



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.04.2025
Kabul Tarihi : 26.05.2025

Received Date : 01.04.2025
Accepted Date : 26.05.2025

YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONARME KOLONLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF HIGH STRENGTH REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Kağan SÖĞÜT¹* (ORCID: 0000-0002-0601-6420)

¹ Kilis 7 Aralık Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kağan SÖĞÜT, kagan.sogut@kilis.edu.tr

ÖZET

Betonarme etriyeli kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi, temel olarak enkesit boyutlarına, betonun basınç dayanımına ve boyuna donatı oranına bağlıdır. Yüksek mukavemetli betonlar hem dayanım hem de durabilite bakımından önemli avantajlar sağlamaktadırlar. Halihazırda, özellikle yüksek mukavemetli betonarme kolonların davranışı tam olarak anlaşılamamış olup literatürde eksiklikler bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı yüksek mukavemetli betonarme kolonların eksenel basınç altındaki davranışını anlamak için sonlu elemanlar modeli geliştirilerek parametrik çalışmalar yürütmektir. Bu kapsamda dikkate alınan parametreler; beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve enkesit boyutlarıdır. Ayrıca mevcut yönetmelik tahminlerinin değerlendirilmesi de gerçekleştirilmiştir. Beton basınç dayanımının 50 MPa' dan 100 MPa' a çıkarılması durumunda betonarme kolonun eksenel yük taşıma kapasitesinde yaklaşık olarak %69' luk bir artış gözlenmiştir. Boyuna donatı oranının %2'den %5.6'ya çıkarılması durumunda betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesi 1547.8 kN'dan 1862.5 kN'a çıkarak yaklaşık olarak %20 artmıştır. Betonarme kolonlarda enkesit boyutlarının 150 mm'den 450 mm'ye çıkarılması durumunda eksenel yük taşıma kapasitesinde 1547.5 kN' dan 12553.8 kN' a bir artış gözlenmiştir. Son olarak, mevcut yönetmeliklerde betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini hesaplamak üzere kullanılan formülün, kapasiteyi yaklaşık %7 daha düşük tahmin ettiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, eksenel yük, kolon, sonlu elemanlar.

ABSTRACT

The axial load capacity of reinforced concrete columns with shear links varies depending on cross-sectional dimensions, concrete compressive strength, and longitudinal reinforcement ratio. The behaviour of reinforced concrete columns, especially high-strength ones, is not fully understood, and existing literature has research gaps related to it. The aim of this study is to understand the behaviour of high-strength reinforced concrete columns by developing a finite element model for high-strength reinforced concrete columns and conducting parametric studies. The parameters considered in this study are concrete compressive strength, longitudinal reinforcement ratio, and cross-section dimensions. Moreover, predictions of the current design code were evaluated. When the concrete compressive strength increased from 50 MPa to 100 MPa, an approximately 69% increase in the axial load-carrying capacity of the reinforced concrete column was observed. In the case of increasing the longitudinal reinforcement ratio from 2% to 5.6%, the axial load-carrying capacity of the reinforced concrete column increased by approximately 20%, from 1547.8 kN to 1862.5 kN. An increase in axial load-carrying capacity from 1547.5 kN to 12553.8 kN was observed with increasing the cross-section dimensions from 150 mm to 450 mm. Moreover, the predictions of the current design codes were evaluated, and it was found that they underestimated 7% of the axial load capacity.

Keywords: Axial load, column, finite element, reinforced concrete

GİRİŞ

Betonarme kolonlar, yapıların yük taşıma kapasitesini ve stabilitesini sağlayan temel taşıyıcı elemanlardır (ACI Committee 445, 1998; Said vd., 2024). Betonarme etriyeli kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi esas olarak enkesit boyutlarına, betonun basınç dayanımına ve boyuna donatı alanına bağlıdır (ACI-318, 2019; TS 500, 2014). Yıllar içerisinde gelişen teknolojiyle birlikte yüksek katlı veya yüksek yüklere maruz kalabilecek yapılarda yüksek mukavemetli beton kullanımı yaygınlaşmıştır (Légeron & Paultre, 2000; Paultre vd., 2009; Aslani & Nejadi, 2012; Awati & Khadiranaikar, 2012; Eid vd., 2019). Bu tür yapılarda, yüksek mukavemetli betonun yalnızca dayanım açısından değil, aynı zamanda durabilite yönünden de sağladığı katkılar, kullanımının önemini artırmıştır (Salah-Eldin vd., 2019). Ancak, özellikle normal dayanıma sahip betonarme kolonlar için geliştirilen tasarım yöntemleri, yüksek dayanımlı betonarme kolonlara doğrudan uygulanamayabilir (Awati & Khadiranaikar, 2012). Bu durum, daha fazla deneysel, nümerik ve analitik çalışma yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Mevcut literatürde, gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, sargılama etkisi ve beton dayanımı gibi davranışı doğrudan etkileyen parametreler incelenmiş olsa da yüksek mukavemetli betonarme kolonların eksenel basınç altındaki davranışlarını inceleyen deneysel, nümerik ve analitik çalışmalar sınırlı kalmıştır (İbrahim & MacGregor, 1997; Canbay vd., 2006; Awati & Khadiranaikar, 2012; Koksall & Erdogan, 2021). Örneğin, Awati ve Khadiranaikar (2012), yürüttükleri deneysel ve analitik çalışmada, etriye oranındaki artışın yüksek mukavemetli betonarme kolonların hem sünekliğini hem de eksenel yük taşıma kapasitesini artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, yüksek mukavemetli betonarme kolonların davranışlarının farklılık gösterebileceği ortaya konulmuştur (Awati & Khadiranaikar, 2012). Bunun yanı sıra, yüksek mukavemetli betonarme kolonların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi konusu literatürde yeterince ele alınmamıştır. Örneğin, Amirkhani ve Lezgy-Nazargah (2022), Abaqus programını kullanarak normal dayanımlı betonarme kolonların davranışlarını incelemiştir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, yüksek mukavemetli betonarme kolonların davranışı hâlen tam olarak anlaşılamamış olup, mevcut yönetmeliklere eklenebilecek bir tasarım formülasyonuna duyulan ihtiyaç devam etmektedir.

Çoğu zaman deneysel çalışmalar yürütmek yüksek maliyetlere neden olmakta ve uzun zaman almaktadır. Oysa, doğrulaması yapılmış bir sonlu elemanlar modeli bu maliyetleri ve süreyi azaltabilir. Bu çalışmanın amacı, yüksek mukavemetli betonarme kolonlar için iki boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirerek eksenel yük taşıma kapasitelerini tahmin etmektir. Bu kapsamda, söz konusu kolonlar için iki boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Geliştirilen iki adet model, mevcut literatürde deneysel sonuçları bulunan betonarme kolonlarla doğrulanmış, ardından parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Parametre olarak, kolon davranışını önemli ölçüde etkileyen beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve enkesit boyutları seçilmiştir. Ayrıca, betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin hesaplanmasında pek çok yönetmelikte kullanılan formülasyon değerlendirilmiş ve ilerideki hesaplamalarda kullanılabilecek bir sonlu eleman modeli önerilmiştir. Bunlara ek olarak, normal dayanımlı betona (30 MPa) sahip betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasiteleri, yönetmelik tahminleri ile sonlu eleman modellerinin tahminleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu sayede hem normal dayanımlı hem de yüksek dayanımlı betonarme kolonlar için yönetmelik ve sonlu eleman modeli tahminlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından test edilen betonarme kolonlar, iki boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modelinin doğrulanmasında kullanılmıştır. Söz konusu model, VecTor2 programı (Wong vd., 2013) kullanılarak oluşturulmuştur. Detaylar aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur

Betonarme Kolonlar

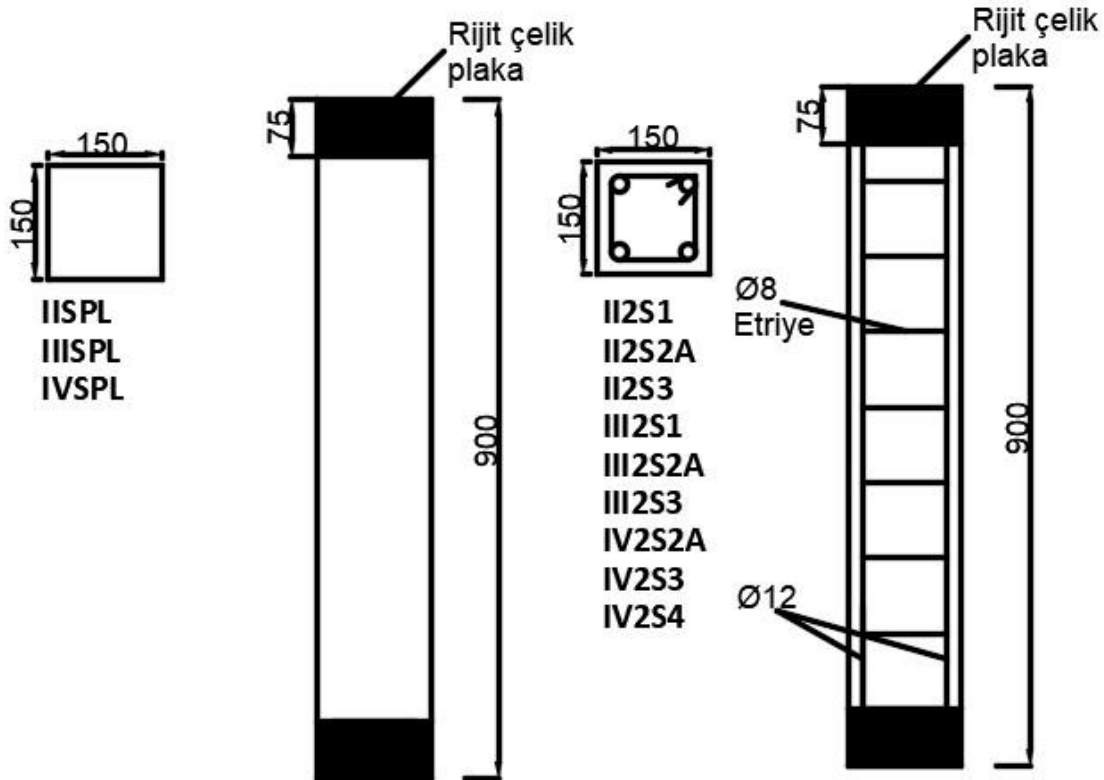
Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından test edilen kolonlar iki farklı enkesit boyutuna sahiptir. Birinci grup kolonlar 150×150 milimetre (mm) enkesit boyutlarına sahipken, ikinci grup kolonlar 125×125 mm enkesit boyutlarına sahiptir. Şekil 1’de görüldüğü üzere, birinci ve ikinci grup kolonlar sırasıyla dört adet 12 mm ve dört adet 10 mm boyuna çelik donatılarla donatılmıştır. 8 mm çapında çelik donatılardan oluşturulmuş etriyeler, farklı aralıklarla her iki grup betonarme kolonda kullanılmıştır. Ayrıca, her iki gruptan hem boyuna donatısız hem de etriyesiz olarak test edilen kolonlar Şekil 1’de gösterilmiştir. Etriye aralıkları, kolon isimlendirmelerinin sonunda “S1” bulunan kolonlarda 100 mm, “S2” bulunanlarda 75 mm, “S3” bulunanlarda 50 mm ve “S4” bulunanlarda ise 30 mm olarak tasarlanmıştır (Awati & Khadiranaikar, 2012). Ayrıca, kolon isimlendirmeleri malzeme özellikleri, enkesit boyutları ile boyuna ve enine donatı özelliklerine göre yapılmış olup, Tablo 1 ve Şekil 1’de gösterilmiştir (Awati & Khadiranaikar, 2012). Test edilen betonarme kolonların malzeme özellikleri; f_c (beton silindirik basınç dayanımı), $f_{y,l}$ (boyuna donatı akma dayanımı) ve $f_{y,v}$ (etriye donatısı akma dayanımı) Tablo 1’de verilmiştir.

Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Modellemesi

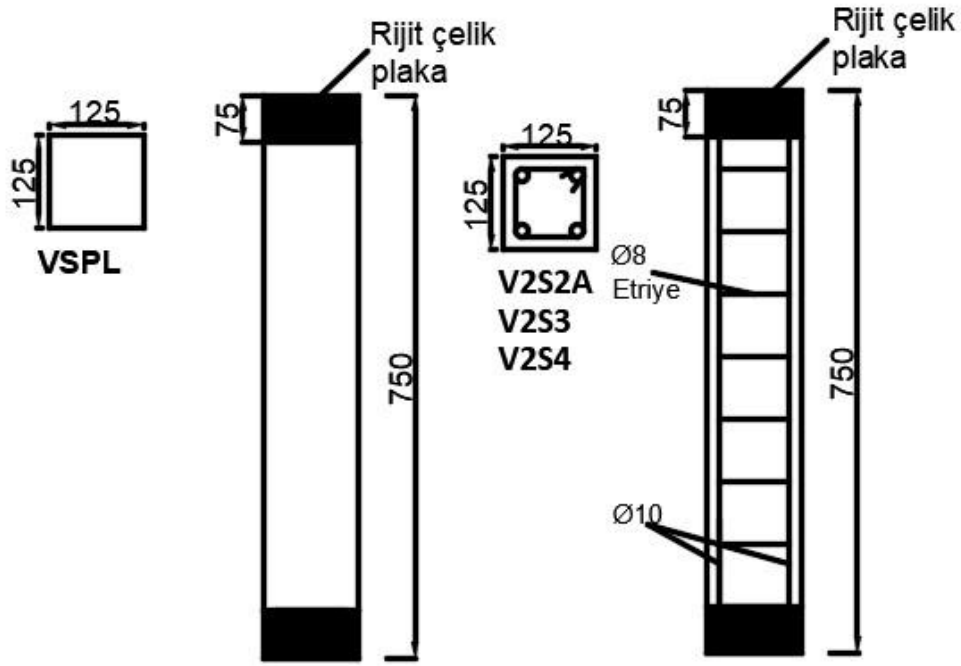
İki boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modeli, daha önce de belirtildiği üzere, VecTor2 (Wong vd., 2013) programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu program, betonarme yapıların davranışını tahmin etmede daha başarılı sonuçlar veren, Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisi'nin (İng. *Modified Compression Field Theory* – MCFT) (Vecchio & Collins, 1986) gelişmiş bir versiyonu olan Bozulmuş Gerilme Alanı Modeli'ni (İng. *Disturbed Stress Field Model* – DSFM) (Vecchio, 2000) kullanmaktadır. Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından deneysel çalışmaları yapılan betonarme kolonlar için iki farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan tipik bir sonlu eleman modeli Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Awati & Khadiranaikar (2012) Tarafından Test Edilen Kolonların Malzeme Özellikleri

Kolon	f_c (MPa)	$f_{y,l}$ (MPa)	$f_{y,v}$ (MPa)
II2S1	61	430	500
II2S2A	62	500	500
II2S3	66	430	500
IISPL	62.8	-	-
III2S1	75.8	430	500
III2S2A	77.58	500	500
III2S3	78	430	500
IIISPL	76.53	-	-
IV2S2A	96	500	500
IV2S3	102	430	500
IV2S4	98	430	500
IVSPL	95	-	-
V2S2A	108	500	500
V2S3	115.6	430	500
V2S4	115.6	430	500
VSPL	115.6	-	-

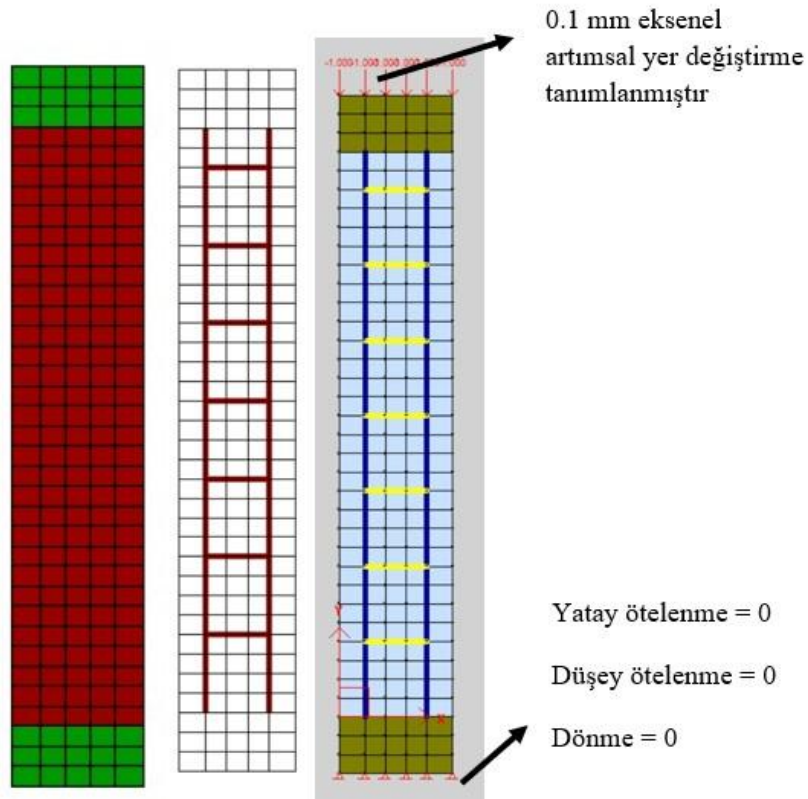


(a)



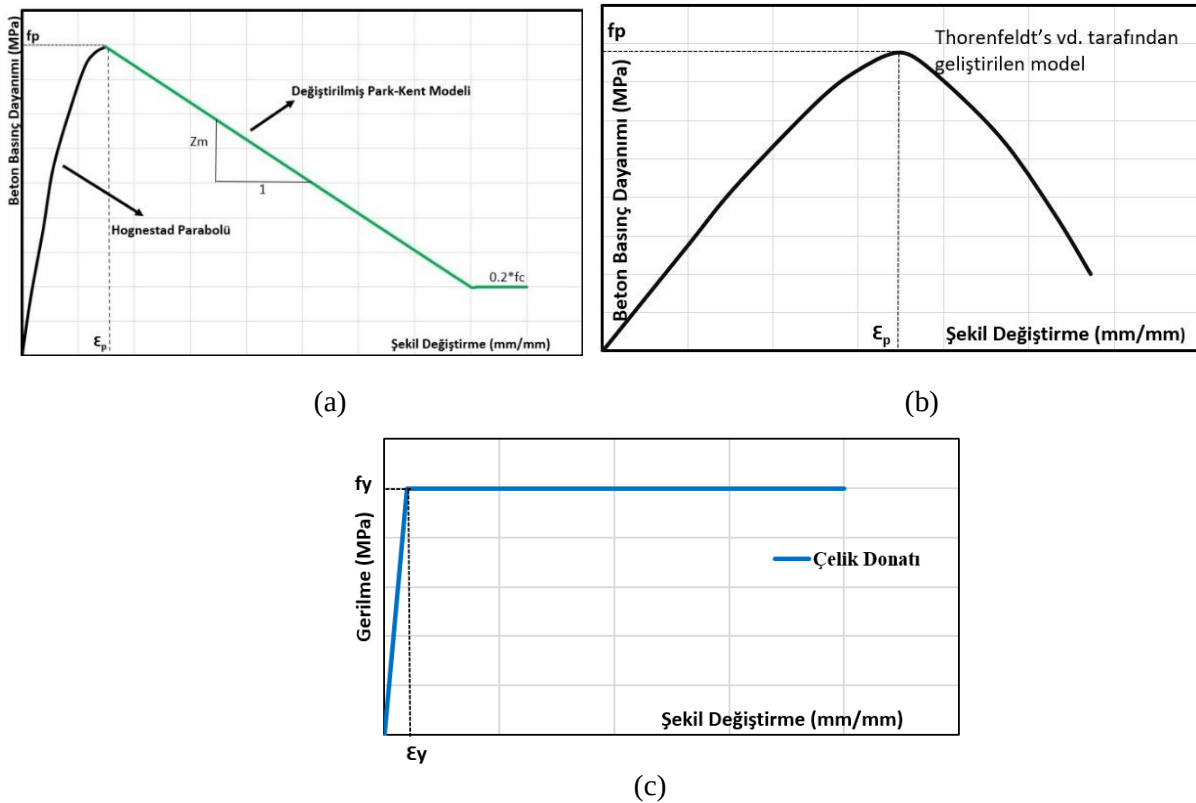
(b)

Şekil 1. Awati & Khadiranaikar (2012) Tarafından Test edilen kolonlar (a) Birinci grup; (b) İkinci grup (Tüm ölçüler milimetre cinsindendir)



Şekil 2. Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli

Deneyler yalnızca basınç altında betonarme kolonların davranışını incelemek üzere yürütüldüğü için, beton için iki farklı beton modeli düşünülerek iki farklı sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Birinci modelde VecTor2 (Wong vd., 2013) programının içinde varsayılan ayarlarda bulunan beton basınç davranış modeli kullanılmıştır. Şekil 3'te gösterildiği gibi bu modelde beton nihai dayanımına ulaşmadan önceki davranışı Hognestad vd. (1955) tarafından geliştirilen parabol ile ve betonun nihai dayanımına ulaştıktan sonraki davranışı ise Değiştirilmiş Park-Kent model (Scott vd., 1982; Wong vd., 2013) ile modellenmiştir. Ayrıca beton basınç azalması program içinde Model A olarak tanımlanan ve Vecchio & Collins (1993) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Şekil 3 (b)'de görüldüğü üzere ikinci modelde ise betonun basınç davranışı Thorenfeldt's vd. (1987) tarafından geliştirilen model kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca beton basınç azalması için ise program içerisinde Model B olarak tanımlanan ve Vecchio & Collins (1993) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Diğer tüm malzeme modelleri program tarafından varsayılan ayarlı olarak kullanılmıştır. Şekil 3 (c) 'de görüldüğü üzere çelik donatılar için yalnızca akma dayanımları verildiği için elastik tam plastik bir model kullanılmış olup gerilme-birim uzama eğrisi akma dayanımına kadar elastik davranış göstereceği, akma dayanımına ulaştıktan sonra ise tam plastik davranış göstereceği şekilde modellenmiştir. Betonarme kolonlar yalnızca statik eksenel basınç kuvveti altında test edildiği için beton ve çelik arasındaki aderans tam bağlı şekilde modellenmiştir. Bu yaklaşım, çelik donatı ile beton arasındaki aderansın tam bağlı olduğu kabulüne dayanan çalışmalarda da başarıyla uygulanmıştır (Palermo & Vecchio, 2007; Amirkhani & Lezgy-Nazargah, 2022; Dirar et al., 2025). Ayrıca, sonlu elemanlar modelinin doğrulama aşamasında, tam bağlı şekilde yapılan modelleme ile deney sonuçları başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir (bkz. Tablo 2). Sonlu elemanlar ağ boyutu her iki yön için de yaklaşık 25 mm olarak oluşturulmuştur. Bu ağ boyutu seçimi daha önce yapılan çalışmalar da uyumludur (Sogut vd., 2021; Dirar vd., 2024; Dirar vd., 2025; Sogut, 2025).



Şekil 3. Malzeme modelleri (a) Birinci sonlu eleman modeli için beton modeli (b) İkinci sonlu eleman modeli için beton modeli (c) Çelik donatı için malzeme modeli

BULGULAR VE TARTIŞMA

Model Tahminleri

Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından test edilen ve detayları önceki bölümde verilen betonarme kolonların deneysel sonuçlarının doğrulaması oluşturulan iki adet sonlu elemanlar modeli ile de yapılmıştır. Tablo 2 geliştirilen birinci ve ikinci sonlu eleman modellerinin betonarme kolonların maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi tahminlerini (P_{FE1} ve P_{FE2}) göstermektedir. Ayrıca yine Tablo 2' de eksenel yük altında etriyeli betonarme kolonların maksimum yük taşıma kapasitesini teorik olarak hesaplanması sonucu elde edilen P_{Teo} değerleri de

verilmiştir. Bu teorik hesaplama pek çok yönetmelik tarafından kullanılmakta olup (ACI-318, 2019; TS 500, 2014) aşağıda Formül 1' de verilmiştir.

$$P_{Teo.} = 0.85 * f_{cd} * A_c + A_{st} * f_{yd} \quad (1)$$

Burada f_{cd} beton basınç dayanımını, A_c beton enkesit alanını, A_{st} boyuna donatı alanını ve f_{yd} ise boyuna donatı akma dayanımı göstermektedir.

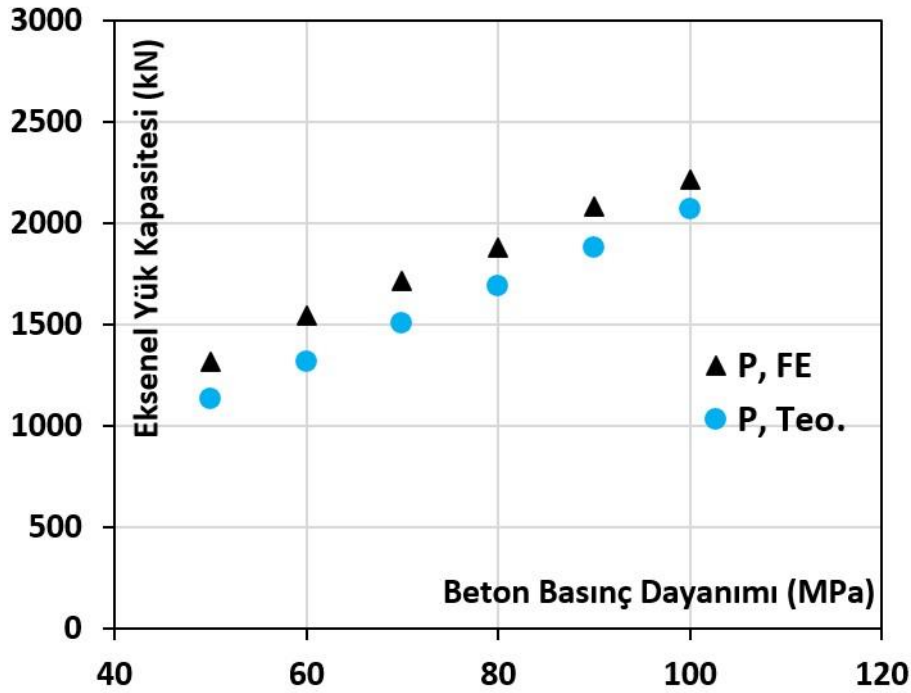
Geliştirilen birinci ve ikinci sonlu elemanlar modeli betonarme kolonların maksimum eksenel yük taşıma kapasitesini sırasıyla %4 ve %1 hata payıyla tahmin etmişlerdir. Ayrıca tahminlerden dolayı oluşan standart sapmalar sırasıyla 0.10 ve 0.09' dur. Betonarme kolonların maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi teorik olarak ise %7 hata payı ve 0.09 standart sapma değeriyle hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere her iki sonlu elemanlar modeli de teorik hesaplama göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. İkinci olarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli, %1 hata payıyla deney sonuçlarını en iyi şekilde tahmin etmiştir.

Beton Basınç Dayanımı Etkisi

Geliştirilen sonlu eleman modellerinden ikincisi deney sonuçlarını daha iyi doğruladığı için yapılacak parametrik çalışmalara o modelle devam edilmiştir. Beton basınç dayanımının betonarme kolon eksenel yük kapasitesine olan etkisi farklı beton sınıfları kullanılarak incelenmiştir. Enkesit ölçüleri 150*150 mm olan, dört adet 12 mm boyuna donatıya sahip ve 8 mm etriye 100 mm aralıkla yerleştirilmiş II2S1 kolonuna eş kolonlar üzerinde parametrik çalışma yürütülerek bu etki incelenmiştir. Farklı beton basınç dayanımları yani 50,60,70,80,90 ve 100 MPa incelenmiştir. Şekil 4 beton basınç dayanımının kolon eksenel yük taşıma kapasitesi ile değişimini göstermektedir. Burada hem sonlu elemanlar yoluyla elde edilen sayısal sonuçlar (P_{FE}) hem de Formül 1'de verilen denklemin tahminleri ($P_{Teo.}$) verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere her iki durum için de beton basınç dayanımı arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesi artmıştır. Örneğin beton basınç dayanımı 50 MPa' dan 100 MPa çıkarıldığında sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak test edilen betonarme kolonun eksenel yük taşıma kapasitesi yaklaşık %69' luk bir artış ile 1314.5 kN' dan 2215.4 kN' a çıkmıştır. Formül 1' de verilen teorik hesaplamalara göre ise betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesi 1131.4 kN' dan 2068.4 kN' a çıkmıştır. Bu da yaklaşık %83' lük bir artışa denk gelmektedir. Burada ayrıca Formül 1' de verilen teorik betonarme kolon eksenel yük kapasitesi tahminlerinin daha düşük kaldığı görülmektedir.

Tablo 2. Model Tahminleri

Kolon	P, Deneyssel (kN)	P, FE1 (kN)	P, FE1 / P, Deneyssel.	P, FE2 (kN)	P, FE2 / P, Deneyssel	P, Teo. (kN)	P, Teo. / P, Exp.
II2S1	1489.4	1516.4	1.02	1547.8	1.04	1337.5	0.90
II2S2A	1493.9	1546.6	1.04	1494.0	1.00	1387.9	0.93
II2S3	1542.3	1598.6	1.04	1590.9	1.03	1431.3	0.93
IISPL	1470.0	1352.2	0.92	1377.4	0.94	1201.1	0.82
III2S1	1821.5	1811.1	0.99	1812.5	1.00	1614.9	0.89
III2S2A	1848.4	1871.4	1.01	1796.7	0.97	1679.9	0.91
III2S3	1896.8	1843.9	0.97	1788.7	0.94	1656.1	0.87
IIISPL	1912.6	1635.9	0.86	1604.8	0.84	1463.6	0.77
IV2S2A	2081.8	2263.0	1.09	2186.6	1.05	2025.1	0.97
IV2S3	2065.9	2348.2	1.14	2240.0	1.08	2105.9	1.02
IV2S4	1975.0	2285.0	1.16	2159.4	1.09	2031.0	1.03
IVSPL	2182.5	2026.8	0.93	1983.2	0.91	1816.9	0.83
V2S2A	1550.0	1732.7	1.12	1639.7	1.06	1562.5	1.01
V2S3	1450.0	1835.0	1.27	1758.5	1.21	1639.5	1.13
V2S4	1560.0	1834.8	1.18	1690.5	1.08	1639.5	1.05
VSPL	1750.0	1691.3	0.97	1586.1	0.91	1535.3	0.88
		Ortalama:	1.04			1.01	0.93
		Standart sapma:	0.10			0.09	0.09



Şekil 4. Beton Basınç Dayanımı Etkisi

Awati & Khadiraikar (2012) tarafından test edilen betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin teorik ve nümerik olarak tahmin edilmesinin daha iyi anlaşılabilmesi için ayrıca fiziksel olarak test edilen betonarme kolonlar; 30 MPa basınç dayanımına sahip olacak şekilde nümerik olarak test edilmiştir. Bununla ilgili karşılaştırmalar Tablo 3 üzerinde verilmiştir. Beton sınıfının 30 MPa olduğu senaryoda her iki sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar Formül 1 ile karşılaştırılmıştır. Tablo 3'ten de görüldüğü üzere Formül 1 yaklaşık olarak betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesini %13-15 hata ile tahmin edebilmiştir.

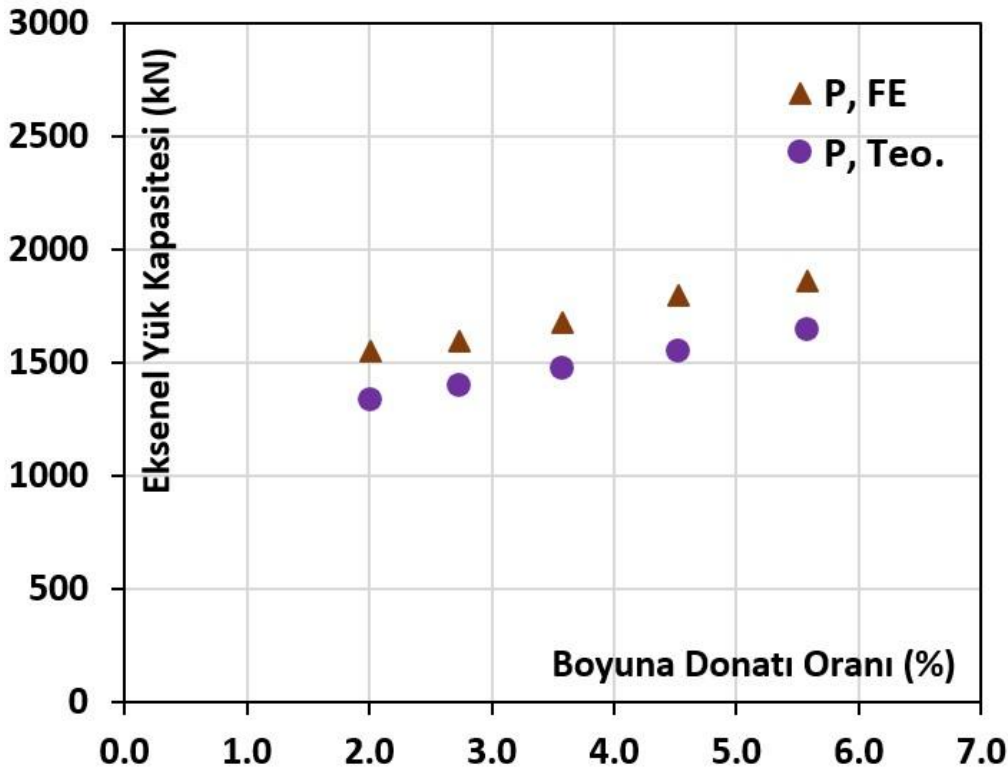
Tablo 3. C30 Beton Sınıfı İçin Model Tahminleri

Kolon	f_c (MPa)	P, FE1 (kN)	P, FE2 (kN)	P, Teo. (kN)	P, Teo. / P, FE1	P, Teo. / P, FE2
II2S1	30	881.2	871.2	756.6	0.86	0.87
II2S2A	30	915.9	890.8	788.2	0.86	0.88
II2S3	30	890.5	878.0	756.6	0.85	0.86
IISPL	30	675.2	674.7	573.8	0.85	0.85
IV2S4	30	896.9	879.8	756.6	0.84	0.86
V2S2A	30	635.5	615.2	547.4	0.86	0.89
V2S3	30	617.8	608.5	525.5	0.85	0.86
V2S4	30	621.6	609.3	525.5	0.85	0.86
VSPL	30	468.9	469.1	398.4	0.85	0.85
Ortalama:					0.85	0.87
Standart: Sapma					0.01	0.01

Boyuna Donatı Oranı Etkisi

Boyuna donatı oranının betonarme kolonun eksenel yük kapasitesi üzerindeki etkisi, farklı donatı oranlarına sahip betonarme kolonların sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak test edilmesiyle incelenmiştir. Kolon eksenel yük taşıma kapasitesinin, boyuna donatı oranındaki değişim karşısında nasıl etkilendiğini incelemek amacıyla; kesit ölçüleri 150×150 mm olan, 61 MPa beton dayanımına sahip ve 8 mm çapında etriyelerin 100 mm aralıklarla yerleştirildiği II2S1 kolonuna eşdeğer olacak şekilde %2, %2.7, %3.6, %4.5 ve %5.6 boyuna donatı oranlarına sahip kolonlar üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Şekil 5, betonarme kolonun eksenel yük taşıma

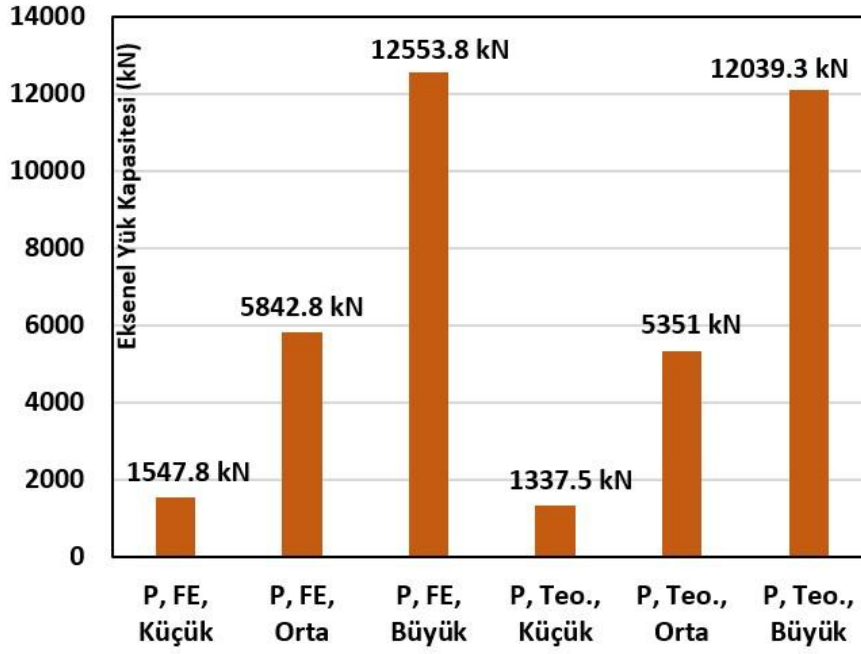
kapasitesinin, boyuna donatı oranının artması veya azalmasıyla nasıl değiştiğini göstermektedir. Hem nümerik hem de Formül 1’de verilen teorik eksenel yük taşıma kapasiteleri gösterilmiştir. Boyuna donatı oranının %2’den %5.6’ya çıkması durumunda, eksenel yük taşıma kapasitesi nümerik hesaplamada 1547.8 kN’dan 1862.5 kN’a, teorik hesaplamada ise 1337.5 kN’dan 1641.6 kN’a yükselmiştir. Bu artışlar sırasıyla yaklaşık %20 ve %23’tür. Ayrıca, beton basınç dayanımının etkisine benzer şekilde, Formül 1’de verilen teorik betonarme kolon eksenel yük kapasitesi tahminlerinin daha düşük kaldığı görülmektedir.



Şekil 5. Boyuna donatı oranı etkisi

Enkesit Boyutlarının Etkisi

Enkesit boyutlarının etkisini incelemek için üç tane betonarme kolon göz önüne alınmıştır. Göz önüne alınan kolonlardan ilkinin enkesit boyutları 150*150 mm olup, boyuna donatısı dört adet 12 mm çelik donatılardan teşkil edilmiştir. Böylece boyuna donatı oranı %2 olarak hesaplanmıştır. Etriye donatısı olarak 8 mm çelik donatılar 100 mm aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Etriye oranı ise böylece %0.67 olarak tasarlanmıştır. İlk kolon II2S1 kolonuna eş kolon olarak tasarlanmıştır. İkinci kolon tüm ayrıtlar iki ile çarpılarak tasarlanmıştır. Enkesit boyutları 300*300 mm olup, boyuna donatı oranı korunarak dört adet 24 mm çelik donatılardan boyuna donatısı teşkil edilmiştir. Aynı şekilde etriye donatısı oranı da sabit tutularak 16 mm çelik donatılar 200 mm aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Üçüncü kolon ise tüm ayrıtlar üç ile çarpılarak tasarlanmıştır. Enkesit boyutları 450*450 mm olup, boyuna donatı oranı korunarak dört adet 36 mm çelik donatılardan boyuna donatısı teşkil edilmiştir. Aynı şekilde etriye donatısı oranı da sabit tutularak 24 mm çelik donatılar 300 mm aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Diğer bütün malzeme, yükleme ve geometrik özellikler korunarak parametrik çalışma yapılmıştır. Şekil 6 küçük (150*150 mm), orta (300*300 mm) büyük (450*450 mm) enkesitli betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini karşılaştırmaktadır. Hem nümerik hem de Formül 1’de verilen teorik eksenel yük taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Formül 1’e göre enkesit boyutlarının 150 mm’den 300 mm’ye çıkmasıyla eksenel yük taşıma kapasitesi 1337.5 kN’dan 5351 kN’a çıkmıştır. Benzer şekilde sonlu elemanlar modeli kullanılarak oluşturulan kolonlarda enkesit boyutunun 150 mm’den 300 mm’ye artması eksenel yük taşıma kapasitesini 1547.5 kN’dan 5842.8 kN’a çıkarmıştır. Formül 1’e göre enkesit boyutlarının 300 mm’den 450 mm’ye çıkması durumunda ise eksenel yük taşıma kapasitesi 5351 kN’dan 12039.3 kN’a çıkmıştır. Benzer şekilde sonlu elemanlar modelinin eksenel yük taşıma kapasite tahmini de enkesit boyutlarının 300 mm’den 450 mm’ye çıkması durumunda 5842.8 kN’dan 12553.8 kN’a çıkmıştır. Formül 1’e göre yapılan hesaplamalarda eksenel yük taşıma kapasitesinin daha düşük tahmin edildiği görülmüştür.



Şekil 6. Enkesit boyutlarının etkisi

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında beton basınç dayanımı yüksek kolonların eksenel basınç kuvveti altındaki davranışları incelenmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve bu model mevcut literatürde deneysel çalışmaları yapılan yüksek basınç mukavemetine sahip kolonların deneysel sonuçları karşılaştırılmış ve başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Yürütülen nümerik çalışmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yüksek basınç dayanımına sahip betonarme kolonlar için iki adet sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve bu modeller, deney sonuçlarını sırasıyla %4 ve %1 hata oranlarıyla tahmin etmiştir. Pek çok yönetmelikte (ACI 318, 2019; TS 500, 2014) yer alan formülasyon ise deneysel sonuçları %7 hata oranıyla tahmin edebilmiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere, kullanılan formül betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini olduğundan daha düşük tahmin etmiştir.
- 30 MPa normal basınç dayanımına sahip betonarme kolonlar için yapılan nümerik analiz sonuçlarını, pek çok yönetmelik (ACI-318, 2019; TS 500, 2014) tarafından da kullanılan formülasyon yaklaşık olarak %13-15 daha az eksenel yük taşıma kapasitesiyle tahmin edebilmiştir. Teorik hesaplamalarda kullanılan formül hem yüksek hem de normal basınç dayanımına sahip betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini daha düşük tahmin etmiştir.
- Beton basınç dayanımının 50 MPa' dan 100 MPa çıkması durumunda betonarme kolonun eksenel yük taşıma kapasitesinde yaklaşık olarak %69' luk bir artış gözlenmiştir.
- Boyuna donatı oranının %2'den %5,6'ya çıkması durumunda betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesi 1547.8 kN'dan 1862.5 kN'a çıkarak yaklaşık olarak %20 artmıştır.
- Betonarme kolonlarda enkesit boyutlarının 150 mm'den 300 mm'ye çıkması durumunda eksenel yük taşıma kapasitesinde 1547.5 kN' dan 5842.8 kN' a bir artış gözlenmiştir. Benzer şekilde enkesit boyutlarının 300 mm'den 450 mm'ye çıkması durumunda da eksenel yük taşıma kapasitesi 5842.8 kN'dan 12553.8 kN' a çıkmıştır.
- Bu çalışma kapsamında geliştirilen sonlu eleman modeli, deneysel sonuçlarla doğrulanmış olup, betonarme kolonların eksenel basınç kuvveti taşıma kapasitesini tahmin etmede ve boyutlandırmada kullanılabilir. Çalışma, kısıtlı bir çalışma alanına sahip olan yüksek mukavemetli betonarme kolonlar için teorik bir formülasyonun gerekliliğini ortaya koyarak, sonlu eleman modeli önermiştir. Ayrıca, yüksek mukavemetli betonarme kolonların eksenel basınç kuvveti altındaki davranışlarının incelenmesi için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 318. (2019) Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- ACI Committee 445 on Shear and Torsion (1998). Recent approaches to shear design of structural concrete. *Journal of Structural Engineering*. 124(12), 1375-1417.
- Amirkhani, S., & Lezgy-Nazargah, M. (2022). Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete columns: Evaluation of different modeling approaches for considering stirrup confinement effects. *Structural Concrete*, 23, 2820–2836. <https://doi.org/10.1002/suco.202100532>
- Aslani, F., & Nejadi, S. (2012). Cyclic constitutive model for high-strength concrete confined by ultra-high-strength and normal-strength transverse reinforcements. *Australian Journal of Structural Engineering*. 12, 159–172. <https://doi.org/10.7158/13287982.2011.11465088>
- Awati, M., & Khadiranaikar, R.B. (2012). Behavior of concentrically loaded high performance concrete tied columns. *Engineering Structures*, 37, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.040>
- Canbay, E., Ozcebe, G., & Ersoy, U. (2006). High-strength concrete columns under eccentric load. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 132, 1052–1060. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:7\(1052\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:7(1052))
- Dirar, S., Caro, M., Sogut, K., & Quinn, A. (2024). Experimental behaviour, FE modelling and design of large-scale reinforced concrete deep beams shear-strengthened with embedded fibre reinforced polymer bars. *Structures*, 67, 106938. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106938>
- Dirar, S., Sogut, K., Caro, M., Rahman, R., Theofanous, M., & Faramarzi, A. (2025). Effect of shear span-to-effective depth ratio and FRP material type on the behaviour of RC T-beams strengthened in shear with embedded FRP bars. *Engineering Structures*, 332, 120105. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120105>
- Eid, R., Cohen, A., Guma, R., Ifrach, E., Levi, N., & Zvi, A. (2019). High-strength concrete circular columns with TRC-TSR dual internal confinement. *Buildings*, 9(10), 218. <https://doi.org/10.3390/buildings9100218>
- Hognestad, E., Hanson, N.W., & McHenry, D. (1955). Concrete stress distribution in ultimate stress design. *ACI Journal*, 27(4), 455-479. <https://doi.org/10.14359/11609>
- Ibrahim, H.H., & MacGregor, J.G. (1997). Modification of the ACI rectangular stress block for high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 94, 40–48. <https://doi.org/10.14359/459>
- Koksal, H.O., & Erdogan, A. (2021). Stress–strain model for high-strength concrete tied columns under concentric compression. *Structures*, 32, 216-227. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.063>
- Légeron, F., & Paultre, P. (2000). Behavior of high-strength concrete columns under cyclic flexure and constant Axial Load. *ACI Structural Journal*, 97(4), 591–601. <https://doi.org/10.14359/7425>
- Palermo, D. & Vecchio, F.J. (2007) Simulation of cyclically loaded concrete structures based on the finite-element method. *Journal of Structural Engineering*. 133, 728–738. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:5\(728\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:5(728))
- Paultre, P.; Eid, R.; Robles, H.I.; & Bouaanani, N. (2009). Seismic performance of circular high-strength concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 106(4), 395–404. <https://doi.org/10.14359/56605>
- Said, A. I., Hilfi, H. A., Allawi, A. A., & Wardeh, G. (2024). Structural Performance of a Hollow-Core Square Concrete Column Longitudinally Reinforced with GFRP Bars under Concentric Load. *CivilEng*, 5(4), 928-948. <https://doi.org/10.3390/civileng5040047>
- Salah-Eldin, A., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2019). Structural performance of high-strength-concrete columns reinforced with GFRP bars and ties subjected to eccentric loads. *Engineering Structures*, 185, 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.143>
- Scott, B.D., Park, R., & Priestley, M.J.N. (1982). Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *ACI Journal*, 79(1), 13-27. <https://doi.org/10.14359/10875>
- Sogut, K. (2025). Structural behaviour of concrete deep beams reinforced with aluminium alloy bars. *Applied Sciences*, 15(10), 5453. <https://doi.org/10.3390/app15105453>

Sogut, K., Dirar, S., Theofanous, M., Faramarzi, A., & Nayak, A.N. (2021). Effect of transverse and longitudinal reinforcement ratios on the behaviour of RC T-beams shear strengthened with embedded FRP BARS. *Composite Structures*, 262, 113622. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113622>

Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. & Jensen, J.J. (1987). Mechanical properties of high strength concrete and applications in design. In: *Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete*, Stavanger, p.p. 149–159.

TS 500: Requirements for design and construction of reinforced concrete structures (2014). TSE (Turkish Standards Institute), Ankara, Turkey.

Vecchio, F.J. (2000). Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1070-1077. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:9\(1070\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:9(1070))

Vecchio, F.J. & Collins M.P. (1986). The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Structural Journal*, 83(2), 219–231. <https://doi.org/10.14359/10416>

Vecchio, F.J. & Collins, M.P. (1993). Compression response of cracked reinforced concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 119(12), 3590-3610. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:12\(3590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:12(3590))

Wong, P.S., Vecchio, F.J. & Trommels, H. (2013). *VecTor2 & FormWorks user's manual* (second edition). Toronto: University of Toronto.