

Çekme Rijitleşmesinin FRP ve Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Yük-Deplasman Davranışı Üzerindeki Etkisi

İsmail ÜNSAL¹, Cengiz DÜNDAR¹, A. Kamil TANRIKULU*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 10.02.2016

Kabul tarihi: 09.03.2016

Özet

Bu çalışmada çekme rijitleşmesinin, FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı üzerindeki etkisi teorik olarak incelenmiştir. Bu amaçla yapılan analizlerde, literatürde mevcut çeşitli deneysel çalışmalarda test edilmiş olan 12 adet FRP ve çelik donatılı kiriş numunesi esas alınmıştır. Çekme rijitleşmesinin eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemek üzere hesaplarda iki bölgeyi doğrusal çekme rijitleşmesi modeli kullanılmıştır. Bu modelde çekme rijitleşmesini α_{ts} parametresi kontrol etmektedir. Yapılan analizlerle, her bir kiriş için α_{ts} parametresinin 2 ile 25 arasında değişen değerlerine bağlı olarak yük-deplasman eğrisi elde edilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar, mevcut deneysel çalışmalarda verilen kiriş numunelerine ait yük-deplasman ilişkileriyle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile en uyumlu yük-deplasman ilişkisini sağlayan α_{ts} değerleri kaydedilmiştir. Sonuç olarak yük-deplasman davranışı belirlenmek istenen FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin analizi için hesaplarda esas alınması gereken α_{ts} değerinin, donatı oranı ve donatı elastisite modülü gibi faktörlere bağlı olarak önemli oranda değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çekme rijitleşmesi, FRP donatılı kiriş, Şekil değişme, Deplasman

Tension Stiffening Effect on Load–Deflection Behavior of Concrete Beams Reinforced with FRP and Steel Bars

Abstract

In this study, tension stiffening effect on load-deflection behavior of concrete beams reinforced with FRP and steel bars is investigated. A total of 12 FRP reinforced concrete beam specimens, available in the literature, were considered in the analysis. In order to investigate tension stiffening effect on flexural behavior, bilinear tensile stress-strain model was considered for concrete material. In this model the parameter α_{ts} controls the tension stiffening effect on the load-deflection behavior of the beam. Load-deflection curves for the specimens were obtained with varying α_{ts} between 2 to 25, and then were compared with the experimental results. In conclusion it is observed that the value of α_{ts} to be taken into account for calculations in order to predict load-deflection behavior of reinforced concrete beams significantly depend on the reinforcement ratio and the mechanical properties of reinforcement.

Keywords: Tension stiffening, FRP reinforced beam, Strain, Load-deflection, Moment-curvature

* Yazışmaların yapılacağı yazar: A. Kamil TANRIKULU, Çukurova Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana. akt@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Eğilmeye çalışan betonarme elemanlarda, ilk çatlamaadan hemen sonra komşu iki çatlak arasında kalan beton, donatı ile olan aderansı nedeniyle oluşan çekme gerilmesinin taşınmasına katkı sağlamaktadır. Betonarme elemanın bu andaki eğilme rijitliği, beton çekme dayanımı ihmal edilerek hesaplanan eğilme rijitliğinden daha büyük olmaktadır. Çekme rijitleşmesi denilen bu etki, özellikle düşük donatı oranına sahip kiriş kesitlerinde çatlamanın ilk aşamalarında moment - eğrilik ilişkisine yön vermekte ve yük altında eğilme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.

Çekme rijitleşmesinin gerek FRP donatılı gerekse çelik donatılı betonarme kirişler üzerindeki etkisinin belirlenmesine ilişkin pek çok sayıda teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Stramandinoli ve Rovere [1] çalışmalarında çekme rijitleşmesi için, çelik ve betonun modüler oranına ve donatı oranına bağlı olan, CEB modelinden türetilmiş bir parametrenin belirleyici olduğu yeni bir model önermişlerdir. Allam, Shoukry, Rashad, Hassan [2] önerdikleri analitik modelde çekme rijitleşmesinin alt sınırını belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca çekme bölgesindeki betonun toplam katkısını hesaplamak üzere yapılan sonlu elemanlar analizi ile elde ettikleri değeri elemanda çekme rijitleşmesinin üst sınırı olarak kabul etmişlerdir. Yaptıkları analizlerde artan eğilme donatısı oranına karşılık çekme rijitleşmesinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Wu ve Gilbert [3], modifiye ettikleri CEB-FIB modelini nonlineer sonlu elemanlar programına uyarlamışlar ve çekme rijitleşmesini kullanılabilirlik sınır durumunda belirlemeye çalışmışlardır. Önerdikleri model ile eksenel çekme yükü altındaki elemanlara ait gerilme, deformasyon ve çatlak genişlikleri belirlenmiştir. Yankelevsky, Jabareen ve Abutbul [4], eksenel çekme ile yüklenen silindirik kesitli, tek donatılı bir elemanın artan yük altında rijitliğindeki sürekli değişimi inceleyerek bir boyutlu model geliştirmişlerdir.

Literatürde mevcut olan iki bölgeli doğrusal çekme rijitleşmesi modelinde çekme rijitleşmesini α_{ts} parametresi kontrol etmekte ve α_{ts} için 2 ile 25 arasında bir değer alınması önerilmektedir. Ancak

bu değer aralığındaki farklı α_{ts} değerleri esas alınarak yapılan hesaplardan oldukça farklı yük-deplasman eğrileri elde edilmektedir.

Bu çalışmada, α_{ts} parametresi donatı oranı ve donatının mekanik özellikleri gibi etkenlerle ilişkilendirilmiştir. Bu amaçla yapılan analizler için, literatürde mevcut olan çeşitli deneysel çalışmalarda test edilmiş 12 adet FRP donatılı kiriş numunesi esas alınmıştır. Her bir kiriş için α_{ts} parametresinin 2 ile 25 arasında değişen değerlerine bağlı olarak yapılan analizlerle yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Analiz sonuçları, mevcut deneysel çalışmalarda verilen kiriş numunelerine ait yük-deplasman ilişkileriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçları ile en uyumlu yük-deplasman ilişkisini belirleyen α_{ts} değerleri kaydedilmiştir. Yük-deplasman davranışı belirlenmek istenen FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin analizi için hesaplarda esas alınması gereken α_{ts} değerinin, donatı elastisite modülü ve donatı oranı gibi faktörlere bağlı olarak önemli oranda değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

2. MALZEME MODELLERİ VE SAYISAL YÖNTEM

Bu çalışmada, Dündar ve arkadaşları [5] tarafından geliştirilmiş olan, FRP ve çelik donatılı yatay taşıyıcı sistemleri herhangi bir yükleme ve mesnetlenme koşulu altında analiz ederek elemanların yük-deplasman davranışını belirleyen bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Sistem deplasmanlarının hesabında rijitlik matrisi yöntemi kullanılmaktadır. Programda kullanılan sayısal yöntemde, analizin ilk adımında sistemdeki farklı donatıya sahip tüm kesitler için moment - eğrilik ilişkileri kesitin taşıma gücü moment kapasitesi seviyesine kadar hesaplanmakta ve saklanmaktadır. Moment-eğrilik ilişkileri hesaplanırken ilk olarak tarafsız eksen derinliği ve beton basınç bölgesinde en dış lifteki şekil değiştirme (ϵ_c) için bir başlangıç değeri belirlenmekte, denge denklemleri ve uygunluk şartı sağlanıncaya kadar iterasyonlara devam edilmektedir. Her (ϵ_c) değeri için yeni bir moment-eğrilik değeri hesaplanmaktadır. Beton basınç

bölgesinde en dış lifte maksimum şekil değiştirmeye ulaşıncaya kadar moment-eğrilik ilişkileri hesaplanmaya devam edilmektedir. Daha sonra dış yükler altında sistemin lineer elastik analizi yapılmaktadır. Bu analiz sonucu elde edilen eleman uç kuvvetleri kullanılarak elemanlarda çatlamış ve çatlamamış bölgeler belirlenmekte ve her bölgenin eleman rijitliğine katkısı daha önce belirlenmiş olan moment-eğrilik ilişkileri de kullanılarak sayısal integrasyon tekniği ile hesaplanmaktadır.

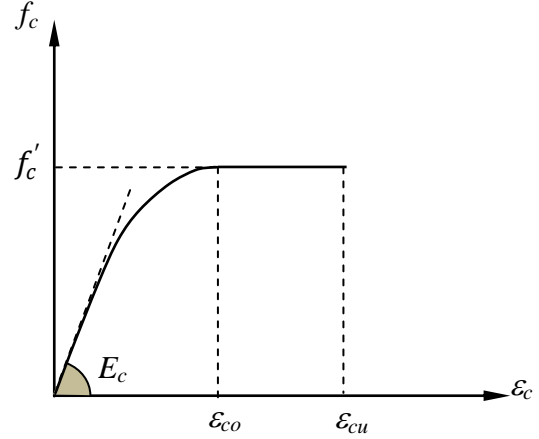
Programda elemanlara ait efektif rijitlikler, çatlamış kesit analizi ile hesaplanan moment - eğrilik ilişkisinden elde edilebildiği gibi, literatürdeki ACI440.1R [6], ACI440-H [7], CEB [8], Bischoff [9], ISIS [10] gibi mevcut modeller de dikkate alınarak hesaplanabilmektedir. Bu şekilde eleman rijitlikleri belirlendikten sonra sistem rijitlik matrisi oluşturularak çözüme gidilmekte, düğüm deplasmanları ve eleman uç kuvvetleri hesaplanmaktadır.

Programa tanımlanan yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar iterasyonlara devam edilmektedir. Program dikdörtgen kesitli yatay taşıyıcı sistemleri üniform veya tekil yükler altında çözümlenebilmekte, kesitlerde bulunan çelik veya FRP donatısını buldukları konuma göre çekme veya basınç donatısı olarak dikkate alabilmektedir. Beton basınç bölgesi için gerilme-şekil değiştirme modeli olarak Hognestad veya CEB-FIB [11] modelleri seçilebilmektedir. Beton çekme bölgesi için literatürde verilen herhangi bir gerilme-şekil değiştirme modeli kullanılabilir.

Bu çalışmada beton basınç bölgesinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için Şekil 1 de verilen ve (1) denklemlerinde tanımlanan CEB-FIB modeli kullanılmıştır. Denklemlerde $\varepsilon_{co} = 0,002$, $\varepsilon_{cu} = 0.003$ alınmıştır.

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad (1a)$$

$$f_c = f'_c \quad \varepsilon_{co} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (1b)$$



Şekil 1. Beton basınç bölgesinde gerilme-şekil değiştirme için CEB-FIB modeli

FRP gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2 de de görüldüğü gibi kopma anına kadar lineer elastik alınmış ve (2) denklemi ile tanımlanmıştır.

$$f_f = E_f \varepsilon_f \quad \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fu} \quad (2)$$

(2) denkleminde f_f ve ε_f sırasıyla FRP donatısındaki gerilme ve şekil değiştirmeyi; E_f FRP donatısının elastisite modülünü ve ε_{fu} kopma anındaki şekil değiştirmesini göstermektedir.

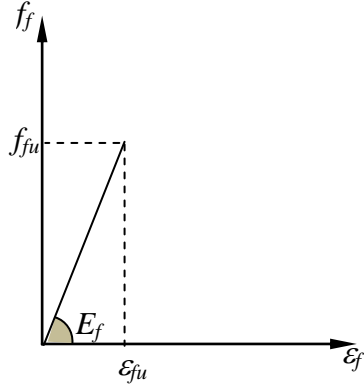
Çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için, Şekil 3 te verilen ve (3) denklemi ile tanımlanan elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (3)$$

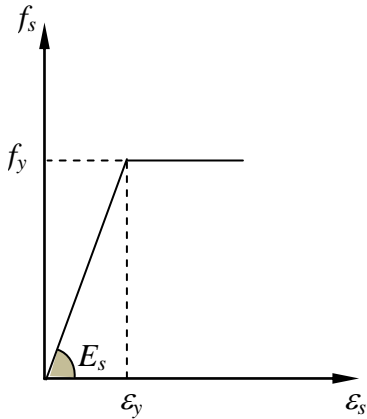
(3) denkleminde f_s and ε_s sırasıyla çeliğin gerilme ve şekil değiştirmesini, E_s ve f_y ise çeliğin elastisite modülü ve akma gerilmesini göstermektedir.

3. ÇEKME RİJİTLEŞMESİ PARAMETRESİNİN KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

Kirişlerde çekme rijitleşmesi etkisi, eğilme davranışı altında elemanda ilk çatlamadan hemen sonra komşu iki çatlak arasında kalan betonun,



Şekil 2. FRP donatısının gerilme-şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 3. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

donatı ile olan aderansı nedeniyle çekme bölgesindeki mevcut gerilmenin taşınmasına katkı sağlaması olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda elemanın eğilme rijitliğine de sağladığı katkı nedeniyle bu etki, özellikle düşük donatı oranına sahip kiriş kesitlerinde çatlamaların ilk aşamalarında moment - eğrilik ilişkisine yön vermekte ve yük altında eğilme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, çekme rijitleşmesi etkisini incelemek üzere iki bölgeli doğrusal çekme rijitleşmesi modeli esas alınmıştır. Şekil 4 te ve (4) denklemlerinde görüldüğü üzere iki bölgeli doğrusal çekme rijitleşmesi modelinde çekme rijitleşmesini α_{ts} parametresi kontrol

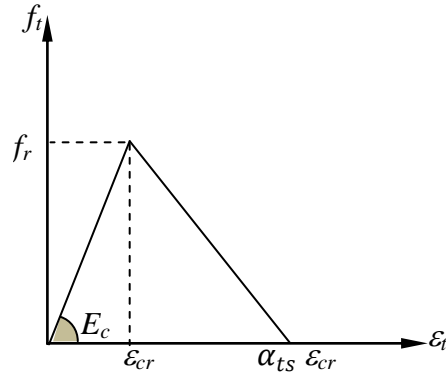
etmektedir. ε_{ctu} kırılma anındaki şekil değiştirme olup (ε_{cr}) çatlama anındaki şekil değiştirme değerinin α_{ts} parametresi ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

$$f_t = E_c \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \quad (4a)$$

$$f_t = f_r - \frac{f_r}{\varepsilon_{ctu} - \varepsilon_{cr}} (\varepsilon_t - \varepsilon_{cr}), \quad (4b)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ctu} &\geq \varepsilon_t \geq \varepsilon_{cr} \\ \varepsilon_{ctu} &= \alpha_{ts} \varepsilon_{cr} \end{aligned} \quad (4c)$$

(4) denklemlerinde f_i betonun çekme gerilmesini, E_c betonun elastisite modülünü, f_r ise betonun çatlama gerilmesini göstermektedir.



Şekil 4. İki bölgeli doğrusal çekme rijitleşmesi modeli

Literatürde çekme rijitleşmesi parametresi α_{ts} için 2 ile 25 arasında değer alınması önerilmektedir. Ancak bu değer aralığındaki farklı α_{ts} değerleri esas alınarak yapılan hesaplardan oldukça farklı yük-deplasman eğrileri elde edilmektedir. Bu çalışmada, α_{ts} parametresinin kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla yapılan analizler için, literatürde mevcut olan çeşitli deneysel çalışmalarda test edilmiş 12 adet FRP ve çelik donatılı kiriş numunesi esas alınmıştır. Her bir kiriş için α_{ts} parametresinin 2 ile 25 arasında değişen değerlerine bağlı olarak yapılan analizlerle yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Analiz sonuçları, mevcut deneysel çalışmalarda verilen kiriş numunelerine ait yük-deplasman ilişkileriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçları ile en uyumlu yük-deplasman ilişkisini belirleyen α_{ts} değerleri kaydedilmiştir. Yük-

deplasman davranışı belirlenmek istenen FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin analizi için hesaplarda esas alınması gereken α_{ts} değerinin, donatı elastisite modülü ve donatı oranı gibi faktörlere bağlı olarak önemli oranda değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. İncelenen 12 adet FRP ve çelik donatılı kiriş numunesinin ait olduğu çalışmalar aşağıda verilmektedir:

(a) Bir adet çelik, üç adet karbon lifli polimer (CFRP) donatılı sürekli kiriş ile iki adet karbon lifli polimer donatılı basit mesnetli kiriş (Mahroug, Ashour, Lam) [12] deneyi. Bu çalışmada test edilmiş olan kirişlerin yüksekliği 150 mm ve genişliği 500 mm olup basit mesnetli ve sürekli kirişlerin açıklıkları 2000 mm'dir.

(b) Bir adet çelik, üç adet bazalt lifli polimer (BFRP) donatılı sürekli kiriş ile iki adet bazalt lifli polimer donatılı basit mesnetli kiriş (Mahroug, Ashour, Lam) [13] deneyi. Bu çalışmada test edilmiş olan kirişlerin yüksekliği 150 mm ve genişliği 500 mm olup basit mesnetli ve sürekli kirişlerin açıklıkları 2000 mm'dir.

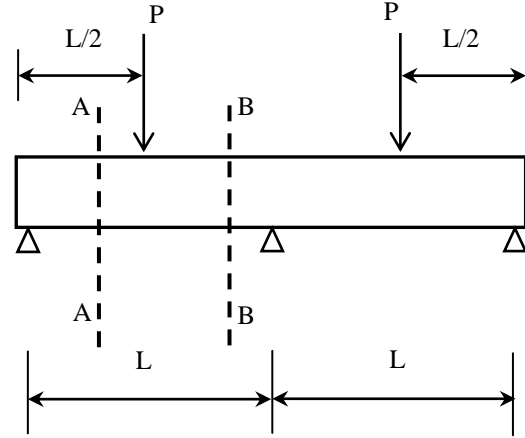
Deney sürekli kirişlerinin mesnetlenme ve yükleme durumu Şekil 5' te görülmektedir.

Kiriş numunelerine ait beton silindir basınç dayanımları 25 ile 43 MPa arasında değişmektedir. Kirişlerin açıklık ortasında ve mesnet bölgesindeki kesitlerine (A-A ve B-B kesitleri) ait donatı detayları ve mekanik özellikleri, Çizelge 1' de verilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yapılan analizler sonucunda 12 adet FRP ve çelik donatılı her bir sürekli kirişe ait yük-deplasman eğrisi, α_{ts} parametresinin 2 ile 25 arasında değişen değerleri için elde edilmiştir. Analiz sonuçları, Şekil 7(a-l) deki grafiklerde, mevcut deneysel çalışmalarda verilmiş olan kiriş numunelerine ait yük-deplasman ilişkileriyle karşılaştırılmaktadır.

Şekil 7(a) ve 7(b) grafikleri incelendiğinde, denge altı donatı oranına sahip olan iki kiriş için deney



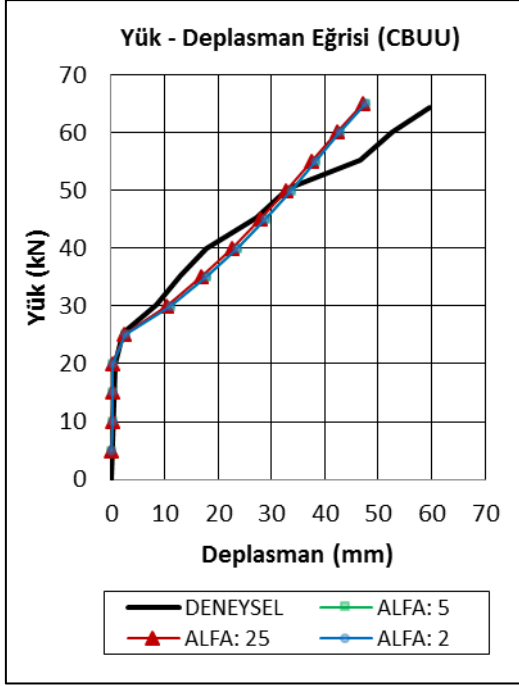
Şekil 5. Sürekli kiriş ve yükleme durumu

sonuçlarına en yakın davranışı sağlayan α_{ts} değerlerinin önemli ölçüde farklı olduğu görülmektedir. Bazalt lifli polimer donatılı kiriş (CBUU) için α_{ts} değeri 25 olarak bulunurken, karbon lifli polimer donatılı kiriş (CCUU) için α_{ts} değeri 12 olarak elde edilmiştir. Çizelge 1'de görüleceği üzere bu kirişlerin açıklıkta çekme donatısı oranı aynı olup %0,24 iken beton basınç dayanımları sırasıyla 42 ve 43 MPa'dır. ρ_f / ρ_{fb} oranları ise CBUU kirişi için 0,83 ve CCUU kirişi için 0,67'dir. Kopma gerilmeleri bazalt ve karbon lifli polimer için sırasıyla 1250 MPa ve 1773 MPa'dır. Aynı kesit ölçülerine sahip olan iki kiriş arasındaki en belirgin fark donatıların elastisite modülü olup CBUU kirişi için 50 GPa ve CCUU kirişi için 137 GPa'dır. Burada α_{ts} parametresinin, donatı elastisite modülü (E_f) ile önemli ölçüde ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek elastisite modülüne sahip FRP donatıların kullanıldığı kirişlerde α_{ts} parametresi için düşük değerler elde edilmektedir.

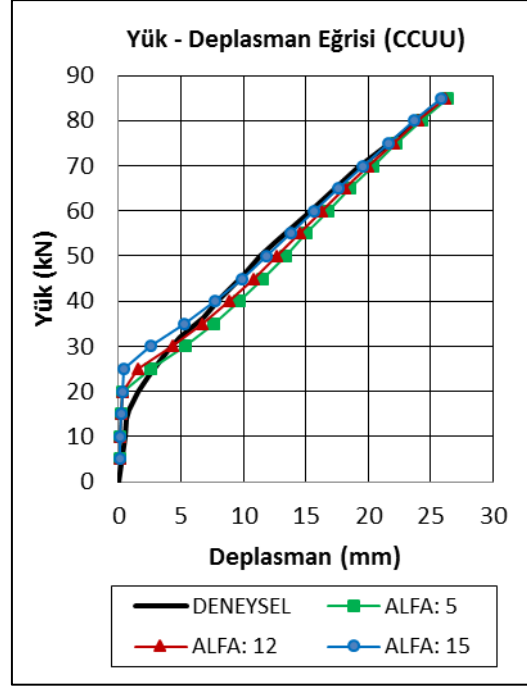
Şekil 7(c) ve 7(d) grafikleri karşılaştırıldığında, her ikisi denge üstü donatı oranına sahip olan CBOO ve CCOO kirişleri için deney sonuçlarına en yakın davranışı sağlayan çekme rijitleşmesi parametresi α_{ts} sırasıyla 16 ve 5 olarak elde edilmiştir. Çizelge 1'de görüleceği üzere bu kirişlerin açıklıkta çekme donatı yüzdeleri sırasıyla %0,63 ve %0,90 olup ρ_f / ρ_{fb} oranları ise 2,52 ve 1,58'dir.

Çizelge 1. Kirişlere ait donatı detayları ve mekanik özellikleri

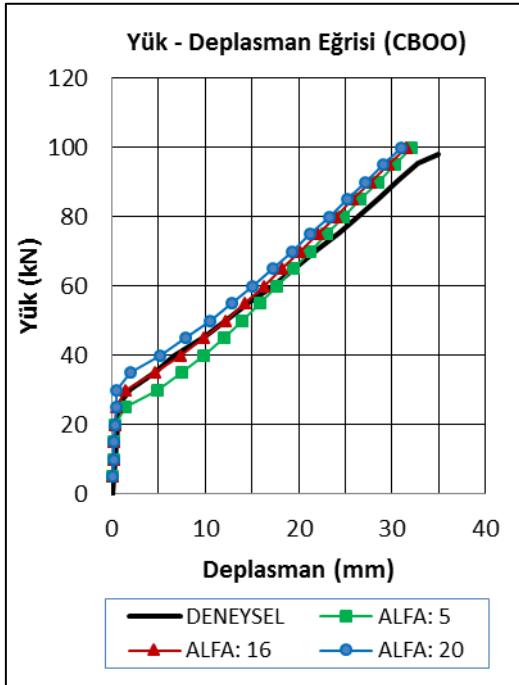
Numune	Donatı yeri	Section A-A					Section B-B					E GPa	f_c GPa
		Donatı	Donatı Cinsi	ρ_f %	ρ_{fb} %	f_{fu}, f_y MPa	Donatı	Donatı Cinsi	ρ_f %	ρ_{fb} %	f_{fu}, f_y MPa		
CCOU ¹²	Alt	5Ø12	CFRP	0,9	0,57	1375	5Ø12	CFRP	-	-	1375	137	37,8
	Üst	-	-	-	-	-	3Ø8	CFRP	0,24	0,36	1773		
CCUU ¹²	Alt	3Ø8	CFRP	0,24	0,36	1773	3Ø8	CFRP	-	-	1773	137	42
	Üst	-	-	-	-	-	3Ø8	CFRP	0,24	0,36	1773		
CCOO ¹²	Alt	5Ø12	CFRP	0,9	0,57	1375	5Ø12	CFRP	-	-	1375	137	40,2
	Üst	-	-	-	-	-	5Ø8	CFRP	0,9	0,57	1773		
CS ₂ UU ¹²	Alt	6Ø10	Steel	0,75	2,88	575	6Ø10	Steel	-	-	575	200	40,6
	Üst	-	-	-	-	-	6Ø10	Steel	0,75	2,88	575		
CBOU ¹³	Alt	5Ø10	BFRP	0,63	0,25	1350	5Ø10	BFRP	-	-	1350	50	43
	Üst	-	-	-	-	-	3Ø8	BFRP	0,24	0,29	1250		
CBUU ¹³	Alt	3Ø8	BFRP	0,24	0,29	1250	3Ø8	BFRP	-	-	1250	50	43
	Üst	-	-	-	-	-	3Ø8	BFRP	0,24	0,29	1250		
CBOO ¹³	Alt	5Ø10	BFRP	0,63	0,25	1350	5Ø10	BFRP	-	-	1350	50	42
	Üst	-	-	-	-	-	5Ø10	BFRP	0,63	0,25	1350		
CSUU ¹³	Alt	4Ø10	Steel	0,50	2,27	575	4Ø10	Steel	-	-	575	200	43
	Üst	-	-	-	-	-	4Ø10	Steel	0,50	2,27	575		
SCO ¹²	Alt	5Ø12	CFRP	0,90	0,57	1375	-	-	-	-	-	137	43
SCU ¹²	Alt	3Ø8	CFRP	0,24	0,40	1773	-	-	-	-	-	137	43,4
SBO ¹³	Alt	5Ø10	BFRP	0,63	0,25	1350	-	-	-	-	-	50	44
SBU ¹³	Alt	3Ø8	BFRP	0,24	0,29	1250	-	-	-	-	-	50	41



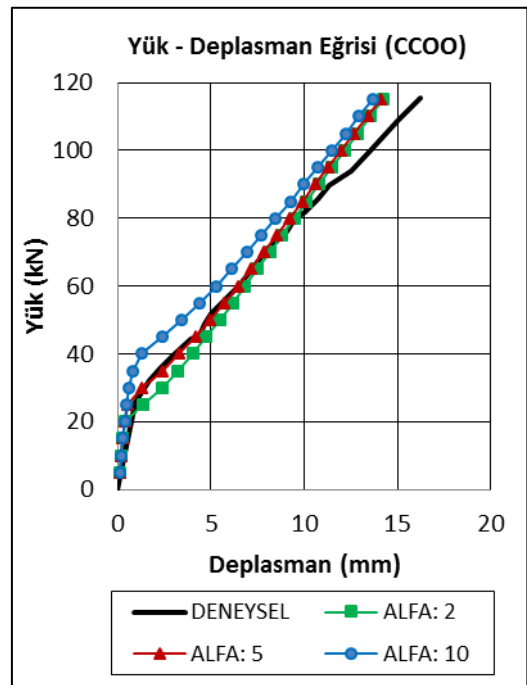
(a)



(b)

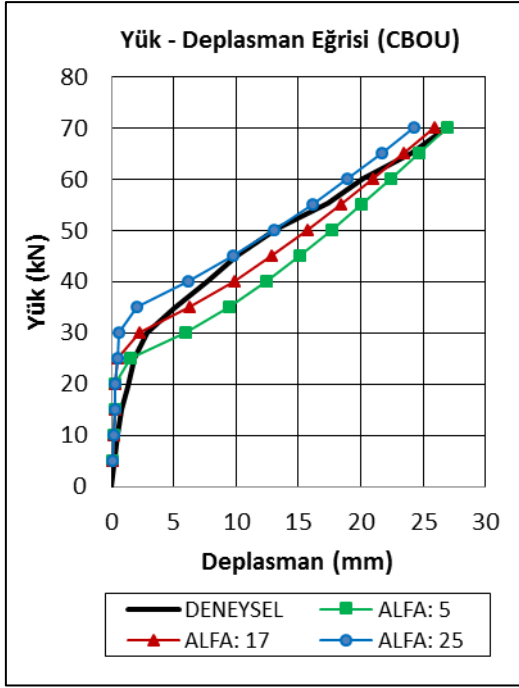


(c)

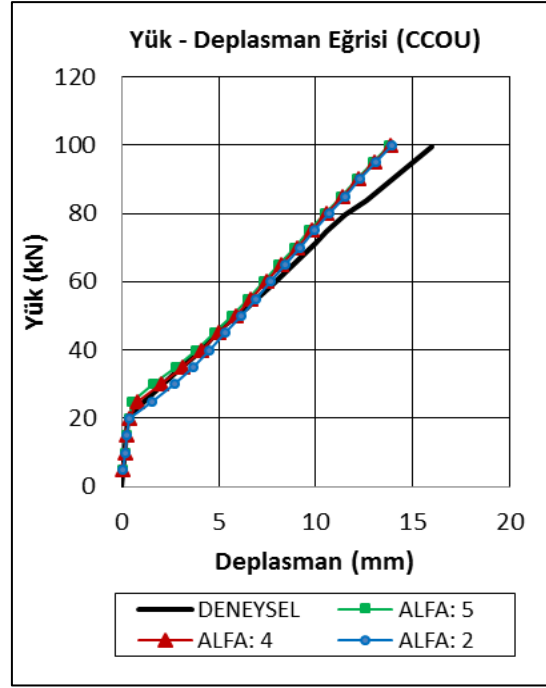


(d)

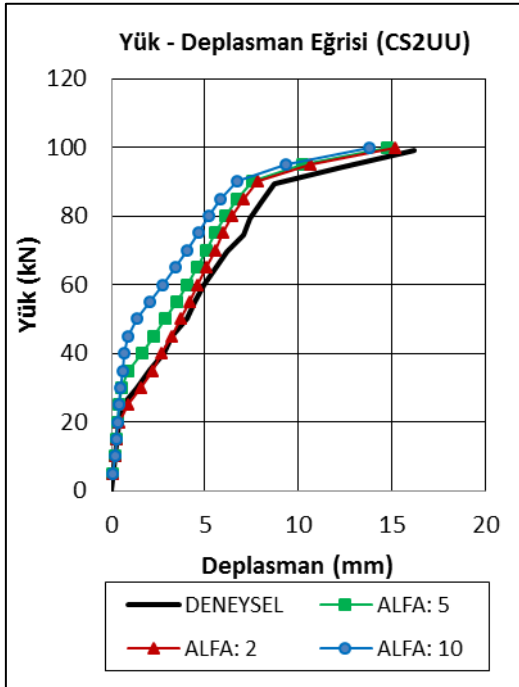
Şekil 7. Kirişlere ait yük-deplasman grafikleri



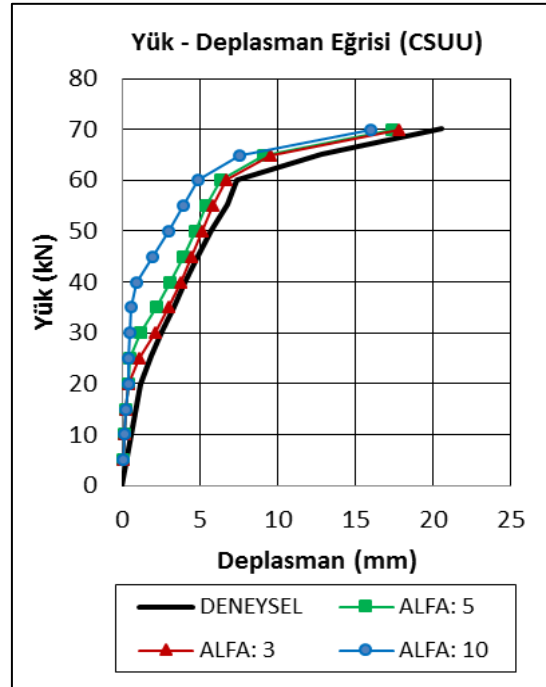
(e)



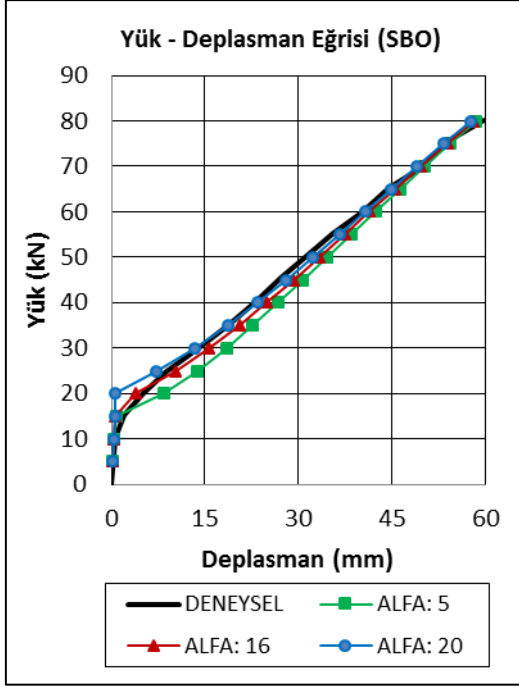
(f)



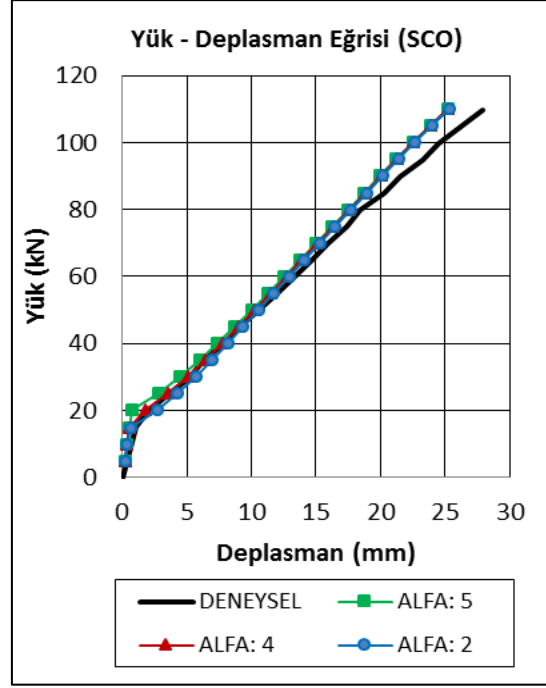
(g)



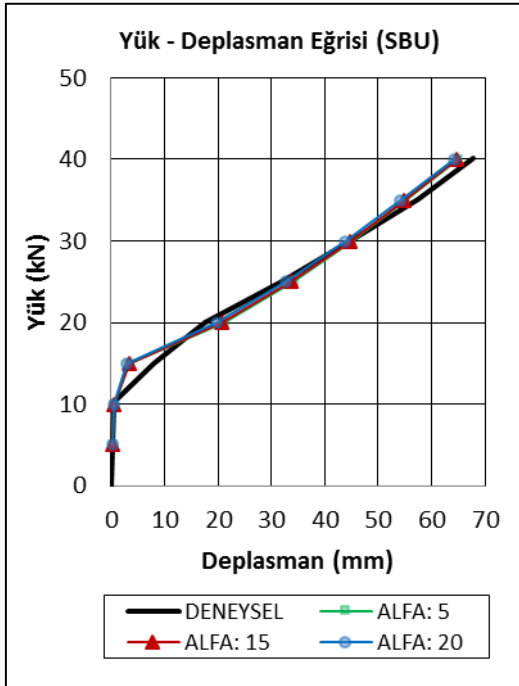
(h)



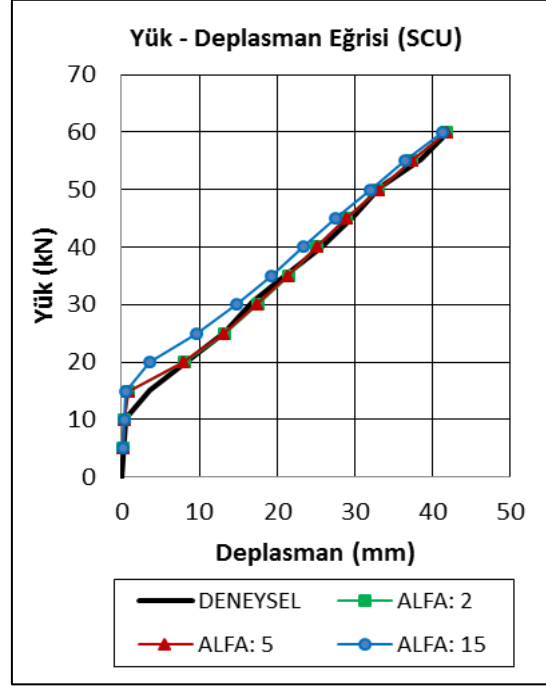
(i)



(j)



(k)



(l)

Beton basınç dayanımları sırasıyla 42 ve 40,2 MPa'dır. Kopma gerilmeleri bazalt ve karbon lifli polimer için sırasıyla 1350 MPa ve 1375 MPa'dır. Aynı kesit ölçülerine sahip olan iki kiriş arasındaki en belirgin fark donatıların elastisite modülü olup CBOO kirişi için 50 GPa ve CCOO kirişi için 137 GPa'dır. Şekil 7(a) ve 7(b) grafiklerindeki benzer şekilde burada da α_{ts} parametresinin, donatı elastisite modülü (E_f) ile önemli ölçüde ilişkili olduğu, E_f arttıkça α_{ts} değerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Benzer durum Şekil 7(e) ile 7(f) grafiklerinde de görülmektedir.

Şekil 7(c) ve 7(e) grafiklerinde CBOO ve CBOU kirişlerine ait yük-deplasman ilişkileri görülmektedir. Her iki kirişin donatıları bazalt lifli polimer donatı olup donatı çapları, elastisite modülleri, donatı oranları ve ρ_f / ρ_{fb} oranları aynıdır. Bu kirişlerin beton basınç dayanımları sırasıyla 42 ve 43 MPa'dır. Bu kirişler arasındaki tek fark donatıların kopma gerilmeleri olup CBOO ve CBOU kirişleri için sırasıyla 1350 ve 1250 MPa'dır. Bu kirişler için α_{ts} değerleri sırasıyla 16 ve 17 olarak elde edilmiştir. Bu karşılaştırmada FRP donatıların kopma gerilmesinin çekme rijitleşmesi parametresi üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir.

Şekil 7(a) ve 7(c) grafiklerinde CBUU ve CBOO kirişlerine ait yük-deplasman ilişkileri görülmektedir. Her iki kirişin donatıları bazalt lifli polimer donatı olup elastisite modülleri aynıdır. Bu kirişlerin beton basınç dayanımları sırasıyla 43 ve 42 MPa'dır. Donatı kopma gerilmeleri sırasıyla 1250 ve 1350 MPa olup kopma gerilmesinin α_{ts} parametresine etkisinin sınırlı olduğu göz önünde bulundurulunca, bu kirişler arasındaki en belirgin farkın donatı oranları olduğu anlaşılmaktadır. Açıklıkta çekme donatısı oranı (ρ_f), CBUU kirişi için %0,24 ve CBOO kirişi için %0,63 olup ρ_f / ρ_{fb} oranları ise sırasıyla 0,83 ve 2,52'dir. Bu kirişler için α_{ts} değerleri sırasıyla 25 ve 16 olarak elde edilmiştir. Burada çekme donatısı oranının çekme rijitleşmesi parametresini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Kesitte çekme donatısı oranı arttıkça α_{ts} değeri azalmaktadır. Aynı etki Şekil 7(b) ve 7(d) grafiklerinde verilen CCUU ve CCOO kirişlerine ait yük-deplasman ilişkilerinde

görülmektedir. Denge altı donatı oranına sahip olan CCUU kirişi için α_{ts} değeri 12 iken, denge üstü donatı oranıyla tasarlanmış olan CCOO kirişi için α_{ts} değeri 5 olarak elde edilmiştir.

Mesnet bölgesindeki çekme donatısı oranının çekme rijitleşmesi parametresine etkisini incelemek üzere Şekil 7(c) ile 7(e) grafikleri karşılaştırıldığında, bu etkinin oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. CBOO ve CBOU sürekli kirişleri ile SBO basit mesnetli kirişlerinin donatı çapları, açıklıkta çekme donatısı oranları, ρ_f / ρ_{fb} oranları, donatı elastisite modülleri ve donatı kopma gerilmeleri tamamen aynıdır.

CBOO kirişinin mesnet bölgesinde çekme donatısı oranı 2,52 iken α_{ts} değeri 16'dır. Bu kirişin sadece mesnetteki donatı oranının 0,83'e düşürülmesiyle elde edilen CBOU kirişi için α_{ts} değeri sınırlı bir miktar artarak 17 değerine çıkmıştır. Şekil 7'de yük-deplasman ilişkisi verilen basit mesnetli SBO kirişi için ise α_{ts} değeri 16 olarak elde edilmiştir. Burada mesnet bölgesindeki çekme donatısı oranının ve kirişlerin mesnetlenme durumunun çekme rijitleşmesi parametresine etkisinin oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada çekme rijitleşmesinin, FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı üzerindeki etkisini incelemek üzere, literatürde mevcut çeşitli deneysel çalışmalarda test edilmiş olan sürekli kiriş numuneleri, kiriş kesitlerinin moment-eğrilik ilişkisine dayalı sayısal bir yöntemle analiz edilmiştir. Farklı çekme rijitleşmesi parametresi (α_{ts}) değerleri esas alınarak yapılan analizlerden oldukça farklı yük-deplasman eğrileri elde edilirken, deneysel sonuçlara en yakın yük-deplasman davranışını sağlayan (α_{ts}) değerlerinin, donatı oranı ve donatı elastisite modülü gibi faktörlere bağlı olarak önemli oranda değişkenlik gösterdiği görülmüştür.

Kirişlerde yüksek elastisite modülüne sahip FRP donatısı kullanılması durumunda, deneysel sonuçlara en yakın yük-deplasman davranışını sağlayan çekme rijitleşmesi parametresinin (α_{ts})

düşük değerlerde kaldığı, düşük elastisite modülüne sahip FRP donatısı kullanılan kirişlerin analizinde ise (α_{ts}) parametresinin yüksek değerler aldığı görülmüştür. Aynı mekanik özelliklere sahip FRP donatıların kullanıldığı farklı kirişlerin analizi sonucunda, donatı oranı arttıkça çekme rijitleşmesi parametresi (α_{ts}) değerinin önemli ölçüde azaldığı, sürekli kirişlerin mesnet bölgesindeki donatı oranının, (α_{ts}) seçimindeki etkisinin ise sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Yukarıda yapılan değerlendirmeler sonucunda kirişlerin eğilme davranışını önemli ölçüde etkileyen çekme rijitleşmesi parametresinin (α_{ts}) , büyük ölçüde kesitte kullanılan donatı oranı ve donatı elastisite modülüne bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: FDK-2015-4924).

7. KAYNAKLAR

1. Stramandinolia R.S.B., Rovere H.L.L., 2008. An Efficient Tension-Stiffening Model for Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Members, *Engineering Structures*, 30: 2069–2080.
2. Allam S.M., Shoukry M.S., Rashad G.E., Hassan A.S., 2013. Evaluation of Tension Stiffening Effect on the Crack Width Calculation of Flexural RC Members, *Alexandria Engineering Journal*, 52: 163-173.
3. Wu H.Q., Gilbert R.I., 2009. Modeling Short-Term Tension Stiffening in Reinforced Concrete Prisms Using a Continuum-Based Finite Element Model, *Engineering Structures*, 31: 2380-2391.
4. Yankelevsky D.Z., Jabareen M., Abutbul A.D., 2008. One-Dimensional Analysis of Tension Stiffening in Reinforced Concrete with Discrete Cracks, *Engineering Structures*, 30: 206–217.
5. Dunder C., Tanrikulu A.K., Frosch R.J., 2015. Prediction of Load-Deflection Behavior of Multi-Span FRP and Steel Reinforced Concrete Beams, *Composite Structures*, 132: 680-693.
6. ACI Committee 440. Guide For The Design and Construction of Structural Concrete Reinforced With FRP Bars. ACI440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI; 2006. P. 44.
7. El-Nemr A, Ahmed EA, Benmokrane B. Flexural Behavior And Serviceability of Normal and High-Strength Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Bars. *ACI Struct J* 2013; 110 (6): 1077–88.
8. Comité Euro-International du Béton (CEB). Manual on Cracking and Deformation, Bulletin D'information, No. 158-E; 1985.
9. Bischoff PH. Reevaluation for Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars. *J Struct Eng* 2005;131(5):752–67.
10. ISIS Canada. Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers, Design Manual No. 3, ISIS Canada, Winnipeg, Manitoba; 2001.
11. Comité Euro-International du Béton(CEB). CEB-FIB Model for Concrete Structures, Bulletin 213/214; 1990.
12. Mahroug M.E.M., Ashour A.F., Lam D., 2014. Tests of Continuous Concrete Slabs Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Bars, *Composites : Part B*, 66: 348-357.
13. Mahroug M.E.M., Ashour A.F., Lam D., 2014. Experimental Response and Code Modelling of Continuous Concrete Slabs Reinforced With BFRP Bars, *Composite Structures*, 107: 664-674.

