



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yüksek Çekme Donatısı Oranına Sahip T En-Kesitli Betonarme Kirişlerin Moment-Eğrilik İlişkisi

 Rohullah JAMAL^{a,*},  S. Bahadır YÜKSEL^a

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: jamal.rohullah@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.718326

ÖZET

Bu çalışmada yüksek çekme donatısı oranına sahip T en-kesitli betonarme kirişlerin moment eğrilik ilişkisi araştırılmıştır. T en-kesitli betonarme kirişlerin çekme donatısı oranı yüksek olacak şekilde sabit alınmış, beton sınıfı ve basınç donatısı oranları değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. Altı tip toplam 66 adet farklı parametrelere sahip T en-kesitli betonarme kiriş tasarlanmıştır. Kiriş malzemelerinin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak T en-kesitli betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Akma ve kırılma durumunda moment-eğrilik değerleri, eğrilik süneklik değerleri, süneklik oranları ve efektif rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarından farklı parametrelerden elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde sunulmuş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. T en-kesitli betonarme kirişlerin davranışı, eğrilik sünekliği, efektif süneklik oranı, efektif rijitliği, kirişlerin akma ve maksimum moment taşıma kapasitelerinin değerlerinden yararlanarak yorumlanmıştır. T en-kesitli betonarme kirişlerin basınç donatısı oranının artması ile akma momenti ve maksimum moment taşıma kapasitesi değerleri artmakta fakat akma eğrilik değerleri azalmaktadır. Basınç donatısı olmayan ($\rho=0$) kirişlerde maksimum eğrilik değerleri basınç donatısı bulunan T en-kesitli kirişlerden daha düşük elde edilmiştir. Basınç donatısı $\rho=0.1\rho$ ile $\rho=\rho$ arasında olan T en-kesitli kirişlerde maksimum eğrilik değerleri yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. T kesitli betonarme kirişlerde basınç donatısının elemanların eğrilik sünekliğine, efektif rijitliklerine, maksimum eğriliklerine, akma momentine ve maksimum moment taşıma kapasitesine olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Moment-eğrilik, Akma momenti, Kırılma momenti, Doğrusal olmayan davranış, Eğrilik sünekliği.

Moment-Curvature Relationship of T Cross Section Reinforced Concrete Beams with High Tensile Reinforcement Ratio

ABSTRACT

In this study, moment curvature the relation of T cross-section reinforced concrete beams with high tensile reinforcement ratio was investigated. The parametric study was performed for T cross-section reinforced concrete beams by taking the tensile reinforcement ratios as high and constant and changing the concrete grade and compression reinforcement ratios. Six types total 66 different T cross-section reinforced concrete beams having different parameters were designed. Moment-curvature relations of T cross section reinforced concrete beams were obtained by considering the nonlinear behaviors of beam materials. Moment-curvature values,

curvature ductility values, ductility ratios and effective stiffness values were calculated for the case of yield and failure stages. The results obtained from different parameters from the analysis results are presented in tables and the results were evaluated. The behavior of T cross-section reinforced concrete beams has been interpreted using the values of curvature ductility, effective ductility ratio, effective rigidity, yield and maximum moment capacities of beams. As the compression reinforcement ratio of T cross-section reinforced concrete beams increase, yield moment and maximum moment bearing capacity values increase, but the yield curvature values decrease. Maximum curvature values of the T cross-section beam without compression reinforcement ($\rho' = 0$) were obtained lower than the beams with compression reinforcements. For the T cross-section beams with compression reinforcement between $\rho' = 0.1\rho$ and $\rho' = \rho$, the maximum curvature values are stayed constant. It has been observed that the compression reinforcement has a positive effect on the curvature ductility, effective rigidity, maximum curvature, yield moment and maximum moment bearing capacity of the reinforced concrete beams with T section.

Keywords: Moment curvature, Yield moment, Ultimate moment, Nonlinear behavior, Curvature ductility

I. GİRİŞ

Betonarme elemanların tasarımında eleman davranışının ve bu davranışı etkileyen faktörlerin bilinmesi önemlidir. Betonarme elemanların davranışı, kesit davranışından ve kesitin moment-eğrilik ilişkisinden izlenebilir [1]. Betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışına etki eden faktörler; çekme ve basınç donatısı oranı, enine donatının çapı, aralığı ve betonun basınç dayanımıdır. Betonarme kesitlerin moment-eğrilik ilişkilerini etkileyen ve tasarım aşamasında birer parametre olarak düşünülen, beton basınç dayanımı, çekme donatısı oranı ve basınç donatısı oranı gibi faktörlerin moment-eğrilik ilişkisine olan etkisinin incelenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır [2].

Farklı parametrelerde eşit en-kesit alanına sahip T en-kesitli betonarme kiriş modelleri tasarlanmış ve bu modellerin davranışına; beton sınıfının, basınç donatısı oranının moment-eğrilik ilişkisine olan etkisi araştırılmıştır. T en-kesitli betonarme kiriş modellerinde 6 farklı çekme donatısı oranı ($\rho = 0.0438, 0.0518, 0.0596, 0.0671, 0.0744, ve 0.0814$) dikkate alınmıştır. İncelenen parametrelerin kesit davranışına etkileri, akma ve kırılma durumundaki moment ve eğrilik değerleri, eğrilik süneklikleri ve efektif rijitlik değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Farklı parametrelerde tasarlanan T en-kesitli betonarme kiriş modelleri için elde edilen moment-eğrilik grafikleri karşılaştırarak yorumlanmıştır. Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışları dikkate alınarak analizler SAP2000 (Ver.20.2.0) [3] programında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada çekme donatı oranı $\rho = \rho_{max} = 0.85\bar{\rho}_b$ sabit olup farklı basınç donatısı oranlarına sahip T en-kesitli betonarme kiriş modelleri tasarlanmıştır.

T en-kesitli kirişleri

n çekme donatısı oranı maksimum donatı oranı olarak sabit tutulmuş, basınç donatısı oranı ve beton basınç dayanımı değiştirilmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerinde dengeli ve maksimum donatı oranları Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$\bar{\rho}_b = 0.85 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left[k_1 \frac{600}{600 + f_{yd}} + \left(\frac{t}{d} \right) \left(\frac{b}{b_w} - 1 \right) \right], \quad \rho = \rho_{max} = 0.85\bar{\rho}_b, (\rho - \rho') \leq \rho_{max} \quad (1)$$

Denklem (1)'de $\bar{\rho}_b$, f_{cd} , f_{yd} , k_1 , t , d , b ve b_w sırasıyla T en-kesitli kirişlerin dengeli durumda çekme donatı oranını, betonun hesap basınç dayanımını, donatının hesap akma dayanımını, eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinlik katsayısını, tabla yüksekliğini, faydalı en-kesit yüksekliğini, tabla genişliğini ve kiriş en-kesit genişliğini göstermektedir.

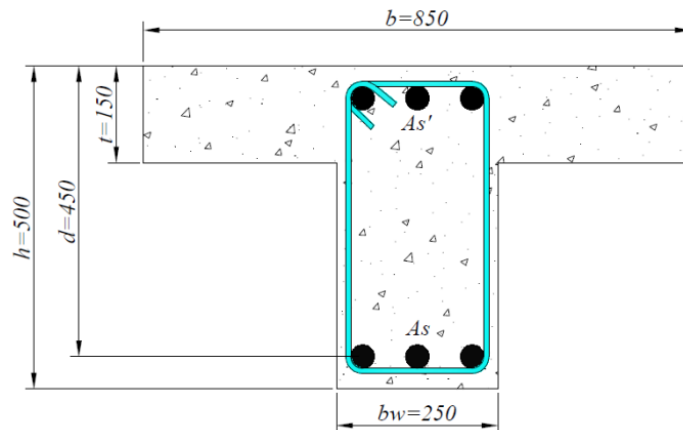
Sabit geometride, farklı beton sınıfı, boyuna donatı olarak sabit çekme donatı oranı ve farklı basınç donatı oranlarına sahip 6 tip toplam 66 adet T en-kesitli betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır. Betonarme T en-kesitli kiriş modellerinin tasarımında TBDY (2018)'de [4] ve TS500 (2000)'de [5] verilen hükümler dikkate alınmıştır. Farklı parametrelerde tasarlanan betonarme kiriş modellerinde çekme donatısı oranı $\rho = \rho_{max} = 0.85\overline{\rho_b}$ sabit alınmış ve basınç donatı oranları; $\rho'_s = 0.0\rho, 0.1\rho, 0.2\rho, 0.3\rho, 0.4\rho, 0.5\rho, 0.6\rho, 0.7\rho, 0.8\rho, 0.9\rho$ ve ρ olacak şekilde değiştirilmiştir.

T en-kesitli betonarme kiriş modellerinde altı farklı beton sınıfı C25, C30, C35, C40, C45 ve C50 değişen parametre olarak ele alınmıştır. Betonarme T en-kesitli kiriş modellerinde her beton sınıfı için çekme donatısı oranı sabit tutulmuş basınç donatısı oranları değiştirilerek kesitlerin moment-eğrilik ilişkisi araştırılmıştır. İncelenen parametrelerin kesit davranışına etkileri, eğrilik süneklilikleri, efektif rijitlikleri, efektif rijitlik oranları ve kiriş taşıma gücü momentleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen değerler karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Betonarme T en-kesitli kiriş kesitleri için SAP2000 programında malzeme modelleri tanımlanmıştır. SAP2000 programında tanımlanan beton ve donatı çeliği için hesaplarda ve malzeme modellerinde kullanılan parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerin analizlerinde eksenel yükün değeri $N=0$ olarak alınmıştır. Betonarme kesitlerde eksenel yükün olmadığı durumlarda sargı donatısının etkisi azalmaktadır [2]. Bundan dolayı analizlerde beton modeli olarak Mander sargısız beton modeli [6] kullanılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Betonarme kesitlerin moment-eğrilik ilişkilerini etkileyen ve tasarım aşamasında birer parametre olarak düşünülen, beton basınç dayanımı ve basınç donatısı oranı gibi faktörlerin moment-eğrilik davranışına olan etkisinin incelenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu amaçla T en-kesitli betonarme kiriş modellerinde moment-eğrilik ilişkisi araştırılarak akma ve kırılma durumunda moment ve eğrilik değerleri, eğrilik süneklilikleri ve efektif rijitlik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri farklı parametrelere göre karşılaştırmalı olarak grafikler halinde sunulmuştur. Moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen değerler çizelgeler halinde karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir. Tasarım parametrelerinin incelenmesi için analizlerde dikkate alınan kirişlerin gövde genişliği $b_w=250$ mm, tabla genişliği $b=850$ mm, en-kesit yüksekliği $h=500$ mm ve tabla kalınlığı $t=150$ mm olup donatı düzeni ve en-kesit boyutları Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de A_s ; çekme donatısı alanını, A'_s ; basınç donatısı alanını ifade etmektedir. Beton basınç dayanımı ile bağımlı olarak incelenen parametre; sabit çekme donatısı oranına göre basınç donatısı oranıdır. Bu amaçla 6 tip toplam 66 adet T en-kesitli betonarme kiriş modelinin moment-eğrilik analizi yapılmıştır.



Şekil 1. Tasarlanan betonarme T en-kesitli kiriş modellerinin en-kesit boyutları ve donatı yerleşim planı

T en-kesitli kirişlerin çekme donatısı oranı; maksimum donatı oranı olarak Denklem (1) ile hesaplanmıştır. Betonarme T en-kesitli kirişlerin eğrilik sünekliği gibi parametrelerinin araştırılması için sabit çekme donatısı oranı dikkate alınmıştır. Hesaplarda dikkate alınması gereken çekme donatısı oranı ($\rho = \rho_{max} = 0.85\bar{\rho}_b$) tüm kiriş modellerinde sabit alınmıştır. Betonarme kiriş modellerinde basınç donatısı oranları $\rho'_s = 0.0\rho, 0.1\rho, 0.2\rho, 0.3\rho, 0.4\rho, 0.5\rho, 0.6\rho, 0.7\rho, 0.8\rho, 0.9\rho$ ve ρ olacak şekilde değiştirilmiştir. Çekme ve basınç donatısı oranları Tablo 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Beton basınç dayanımının T kesitli kirişlerin davranışı üzerinde etkisini araştırmak için C25, C30, C35, C40, C45 ve C50 beton basınç dayanımları dikkate alınmıştır. Tablo 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'den görüleceği gibi kirişlerde sabit beton sınıfı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranına 11 farklı değer verilerek değiştirilmiştir. Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Eğrilik süneklik katsayısı (μ) Denklem (2) ile ifade edilmiştir. Eğrilik süneklik katsayısı (μ), kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin (k_u), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe (k_y) oranıdır. Betonarme T en-kesitli kirişlerin eğrilik süneklik katsayıları (μ) Denklem (2) ile hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{k_u}{k_y} \quad (2)$$

Denklem (2)'de (μ); eğrilik sünekliğini, (k_y) ve (k_u) akma momenti ve maksimum momente karşı gelen eğrilik değerlerini göstermektedir. Moment-eğrilik grafiğinde ilk doğrunun eğimi, çatlamış kesite ait efektif eğilme rijitliğine (EI_e) karşılık gelmektedir [7]. Betonarme kirişlerin etkin eğilme rijitliği (EI_e) ve etkin eğilme rijitliği çarpanları (k_e) Denklem (3) ile hesaplanmıştır. Denklem (3)'te M_y ve EI sırasıyla akma momentini ve eğilme rijitliğini göstermektedir. Eğilme rijitliği ($EI = E_c I$) betonarme T en-kesitli kirişlerin atalet momenti ve beton elastisite modülüne bağlıdır. Beton elastisite modülü (E_c) farklı beton sınıfları için TS-500, (2000)'de verilen karakteristik beton basınç dayanımlarına (f_{ck}) göre denklem (4) ile hesaplanmıştır.

$$EI_e = \frac{M_y}{k_y}, \quad k_e = \frac{EI_e}{EI} \quad (3)$$

$$E_c = 3250 \times \sqrt{f_{ck}} + 14000, \quad I = \frac{bh^3}{12}, \quad EI = E_c I \quad (4)$$

Tablo 2-7'de A_s çekme donatısı alanını, A'_s basınç donatısı alanını, ρ çekme donatısı oranını, ρ' basınç donatısı oranını ve ρ_b dengeli donatı oranını göstermektedir.

Tablo 1. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler [4]

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C25-C50	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekil-değiştirmesi (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	25-50 MPa
Donatı	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirme (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirme (ϵ_{sp})	0.008
Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirme (ϵ_{su})	0.08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420 MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550 MPa

Tablo 2. Tip-1 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler

Kesit No	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T1-0			0		0.0000	0.85
T1-1			493		0.0044	0.77
T1-2			986		0.0088	0.68
T1-3			1478		0.0131	0.60
T1-4			1971		0.0175	0.51
T1-5	C25	4927	2464	0.0438	0.0219	0.43
T1-6			2956		0.0263	0.34
T1-7			3449		0.0307	0.26
T1-8			3942		0.0350	0.17
T1-9			4435		0.0394	0.09
T1-10			4927		0.0438	0.00

Tablo 3. Tip-2 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler

Kesit No	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T2-0			0		0.0000	0.85
T2-1			583		0.0052	0.77
T2-2			1166		0.0104	0.68
T2-3			1749		0.0155	0.60
T2-4			2332		0.0207	0.51
T2-5	C30	5830	2915	0.0518	0.0259	0.43
T2-6			3498		0.0311	0.34
T2-7			4081		0.0363	0.26
T2-8			4664		0.0415	0.17
T2-9			5247		0.0466	0.08
T2-10			5830		0.0518	0.00

Tablo 4. Tip-3 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler

Kesit No	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T3-0			0		0.0000	0.85
T3-1			671		0.0060	0.77
T3-2			1341		0.0119	0.68
T3-3			2011		0.0179	0.60
T3-4			2682		0.0238	0.51
T3-5	C35	6705	3352	0.0596	0.0298	0.43
T3-6			4023		0.0358	0.34
T3-7			4693		0.0417	0.26
T3-8			5364		0.0477	0.17
T3-9			6034		0.0536	0.08
T3-10			6705		0.0596	0.00

Tablo 5. Tip-4 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler

Kesit No	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T4-0			0		0.0000	0.85
T4-1			755		0.0067	0.77
T4-2			1510		0.0134	0.68
T4-3			2266		0.0201	0.60
T4-4			3021		0.0269	0.51
T4-5	C40	7552	3776	0.0671	0.0336	0.43
T4-6			4531		0.0403	0.34
T4-7			5286		0.0470	0.26
T4-8			6041		0.0537	0.17
T4-9			6797		0.0604	0.08
T4-10			7552		0.0671	0.00

Tablo 6. Tip-5 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler

Kesit No	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T5-0			0		0.0000	0.85
T5-1			837		0.0074	0.77
T5-2			1674		0.0149	0.68
T5-3			2511		0.0223	0.60
T5-4			3348		0.0298	0.51
T5-5	C45	8371	4186	0.0744	0.0372	0.43
T5-6			5023		0.0446	0.34
T5-7			5860		0.0521	0.26
T5-8			6697		0.0595	0.17
T5-9			7534		0.0670	0.08
T5-10			8371		0.0744	0.00

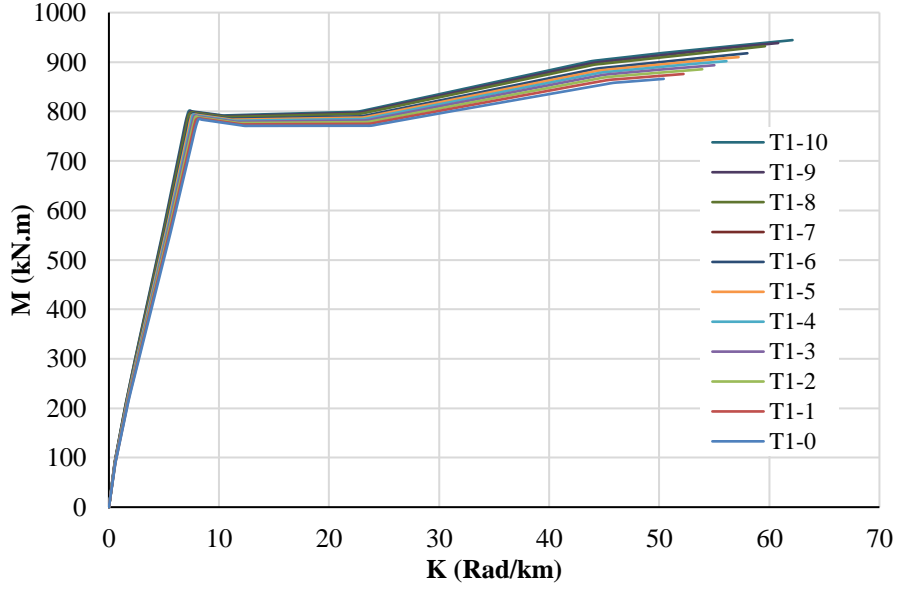
Tablo 7. Tip-6 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler

Kesit No	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T6-0			0		0.0000	0.85
T6-1			916		0.0081	0.77
T6-2			1833		0.0163	0.68
T6-3			2749		0.0244	0.60
T6-4			3665		0.0326	0.51
T6-5	C50	9163	4581	0.0814	0.0407	0.43
T6-6			5498		0.0489	0.34
T6-7			6414		0.0570	0.26
T6-8			7330		0.0652	0.17
T6-9			8247		0.0733	0.09
T6-10			9163		0.0814	0.00

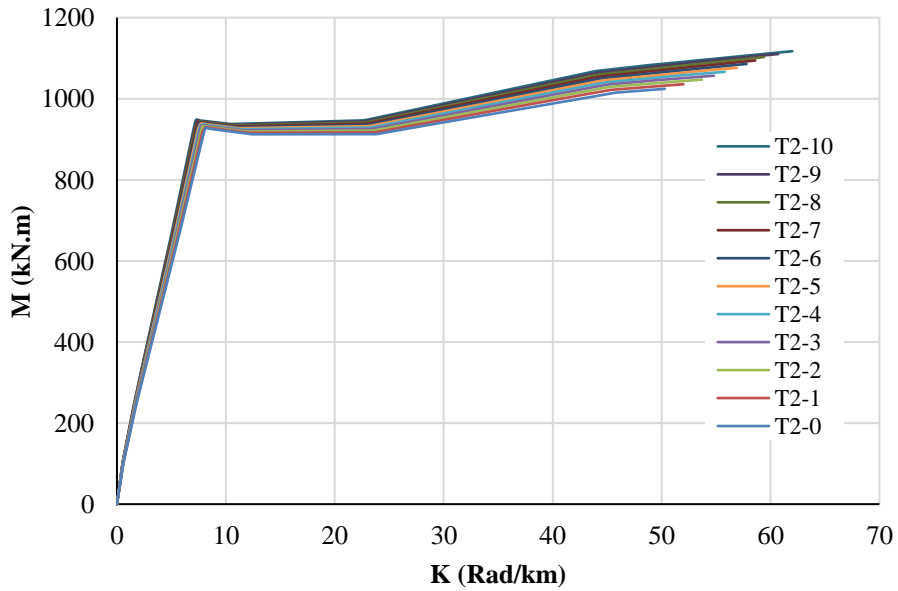
III. ANALİTİK ÇALIŞMA

Betonarme T en-kesitli kirişlerin doğrusal olmayan davranışı incelenerek, bu davranışı etkileyen parametrelerin araştırması yapılmıştır. Betonarme T en-kesitli kiriş elemanlarının davranışı moment-eğrilik ilişkisinden incelenmiştir. Betonarme T en-kesitli kiriş elemanlarının moment-eğrilik ilişkileri gerçekçi malzeme modellerine dayanan SAP2000 programı ile fiber ideal model analizinden elde

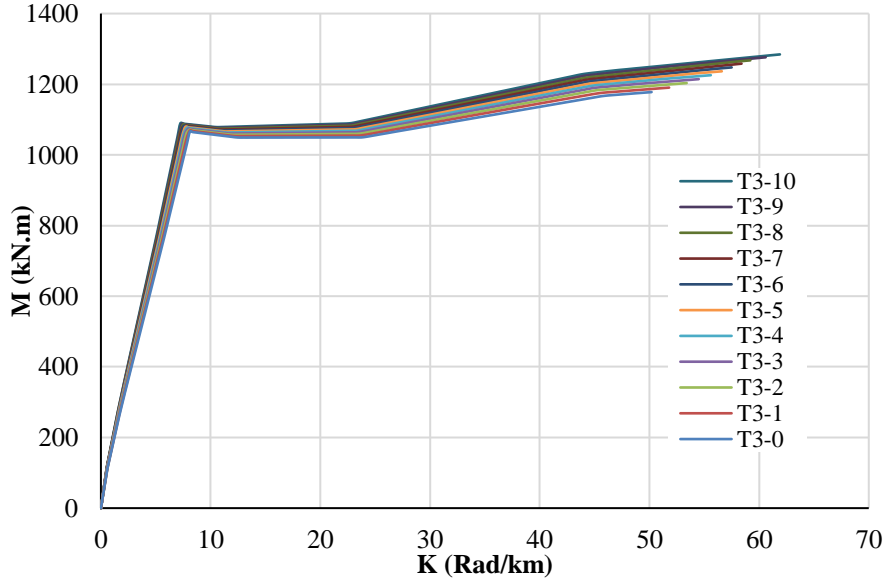
edilmiştir. Analitik çalışmanın kapsamında 6 tip toplam 66 adet farklı parametrelerde tasarlanan betonarme T en-kesitli kiriş modelleri üzerinde analizler yapılarak moment-eğrilik grafikleri karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak çizelgeler halinde özetlenmiştir. Farklı parametrelere göre incelenen T en-kesitli kiriş modelleri için analizlerden elde edilen moment-eğrilik grafikleri Şekil 2, 3, 4, 5, 6 ve 7’de verilmiştir.



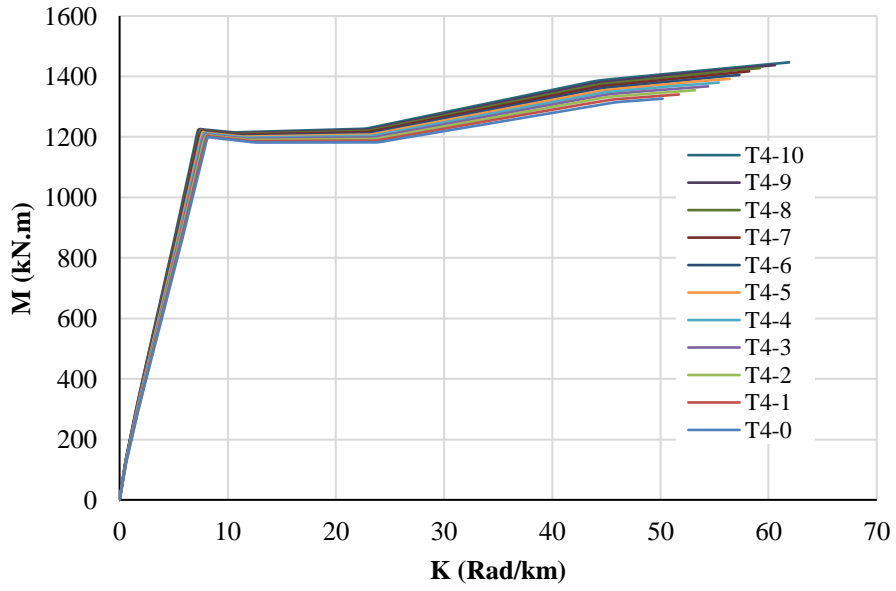
Şekil 2. Tip-1 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait moment eğrilik diyagramları



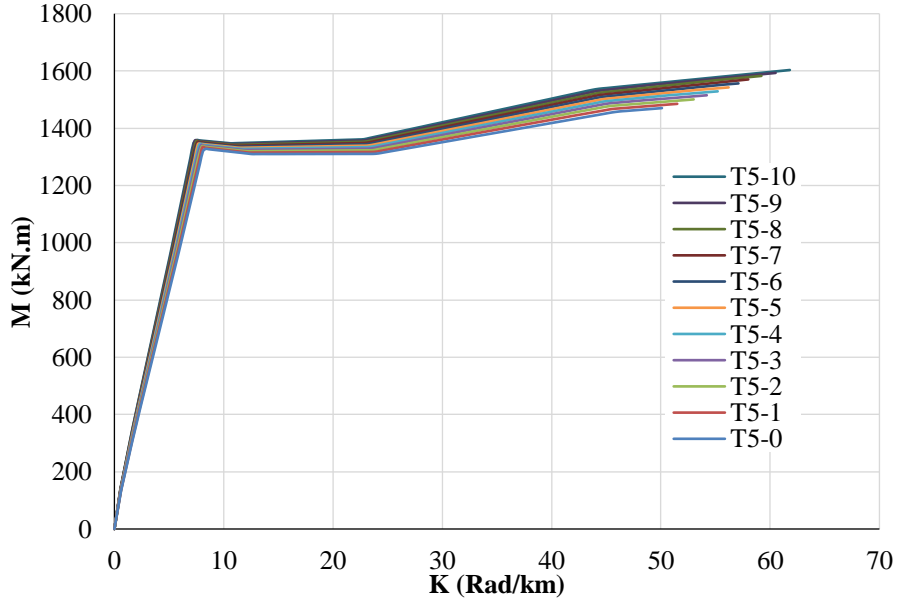
Şekil 3. Tip-2 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait moment eğrilik diyagramları



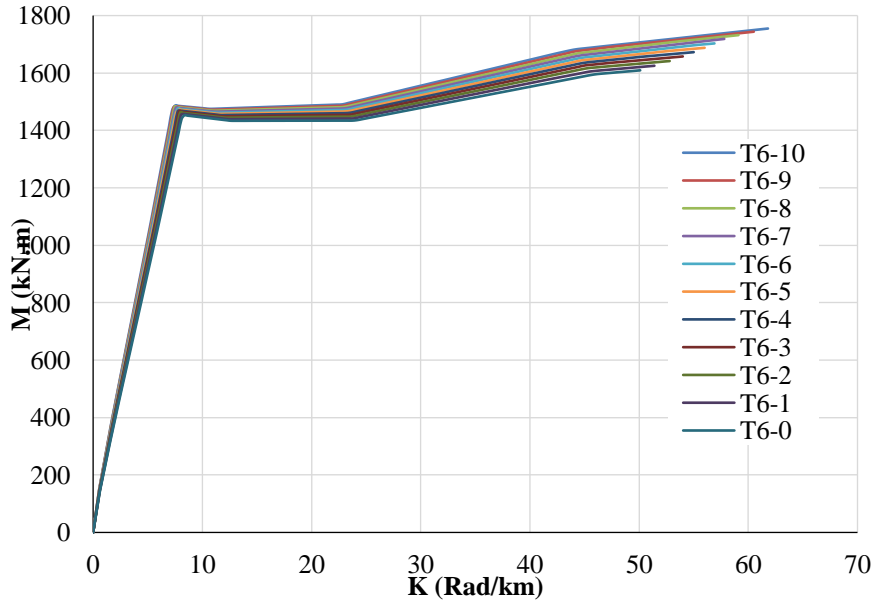
Şekil 4. Tip-3 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait moment eğrilik diyagramları



Şekil 5. Tip-4 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait moment eğrilik diyagramları



Şekil 6. Tip-5 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait moment eğrilik diyagramları



Şekil 7. Tip-6 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait moment eğrilik diyagramları

Betonarme T en-kesitli kiriş elemanlarının moment-eğrilik ilişkisinin grafikleri çizilerek akma momenti, akma eğriliği, maksimum momenti, maksimum eğriliği, etkin eğilme rijitliği ve rijitlik çarpanları hesaplanmıştır. Tip-1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olan betonarme T en-kesitli kirişlerin M_y , M_u , K_y , K_u , EI_e , k_e ve μ değerleri hesaplanarak sırasıyla Tablo 8, 9, 10, 11, 12 ve 13'te verilmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerin M_y , M_u , K_y ve K_u değerleri moment eğrilik ilişkisinden elde edilmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerin etkin eğilme rijitliği ve rijitlik çarpanları Denklem (3) ve eğrilik sünekliliği Denklem (2) ile hesaplanmıştır. Tablolarda M_y , M_u değerlerinin birimi; kNm , K_y , K_u değerlerinin birimi; $Rad/1000m$ ve etkin eğilme rijitliği değerinin birimi; kNm^2 olarak verilmiştir.

Tablo 8-13'te M_y , M_u , K_y , K_u , EI_e , k_e ve μ sırasıyla akma momenti, maksimum momenti, akma eğriliği, maksimum eğriliği, efektif eğilme rijitliği, efektif rijitliğin çarpanı ve eğrilik süneklilidir.

Tablo 8. Tip-1 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları

Kesit No	Akma anında		Kırılma anında		EI_e (kNm^2)	k_e	μ
	M_y (kNm)	K_y ($Rad/1000m$)	M_u (kNm)	K_u ($Rad/1000m$)			
T1-0	777.6	8.03	865.9	50.4	96837	0.731	6.3
T1-1	782.7	7.92	875.8	52.2	98826	0.747	6.6
T1-2	784.3	7.81	885.4	53.9	100423	0.759	6.9
T1-3	787.4	7.71	893.5	55.0	102127	0.772	7.1
T1-4	787.7	7.62	901.7	56.1	103373	0.781	7.4
T1-5	791.0	7.52	910.0	57.2	105186	0.794	7.6
T1-6	791.6	7.43	917.8	58.0	106541	0.805	7.8
T1-7	791.8	7.36	924.9	58.8	107582	0.813	8.0
T1-8	792.4	7.29	932.0	59.6	108697	0.821	8.2
T1-9	793.1	7.22	938.4	60.8	109848	0.830	8.4
T1-10	793.7	7.16	944.3	62.1	110852	0.838	8.7

Tablo 9. Tip-2 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.

Kesit No	Akma anında		Kırılma anında		EI_e (kNm^2)	k_e	μ
	M_y (kNm)	K_y ($Rad/1000m$)	M_u (kNm)	K_u ($Rad/1000m$)			
T2-0	921.5	8.07	1024.3	50.3	114188	0.821	6.2
T2-1	922.0	7.94	1035.7	52.0	116121	0.835	6.5
T2-2	930.0	7.85	1047.1	53.7	118471	0.852	6.8
T2-3	930.2	7.74	1056.7	54.8	120181	0.864	7.1
T2-4	930.7	7.64	1066.2	55.8	121819	0.876	7.3
T2-5	931.6	7.55	1075.9	56.9	123391	0.887	7.5
T2-6	931.8	7.47	1085.5	57.8	124739	0.897	7.7
T2-7	934.8	7.41	1094.2	58.6	126154	0.907	7.9
T2-8	935.9	7.32	1102.6	59.4	127855	0.919	8.1
T2-9	941.4	7.25	1110.1	60.7	129848	0.933	8.4
T2-10	941.6	7.20	1117.1	62.0	130778	0.940	8.6

Tablo 10. Tip-3 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.

Kesit No	Akma anında		Kırılma anında		EI_e (kNm^2)	k_e	μ
	M_y (kNm)	K_y ($Rad/1000m$)	M_u (kNm)	K_u ($Rad/1000m$)			
T3-0	1058.2	8.11	1177.7	50.2	130481	0.898	6.2
T3-1	1062.7	7.96	1190.4	51.8	133505	0.918	6.5
T3-2	1064.5	7.86	1203.2	53.4	135433	0.932	6.8
T3-3	1065.5	7.76	1214.3	54.5	137307	0.945	7.0
T3-4	1065.9	7.66	1225.5	55.6	139151	0.957	7.3
T3-5	1068.5	7.58	1236.5	56.6	140963	0.970	7.5
T3-6	1074.1	7.51	1247.6	57.5	143023	0.984	7.7
T3-7	1075.8	7.43	1258.2	58.4	144791	0.996	7.9
T3-8	1078.2	7.35	1267.6	59.2	146694	1.009	8.1
T3-9	1078.2	7.29	1276.3	60.6	147901	1.017	8.3
T3-10	1089.0	7.24	1284.4	61.9	150414	1.034	8.5

Tablo 11. Tip-4 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.

Kesit No	Akma anında		Kırılma anında		EI_e (kNm^2)	k_e	μ
	M_y (kNm)	K_y ($Rad/1000m$)	M_u (kNm)	K_u ($Rad/1000m$)			
T4-0	1193.5	8.13	1326.5	50.2	146802	0.972	6.2
T4-1	1194.0	7.99	1340.4	51.7	149437	0.988	6.5
T4-2	1196.0	7.88	1354.5	53.2	151777	1.004	6.8
T4-3	1196.9	7.78	1367.4	54.4	153843	1.017	7.0
T4-4	1200.5	7.69	1379.7	55.4	156112	1.033	7.2
T4-5	1207.4	7.61	1392.1	56.4	158660	1.049	7.4
T4-6	1207.8	7.54	1404.7	57.3	160186	1.060	7.6
T4-7	1210.9	7.45	1417.0	58.2	162537	1.075	7.8
T4-8	1212.4	7.38	1427.7	59.2	164282	1.086	8.0
T4-9	1217.5	7.32	1437.6	60.6	166325	1.100	8.3
T4-10	1222.0	7.26	1446.7	61.9	168320	1.113	8.5

Tablo 12. Tip-5 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.

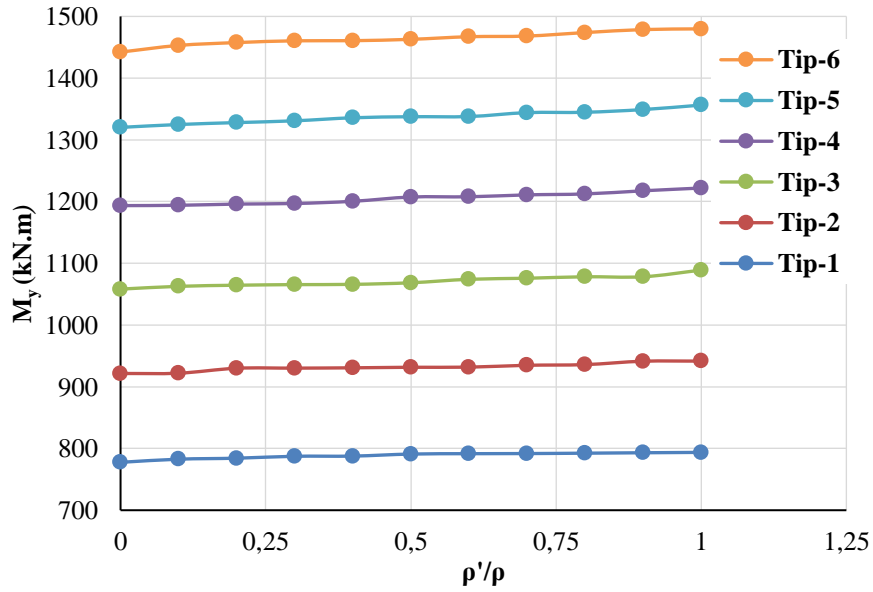
Kesit No	Akma anında		Kırılma anında		EI_e (kNm^2)	k_e	μ
	M_y (kNm)	K_y ($Rad/1000m$)	M_u (kNm)	K_u ($Rad/1000m$)			
T5-0	1320.2	8.14	1470.2	50.1	162187	1.036	6.2
T5-1	1324.9	8.03	1485.2	51.5	164994	1.053	6.4
T5-2	1328.0	7.91	1500.7	53.0	167889	1.072	6.7
T5-3	1330.9	7.81	1515.1	54.2	170410	1.088	6.9
T5-4	1335.8	7.73	1528.7	55.2	172807	1.104	7.1
T5-5	1337.5	7.65	1542.6	56.2	174837	1.117	7.3
T5-6	1337.8	7.55	1556.5	57.1	177192	1.131	7.6
T5-7	1344.1	7.47	1570.4	58.0	179933	1.148	7.8
T5-8	1344.7	7.41	1582.7	59.2	181471	1.158	8.0
T5-9	1349.1	7.36	1593.2	60.5	183302	1.170	8.2
T5-10	1356.4	7.28	1603.3	61.8	186319	1.189	8.5

Tablo 13. Tip-6 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.

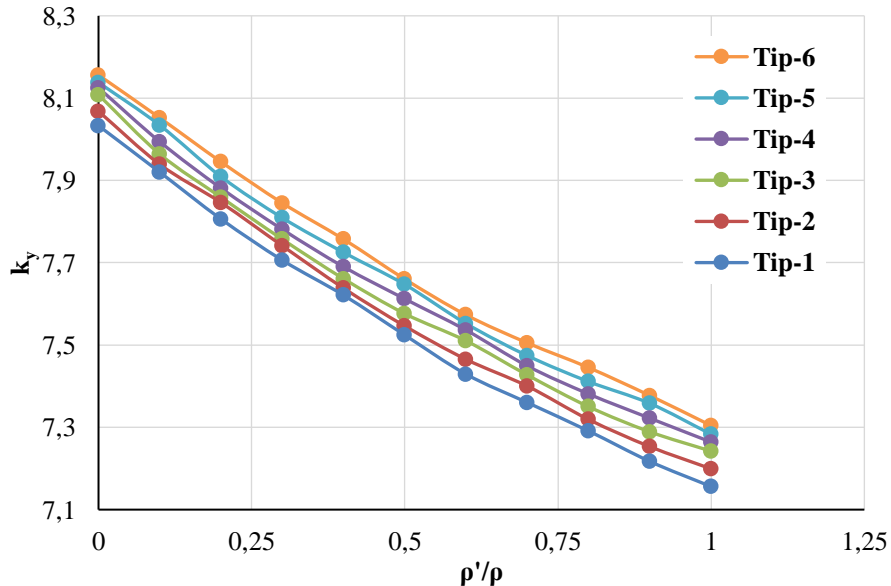
Kesit No	Akma anında		Kırılma anında		EI_e (kNm^2)	k_e	μ
	M_y (kNm)	K_y ($Rad/1000m$)	M_u (kNm)	K_u ($Rad/1000m$)			
T6-0	1442.2	8.16	1609.3	50.1	176740	1.093	6.1
T6-1	1453.0	8.05	1625.2	51.4	180497	1.115	6.4
T6-2	1457.6	7.95	1641.7	52.8	183346	1.134	6.6
T6-3	1460.5	7.85	1657.6	54.0	186051	1.151	6.9
T6-4	1460.7	7.76	1672.6	55.0	188235	1.164	7.1
T6-5	1462.9	7.66	1687.8	56.0	190979	1.180	7.3
T6-6	1467.1	7.57	1703.1	56.9	193804	1.197	7.5
T6-7	1468.2	7.51	1718.7	57.8	195499	1.209	7.7
T6-8	1473.8	7.45	1732.0	59.1	197826	1.223	7.9
T6-9	1478.7	7.38	1743.9	60.5	200366	1.239	8.2
T6-10	1479.8	7.30	1754.9	61.8	202712	1.252	8.5

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

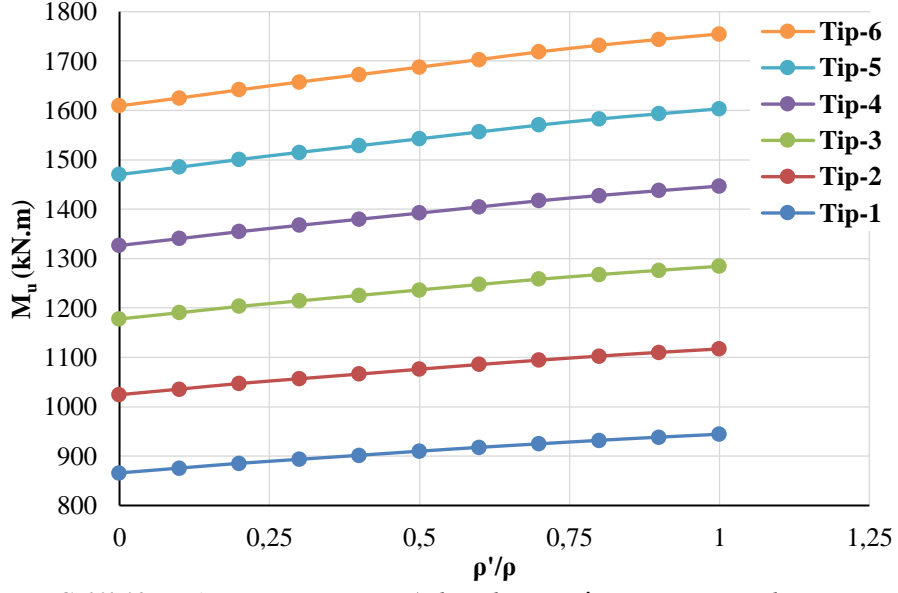
Tasarlanan betonarme T en-kesitli kiriş kesitlerinin farklı parametrelere göre analiz ve hesap sonuçlarından elde edilen grafikler Şekil 8, 9, 10, 11, 12, 13 ve 14'ta verilmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerin moment-eğrilik analizlerinden elde edilen akma momenti (M_y) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi Şekil (8)'de ve akma eğrilik (k_y) değerlerinin ρ'/ρ değerlerine göre değişimi Şekil (9)'da verilmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerin moment-eğrilik analizlerinden elde edilen maksimum moment (M_u) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi Şekil (10)'da ve maksimum momente karşı gelen eğrilik (k_u) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi Şekil (11)'de verilmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen M_y ve k_y değerlerinden elde edilen değerlere göre kesitlerin etkin eğilme rijitliği (EI_e) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi Şekil (12)'de ve betonarme kirişlerin eğrilik sünekliği (μ) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi Şekil (13)'te verilmiştir. Betonarme T en-kesitli kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerine göre Denklem (3) ile hesaplanan etkin eğilme rijitliği çarpanları (k_e) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi Şekil (14)'te verilmiştir.



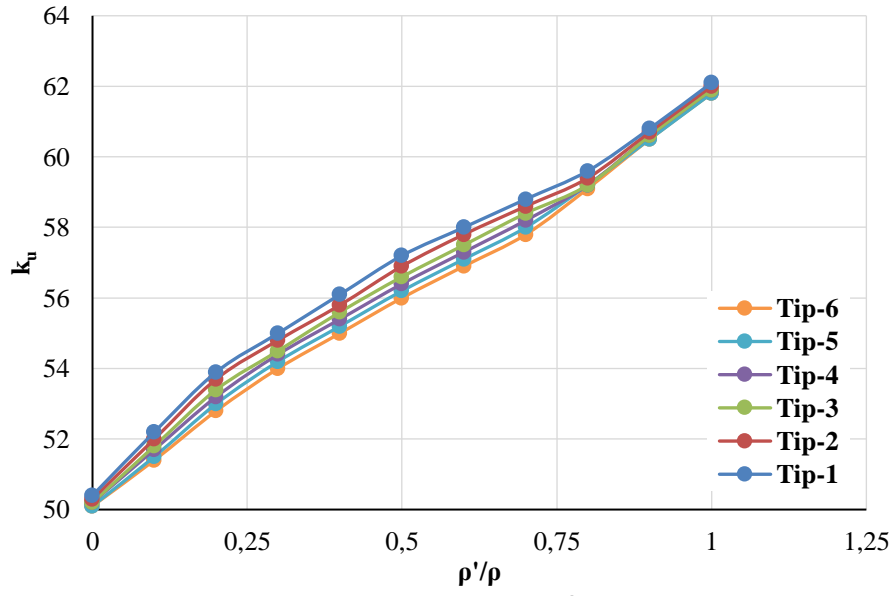
Şekil 8. Akma momenti (M_y) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi



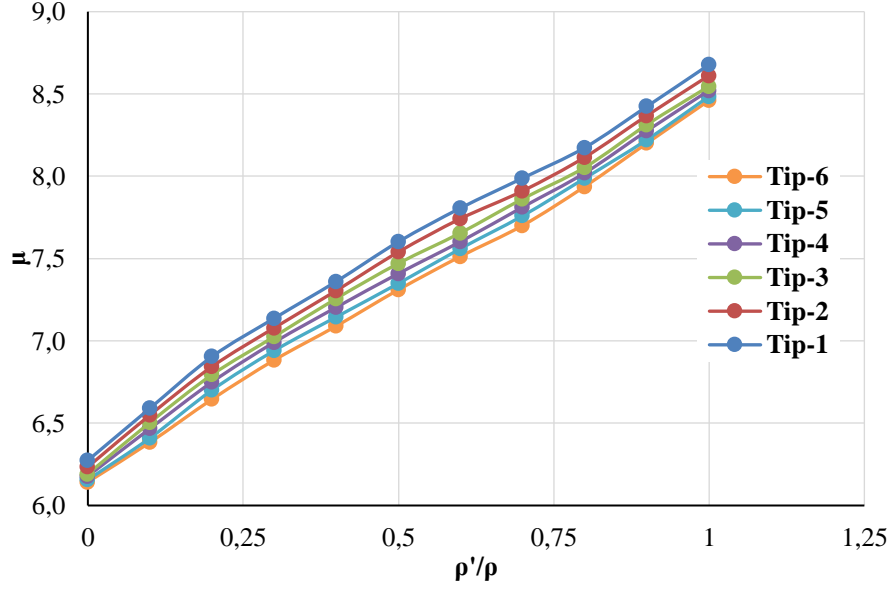
Şekil 9. Akma eğriliği (k_y) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi



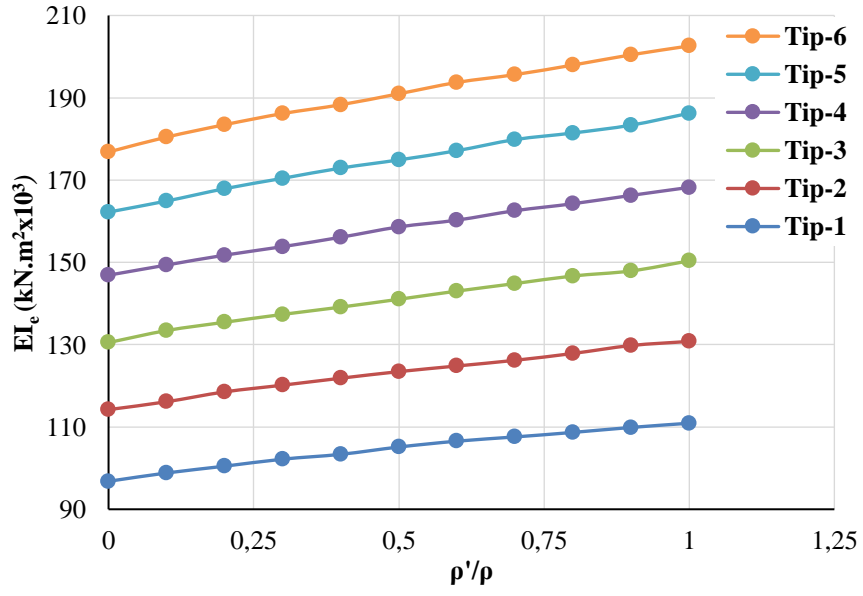
Şekil 10. Maksimum moment (M_u) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi



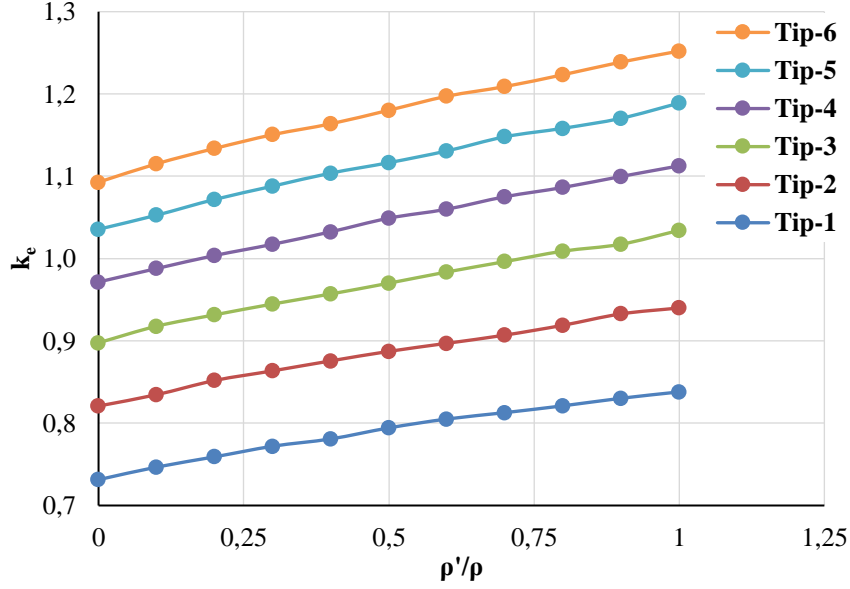
Şekil 11. Maksimum eğrilik (k_u) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi



Şekil 12. Eğrilik Süneklik (μ) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi



Şekil 13. Etkin rijitlik (EI_e) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi



Şekil 14. Etkin eğilme rijitlik çarpanları (k_e) değerlerinin ρ'/ρ oranına göre değişimi

Analiz edilen T en-kesitli kiriş modelleri için Şekil 9, 10, 11, 12, 13 ve 14'den elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

T en-kesitli betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen M_y değerleri % 2.1'den % 2.6'ya kadar artmaktadır.

Sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen M_u değerleri yaklaşık olarak % 9 artmaktadır.

Betonarme T en-kesitli kirişlerde beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı sabit iken basınç donatısı oranının artması ile akma eğriliği (k_y) değerleri yaklaşık olarak % 12 azalmaktadır.

Betonarme T en-kesitli kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile maksimum eğrilik (k_u) değerleri yaklaşık olarak % 23 artmıştır.

Sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile betonarme T en-kesitli kirişlerin eğrilik süneklik (μ) değerleri % 38 ve efektif eğilme rijitliği (EI_e) değerleri % 14.6 artmaktadır.

Basınç donatı oranının artması ile betonarme T en-kesitli kirişlerin efektif eğilme rijitliği çarpanı (k_e) değerlerinin 0.73'ten 1.25'e kadar değiştiği görülmektedir

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada betonarme T en-kesitli kirişlerin davranışına etkileyen parametreler araştırılmıştır. Betonarme T en-kesitli kirişlerin davranışı gerçekçi malzeme modellerine dayanan SAP2000 programı ile fiber ideal modelinden elde edilmiştir. Çalışmanın kapsamında 66 adet betonarme T en-kesitli kiriş modelinin analizleri yapılarak moment-eğrilik grafikleri karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Tasarlanan kiriş kesitlerin analizlerin elde edilen sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir.

Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme T en-kesitli kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile akma momenti (M_y) değerleri artmaktadır.

Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme T en-kesitli kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile maksimum moment (M_u) değerleri artmaktadır.

Betonarme T en-kesitli kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile akma eğriliği (k_y) değerleri artmaktadır.

Betonarme T en-kesitli kirişlerde basınç donatısı oranının sabit tutulup, beton basınç dayanımının artırılması ile maksimum eğrilik (k_u) değerleri azalmaktadır.

Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme T en-kesitli kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile EI_e ve k_e değerleri artmaktadır.

Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme T en-kesitli kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile μ değerleri küçük miktarlarda azalmaktadır.

Basınç donatısı oranının T en-kesitli kirişlerin akma ve maksimum moment taşıma kapasitesine, eğrilik sünekliğine ve kesitlerin etkin eğilme rijitliğine etkisi olduğu ispatlanmıştır.

VI. KAYNAKLAR

- [1] U. Ersoy, "Betonarme Kiriş ve Kolonların Moment Kapasitelerinin Saptanması," *Teknik Dergi*, 9 (4), ss. 1781-1997, 1998.
- [2] S. B. Yüksel, R. Jamal ve S. Foroughi, "Kirişlerde Basınç Donatısı Oranının Moment-Eğrilik İlişkisine Etkisi," *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c.8, s.1, 1-17, 2020.
- [3] SAP2000, "Structural Software for Analysis and Design, Computers and Structures", Inc, Version 20.2.0.0 USA.
- [4] TTDY, 2018, "Türkiye Tina Deprem Yönetmeliği" *T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı*, Ankara, 18 Mart 2018.
- [5] TS500, 2000, "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", *Türk Standardları Enstitüsü*, TSE, Ankara, Şubat 2000.
- [6] J. Mander, T. Priestley M. J. N. and R Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, pp.1804-1826, 1988.
- [7] N. Çağlar, A. Akkaya, A. Demir ve H. Öztürk, "Farklı Kesit Geometrilerine Sahip Betonarme Kolonların Davranışının İncelenmesi," *ISITES2014*, ss. 2095-2105, Karabük/Türkiye, 2004.
- [8] E. Canbay, U. Ersoy, G. Özcebe, H. Sucuoğlu ve S.T. Wasti, "Binalar İçin Deprem Mühendisliği Temel İlkeler," *Akademik Kitaplar Yayınevi*, ISTN: 9799789944070, ODTÜ Ankara, 2010.
- [9] U. Ersoy ve G. Özcebe, "Betonarme 1," *Evrin Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti*, İSTN: 978-975-503-215-31, İstanbul, 2012.