dayanımı ve bunlara ek olarak enine donatının hacimsel oranı gibi parametrelerin eğrilik sünekliğine olan etkilerini incelemektir. Çalışmada kullanılan yapısal parametreler ve değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Kolona gelen eksenel basınç yük miktarı, betonarme kolon brüt kesit alanı ( $A_c$ ) ile betonun karakteristik basınç dayanımının ( $f_{ck}$ ) çarpılmasıyla elde edilen dayanımın %’si cinsinden göz önüne alınarak her bir beton sınıfı için iki çeşit eksenel yük tanımlanmıştır. Kolonların boyuna donatı oranları, DBYBHY-2007 'de [13] belirtilen sınır değerler arasında olacak şekilde seçilerek hesaplamalara dâhil edilmiştir. Eksenel yük ve boyuna donatı oranı dışında betonarme projelerde sıklıkla kullanılan yapısal parametreler de çalışmada dikkate alınarak, bu parametrelerin süneklik üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında pratikte yaygın kullanılan 250x500 mm, 300x500 mm, 250x600 mm ve 300x600 mm boyutlarında dikdörtgen her iki yönde çiroza sahip betonarme kesitler seçilmiştir. Kullanılan kesitlerin boyut ve donatı detayları Şekil 1’de verilmiştir. Kesitlerde net beton örtüsü 200mm alınmıştır. Simetrik donatılı betonarme kolon kesitleri kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Hesaplarda kullanılan parametreler ve değerleri

Eksenel Yük Düzeyi ( $N-\% A_c \cdot f_{ck}$ )	(%20-%30). $A_c \cdot f_{ck}$
Beton Basınç Dayanımı ( $f_{ck}-N/mm^2$ )	20-30
Boyuna Donatı Oranı ( $\rho_t-\%$ )	1.0-2.0
Boyuna Donatı Akma Dayanımı ( $f_{yk}-N/mm^2$ )	220-420
Enine Donatı Aralığı (s-mm)	100-200
Enine Donatı Çapı ( $\phi$ -mm)	8-10
Enine Donatı Akma Dayanımı ( $f_{ywk}-N/mm^2$ )	220-420

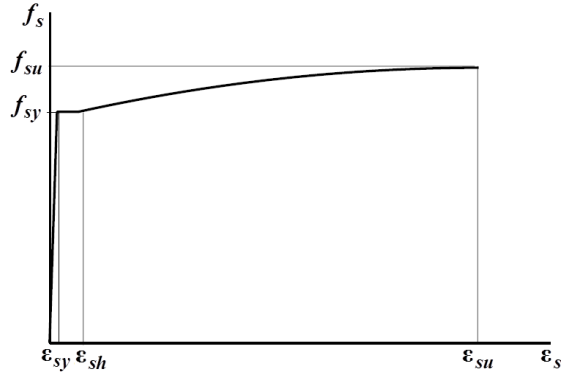


**Şekil 1.** Betonarme kolon kesitleri

Çalışmada donatı çeliği modeli için, DBYBHY-2007 'de [13] yer alan pekleşmeli donatı modeli esas alınmıştır. Pekleşmeli donatı modeline ait genel gerilme-birim şekil değiştirme ( $f_s-\epsilon_s$ ) grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Burada,  $f_{sy}$ : donatı çeliğinin akma dayanımı,  $f_{su}$ : donatı çeliğinin kopma dayanımı,  $\epsilon_{sy}$ : donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi,  $\epsilon_{sh}$ : donatı çeliğinin pekleşme başlangıcındaki birim şekil değiştirmesi,  $\epsilon_{su}$ : donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi değerini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında yer alan analizlerde boyuna donatı için S220 ve S420 sınıfı donatı çeliği kullanılmıştır. Donatı çeliğinin elastisite modülü için  $E_s=2 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup> olarak alınmıştır. S220 ve S420 sınıfındaki donatı çeliklerine ait diğer tanımlayıcı bilgiler Tablo 2’deki gibidir [13]. Beton ve donatı için herhangi bir malzeme katsayısı uygulanmamış olup, dayanım değerleri doğrudan kullanılmıştır.

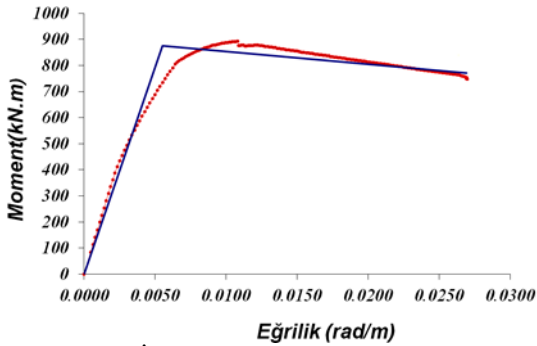
**Tablo 2.** S220 ve S420 sınıfı donatı çeliklerine ait malzeme bilgileri [13]

Kalite	$f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{sy}$	$\epsilon_{sh}$	$\epsilon_{su}$	$f_{su}$ (N/mm <sup>2</sup> )
S220	220	0.0011	0.011	0.16	275
S420	420	0.0021	0.008	0.10	550



Şekil 2. Donatı çeliğine ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

Doğrusal elastik olmayan davranışın yansıtılabilmesi için kesitin moment-eğrilik ilişkileri elde edilerek idealleştirilebilir. Örnek bir betonarme kesite ait idealleştirilmiş moment-eğrilik grafiği Şekil 3'de gösterilmiştir. Akma anının ve nihai noktanın idealizasyon işlemi sırasıyla Priestley ve diğ. [14] ile DBYBHY-2007 [13] dokümanlarından yararlanılmıştır.



Şekil 3. İdealleştirilmiş moment-eğrilik grafiği

Sargılı ve sargısız beton modelleri kullanılarak bunların eleman davranışına ve sünekliğe etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur [15-18]. Çalışmada beton modeli olarak DBYBHY-2007'de [13] önerilen Mander sargılı beton modeli [19] kullanılmıştır. Kolonların uzun boyut doğrultuları göz önüne alınarak tek eksen etrafında toplam 512 adet moment-eğrilik analizi yapılmıştır. Moment-eğrilik analizleri excel yazılımı sayesinde yapılmış olup daha önce aynı yazılımın kullanıldığı Senel ve Palanci [20] ile Palanci [21]' ya ait çalışmalar bulunmaktadır.

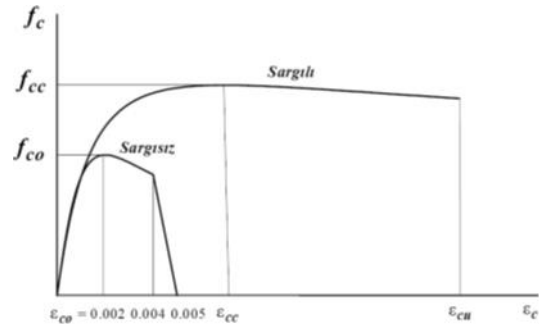
### 3. Beton Modelleri

Bilindiği üzere donatı çeliği sünek bir malzeme olmasına karşın beton yeterli sünekliğe sahip değildir. Bu yüzden daha sünek yapı elemanları elde edebilmek için betonun sargılanması gerekmektedir. Dünyada ve ülkemizde yapılar için en sık kullanılan sargılama türü belirli aralıklarla

yanal donatılar ile beton çekirdeğinin sarılmasıdır. Donatının korunması ve gerekli aderansın sağlanması için her bir yapı elemanında pas payı bırakılmaktadır. Elemanların kabuk bölgesi diye adlandırılan bu beton bölgesinin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri sargısız beton modeli ile temsil edilmelidir.

#### 3.1. Sargısız Beton

Sargılı betona ait davranışın daha iyi kavranabilmesi adına ilk önce sargısız betonun davranışına değinilmesi yararlı olacaktır. Sargısız betona ait birim şekil değiştirme (kısılma) değeri betonarmenin elemanlarında yeterli miktarda süneklik seviyesine ulaşılmasına olanak sağlamayacak derecede azdır. Sargısız beton modeli olarak çalışmalarda sıklıkla Geliştirilmiş Hognestad [22] ve Mander [19] modelleri kullanılmaktadır. Mander sargılı beton modelinde etkili sargılama basınç gerilmesi değeri olarak sıfır alındığında sargısız beton modeli elde edilmektedir. Mander sargılı ve sargısız beton modeline ait gerilme-birim şekil değiştirme ( $f_c$ - $\epsilon_c$ ) ilişkisi Şekil 4'de gösterilmiştir. Burada,  $f_{co}$ : sargısız betonun basınç dayanımı,  $f_{cc}$ : sargılı beton dayanımı,  $\epsilon_{co}$ : sargısız beton birim şekil değiştirmesi,  $\epsilon_{cc}$ : sargılı beton birim şekil değiştirmesi,  $\epsilon_{cu}$ : sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi değerini ifade etmektedir.



Şekil 4. Mander sargılı ve sargısız beton modeline ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [13]

#### 3.2. Sargılı Beton

Betonun enine doğrultuda sargılanması dayanım ve sünekliği büyük ölçüde artırmakta ve dayanım kaybına uğramadan elemanın büyük şekil değiştirmeler yapmasını sağlamaktadır. Bu durum, geçmiş birçok araştırmacı tarafından kapsamlıca incelenmiştir [23-25]. Sargılama, dayanım ve sünekliğin artırılması amacıyla kesite enine donatı yerleştirilmesi ile beton çekirdeğine yanal basınç uygulanmasıdır. Yanal basınca maruz kalan beton çekirdeğinde çatlak oluşumunu ve artışı

sınırlandırıp daha fazla süneklik elde etmek mümkündür. Bu açıdan sargı etkisinin derecesi enine donatı tarafından beton çekirdeğine uygulanan basınç kuvvetine bağlıdır. Bu sebeple bu basıncı ve basıncın uygulandığı betonu etkileyen faktörler doğrudan sargılama ile ilgilidir [26, 27]. Enine donatı miktarı, enine donatı aralığı, enine donatı çapı, enine donatı akma dayanımı, enine donatı detaylandırması, boyuna donatı detaylandırması, beton basınç dayanımı ve eksenel yük düzeyi gibi etkenler sargı etkisini etkileyen faktörlerdir. Geliştirilmiş Kent-Park [28], Mander [19] ve Saatçioğlu-Razvi [29] modelleri sargılı beton modellerinden bazılarıdır. Mander Modelinde sargılı ve sargısız beton için gerilme-birim şekil değiştirme ( $f_c$ - $\epsilon_c$ ) ilişkilerini tanımlayan bağıntılar Denklem 1-8'de verilmiştir [13]. Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi ( $\epsilon_{cu}$ ), bu çalışmada Denklem 9-10 ile hesaplanmıştır [13].

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

$$f_{cc} = \lambda_c \cdot f_{co} \quad (2)$$

$$\lambda_c = 2.254 \cdot \sqrt{1 + 7.94 \cdot \frac{f_e}{f_{co}}} - 2 \cdot \frac{f_e}{f_{co}} - 1.254 \quad (3)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (4)$$

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

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (6)$$

$$E_c \cong 5000 \cdot \sqrt{f_{co}} \quad [MPa] \quad (7)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (8)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 0.014 \cdot (\rho_s / \rho_{sm}) \quad (9)$$

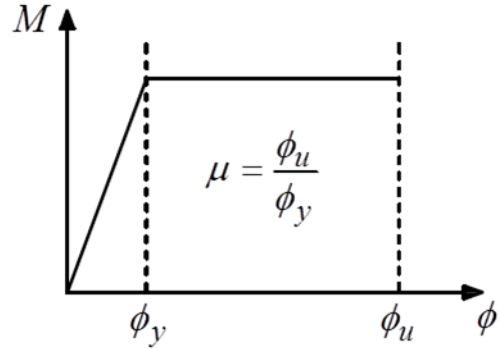
$$\rho_s = \frac{A_o \cdot l_s}{s \cdot b_k \cdot h_k} \quad (10)$$

Etkili sargılama basıncı  $f_c = 0$  alınır, buna bağlı olarak Denklem 3'den  $\lambda_c = 1$  olacağından Denklem 2'de  $f_{cc} = f_{co}$  ve Denklem 5'de  $\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}$  alınacak ve sargısız beton modeli elde edilecektir [13]. Enine donatı ile sarılmış olan beton bölgesi ise sargılı beton gerilme-birim şekil değiştirme ilişkilerinin kullanılması ile temsil edilir.

#### 4. Eğrilik Sünekliğine Farklı Parametrelerin Etkisi

Çalışma kapsamında tasarım değişkenlerinin araştırılması için boyutları 250x500 mm (S1), 300x500 mm (S2), 250x600 mm (S3) ve 300x600 mm (S4) olarak 4 adet kolon kesiti ele alınmıştır (Şekil 1). Eksenel yük, beton dayanımı, boyuna donatı oranı, boyuna donatı akma dayanımı, enine donatı aralığı, enine donatı çapı, enine donatı akma dayanımı ve enine donatının hacimsel oranı gibi parametrelerin eğrilik sünekliğine olan etkileri incelenecektir. Betonarme elemanlara ait kesitlerin sünekliği, "eğrilik sünekliği katsayısı ( $\mu$ )" ile hesaplanır (Şekil 5). Eğrilik sünekliği katsayısı, nihai eğriliğin ( $\phi_u$ ) akma anındaki eğriliğe ( $\phi_y$ ) oranı olarak tanımlanır (Denklem 11).

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (11)$$



Şekil 5. Eğrilik-sünekliği değerlerinin hesaplanması

Çalışma kapsamında eksenel yük, beton dayanımı, boyuna donatı oranı, boyuna donatı dayanımı, enine donatı aralığı, enine donatı çapı ve enine donatı dayanımı için ikişer durum göz önüne alındığında seçilen dört kesit için toplam 512 adet moment-eğrilik analizi yapılmıştır. Enine donatının hacimsel oranı için başlangıçta değerler belirlenmemiş, enine donatı çapı, enine donatı aralığı ve toplam enine donatı uzunluğunun dikkate alınmasıyla hesaplamalara dâhil edilmiştir. Moment-eğrilik analizleri kolonların uzun boyut doğrultuları göz önüne alınarak tek eksen etrafında yapılmıştır. Değişkenlerin eğrilik sünekliğine olan etkilerini daha iyi görebilmek için incelenen parametrenin göz önüne alınan tüm değerleri ile diğer değişkenler sabit tutularak bulunan eğrilik sünekliği değerleri karşılaştırılmıştır. Parametrelerin sünekliği nasıl etkilediğini açığa çıkarmak amacıyla elde edilen verilerden örnek tablolar oluşturulmuştur (Tablo 3-9).

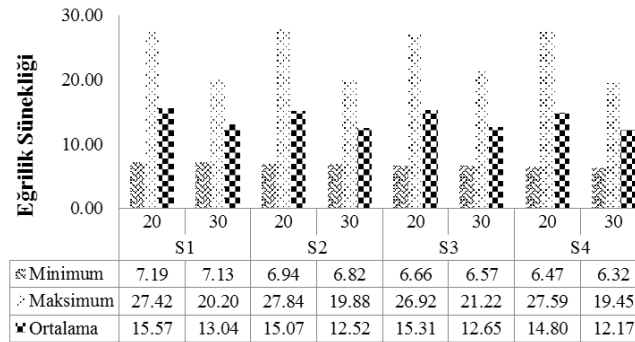
#### 4.1. Eksenel Yük Düzeyinin Etkisi

Göz önüne alınan iki (%20, %30). $A_c.f_{ck}$  farklı eksenel yük düzeyi için moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve bunların karşılaştırması yapılmıştır. Eksenel yük hariç diğer değişkenler sabit tutularak kolon kesitleri için örnek eğrilik sünekliği değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Eksenel yük artışının kesitin moment taşıma kapasitesini bir miktar arttırdığı birçok çalışma ile kanıtlanmıştır [4, 9, 12]. Buna karşın Tablo 3’de görüldüğü üzere eksenel yük seviyesinin artmasıyla eğrilik sünekliği değerlerinde azalma görülmektedir. Eksenel yük ile her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliğine etkisine bakıldığında, eksenel yükün arttığı durumda diğer tüm parametreler sabit iken sadece enine donatı aralığı ve boyuna donatı akma dayanımı azaldığında eğrilik sünekliğinde artış görülmüştür. Diğer tüm parametrelerin değişimi eksenel yük arttığında eğrilik sünekliğinin azalmasına engel olamıyorken,

enine donatı aralığının ve boyuna donatı akma dayanımının azalmasının sünekliği iyileştirmesi bu iki parametrenin eksenel yüke göre eğrilik sünekliğinde baskın olduğunu ifade etmektedir. Eksenel yükün %20 ve %30 olduğu durumda tüm değişken verileri için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliği değerleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Eksenel yük düzeyi %20’den %30’a çıktığında tüm değişkenlerin değerleri dikkate alındığında ortalama eğrilik süneklik değerleri S1, S2, S3 ve S4 için sırasıyla %16, %17, %17 ve %18 azalmaktadır. Eksenel yük arttığında minimum ile maksimum değerler arasındaki fark düşmektedir (Şekil 6). Eksenel yükün artması sünekliği azaltırken eleman bazında kırılma türünü de beklenen sünek kırılmadan (çekme kırılması) istenmeyen gevrek kırılma (basınç kırılması) yönüne doğru çevirmektedir. Sonuçlara bakıldığında eksenel yük ile sünek davranış arasındaki ilişkinin ters orantılı olarak değiştiği söylenebilir.

**Tablo 3.** Eğrilik sünekliğine eksenel yük düzeyinin etkisi

Kesit	Eksenel Yük Düzeyi	Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı Oranı	Boyuna Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Aralığı	Enine Donatı Çapı	Enine Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Eğrilik Sünekliği
	N %	$f_{ck}$ $N/mm^2$	$\rho_t$ %	$f_{yk}$ $N/mm^2$	S mm	$\phi$ mm	$f_{yk}$ $N/mm^2$	$\rho_s$ %	$\mu$
S1	20	20	1	220	100	8	420	1.05	23.07
	30	20	1	220	100	8	420	1.05	20.20
S2	20	20	1	220	100	8	420	0.99	23.34
	30	20	1	220	100	8	420	0.99	18.22
S3	20	20	1	220	100	8	420	0.91	23.73
	30	20	1	220	100	8	420	0.91	19.89
S4	20	20	1	220	100	8	420	0.85	24.23
	30	20	1	220	100	8	420	0.85	18.47



**Şekil 6.** Eksenel yükün %20 ve %30 olduğu durumda tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliği değerleri

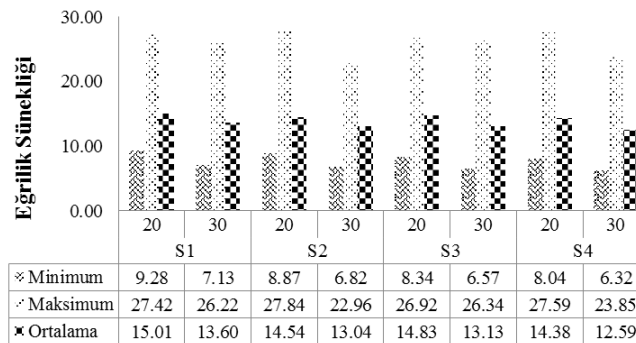
#### 4.2. Beton Basınç Dayanımının Etkisi

Beton basınç dayanımının süneklik üzerine etkilerini görmek amacıyla iki (20, 30 N/mm<sup>2</sup>) farklı beton basınç dayanımı dikkate alınmıştır. Beton basınç dayanımı farkının süneklik üzerindeki görülmesi için dikkate alınan tüm kolon kesitleri için örnek eğrilik sünekliği değerleri Tablo 4'de gösterilmiştir. Beton basınç dayanımı artışının, kesitlerin sünekliği üzerinde olumlu etkisi olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir [7, 10, 11, 18]. Bu çalışmada eksenel yük düzeyi, kolon kesit alanı ile beton dayanımının çarpılmasıyla elde edilen dayanımın %'si cinsinden göz önüne alınmasından dolayı beton dayanımının artmasıyla birlikte eksenel yük miktarı da artmaktadır. Dolayısıyla birbirine yakın eksenel yük miktarı altında beton dayanımının sünekliğe etkisini görebilmek amacıyla artan beton dayanımına paralel olarak eksenel yük yüzdesi azaltılarak Tablo 4'de eğrilik sünekliği değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre beton dayanımı artışının göz önüne alınan tüm kesitlerde sünekliği

iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Beton basınç dayanımı ile her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliğine katkısı değerlendirildiğinde, diğer tüm parametreler sabit iken beton basınç dayanımı ile boyuna donatı oranı arttığında sadece eğrilik sünekliği artmıştır. Diğer tüm parametrelerin değişmesi beton basınç dayanımı artmasına rağmen eğrilik sünekliğinin düşmesini durduramamıştır, bu da beton basınç dayanımının incelenen parametreler içerisinde eğrilik sünekliği üzerinde daha az etkin olduğunu belirtmektedir. Beton basınç dayanımının 20 ve 30 N/mm<sup>2</sup> olduğu durumda tüm değişken verileri için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliği değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Beton dayanımının artmasıyla birlikte eksenel yük miktarının artışı, tüm değişken verileri göz önüne alındığında eğrilik sünekliğinin minimum, maksimum ve ortalama değerlerini azaltması, eksenel yük etkisinin beton basınç dayanımına göre daha fazla hissedildiğini göstermektedir.

**Tablo 4.** Eğrilik sünekliğine beton basınç dayanımının etkisi

Kesit	Eksenel Yük Düzeyi	Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı Oranı	Boyuna Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Aralığı	Enine Donatı Çapı	Enine Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Eğrilik Sünekliği
	N %	f <sub>ck</sub> N/mm <sup>2</sup>	ρ <sub>t</sub> %	f <sub>yk</sub> N/mm <sup>2</sup>	S mm	φ mm	f <sub>yk</sub> N/mm <sup>2</sup>	ρ <sub>s</sub> %	μ
S1	30	20	1	220	100	8	420	1.05	20.20
	20	30	1	220	100	8	420	1.05	22.14
S2	30	20	1	220	100	8	420	0.99	18.22
	20	30	1	220	100	8	420	0.99	21.92
S3	30	20	1	220	100	8	420	0.91	19.89
	20	30	1	220	100	8	420	0.91	20.79
S4	30	20	1	220	100	8	420	0.85	18.47
	20	30	1	220	100	8	420	0.85	19.02



**Şekil 7.** Beton basınç dayanımının 20 ve 30 N/mm<sup>2</sup> olduğu durumda tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliği değerleri

#### 4.3. Boyuna Donatı Oranının Etkisi

Çalışma kapsamında DBYBHY-2007 'de kolonlar için belirlenen boyuna donatı oranları dikkate

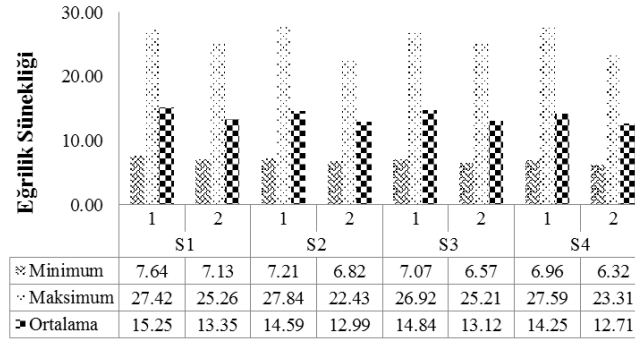
alınarak bu oranlar arasında iki (%1, %2) çeşit boyuna donatı oranı seçilmiştir. Boyuna donatı oranının sünekliğe etkilerinin araştırılması için dikkate alınan tüm kolon kesitleri için örnek eğrilik

sünekliği değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre boyuna donatı oranı artışının göz önüne alınan tüm kesitler için eğrilik sünekliğini azalttığı görülmektedir. Boyuna donatı oranı ile her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliğine etkisi incelendiğinde, diğer tüm parametreler sabit tutulurken boyuna donatı oranı arttığında enine donatı çapı ve enine donatı dayanımının artması eğrilik sünekliğinin düşmesini engelleyememiştir. Diğer tüm parametrelerin değişimi boyuna donatı oranı artışına rağmen eğrilik sünekliğini yükseltmiştir. Boyuna donatı oranının %1 ve %2 olduğu durumda

tüm değişken sonuçları için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliği değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Boyuna donatı oranı %1’den %2’ye çıktığında tüm değişkenlerin değerleri dikkate alındığında ortalama eğrilik süneklik değerleri S1, S2, S3 ve S4 kesitlerinin tümü için yaklaşık %12 azalmaktadır. Boyuna donatı oranı arttığında dikkate alınan tüm kesitler için maksimum değer minimum değerın 3.70 katı civarındadır. Eksenel yük parametresinde olduğu gibi boyuna donatı oranının artması kesit sünekliğinde düşüşe sebep olmaktadır.

**Tablo 5.** Eğrilik sünekliğine boyuna donatı oranının etkisi

Kesit	Eksenel Yük Düzeyi	Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı Oranı	Boyuna Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Aralığı	Enine Donatı Çapı	Enine Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Eğrilik Sünekliği
	N %	$f_{ck}$ $N/mm^2$	$\rho_t$ %	$f_{yk}$ $N/mm^2$	S mm	$\phi$ mm	$f_{yk}$ $N/mm^2$	$\rho_s$ %	$\mu$
S1	20	20	1	220	100	8	420	1.05	23.07
	20	20	2	220	100	8	420	1.05	21.79
S2	20	20	1	220	100	8	420	0.99	23.34
	20	20	2	220	100	8	420	0.99	21.98
S3	20	20	1	220	100	8	420	0.91	23.73
	20	20	2	220	100	8	420	0.91	22.58
S4	20	20	1	220	100	8	420	0.85	24.23
	20	20	2	220	100	8	420	0.85	20.38



**Şekil 8.** Boyuna donatı oranının %1 ve %2 olduğu durumda tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliği değerleri

#### 4.4. Boyuna Donatı Akma Dayanımının Etkisi

Boyuna donatı akma dayanımı olarak bu çalışma için iki farklı (220, 420 N/mm<sup>2</sup>) dayanım seçilerek hesaplamalara katılmıştır. Boyuna donatı dayanımının sünekliğe etkilerinin incelenmesi için tüm kolon kesitleri için örnek eğrilik sünekliği değerleri Tablo 6’da verilmiştir. Moment-eğrilik analizlerinden alınan sonuçlara göre boyuna donatı akma dayanımı artışının göz önüne alınan tüm kesitler için eğrilik sünekliğini %30 dolayında azalttığı görülmektedir. Boyuna donatı akma dayanımı ile her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliğine etkisi irdelendiğinde, boyuna

donatı akma dayanımı arttığında diğer tüm parametreler sabit tutulurken enine donatı aralığının azalması eğrilik sünekliğinin düşüşünü durdurabilmiştir. Diğer tüm parametrelerin değişimi boyuna donatı akma dayanımının artışıyla birlikte eğrilik sünekliğinin azalmasını önleyememiştir. Boyuna donatı akma dayanımının 220 ve 420 N/mm<sup>2</sup> olduğu durumda tüm değişken sonuçları için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliği değerleri Şekil 9’da verilmiştir. Boyuna donatı akma dayanımı 220’den 420 N/mm<sup>2</sup>’ye çıktığında tüm değişkenlerin değerleri dikkate alındığında ortalama eğrilik süneklik değerleri S1, S2, S3 ve S4 kesitleri için sırasıyla

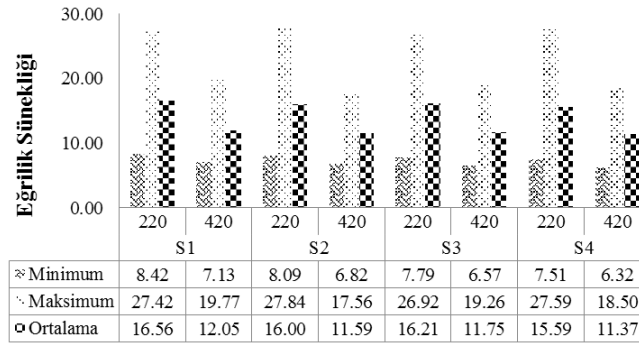


%27, %28, %28 ve %27 oranında azalmaktadır. Boyuna donatı akma dayanımı arttığında minimum ile maksimum değerler arasındaki fark azalmaktadır. Boyuna donatı akma dayanımının artmasıyla birlikte kesitin aksel yük ve moment taşıma kapasitesi arttığı bilinmesine rağmen eğrilik

sünekliliğinde azalma olduğu görülmektedir. Boyuna donatı ile ilgili olan boyuna donatı oranı ve dayanım değerlerinin artışının süneklik üzerinde bulunan sonuçlar doğrultusunda olumsuz etkiye sebep olduğu hesaplanmıştır.

**Tablo 6.** Eğrilik sünekliğine boyuna donatı akma dayanımının etkisi

Kesit	Eksenel Yük Düzeyi	Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı Oranı	Boyuna Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Aralığı	Enine Donatı Çapı	Enine Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Eğrilik Sünekliği
	N %	$f_{ck}$ $N/mm^2$	$\rho_t$ %	$f_{yk}$ $N/mm^2$	S mm	$\phi$ mm	$f_{yk}$ $N/mm^2$	$\rho_s$ %	$\mu$
S1	20	20	1	220	100	8	420	1.05	23.07
	20	20	1	420	100	8	420	1.05	16.85
S2	20	20	1	220	100	8	420	0.99	23.34
	20	20	1	420	100	8	420	0.99	15.95
S3	20	20	1	220	100	8	420	0.91	23.73
	20	20	1	420	100	8	420	0.91	16.67
S4	20	20	1	220	100	8	420	0.85	24.23
	20	20	1	420	100	8	420	0.85	16.31



**Şekil 9.** Boyuna donatı akma dayanımının 220 ve 420  $N/mm^2$  olduğu durumda tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliliği değerleri

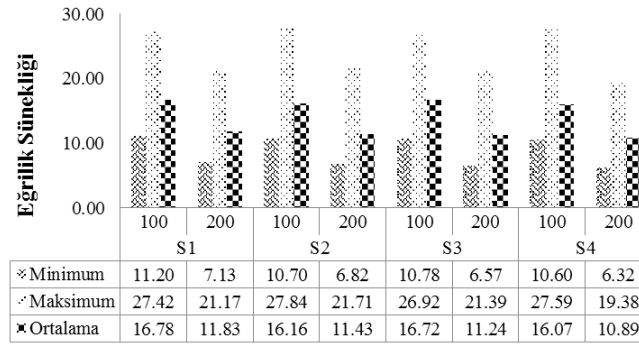
#### 4.5. Enine Donatı Aralığının Etkisi

Enine donatı aralığı için iki farklı (100, 200 mm) adım aralığı göz önüne alınarak seçilen kesitlerin moment-eğrilik analizlerine yansıtılmıştır. Enine donatılar, boyuna donatıları bir arada tutarak burkulma boyunu kısaltıp boyuna donatıların burkulmasını engeller ve kesitin kesme kuvveti kapasitesini artırır. Bunun dışında enine donatı aralığının azalmasının kesitin sünekliğini olumlu olarak etkilediği birçok çalışmada elde edilmiştir [10, 11, 12, 18]. Enine donatı aralığının süneklik üzerindeki etkilerinin incelenmesi için tüm kolon kesitleri için örnek eğrilik sünekliği değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre enine donatı aralığı artışının göz önüne alınan tüm kesitler için eğrilik sünekliğini %35 civarında azalttığı söylenebilir. Enine donatı aralığı ile her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliğine etkisi

değerlendirildiğinde, enine donatı aralığı arttığında diğer tüm parametreler sabit tutulurken boyuna donatı akma dayanımı hariç parametrelerin değişimi eğrilik sünekliğinin azalmasına engel olamamıştır. Enine donatı aralığının 100 ve 200 mm olduğu durumda tüm değişken sonuçları için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliği değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Enine donatı aralığı 100'den 200 mm'ye çıktığında tüm değişkenlerin değerleri dikkate alındığında ortalama eğrilik süneklik değerleri S1, S2, S3 ve S4 kesitleri için sırasıyla %29, %29, %33 ve %32 oranında azalmaktadır. Enine donatı aralığı arttığında minimum ile maksimum değerler arasındaki fark artmaktadır. Bu sonuçlar enine donatı aralığının sargı etkisi üzerindeki önemini vurgulamaktadır.

**Tablo 7.** Eğrilik sünekliliğine enine donatı aralığının etkisi

Kesit	Eksenel Yük Düzeyi	Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı Oranı	Boyuna Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Aralığı	Enine Donatı Çapı	Enine Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Eğrilik Sünekliliği
	N %	$f_{ck}$ $N/mm^2$	$\rho_t$ %	$f_{yk}$ $N/mm^2$	S mm	$\phi$ mm	$f_{yk}$ $N/mm^2$	$\rho_s$ %	$\mu$
S1	20	20	1	220	100	8	420	1.05	23.07
	20	20	1	220	200	8	420	0.53	16.59
S2	20	20	1	220	100	8	420	0.99	23.34
	20	20	1	220	200	8	420	0.50	15.27
S3	20	20	1	220	100	8	420	0.91	23.73
	20	20	1	220	200	8	420	0.46	14.69
S4	20	20	1	220	100	8	420	0.85	24.23
	20	20	1	220	200	8	420	0.43	14.75

**Şekil 10.** Enine donatı aralığının 100 ve 200 mm olduğu durumda tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliliği değerleri

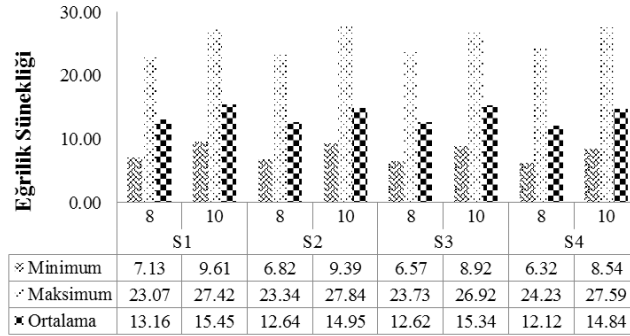
#### 4.6. Enine Donatı Çapının Etkisi

Çalışma kapsamında enine donatı çapı olarak iki farklı (8, 10 mm) donatı çapı seçilerek kesitlerin moment-eğrilik analizlerinde kullanılmıştır. Büyük çapta kullanılan enine donatı daha büyük eğilme rijitliği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla daha rijit enine donatı beton çekirdeği genişledikçe donatının dışarıya doğru bel vermesini geciktirerek daha verimli bir sargılama etkisine imkân verecektir. Bu da kesit sünekliliğine olumlu olarak yansıtacaktır. Enine donatı çapının sünekliliğe etkilerini incelemek amacıyla seçilen tüm kolon kesitleri için örnek eğrilik sünekliliği değerleri Tablo 8'de gösterilmiştir. Moment-eğrilik analizlerinden alınan sonuçlara göre enine donatı çapı artışının göz önüne alınan tüm kesitler için eğrilik sünekliliğini %16 civarında arttırdığı bulunmuştur. Enine donatı çapı ile her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliliğine etkisine bakıldığında, enine donatı çapının arttığı durumda

diğer tüm parametreler sabit iken sadece beton basınç dayanımı ve enine donatı akma dayanımı azalmasına rağmen eğrilik sünekliliğinde artış görülmüştür. Diğer tüm parametrelerin değişimi enine donatı çapı arttığında eğrilik sünekliliğinin azalmasına engel olamıyorken, beton basınç dayanımının ve enine donatı akma dayanımının azalmasına rağmen sünekliliğin iyileşmesi enine donatı çapının bu iki parametreye göre eğrilik sünekliliğinde daha baskın olduğu söylenebilir. Enine donatı çapının 8 ve 10mm olduğu durumda tüm değişken verileri için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliliği değerleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Enine donatı çapı 8'den 10mm'ye çıktığında tüm değişkenlerin değerleri dikkate alındığında ortalama eğrilik süneklilik değerleri S1, S2, S3 ve S4 için sırasıyla %17, %18, %22 ve %22 artmaktadır. Enine donatı çapı arttığında minimum ile maksimum değerler arasındaki fark azalmaktadır.

Tablo 8. Eğrilik sünekliliğine enine donatı çapının etkisi

Kesit	Eksenel	Beton	Boyuna	Boyuna	Enine	Enine	Enine	Enine	Eğrilik
	Yük	Basınç	Donatı	Donatı	Donatı	Donatı	Donatı	Donatı	
Düze	Basınç	Oran	Akma	Akma	Aralığı	Çapı	Akma	Hacimsel	Sünekli
Yüze	Oran	Oran	Oran	Oran	Oran	Oran	Oran	Oran	Oran
N	$f_{ck}$	$\rho_t$	$f_{yk}$	$S$	$\phi$	$f_{yk}$	$\rho_s$	$\mu$	
%	$N/mm^2$	%	$N/mm^2$	mm	mm	$N/mm^2$	%		
S1	20	20	1	220	100	8	420	1.05	23.07
	20	20	1	220	100	10	420	1.65	27.42
S2	20	20	1	220	100	8	420	0.99	23.34
	20	20	1	220	100	10	420	1.56	27.84
S3	20	20	1	220	100	8	420	0.91	23.73
	20	20	1	220	100	10	420	1.43	26.92
S4	20	20	1	220	100	8	420	0.85	24.23
	20	20	1	220	100	10	420	1.34	27.59



Şekil 11. Enine donatı çapının 8 ve 10 mm olduğu durumda tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliği değerleri

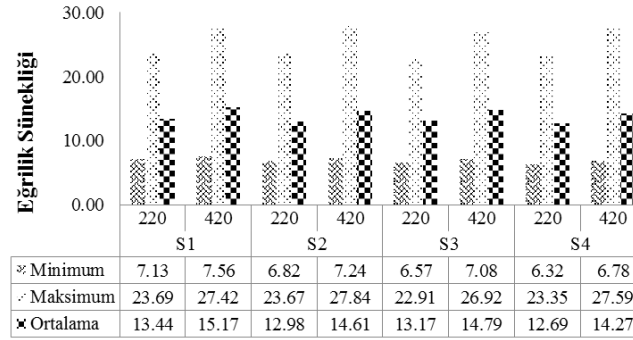
#### 4.7. Enine Donatı Akma Dayanımının Etkisi

Enine donatı dayanımı olarak çalışmada iki farklı (220, 420  $N/mm^2$ ) dayanım seçilerek hesaplamalara dâhil edilmiştir. Enine donatı dayanımının sünekliliğe etkilerinin incelenmesi için dikkate alınan tüm kolon kesitleri için örnek eğrilik sünekliği değerleri Tablo 9'da gösterilmiştir. Sargılamanın etkinliği artan gerilme değerleri altında enine donatının yanal basınç uygulayarak betonda oluşan çatlakların gelişimini önleyebilmesine bağlıdır. Artan yanal deformasyon altında enine donatının betona uyguladığı basıncın artması istenen bir davranıştır. Enine donatı tarafından uygulanabilecek maksimum basınç kullanılan çeliğin akma dayanımına bağlıdır. Bu nedenlerle büyük akma dayanımına sahip çelik sargılama etkisi açısından daha olumludur. Dolayısıyla sargılamanın iyileşmesi kesitin sünekliliğine de faydalı olacaktır. Elde edilen sonuçlara göre enine donatı akma dayanımı artışının göz önüne alınan tüm kesitler

için eğrilik sünekliliğini %10 civarında yükselttiği söylenebilir. Enine donatı akma dayanımı ile her bir parametrenin değişiminin eğrilik sünekliliğine katkısı değerlendirildiğinde, diğer tüm parametreler sabit iken enine donatı akma dayanımı arttığında beton basınç dayanımı azalmasına rağmen eğrilik sünekliliği değeri artmıştır. Diğer tüm parametrelerin değişmesi enine donatı akma dayanımı artmasına rağmen eğrilik sünekliliğinin düşmesini durduramamıştır. Enine donatı akma dayanımının 220 ve 420  $N/mm^2$  olduğu durumda tüm değişken sonuçları için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliliği değerleri Şekil 12'de verilmiştir. Enine donatı akma dayanımının 220'den 420  $N/mm^2$ 'ye çıktığında tüm değişkenlerin sonuçları dikkate alındığında ortalama eğrilik süneklik değerleri S1, S2, S3 ve S4 için sırasıyla %13, %13, %12 ve %12 artmaktadır. Enine donatı akma dayanımına ait minimum ile maksimum değerler arasındaki fark 3 ile 4 arasında değişmektedir.

**Tablo 9.** Eğrilik sünekliğine enine donatı akma dayanımının etkisi

Kesit	Eksenel Yük Düzeyi	Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı Oranı	Boyuna Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Aralığı	Enine Donatı Çapı	Enine Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Eğrilik Sünekliği
	N %	$f_{ck}$ $N/mm^2$	$\rho_t$ %	$f_{yk}$ $N/mm^2$	S mm	$\phi$ mm	$f_{yk}$ $N/mm^2$	$\rho_s$ %	$\mu$
S1	20	20	1	220	100	8	220	1.05	22.75
	20	20	1	220	100	8	420	1.05	23.07
S2	20	20	1	220	100	8	220	0.99	19.88
	20	20	1	220	100	8	420	0.99	23.34
S3	20	20	1	220	100	8	220	0.91	22.91
	20	20	1	220	100	8	420	0.91	23.73
S4	20	20	1	220	100	8	220	0.85	20.72
	20	20	1	220	100	8	420	0.85	24.23

**Şekil 12.** Enine donatı akma dayanımının 220 ve 420  $N/mm^2$  olduğu durumda tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliği değerleri

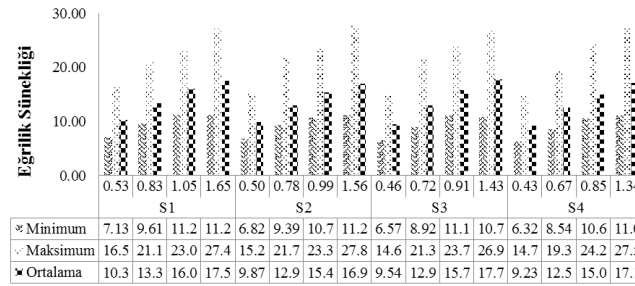
#### 4.8. Enine Donatı Hacimsel Oranının Etkisi

Enine donatı miktarı, enine donatı hacminin beton çekirdeği hacmine oranı olarak ifade edilir ve sargı etkisini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Daha büyük enine donatı hacimsel oranı, beton üzerinde daha büyük yanal basınç uygulanması ve böylelikle dayanım ve süneklikte daha büyük artışa neden olmaktadır. Artan enine donatı hacimsel oranı ile birlikte betonarme davranışında büyük iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir [26]. Enine donatı hacimsel oranı için ayrıca değerler belirlenmemiş, enine donatı çapı, enine donatı aralığı ve toplam enine donatı uzunluğunun dikkate alınmasıyla üstteki yedi parametreye ek olarak tüm kesitler için belirlenerek hesaplamalara dâhil edilmiştir. Enine donatı hacimsel oranının sünekliğe etkilerinin araştırılması için dikkate alınan tüm kolon kesitleri için örnek eğrilik sünekliği değerleri Tablo 10'da verilmiştir.

Moment-eğrilik analizlerinden alınan sonuçlara göre S1, S2, S3 ve S4 kesitlerinin sahip olduğu en düşük ve en yüksek enine donatı hacimsel oranı arasındaki eğrilik sünekliği değerlerinin farkı sırasıyla %65, %82, %83 ve %87 hesaplanmıştır. Kesitlerin sahip olduğu enine donatı hacimsel oranına göre tüm değişken sonuçları için minimum, maksimum ve ortalama eğrilik sünekliği değerleri Şekil 13'de verilmiştir. Kesitlerin ortalama eğrilik sünekliği değerleri, kesitlerin kendi içerisinde en düşük enine donatı hacimsel oranına ait eğrilik sünekliğine bölündüğünde S1, S2, S3 ve S4 için sırasıyla 1.29-1.70, 1.32-1.71, 1.36-1.86 ve 1.36-1.86 aralığında oranlar elde edilmektedir. Kesitlerin enine donatı hacimsel oranı değerleri göz önüne alındığında, hesaplanan minimum ile maksimum eğrilik sünekliği değerleri farkı yaklaşık olarak 2 ile 2.5 arasında değişmektedir.

**Tablo 10.** Eğrilik sünekliğine enine donatı hacimsel oranının etkisi

Kesit	Eksenel	Beton	Boyuna	Boyuna	Enine	Enine	Enine	Enine	Eğrilik
	Yük	Basınç	Donatı	Donatı	Donatı	Donatı	Donatı	Donatı	
	Düzeği	Dayanımı	Oranı	Akma	Aralığı	Çapı	Akma	Hacimsel	Sünekliği
	N	$f_{ck}$	$\rho_t$	$f_{yk}$	S	$\phi$	$f_{yk}$	$\rho_s$	$\mu$
	%	$N/mm^2$	%	$N/mm^2$	mm	mm	$N/mm^2$	%	
S1	20	20	1	220	200	8	420	0.53	16.59
	20	20	1	220	200	10	420	0.83	21.17
	20	20	1	220	100	8	420	1.05	23.07
	20	20	1	220	100	10	420	1.65	27.42
S2	20	20	1	220	200	8	420	0.50	15.27
	20	20	1	220	200	10	420	0.78	21.71
	20	20	1	220	100	8	420	0.99	23.34
	20	20	1	220	100	10	420	1.56	27.84
S3	20	20	1	220	200	8	420	0.46	14.69
	20	20	1	220	200	10	420	0.72	21.39
	20	20	1	220	100	8	420	0.91	23.73
	20	20	1	220	100	10	420	1.43	26.92
S4	20	20	1	220	200	8	420	0.43	14.75
	20	20	1	220	200	10	420	0.67	19.38
	20	20	1	220	100	8	420	0.85	24.23
	20	20	1	220	100	10	420	1.34	27.59

**Şekil 13.** Enine donatı hacimsel oranlarına göre tüm değişken verileri için eğrilik-sünekliği değerleri

## 5. Regresyon Analizi ile Süneklik Hesabı

Değişkenler arasındaki ilişkinin büyüklüğünü ölçmek ve bağımsız değişkenler yardımıyla elde edilen bağımlı değişken değerini kestirmek için excelde çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Burada bağımsız değişkenler sırasıyla eksenel yük yüzdesi, boyuna donatı oranı, boyuna donatı akma dayanımı, enine donatı aralığı, enine donatı çapı, enine donatı akma dayanımı, enine donatı oranı, bağımlı değişken olarak da eğrilik sünekliği değeri alınmıştır. Dört kesit için gerçekleştirilen 512 adet moment-eğrilik analizinden bulunan eğrilik sünekliği sonuçları ile göz önüne alınan parametre değerleri için yapılan regresyon analizi sonuçları Tablo 11’de verilmiştir. Regresyon analizi sonuçlarına bakıldığında değişkenler arasındaki ilişkinin güçlü olduğu görülmektedir.

Regresyon analizi ile ayrıca süneklik değerini denklemlerle elde etmek için denklem katsayıları Tablo 12’deki gibi bulunmuştur. Enine donatı

aralığı ve enine donatı çapı, enine donatı hacimsel oranının hesabında kullanıldığı için süneklik denkleminde bu iki parametre dâhil edilmemiştir. Elde edilen süneklik denkleminde moment-eğrilik analizi yapılmaksızın göz önüne alınan parametreler yardımıyla kesitin eğrilik sünekliği değeri hesaplanabilmektedir (Denklem 12).

$$y = 24.866 - 0.259x_1 - 0.160x_2 - 1.693x_3 - 0.022x_4 + 0.008x_5 + 7.027x_6 \quad (12)$$

Süneklik denkleminin güvenilirliğini test etmek amacıyla daha önce moment-eğrilik analizinden bulunan bazı eğrilik sünekliği değerleri ile denklemden elde edilen süneklik değerleri Tablo 13’de karşılaştırılmıştır. Tablo 13’den görüldüğü üzere moment-eğrilik analizinden ve süneklik denkleminde bulunan değerler birbirine yakındır. Buna göre kesitin eğrilik sünekliği değerleri süneklik denkleminde kullanılan parametreler ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

**Tablo 11.** Regresyon analizi sonuçları

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.91
R Kare	0.83
Ayarlı R Kare	0.82
Standart Hata	1.83
Gözlem	512

**Tablo 12.** Regresyon analizinden elde edilen denklem katsayıları

Katsayılar	
Kesişim	24.866
X Değişkeni 1 (Eksenel Yük Düzeyi)	-0.259
X Değişkeni 2 (Beton Basınç Dayanımı)	-0.160
X Değişkeni 3 ( Boyuna Donatı Oranı)	-1.693
X Değişkeni 4 (Boyuna Donatı Akma Dayanımı)	-0.022
X Değişkeni 5 (Enine Donatı Akma Dayanımı)	0.008
X Değişkeni 6 (Enine Donatı Hacimsel Oranı)	7.027

**Tablo 13.** Denklemden elde edilen eğrilik sünekliği değerlerinin daha önceki değerlerle karşılaştırılması

Kesit	Eksenel Yük Düzeyi	Beton Basınç Dayanımı	Boyuna Donatı Oranı	Boyuna Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Aralığı	Enine Donatı Çapı	Enine Donatı Akma Dayanımı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Eğrilik Sünekliği	Denklemlerle Bulunan Eğrilik Sünekliği Değerleri
	N %	$f_{ck}$ $N/mm^2$	$\rho_t$ %	$f_{yk}$ $N/mm^2$	S mm	$\phi$ mm	$f_{yk}$ $N/mm^2$	$\rho_s$ %	$\mu$	$\mu$
S1	20	20	1	220	100	8	220	1.05	22.75	19.17
	30	30	2	420	200	10	420	0.83	10.62	8.92
S2	20	20	1	220	100	8	220	0.99	19.88	18.75
	30	30	2	420	200	10	420	0.78	10.37	8.59
S3	20	20	1	220	100	8	220	0.91	22.91	18.19
	30	30	2	420	200	10	420	0.72	9.73	8.15
S4	20	20	1	220	100	8	220	0.85	20.72	17.77
	30	30	2	420	200	10	420	0.67	9.18	7.82

Çalışmadan elde edilen gözlem ve bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Tüm değişkenlerin dâhil olduğu ortalama eğrilik sünekliği değerleri S1, S2, S3 ve S4 kesitleri için sırasıyla 14.30, 13.79, 13.98 ve 13.48 hesaplanmıştır. Moment-eğrilik analizleri kolonların uzun boyutları dikkate alınarak gerçekleştirildiği için özellikle uzun yöndeki kolon boyutlarının artması eğilme rijitliğini (EI) daha da arttırdığı için eğrilik değerini azaltmaktadır ( $\phi=M/EI$ ). Bu da ortalama değerlere göre 250x500 mm (S1) kesitinin diğerlerine göre kısmen sünek davrandığını göstermektedir.

## 6. Özet ve Sonuçlar

Betonarme yapı tasarımında yapı sisteminin performansı, yapı elemanlarına ve bu elemanların davranışını etkileyen parametrelere bağlıdır. Bu anlamda yapının düşey taşıyıcı sistem elemanlarının önemli kısmını oluşturan kolonların kesit özellikleri süneklik açısından seçilen tasarım değişkenlerine göre değerlendirilmiştir. Bunun için boyutları 250x500 mm (S1), 300x500 mm (S2), 250x600 mm (S3) ve 300x600 mm (S4) olan 4 adet kolon kesitinin, kolonların davranış özelliklerinin incelenmesi için moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Eksenel yük, beton dayanımı, boyuna donatı oranı, boyuna donatı dayanımı, enine donatı aralığı, enine donatı çapı, enine donatı dayanımı ve enine donatının hacimsel oranı gibi parametrelerin eğrilik sünekliğine olan etkilerini araştırmak için seçilen her iki yönde çirozlu dört kesit analize tabi tutulmuştur. Kolonların uzun boyut doğrultuları dikkate alınarak tek eksen etrafında toplamda 512 adet moment-eğrilik analizi yapılmıştır.

- S1, S2, S3 ve S4 kesitleri için en düşük eğrilik sünekliği değerleri sırasıyla 7.13, 6.82, 6.57 ve 6.32 hesaplanmıştır. Aynı şekilde en yüksek eğrilik sünekliği değerleri 27.42, 27.84, 26.92 ve 27.59 bulunmuştur. Bulunanlara göre tüm kesitler için seçilen parametrelerin eğrilik sünekliğini yaklaşık olarak 4 kata kadar etkilediği görülmektedir.
- Eksenel yük düzeyi %20'den %30'a çıktığında ortalama eğrilik süneklik değerleri tüm kesitler dikkate alındığında %17 oranında azalmaktadır. Sonuçlara bakıldığında eksenel yük düzeyi ile sünek davranış arasındaki ilişkinin ters orantılı olarak değiştiği sonucu çıkarılabilir.

- Beton basınç dayanımının, kesit sünekliği üzerinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Benzer aksel yük miktarı altında beton dayanımının sünekliğe etkisini görebilmek amacıyla aksel yük düzeyinin %30 ve beton dayanımının 20 N/mm<sup>2</sup> olduğu durumlar ile aksel yük düzeyinin %20 ve beton dayanımının 30 N/mm<sup>2</sup> olduğu tüm kesitlerin ortalama değerleri karşılaştırılmıştır. Aynı miktar aksel yük altında beton dayanımının 20'den 30 N/mm<sup>2</sup>'ye çıktığında eğrilik sünekliği değerlerinde %7 oranında artış görülmüştür. Ortalama değerler göz önüne alındığında beton basınç dayanımının sünekliğe etkisi sınırlı kalmaktadır.
- Boyuna donatı oranı %1'den %2'ye çıktığında ortalama eğrilik süneklik değerleri dikkate alınan kesitlerinin tümü için yaklaşık %12 azalmaktadır. Buna göre boyuna donatı oranı ile kesitlerin eğrilik sünekliği arasında ters orantılı bir ilişkinin olduğu sonucuna varılmıştır.
- Boyuna donatı akma dayanımı 220'den 420 N/mm<sup>2</sup>'ye çıktığında ortalama eğrilik süneklik değerleri tüm kesitler göz önüne alındığında %27 oranında düşmektedir. Boyuna donatı ile ilgili olan boyuna donatı oranı ve dayanım değerlerinin artışının süneklik üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu bulunmuştur.
- Enine donatı aralığı 100'den 200 mm'ye çıktığında ortalama eğrilik süneklik değerleri seçilen kesitler için %31 oranında azalmaktadır.
- Enine donatı çapı 8'den 10mm'ye çıktığında ortalama eğrilik süneklik değerleri tüm kesitler göz önüne alındığında %20 artmaktadır.
- Enine donatı akma dayanımının 220'den 420 N/mm<sup>2</sup>'ye çıktığında ortalama eğrilik süneklik değerleri tüm kesitler için %13 artmaktadır.
- S1, S2, S3 ve S4 kesitlerinin sahip olduğu en düşük ve en yüksek enine donatı hacimsel oranı için sırasıyla ortalama eğrilik sünekliği değerlerindeki fark %70, %71, %86 ve %86'ya kadar çıkabilmektedir.
- Süneklik denklemiyle bulunan eğrilik değerleri, moment-eğrilik analizinden bulunan eğrilik değerlerine göre güvenli tarafta kalacak şekilde %5-%20 dolayında düşük hesaplanabilmektedir.
- Enine donatının iyileştiği tüm durumlarda süneklik değerlerinde artış gözlenmiştir.
- Boyuna donatı dayanımı hariç dayanımın arttığı tüm durumlarda eğrilik sünekliği değerleri artmaktadır.

## Kaynakça

- [1] Celep Z., Kumbasar, N. Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı. İstanbul: Beta Dağıtım; 2004.
- [2] Bayülke N. Depreme dayanıklı betonarme ve yığma yapı tasarımı. İzmir: İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi; 2001.
- [3] Meral E. Düşük ve orta yükseklikteki betonarme yapıların sismik deplasman taleplerinin değerlendirilmesi. Denizli: PAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi; 2010.
- [4] Ersoy U., Özcebe G. Betonarme: temel ilkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre hesap. Evrim Yayınevi; 2007.
- [5] Ersoy U., Özcebe G. Sarılmış betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisi analitik bir irdeleme. Teknik Dergi 1998; 9(44): 1799-1827.
- [6] Şenel ŞM., Kaplan H. Farklı uç sargı şekillerinin perde duvarların moment eğrilik davranışı üzerindeki etkilerinin doğrusal olmayan analizi (kuramsal çalışma). Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2002; 8(2): 189-194.
- [7] Cihanlı E, Arslan G. Curvature ductility of unconfined reinforced high-strength concrete beam sections. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences 2009; 27: 139-150.
- [8] Kaltakçı MY., Korkmaz HH., Korkmaz SZ. Basit eğilme etkisindeki betonarme elemanların moment-eğrilik ve tasarım değişkenleri üzerine analitik bir inceleme. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2001; 7(1): 71-80.
- [9] Kolgu S., Peker K.. Betonarme kesit davranışında aksel yük, malzeme modeli ve sargı donatısı oranının etkisi. Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Mayıs 2003.
- [10] Kiracı S., Erdem RT, Bağcı M. Betonarme bir elemanda eğrilik sünekliğinin incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2010; 6(2): 141-154.
- [11] Akkaya A. Betonarme kolon davranışının moment eğrilik ilişkisi ile parametrik olarak incelenmesi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi; 2014.

- [12] Merter O., Uçar T. Betonarme kesitlerin doğrusal elastik ötesi davranışında tüketilen enerjiye boyuna donatı oranının, enine donatı aralığının ve eksenel yükün etkisi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2015; 4(1): 21-39.
- [13] DBYYHY-2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara: Bayındırlık ve İskân Bakanlığı; 2007.
- [14] Priestley MJN., Calvi GM., Kowalsky MJ.. Displacement-based seismic design of structures. Pavia, Italy: IUSS Press; 2007.
- [15] Considere A. Experimental researches on reinforced concrete. New York: McGraw Publishing Co.; 1903.
- [16] Richart FE., Brandtzaeg A., Brown AL. A study of failure of concrete under combined compression stresses. University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin 185 1928.
- [17] Güley EE. Yetersiz sargılanmış kare ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda enine donatı detaylarının sünekliğe etkisi. İstanbul: İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi; 2014.
- [18] Özmen HB., İnel M., Bilgin H. Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2007; 22(2): 375-383.
- [19] Mander JB., Priestley MJN., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering 1988; 114(8): 1804-1825.
- [20] Senel SM., Palanci M. Structural aspects and seismic performance of 1-story precast buildings in Turkey. Journal of Performance of Constructed Facilities 2013; 27(4): 437-449.
- [21] Palanci M. Flexural response prediction of reinforced concrete members based on statistical observations. Arabian Journal for Science and Engineering 2017; 42(9): 3689-3709.
- [22] Hognestad E.. Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois at Urbana Champaign: College of Engineering, Engineering Experiment Station; 1951.
- [23] MacGregor JG. Reinforced concrete: mechanics and design. Prentice Hall; 1992.
- [24] Park R., Paulay T.. Reinforced concrete structures. John Wiley & Sons; 1975.
- [25] İlki A., Fukuta T., Özdemir P. Sargılı beton davranışı ve üç doğrudan oluşan gerilme-şekil değiştirme modeli. İMO Teknik Dergi 2003; 2853-2871.
- [26] Sheikh SA., Uzumeri SM. Strength and ductility of tied concrete columns, Journal of The Structural Division 1980; 106(5).
- [27] Priestley MJN., Park R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading. Structural Journal 1987; 84(1): 61-76.
- [28] Park R., Kent DC., Sampson RA. Reinforced concrete members with cyclic loading, Journal of the Structural Division 1972; 98(7).
- [29] Saatcioglu M., Razvi S.R. Strength and ductility of confined concrete, Journal of Structural Engineering 1992; 118(6): 1590-1607.