



Makale / Research Paper

Sargı Donatısı ve Eksenel Yük Seviyesinin Betonarme Kolonların Eğrilik Süneklik ile Etkin Kesit Rijitliğe Etkisi

Saeid FROUGHI^{1a*}, Rohullah JAMAL^{1b}, Süleyman Bahadır YÜKSEL^{1c}

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

* saeid.froughi@yahoo.com

Received/Geliş: 10.06.2020

Accepted/Kabul: 19.08.2020

Öz: Betonarme elemanların eğrilik sünekliğinin doğru tahmini, sismik yükler altında binaların kapasitesinin güvenilir bir tahminini sağladığı için her zaman çekici bir çalışma konusu olmuştur. Bu çalışmada; malzeme modelinin, eksenel yükün ve sargı donatı oranının betonarme kolonların davranışı üzerindeki etkisi analitik olarak araştırılmıştır. Kare kesitli kolon modelleri tasarlanmıştır. Kolonların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak moment-eğrilik ilişkisinden değerlendirilmiştir. Betonarme kolonların farklı eksenel yük seviyeleri ve sargı donatı oranları için moment eğrilik ilişkileri Mander modeli dikkate alınarak elde edilmiştir. Parametrelerin kolon davranışı üzerindeki incelenen etkileri kesitin mukavemeti, süneklik ve etkin rijitlik açısından değerlendirilmiştir. Tasarlanan betonarme kolon kesitlerde, farklı parametrelerin moment eğrilik ilişkisi, sünekliği ve etkin rijitlik üzerindeki etkisi hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Eksenel yük ve sargı donatı oranının değişiminin, betonarme kolonların moment-eğrilik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Çatlamış kesitin etkin rijitliği sabit olmasa da sargı donatı oranı ve kesit üzerine etki eden eksenel kuvvet gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal olmayan davranış, Moment-eğrilik, Eğrilik süneklik, Etkin rijitlik, Eksenel yük, Sargı donatı.

Effect of Confining Reinforcement and Axial Load Level on Curvature Ductility and Effective Stiffness of Reinforced Concrete Columns

Abstract: The correct estimate of curvature ductility of reinforced concrete members has always been an attractive subject of study as it engenders a reliable estimate of the capacity of buildings under seismic loads. In this study, the effect of the material model, axial load and transverse reinforcement ratio on the behavior of reinforced concrete columns were analytical investigated. Squared cross-section column models have been designed. The behaviors of the columns were evaluated from the moment-curvature relation by taking the nonlinear behavior of the materials into account. The moment-curvature relationships for different axial load levels and transverse reinforcement ratios of the reinforced concrete column cross-sections were obtained considering the Mander confined model. The examined effects of the parameters on the column behavior were evaluated in terms of the strength of the cross-section, ductility and effective stiffness. In the designed column cross-sections, different parameters effecting the moment-curvature relationships, ductility and effective stiffness were calculated and compared. It is observed that the variation of the axial load and transverse reinforcement ratio have an important effect on the moment-curvature behavior, ductility and effective stiffness of the reinforced concrete columns. Although the effective stiffness of the cracked section is not constant, it varies depends on parameters such as the confining reinforcement and axial force acting on the section.

Keywords: Nonlinear behavior, Moment-curvature, Curvature ductility, Effective stiffness, Axial load, Confining reinforcement.

Bu makaleye atf yapmak için

Foroughi, S., Jamal, R., Yüksel, S. B., "Sargı Donatısı ve Eksenel Yük Seviyesinin Betonarme Kolonların Eğrilik Süneklik ile Etkin Kesit Rijitliğe Etkisi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (3); 1309-1319.

How to cite this article

Foroughi, S., Jamal, R., Yüksel, S. B., "Effect of Confining Reinforcement and Axial Load Level on Curvature Ductility and Effective Stiffness of Reinforced Concrete Columns" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (3); 1309-1319.

ORCID: ^a0000-0002-7556-2118, ^b0000-0001-5987-8502, ^c0000-0002-4175-1156

1. Giriş

Önemli depremlere maruz kalan betonarme binaların doğrusal olmayan davranışı ve hasar özelliklerinin anlaşılması, mevcut binaların sismik performansının yanı sıra yeni binaların güvenli ve ekonomik tasarımının değerlendirilmesi için esastır [1]. Betonarme yapılarda, betonarme kolonlar deprem yükleri altında en önemli taşıyıcı sistemlerden biridir. Kolon mekanizmaları depremlerde toptan çökmeyi önlemek için çok önemlidir. Bazı kritik betonarme kolonların hasarı nedeniyle betonarme yapıların objektif performans seviyeleri sağlanamamıştır. Bu nedenle, yapıların davranışlarının belirlenmesi, depreme dayanıklı tasarım için çok önemlidir [2]. Sismik bölgelerde, sünek davranışa sahip yapıların tasarlanması önemlidir [3]. Genel olarak süneklik, bir malzeme, kesit, yapısal eleman veya yapının yük taşıma kapasitesinde büyük bir azalma olmadan aşırı plastik deformasyona uğrama kapasitesi olarak tanımlanır [4]. Betonarme elemanların davranışlarını anlayabilmek için kesitsel davranışın iyi bilinmesi gerekir. Kesitsel davranış moment-eğrilik ilişkisi ile değerlendirilebilir [5]. Basit eğilme için moment-eğrilik ilişkisi iyi çalışılmış bir konudur ve klasik moment-eğrilik diyagramı literatürde yaygın olarak bulunmaktadır [6]. Sismik koşullar altında sünek bir davranış sağlamak için yeterli eğrilik süneklik kapasitesine sahip betonarme bir elemanın tasarlanması arzu edilir. İlk olarak, lineer olmayan davranışların daha iyi anlaşılması için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, sargılı ve sargısız beton modelleri, moment-eğrilik ilişkileri dikkate alınmaktadır [7].

Betonarme yapılarının sismik analizi ve tasarımı doğrusal davranış temel alınarak yapılır. Ancak şiddetli depremler altında çatlamanın etkisi dikkate alınarak doğrusal olmayan analiz yapılmaktadır [8]. Betonarme elemanlarının rijitliğini azaltan betondaki çatlaklar, elemanların donatı ve taşıma kapasitesinin akmasına karşılık gelenlerden çok daha küçük yüklerde ortaya çıkar [9]. Beton çatlama, betonarme elemanlarının eğilme ve kayma rijitliğini azaltır. Bu nedenle, betonarme yapıların çatlama etkisi dikkate alınmadan analiz etmek gerçek davranışı temsil etmeyebilir [10].

1.1. Literatür Özeti

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür taramasında, yapılan çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir. Bedirhanoglu ve İlki [11], betonarme kesitlerde analitik moment eğrilik ilişkilerini farklı sargılı beton modelleri kullanarak incelemişlerdir. Elde edilen teorik moment-eğrilik ilişkileri daha sonra literatürde bildirilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Analitik sonuçlar, deneysel moment-eğrilik ilişkileri ile karşılaştırılmış, analitik ve deneysel moment-eğrilik ilişkileri dikkate alınan tüm sargılı beton modeller için makul bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Parametrik çalışma sonucunda, incelenen kesitlerin özelliklerine göre farklı sargılı beton gerilme-şekil değiştirme modellerinin etkisi özellikle eksenel yük seviyesi daha yüksek olduğunda önemli miktarda değiştiği görülmüştür.

Foroughi ve Yüksel [12], malzeme modelinin, eksenel yük seviyesinin, boyuna donatı oranının, sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığının kare en-kesitli betonarme kolon davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Eğrilik süneklikleri ve kesit kuvvetleri karşılaştırılarak parametrelerin davranışsal etkilerini incelemişlerdir. Sargı donatı çaplarının ve sargı donatı aralığının kolon kesitlerinin süneklik kapasiteleri üzerinde etkili parametreler olduğu bulunmuştur. Eksenel yük, kesitin sünekliğini etkileyen çok önemli bir parametre olduğu ve eksenel yükün azalmasıyla kolon kesitlerinin sünekliğinin arttığı görülmüştür.

Foroughi ve Yüksel [13], eksenel yük, boyuna donatı çapı, sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığının değişiminin farklı kare, dikdörtgen ve dairesel en-kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkisine olan etkisini incelemiştir. İncelenen parametrelerin kolon davranışına etkileri, eğrilik sünekliği ve kesit dayanımı açısından değerlendirilmiştir. Tasarlanan betonarme kolon kesitlerde, farklı parametrelerin moment eğrilik ilişkisi üzerindeki etkisi hesaplanarak

karşılaştırılmıştır. Eksenel yük, boyuna donatı çapı, sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığının değişiminin, betonarme kolonların moment-eğrilik davranışı, eğrilik sünekliği ve kesit dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Baran ve Dinçer [14], betonarme kolonların bileşik eğilme ve eksenel yük altında sünekliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki kolonların sünekliklerinin karşılaştırılabilmesi için değişik kriterler belirlenmiştir. Karşılaştırma şeklinde de elemanların moment-eğrilik davranışları dikkate alınmıştır. Sargı donatılı kolonlarda sünek bir davranış elde edebilmek için, sargı donatı aralığı ile ilgili limitler önermişlerdir. Sargı aralığı oranının artması, kolonların moment-eğrilik ile süneklik davranışları üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Meral [15], çalışma kapsamında eksenel yük, beton basınç dayanımı, boyuna ve enine donatı oranlarının betonarme kolonların eğrilik sünekliğine olan etkileri araştırılmıştır. Boyuna ve enine donatı oranlarının arttığı tüm durumlarda eğrilik sünekliği değerleri artmaktadır. Beton basınç dayanımının, kesit sünekliği üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında eksenel yük düzeyi ile sünek davranış arasındaki ilişkinin ters orantılı olarak değiştiği sonucu çıkarılmıştır.

Jun ve Hui [16], çalışmaları betonarme elemanların moment-eğrilik ilişkisi üzerine yürütülmüştür. Eğilme momenti ve eğrilik üzerindeki etkileri gözlemlemek için beş farklı kesit dikkate almışlardır. Analizlerden, kesit boyutundaki artışla birlikte, kabuk betonunda çatlama, akma ve kırılma durumları için moment ve eğrilik değerleri elde edilmiştir. Eğilme momenti-eğrilik analiz sonuçlarından, enine kesit atalet momentinin artmasıyla birlikte eğilme momenti ve eğrilik arttığını ve kesitlerin çatlama, akma ve kırılma kapasitesinin arttığı görülmektedir.

Aydemir ve Zorbozan [17], kolon eğilme momenti kapasitesini etkileyen parametrelerin istatistik dağılımlarını dikkate alarak, bu parametrelerdeki belirsizliklerin eğilme momenti kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Analitik moment-eğrilik ilişkileri farklı parametrelere göre sayısal olarak modellenmiştir. Beton ve donatı çeliği sınıflarının değişmesi ile kolonların taşıma gücü momenti üzerindeki etkileri, sadece yüksek eksenel yük düzeylerinde bir miktar büyük olmakla beraber genelde sınırlı olmaktadır. Donatı düzeni ve kesit boyutlarındaki değişmesi kolon taşıma gücü üzerinde meydana getirdiği değişkenlikler genelde sınırlıdır. Kesit geometrisindeki farklılığın etkileri ise, boyuna donatı oranının artmasıyla belirginleşmekle birlikte, donatı oranının küçük değerleri için genelde sınırlı olmaktadır.

Kumar vd., [18], olasılıklı sismik risk değerlendirmesi için düşünülen referans betonarme yapısal elemanlar için dikdörtgen betonarme giriş ve kolon kesitleri için doğrusal olmayan eksenel kuvvet ve moment-eğrilik ilişkilerinin araştırılmasını vurgulamıştır. Betonarmenin moment-eğrilik davranışını simüle etmek için analitik bir model sunulmuştur. Sabit bir eksenel yük veya deformasyon artışlarının kontrolü ile önerilen model, moment-eğrilik eğrisinin hem yükselen hem de azalan eğrilerini hesaplamak için kullanılabilir. Moment-eğrilik ilişkileri, iki veya üç boyutlu betonarme çerçevelerin limit analizi çalışmasında önemli bir rol oynar.

Sheikh vd., [19], çok sayıda kolonun moment-eğrilik analizlerine dayanarak normal ve yüksek mukavemetli dairesel betonarme kolonlar için etkili akma eğriliğini tahmin etmek için basit ifadeler sunmuştur. Akma eğriliği, kesitin boyutundan, eksenel yük seviyesinden, betonun dayanımından, boyuna donatı oranından ve beton örtüsünden etkilenir. Beton örtü (kabuk beton) önemsiz bir etkiye sahip olduğundan, etkili akma eğriliğinin doğru tahmininin, etkili derinlikten (faydalı yükseklik) ziyade brüt kesitin çapı cinsinden ifade edildiğinde elde edilebileceği görülmüştür. Boyuna takviye oranı, etkili akma eğriliği üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Bu nedenle, etkili akma eğriliği, boyuna donatı oranının etkisi açıkça dikkate alınmadan makul şekilde tahmin edilebilir. Bununla

birlikte, boyuna donatının etkisi, mevcut kolonların doğru performans değerlendirmesi için önemli olabilir.

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip kare en-kesitli betonarme kolonlar tasarlanmıştır. Farklı eksenel yük seviyesi ile sargı donatısı oranının tasarlanan betonarme kare kolonların davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tasarlanan betonarme kolonların boyuna donatısı ve beton sınıfı sabit olarak alınmıştır. Betonarme kolon modellerinin davranışı moment eğrilik ilişkisi ile incelenmiştir. İncelenen parametrelerin davranışa etkileri, akma ve maksimum durumunda moment ve eğrilik değerleri, eğrilik sünekliği ve etkin rijitlik değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Farklı parametrelerde tasarlanan kare en-kesitli betonarme kolon modelleri için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri karşılaştırarak yorumlanmıştır. Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışları dikkate alınarak analizler SAP2000 [20] programında gerçekleştirilmiştir. SAP2000 programında malzeme modelleri, sargılı ve sargısız beton modelleri için Mander modeli [21] dikkate alınarak tanımlanmıştır. Ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde, betonarme yapıların sismik performansı belirlenirken, tasarım aşamasında betonarme yapısal elemanlarda çatlamış kesitin etkin rijitliklerinin kullanılması istenmektedir. Betonarme kolonların etkin rijitliği (EI_e), bu çalışmada moment-eğrilik grafiğinin başlangıç bölümünün eğimi olarak tanımlanmıştır. Bu tanım hem çatlamanın etkilerini hem de betonarme kesitlerinin teorik olarak akmasını yansıtır. Betonarme elemanlarındaki çatlamış kesitin etkin rijitliği, moment-eğrilik ilişkisi dikkate alınarak akma momentine ve akma eğrisine karşılık gelen oran ile belirlenmiştir. Çatlakların etkisini ve betonarme kesitlerinin teorik akmasını yansıtan etkin rijitliği etkileyen en önemli parametreler, betonarme kesitlerin kapsamlı moment eğrilik analizleri ile belirlenir. Etkin rijitlik sadece çatlamanın etkisini değil, aynı zamanda moment-eğrilik analizlerinden belirlenen betonarme elemanların davranışını da yansıtır.

2. Moment-Eğrilik

Moment-eğrilik ilişkisi, kesit mukavemeti, eğilme rijitliği ve kesit sünekliğini tahmin etmek için yapıların elastik olmayan analizi için esastır. Betonarme kolonlar için, teorik moment-eğrilik analizi, hem beton hem de donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin bilinmesi durumunda yapılabilir. Betonarme elemanların momenti-eğrilik ilişkisinin doğru belirlenmesi, sismik yüke maruz yapıların yük kapasitesinin güvenilir bir göstergesidir. Moment-eğrilik ilişkileri, malzemelerin doğrusal olmayan davranışını dikkate alan SAP2000 [20] programı ile elde edilmiştir. Betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkilerinin hesaplanması ve farklı parametrelere göre betonarme kolonların sünekliği ile etkin kesit rijitlikleri aşağıdaki paragraflarda hesaplanmıştır.

3. Materyal ve Metot

Depreme dayanıklı yapı tasarımının rijitlik, dayanım ve süneklik olmak üzere üç ana temel prensibi vardır. Bu çalışmanın amacı, 35 farklı betonarme kolonun farklı parametreler için moment-eğrilik ilişkisi, eğrilik sünekliği ve etkin eğilme rijitliklerini belirlemek için gerekli analizlerin yapılmasıdır. Betonarme kolon kesit hesabı ve tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elde kesitteki boyuna donatı oranının, TS500'e [22] göre %1'den %4 arasında olmasını sağlamaktır. Betonarme kolonlarda sünek davranışın sağlanabilmesi için bu koşul yönetmeliklerce zorunlu olduğu için bu çalışmada TS500'de verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. Farklı beton basınç dayanımı, eksenel yük seviyesi ve sargı donatısı oranlarına sahip 35 farklı kare en-kesitli betonarme kolon analiz edilmiştir. Betonarme kolon modellerinin tasarımında TS500 [22] ve TBDY'de [23] verilen hükümler dikkate alınmıştır. Her betonarme kolon modeli için beş farklı eksenel yük seviyesi, yedi farklı sargı donatı aralığı (50mm, 75mm, 100mm, 125mm, 150mm, 175mm ve 200mm) kullanılmıştır. Boyuna donatı çapı (8Φ22) ve sargı donatı çapı (Φ8mm) sabit olarak dikkate alınmıştır. Tüm betonarme kolon modelleri için, beton sınıfı olarak C30 ve donatı çeliği olarak B420C seçilmiştir. Betonarme kolonlar için yapılan analitik çalışmada

TBDY (2018)'de [23] beton ve donatı için verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır (Tablo 1). Tasarım parametrelerinin incelenmesi için analizlerde dikkate alınan kolon kesiti 400mm×400mm boyutlarında olup Şekil 1'de kesit geometrisi ve donatı yerleşim planı verilmiştir. Tasarlanan kolon modellerine ait parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 1'de, A_s ; boyuna donatı alanını, b ve h sırasıyla kolon en-kesit genişliği ve yüksekliğidir.

Kombine eğilme altındaki bir kesitin moment-eğrilik ilişkileri, eksenel yük seviyelerine bağlıdır. 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 [23]. Betonarme kolon kesitlerinde, $N_{max} = A_c \times f_{ck}$ olmak üzere N/N_{max} oranının 0.0, 0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri için moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir.

Tasarlanan betonarme kolon modellerinin moment-eğrilik ilişkileri elde edilerek gerekli hesaplar ve incelemeler yapılmıştır. Farklı eksenel yük seviyeleri ve farklı sargı donatı oranları için analizlerden elde edilen moment-eğrilik grafikleri karşılaştırmalı olarak tablo ve grafikler halinde sunulmuştur. Betonarme kolonların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak moment-eğrilik ilişkileri SAP2000 [20] programı ile elde edilmiştir. Her bir kesit analizi betonarme kolon kesitlerinin eğrilik sünekliği ve etkin kesit rijitliğini değiştirebilecek kriterlere göre karşılaştırılmıştır. Moment-eğrilik ilişkileri farklı modeller için elde edilmiştir ve eğriler karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Tasarlanan kolon kesitleri için moment-eğrilik ilişkileri farklı eksenel yük seviyesi ve sargı donatı aralığı için sunulmuştur. Akma eğrilikleri (k_y) ve nihai eğrilikler (k_u) kullanılarak eğrilik süneklik (μ) değerleri hesaplanmıştır. Sayısal olarak eğrilik sünekliği (μ) ve eğrilik süneklik oranı (μ_0) Denklem (1) ile ifade edilir.

$$\mu = \frac{k_u}{k_y}, \quad \mu_0 = \frac{\mu_{0-i}}{\mu_{0-1}} \quad (1)$$

Yönetmeliklerde yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde tasarım aşamasında betonarme taşıyıcı elemanlarda çatlamış kesite ait etkin kesit rijitliklerinin kullanılması istenmektedir. Betonarme kesitlerde çatlamış kesite ait etkin kesit rijitlikleri (EI_e), moment-eğrilik eğrilik ilişkisi göz önüne alınarak, akma momenti (M_y) ve akma eğriliğine (ϕ_y) karşılık gelen oranı (M_y/ϕ_y) ile belirlenir. EI_e sabit olmayıp ve kesitin boyutu, beton dayanımı ve kesite etkiyen eksenel kuvvet gibi parametrelere bağlıdır. Betonarme kolonların brüt atalet momenti (I) ve betonun elastisite modülü (E_c) değerleri kullanılarak çatlamamış kesit rijitlikleri (EI) hesaplanmıştır. Beton sınıfları için TS500'de [22] verilen beton karakteristik basınç dayanımlarına (f_{ck}) göre E_c değerleri hesaplanmıştır ($E_c = 3250 + \sqrt{f_{ck}} + 14000$). Betonarme taşıyıcı sistemlerin etkin kesit rijitliklerinin hesaplanmasında, gerçekçi yollardan birisi de moment-eğrilik ilişkilerinin kullanılmasıdır. Betonarme elemanların etkin rijitlik katsayısı; $k_e = EI_e/EI$ olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan etkin eğilme rijitliğe göre betonarme kolonların farklı parametreler için etkin eğilme rijitlik oranları (EI_0) Denklem (2) ile hesaplanmıştır. Denklem (2)'de EI_{e-1} ; eksenel basınç kuvveti olmayan ($N=0$) betonarme kolonların etkin eğilme rijitliği değeri, EI_{e-i} ; 4 farklı eksenel basınç kuvvetine sahip olan kolonların etkin eğilme rijitliği değerleridir.

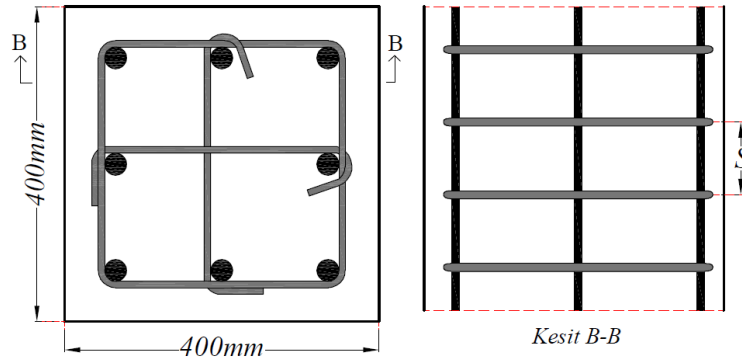
$$EI_0 = \frac{EI_{e-i}}{EI_{e-1}} \quad (2)$$

Betonarme kolon kesitlerinde moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen akma ve kırılma durumları için moment (M_y , M_u) değerlerine göre farklı parametrelere sahip kolon modelleri için M_{yi}/M_{y1} ve M_{ui}/M_{u1} değerleri hesaplanmıştır. M_{y1} ve M_{u1} ; eksenel basınç kuvveti olmayan ($N=0$) betonarme

kolonların akma ve kırılma momentleridir. M_{yi} ve M_{ui} ; 4 farklı eksenel basınç kuvvetine sahip olan kolonların akma ve kırılma momentleridir.

Tablo 1. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler [23]

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C30	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekil-değiştirilmesi (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	30MPa
	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirilmesi (ϵ_{sy})	0.0021
Donatı Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirilmesi (ϵ_{sp})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirilmesi (ϵ_{su})	0.08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa



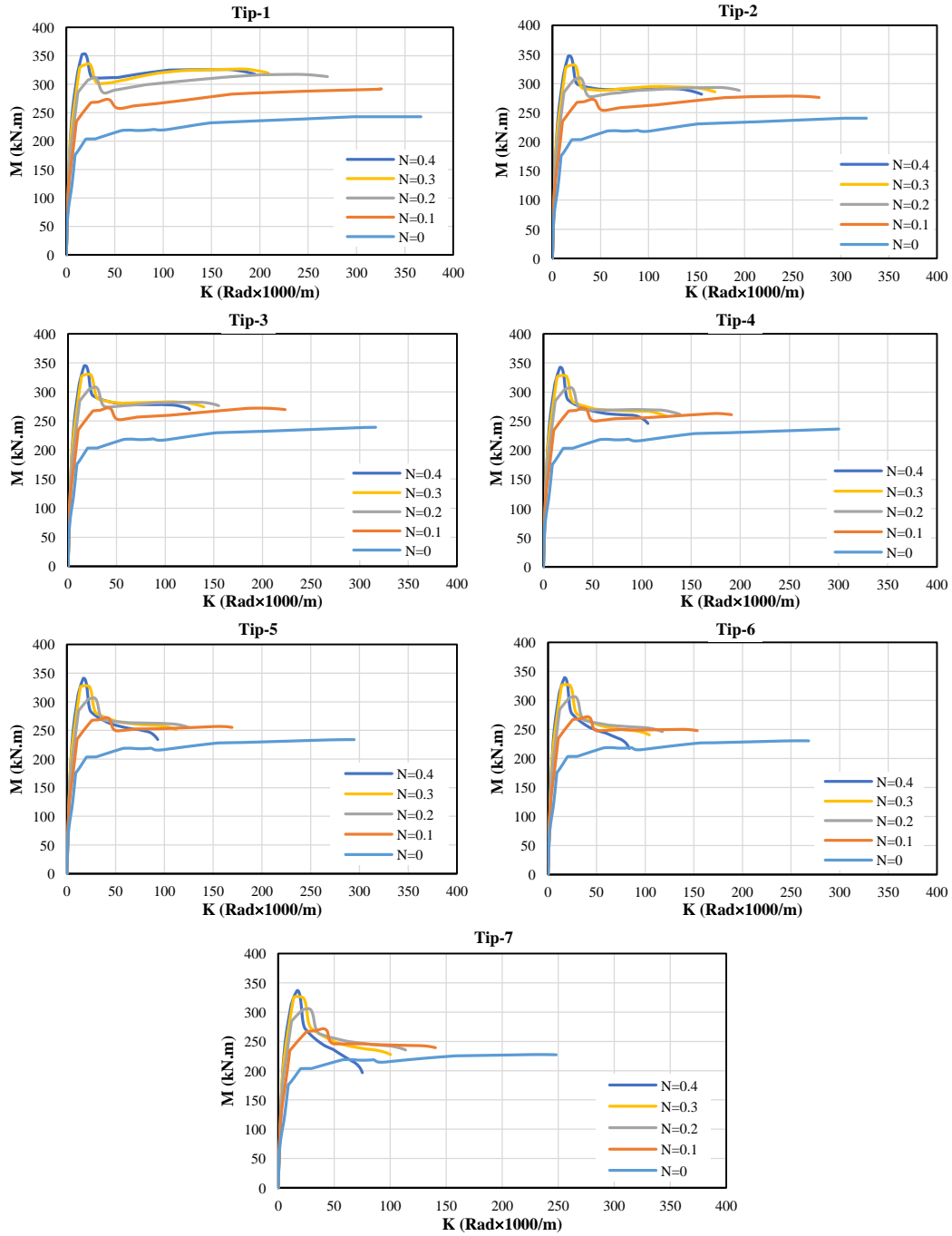
Şekil 1. Tasarlanan kolon modellerinin en-kesit detayları

Tablo 2. Tasarlanan kolon modellerine ait parametreler

Kesit Tip	Beton Sınıfı	Boyuna donatı	Eksenel yük	Sargı donatı
Tip-1				Φ8/50mm
Tip-2				Φ8/75mm
Tip-3			0.0	Φ8/100mm
Tip-4	C30	8Φ22mm	0.1N _d	Φ8/125mm
Tip-5			0.2N _d	Φ8/150mm
Tip-6			0.3N _d	Φ8/175mm
Tip-7			0.4N _d	Φ8/200mm

4. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Bu çalışmada, betonarme kare kolonların davranışını belirlemek için betonarme elemanların tasarım parametreleri araştırılmıştır. TS500 [22] ve TBDY'ye [23] göre tasarlanan kolonların moment eğrilik ilişkilerini oluşturmak için SAP2000 [20] programı ile analiz edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, moment-eğrilik ilişkileri sargı donatı aralığı ve eksenel yük seviyesi değiştirilerek elde edilmiştir. Sayısal model, 35 farklı betonarme kolonun eğrilik sünekliğini analiz etmek için kullanılmıştır. Betonarme kare kolonların moment-eğrilik ilişkileri belirlenmiş ve sonuçlar grafiklerde hazırlanmıştır (Şekil 2). Önemli değişkenlerin moment eğrilik eğrileri üzerindeki etkileri aşağıdaki paragraflarda ele alınmıştır.



Şekil 2. Tasarlanan kolon modellerine ait karşılaştırmalı moment eğrilik grafikleri

Betonarme kolon kesitlerinin moment-eğrilik ilişkilerinden kesitte oluşan hasar bölgelerinin sınırları farklı parametreler için irdelenmiştir. Betonarme kolon kesitlerinde akma ve maksimum durumları için moment (M_y , M_u) ve eğrilik (K_y , K_u) değerleri, M_{yi}/M_{y1} oranları, M_{ui}/M_{u1} oranları, etkin eğilme rijitlikleri (El_e), etkin eğilme rijitlik oranları (El_0), eğrilik sünekliği (μ) ve eğrilik süneklik oranları (μ_0) Tablo 3-9’da özetlenmiştir. Eğrilik sünekliği (μ) ve eğrilik süneklik oranları (μ_0) Denklem (1), etkin eğilme rijitlikleri (El_e) Denklem (2) ile hesaplanmıştır. Tablolarda moment (M_y , M_u) değerleri; kNm , eğrilik (K_y , K_u) değerleri $Rad \times 10^3/m$ ve Etkin eğilme rijitliği (El_e); $kN.m^2$ olarak verilmiştir. Eksenel yük oranının (N/N_{max}) moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve k_e değerleri üzerinde etkisi incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Tip-1 kolon modellerine ait analiz sonuçları

Kesit No	N/N _{max}	Akma anında			Kırılma anında			EI _e	EI ₀	μ	μ ₀
		M _y	K _y	M _{yi} /M _{y1}	M _u	K _u	M _{ui} /M _{u1}				
Tip 1	0	176.0	9.1	1.00	248.8	372.8	1.00	19341	1.0	41.0	1.0
	0.1	234.5	10.6	1.33	292.2	305.2	1.17	22123	1.14	28.8	0.70
	0.3	284.3	12.2	1.62	317.8	240.1	1.28	23303	1.20	19.7	0.48
	0.4	326.8	14.0	1.86	336.2	208.8	1.35	23343	1.21	14.9	0.36
	0.5	397.3	16.2	2.00	354.8	195.0	1.43	24525	1.27	12.0	0.29

Tablo 4. Tip-2 kolon modellerine ait analiz sonuçları

Kesit No	N/N _{max}	Akma anında			Kırılma anında			EI _e	EI ₀	μ	μ ₀
		M _y	K _y	M _{yi} /M _{y1}	M _u	K _u	M _{ui} /M _{u1}				
Tip 2	0	175.4	9.05	1.00	243.5	340.8	0.98	19381	1.0	37.7	0.92
	0.1	234	10.55	1.33	286.4	260.1	1.15	22180	1.15	24.7	0.6
	0.3	283.9	12.15	1.61	312.7	189.5	1.26	23366	1.21	15.6	0.38
	0.4	326	13.95	1.85	333.2	164.2	1.34	23369	1.21	11.8	0.29
	0.5	396.9	16.15	1.96	349.9	150.1	1.41	24576	1.27	9.3	0.23

Tablo 5. Tip-3 kolon modellerine ait analiz sonuçları

Kesit No	N/N _{max}	Akma anında			Kırılma anında			EI _e	EI ₀	μ	μ ₀
		M _y	K _y	M _{yi} /M _{y1}	M _u	K _u	M _{ui} /M _{u1}				
Tip 3	0	174.8	9	0.99	241,3	321,5	0,97	19422	1,0	35,7	0,87
	0.1	233,8	10,5	1,33	282,1	220,4	1,13	22267	1,15	21,0	0,51
	0.3	283,7	12,1	1,61	309,7	161,2	1,24	23446	1,21	13,3	0,33
	0.4	325,6	13,9	1,85	330,5	140,3	1,33	23425	1,21	10,1	0,25
	0.5	396,5	16,1	1,94	346,4	125,7	1,39	24627	1,27	7,8	0,19

Tablo 6. Tip-4 kolon modellerine ait analiz sonuçları

Kesit No	N/N _{max}	Akma anında			Kırılma anında			EI _e	EI ₀	μ	μ ₀
		M _y	K _y	M _{yi} /M _{y1}	M _u	K _u	M _{ui} /M _{u1}				
Tip 4	0	174.2	8.95	0.99	237.1	305.4	0.95	19464	1.01	34.1	0.83
	0.1	233.6	10.45	1.33	278.4	191.1	1.12	22354	1.16	18.3	0.45
	0.3	283.5	12.05	1.61	307.6	138.7	1.24	23527	1.22	11.5	0.28
	0.4	325.2	13.85	1.85	327.8	121.5	1.32	23480	1.21	8.8	0.21
	0.5	396.0	16.05	1.92	344.8	104.6	1.39	24673	1.28	6.5	0.16

Tablo 7. Tip-5 kolon modellerine ait analiz sonuçları

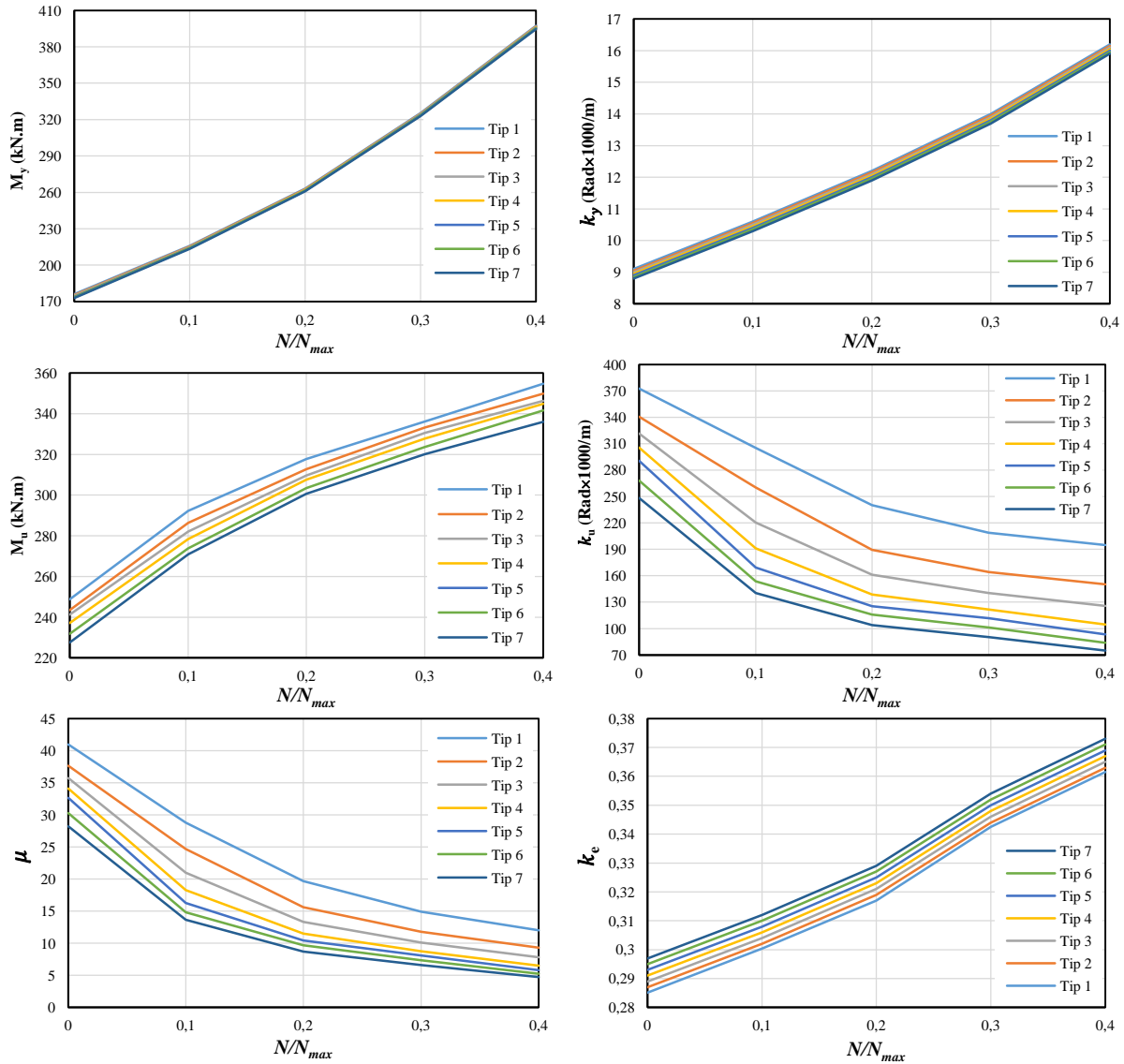
Kesit No	N/N _{max}	Akma anında			Kırılma anında			EI _e	EI ₀	μ	μ ₀
		M _y	K _y	M _{yi} /M _{y1}	M _u	K _u	M _{ui} /M _{u1}				
Tip 5	0	173.8	8.9	0.99	233.9	290.6	0.94	19528	1.01	32.7	0.80
	0.1	233.4	10.4	1.33	275.3	169.4	1.11	22442	1.16	16.3	0.40
	0.3	283.3	12	1.61	304.5	125.4	1.22	23608	1.22	10.5	0.26
	0.4	324.8	13.8	1.85	324.3	111.9	1.30	23536	1.22	8.1	0.20
	0.5	395.7	16	1.91	342.4	93.2	1.38	24731	1.28	5.8	0.14

Tablo 8. Tip-6 kolon modellerine ait analiz sonuçları

Kesit No	N/N _{max}	Akma anında			Kırılma anında			EI _e	EI ₀	μ	μ ₀
		M _y	K _y	M _{yi} /M _{y1}	M _u	K _u	M _{ui} /M _{u1}				
Tip 6	0	173.4	8.85	0.99	231.9	268	0.93	19593	1.01	30.3	0.74
	0.1	233.2	10.35	1.33	273.9	153.6	1.10	22531	1.16	14.8	0.36
	0.3	283.2	11.95	1.61	303.4	115.7	1.22	23699	1.23	9.7	0.24
	0.4	324.5	13.75	1.84	323.6	101.3	1.30	23600	1.22	7.4	0.18
	0.5	395.2	15.95	1.90	341.6	83.7	1.37	24777	1.28	5.3	0.13

Tablo 9. Tip-7 kolon modellerine ait analiz sonuçları

Kesit No	N/N_{max}	Akma anında			Kırılma anında			EI_e	EI_o	μ	μ_o
		M_y	K_y	M_{yi}/M_{y1}	M_u	K_u	M_{ui}/M_{u1}				
Tip 7	0	173	8.8	0.98	227.5	248.2	0.91	19659	1.02	28.2	0.69
	0.1	233	10.3	1.32	270.9	140.5	1.09	22621	1.17	13.6	0.33
	0.3	283	11.9	1.61	300.7	103.8	1.21	23782	1.23	8.7	0.21
	0.4	324.1	13.7	1.84	320.1	90.3	1.29	23657	1.22	6.6	0.16
	0.5	394.7	15.9	1.89	336	75.1	1.35	24824	1.28	4.7	0.12



Şekil 3. Eksenel yük oranının (N/N_{max}) moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve k_e değerleri üzerinde etkisi

5. Sonuç

Analizleri yapılan betonarme kare en-kesitli kolonların moment eğrilik ilişkileri SAP2000 programı ile sargı donatısının oranı ve eksenel yük seviyesi değiştirilerek elde edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, eksenel yük ve sargı donatısının varyasyonunun, betonarme kesitlerin moment-eğrilik davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, sargı donatı aralığı ve eksenel yük seviyesinin artışı her bir betonarme kolon için elemanların akma ve kırılma durumları için moment ve eğrilik değerlerini etkilemektedir.

Sargı donatı aralığının artması ile kolonların akma momenti ve akma eğriliği nerdeyse sabit kalmaktadır. Bu durum için maksimum moment kapasiteleri ve maksimum eğrilik değerleri azalmaktadır. Moment-eğrilik grafiklerinden görülebileceği gibi, sabit eksenel yük seviyesi için sargı donatı aralığının artması ile kesit sünekliğinin azaldığı gözlenmektedir. Sargı donatı aralığının azaltılması ile moment taşıma kapasiteleri, kesit sünekliği ve eğriliğin önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Betonarme kolonlarda eğrilik sünekliğinin artması nedeniyle daha sünek davranış elde edilir. Betonarme kesitin gerçek davranışını görmek için, sargı donatı oranını dikkate alan bir beton modeli kullanılmalıdır.

Eksenel yük seviyesi kolon kesit sünekliğini etkileyen çok önemli bir parametredir. Moment-eğrilik ilişkilerinden görüleceği gibi, sabit sargı donatısı oranı için eksenel yük ($N/N_{max} \geq 0$) oranının artmasıyla kolonların sünekliği azalmaktadır. Bununla birlikte, aynı sabit sargı donatısı oranları için eksenel yük seviyesi küçük olduğunda, kolonlarda yüksek süneklik değerleri elde edilmektedir.

Eksenel yük seviyesindeki artış, genellikle kolonların moment kapasitesini arttırmasına rağmen, maksimum eğrilik değerlerinin azalmasına neden olur. Eksenel yükün kesitsel davranışlar üzerindeki etkisi, sargı donatı aralığının minimum olduğu kesitlerde daha belirgindir. Betonarme kolonlarda eksenel yük seviyesinin artması ile akma eğriliği, akma ve maksimum moment değerleri artmakta, maksimum eğrilik değeri azalmaktadır.

Betonarme taşıyıcı sistemlerin etkin kesit rijitliklerinin hesaplanmasında, gerçekçi yollardan birisi de moment-eğrilik ilişkilerinin kullanılmasıdır. Betonarme kolonlarda çatlamış kesite ait etkin kesit rijitlikleri, moment-eğrilik eğrilik ilişkisi göz önüne alınarak, akma momentinin akma eğriliğine oranı olarak elde edilmiştir. Etkin kesit rijitliği sabit olmayıp sargı donatısı oranına ve kesite etkileyen eksenel kuvvet gibi parametrelere bağlıdır. Betonarme kolonlarda eksenel yük seviyesi ve sargı donatı aralığının artmasıyla hesaplanan etkin eğilme rijitliği artmaktadır. Hesaplanan etkin eğilme rijitliği ve çatlamamış kesit eğilme rijitliklerinden hesaplanan etkin eğilme rijitlik katsayısı (k_e); eksenel yük seviyesi ve sargı donatı aralığının artması ile artmaktadır.

Kaynaklar

- [1]. Uçar, T., Merter, O., and Duzgun, M., Determination of lateral strength and ductility characteristics of existing mid-rise RC buildings in Turkey, *Computers and Concrete*, 2015, 16(3): 467-485.
- [2]. Dok, G., Ozturk, H., and Demir, A., Determining Moment-Curvature Relationship of Reinforced Concrete Columns, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics (EPSTEM)*, 2017, 1: 52-58.
- [3]. Youcef, S. Y., And Chemrouk, M., Curvature Ductility Factor of Rectangular Sections Reinforced Concrete Beams, *World Academy of Science, International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2012, 6(11): 971-976.
- [4]. Arslan, G., and Cihanli, E., Curvature ductility prediction of reinforced High-strength concrete beam sections, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, 16(4): 462-470.
- [5]. Caglar, N., Demir, A., Ozturk, H., and Akkaya, A., A new approach to determine the moment-curvature relationship of circular reinforced concrete columns, *Computers and Concrete*, 2015, 15(3): 321-335.
- [6]. Petschke, T., Corres, H., Ezeberry, J. I., Pérez, A., and Recupero, A., Expanding the classic moment-curvature relation by a new perspective onto its axial strain, *Computers and Concrete*, 2013, 11(6): 515-529.
- [7]. Foroughi, S., and Yuksel, S. B., Moment Curvature Relationship of Square Columns, *International Congress on Engineering and Architecture, (ENAR)*, Alanya, Turkey, 2018, 681-688.

- [8]. Pique, J. R., and Burgos, M., Effective Rigidity of Reinforced Concrete Elements in Seismic Analysis and Design, The 14th World Conference on Earthquake Engineering 12-17 October, Beijing, China, 2008.
- [9]. Vidović, D., Grandić, D., and Šćulac, P., Effective Stiffness for Structural Analysis of Buildings in Earthquake, 4th International Conference Civil Engineering-Science and Practice, Žabljak, 2012, 811-818.
- [10]. Çağlar, N., Demir, A., Öztürk, H., and Akkaya, A., A Simple Formulation for Effective Flexural Stiffness of Circular Reinforced Concrete Columns, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015b, 38: 79-87.
- [11]. Bedirhanoglu, I., and Ilki, A., Theoretical Moment-Curvature Relationships for Reinforced Concrete Members and Comparison with Experimental Data, Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering, 6-8 October 2004 Bogazici University, Istanbul, Turkey, 2004, 231-240.
- [12]. Foroughi, S., and Yuksel, S. B., Investigation of the Moment-Curvature Relationship for Reinforced Concrete Square Columns, Turkish Journal of Engineering (TUJE), 2020a, 4(1): 36-46.
- [13]. Foroughi, S., and Yüksel, S. B., Analytical Investigation of Curvature Ductility of Reinforced Concrete Columns, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 2020b, 25(1): 27-38.
- [14]. Baran, M., ve Dinçer, S., Fretli Kolonlarla İlgili Deneysel Bir Çalışma, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2011, 26(2): 389-399.
- [15]. Meral, E., Yapısal Parametrelerin Betonarme Kolonların Eğrilik Sünekliğine Etkileri, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2018, 1(1): 28-43.
- [16]. Jun, J., and Hui, W., The Relationship Between Moment and Curvature and the Elastic-Plastic Seismic Response Analysis of High Pier Section, The Open Mechanical Engineering Journal, 2015, 9(1): 892-899.
- [17]. Aydemir, C., Ve Zorbozan, M., Betonarme Kolonların Olası Eğilme Momenti Kapasitelerinin Belirlenmesi İçin Bir Yöntem, İMO Teknik Dergi, 2012, 23 (112), 5903-5930.
- [18]. Kumar, C. M. R., Choudhary, V., Narayan, K S B., and D. Reddy, V., Moment Curvature Characteristics for Structural Elements of RC Building, Journal on Today's Ideas - Tomorrow's Technologies, 2014, 2(1): 13-29.
- [19]. Sheikh, M. N., Tsang, H. H., McCarthy, T. J. and Lam, N. T. K., Yield curvature for seismic design of circular reinforced concrete columns, Magazine of Concrete Research, 2010, 62(10): 741-748.
- [20]. SAP2000, Structural Software for Analysis and Design, Computers and Structures, Inc, USA.
- [21]. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [22]. TS500., Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, 2000, Ankara, Türkiye.
- [23]. TBDY., Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 2018, Ankara, Türkiye.