

Araştırma Makalesi

Kendiliğinden Yerleşen ve Normal Betonlu Betonarme Kirişlerin Burulma Davranışının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi*Abdulkadir Cüneyt Aydın^{a*}, Barış Bayrak^a*^a Ataturk University, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, 25240, Erzurum, Turkey.**Öz**

Bu çalışma kapsamında betonarme kiriş elemanlarda beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranının burulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kiriş numunelerinin on iki âdeti geleneksel betonla sekiz âdeti ise kendiliğinden yerleşen betonla üretilmiştir. Beton basınç dayanımı 20 MPa ile 40 MPa; beton tipi normal beton ile kendiliğinden yerleşen beton ve etriye aralığı olarak da 80 mm ile 100 mm bu çalışmanın ana parametrelerini oluşturmuştur. Kiriş numunelerinin boyutları 250x300x1500 mm, boyuna donatı için 16 mm etriye için 8 mm donatı tasarlandı ve bu parametreler bütün numunelerde sabit tutulmuştur. Kiriş numuneleri hazırlandıktan 28 gün sonra burulma momenti deneyine tabi tutulmuştur. Burulma momentine tabi tutulan kirişlerin burulma momenti kapasiteleri ve dönme açıları incelenmiştir. Normal ve kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin burulma momenti kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Aynı parametrelere sahip kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin daha yüksek burulma momenti kapasitelerine ulaştığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Benzer şekilde kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin dönme açılarının normal beton numunelerinin dönme açılarından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Deneysel olarak ölçülen burulma momenti değerleri Amerikan Standardı, Avrupa Standardı, Avustralya Standardı, İngiliz Standardı ve Türk Standardına göre hesaplanan teorik burulma momenti değerleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara en yakın değerler Avustralya Standardında elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: burulma momenti, kendiliğinden yerleşen beton, normal beton, standartlar, dönme açısı

Torsional Behavior of Self Compacting and Conventional Reinforced Concrete Beams: An Experimental and Theoretical Investigation**Abstract**

In this study, the stirrup ratio in reinforced concrete elements, the impact of the concrete class and concrete type on torsional behavior have been investigated. Eight beams with SCC and twelve beams with CC were manufactured. The compressive strength of concrete 20 MPa with 40 MPa; the concrete type conventional concrete with self-compacting concrete and web spacing 80 mm with 100 mm was designed as the main parameter of this study. The dimension of samples of 250x300x1500 mm, 16 mm for longitudinal reinforcement, 8 mm for web were designed and these parameters was constant for all samples. The beams samples were subjected to torsion test 28 days after preparation. The torsional moment capacity and the rotation angles of the concrete beams subjected to torsional moment was investigated. The torsional moment capacity of the beam samples with conventional and self-compacting concrete were compared. It was experimentally observed that the beams samples with self-compacting concrete that have same parameters with the beam samples with conventional concrete reached higher torsional moment values than the beams with conventional concrete. Similarly, the rotation angles of the self-compacting concrete series have lower values than conventional concrete series. The torsional moment values measured experimentally were compared with the torsional moment values calculated theoretically according to American Standard, European

* Corresponding author
e-mail: acaydin@atauni.edu.tr

Received: 07.06.2016
Accepted: 20.07.2016

Standard, Australia Standard, British Standard and Turkish Standard. The values closest to the experimental results are the values calculated according to the Australian Standard.

Keywords: torsion moment, self-compacting concrete, conventional concrete, standards, rotation angle

Giriş

Burulma Momenti

Burulma, burulma momentleri etkisinde aynı eksen üzerinde eleman en kesitlerinin dönmesi olarak tanımlanabilir. Burulma olayı eleman en kesitlerinde kayma gerilmeleri oluşturur ve elemanda kesit düzeyinde meydana gelir.

Burulma momenti yapı elemanlarına tek başına etki etmesinden ziyade eğilme momenti ve kesme kuvveti ile birlikte etki eder. Dolayısıyla burulma momentinin yapı elemanına tek başına etki etmesi durumu akademik bir çalışma konusudur [1]. Betonarme kiriş elemanlarda burulma momenti gerek Türk Standartlarında gerekse uluslararası standartlarda pek fazla yer bulamamaktadır. Bu çalışmanın önde gelen amaçlarından bir tanesi de burulma momentine maruz kalan yapı elemanlarının davranışı hakkında ilgililere bilgi vermektir.

Burulma momentine maruz kalan betonarme kirişlerin gevrek kırılmalarını önlemek için burulma donatısı yerleştirmek gerekir. Gevrek kırılmayı önlemek için burulma donatısı görevini etriye ve boyuna donatılar üstlenir. Yalnız burada bu iki grup donatıdan birinin bulunmaması halinde diğerinin burulma dayanımı açısından hiçbir işe yaramayacağını belirtmekte yarar vardır [2].

Bu çalışma kapsamında burulma momenti deneysel ve teorik olarak hesaplanmıştır. Teorik burulma momentini hesaplamak için Amerikan Standardı (ACI) [3], Avrupa Standardı (Eurocode-2) [4], Avustralya Standardı (AS3600) [5], İngiliz Standardı (BS110) [6] ve Türk Standardının (TS500-2000) [7] burulma ile ilgili bölümlerindeki formüller kullanılmıştır. İlgili standartlardaki formüllere inceleyecek olursak:

Amerikan Standardına göre burulma momenti formülü aşağıdaki gibi ifade edilir [8]:

$$T_{ACI} = f_{ys}(A_{sw}/s)2A_0 \cot\theta \quad (1)$$

Burada, f_{ys} çeliğin akma dayanımını, A_{sw} etriye alanını, s etriye aralığını, A_0 etriye çubuğu kesit alanını, θ dönme açısını ifade etmektedir.

Avrupa Standardına göre burulma momenti [8]:

$$T_{EU} = 2A_k \sqrt{\frac{A_{sw}f_{ywd}}{s}} \sqrt{\frac{A_{sl}f_{yld}}{u_k}} \quad (2)$$

Burada, A_k merkezi boyuna donatıların ortası olan kiriş kesit alanını, f_{ywd} etriye çeliği tasarım dayanımını, A_{sl} boyuna donatı kesit alanını, f_{yld} boyuna donatı çeliği akma dayanımını, u_k merkezi boyuna donatıların ortası olan kesitin çevresini ifade etmektedir.

Avustralya Standardına göre burulma momenti [8]:

$$T_{AS} = f_{ys} \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) 2A_t \cot\theta \quad (3)$$

Formülü ile ifade edilir. Burada, A_t boyuna donatıların merkezinin çevrelediği kiriş kesitinin alanını ifade etmektedir.

İngiliz Standardına göre burulma momenti hesabı [8]:

$$T_{BS} = \frac{A_{sv}0.8x_1y_1(0.87f_{ys})}{s} \quad (4)$$

Formülü ile ifade edilir. Burada, A_{sv} kiriş kesitindeki iki etriye ayağının arasında kalan alanı, x_1 etriye ayağının kısa kenar doğrultusundaki uzunluğunu, y_1 etriye ayağının uzun kenar doğrultusundaki mesafesini ifade etmektedir.

Türk Standardına göre burulma momenti hesabı [7]:

$$T_{TS} = \frac{A_{sw}2A_kf_{ywd}}{s} \quad (5)$$

Formülü ile ifade edilir.

Yukarıdaki formüllerden de anlaşılacağı gibi her ülke burulma momenti hesabında kendi yaklaşımını kullanmaktadır. Formüller arasındaki temel ayrılık ilgili standartların

burulma momentini karşılayan kesit alanını hesaplamasından kaynaklanıyor. Bu çalışma kapsamında ilgili standartlarla deneysel sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Kendiliğinden yerleşen Beton

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) son yıllarda beton teknolojisinde geliştirilen, kendi ağırlığı altında kalıba yerleşebilme özelliği sayesinde beton dünyasında geniş bir çevre tarafından kullanılan yeni bir özel beton türüdür [9-11]. KYB 1986 yılında Tokyo Üniversitesi'nde Prof. Okamura ve ekibi tarafından bulunmuş ve herhangi bir vibrasyon işlemine gerek duymadan kendi ağırlığı altında kalıba yerleşme özelliği ile araştırmacıların son yıllarda ilgi odağı olmuştur [12-14]. Vibrasyon ve işçilik gerektirmemesi, hızlı döküm, zor yerlerde döküm kolaylığı gibi avantajları KYB'yi beton endüstrisinde gözde kılmıştır [15-17]. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), özel bir karışım hesabı ve dizaynı bulunan, slump kavramı yerine yayılma kavramı ile değerlendirilen ve yerine kendiliğinden yerleşen, bu amaçla vibratör kullanılmasına kesinlikle gerek olmayan, kolay pompalanan, su/çimento oranı düşük, yüksek dayanımlı, segregasyon olmayan, kendiliğinden sıkışan ve seviyelenebilen, kolaylıkla döküldüğü kalıbın şeklini alan, mükemmel yüzey bitişi sağlayan yüksek dayanımlı bir betondur KYB bu avantajlarından dolayı özellikle son yıllarda Dubai 'deki Burj Khalifa, İtalya' da ki 21. Yüzyıl Ulusal Sanat Müzesi gibi önemli yapılarda kullanılmıştır [16-18]. KYB' nin avantajlarının yanı sıra yüksek hidrasyon ve rötre gibi dezavantajları da vardır [19].

Kendiliğinden yerleşen beton günümüzde farklı isimlerle anılmaktadır. Özellikle döşeme tipi, geniş boyutlu yüzeysel alanlarda kullanılması halinde Kendiliğinden Yüzeyleyen Beton (Self Levelling Concrete-SLC) adını almaktadır. Kuzey Amerika'da, Kendiliğinden Konsolide Olan, Çöken Beton (Self Consolidating Concrete-SCC) adı kullanılmaktadır. Kullanım alanı ve bölgeye göre değişen bu isimler birbiri yerine de kullanılmaktadır. Türkiye'de çoğunlukla Kendiliğinden Yerleşen Beton terimi kullanılmakta olup Kendiliğinden Sıkışan Beton

veya Kendiliğinden Sıkışarak Yerleşen Beton isimleri de alternatif olarak kullanılmaktadır. Bundan önceki çalışmalarda [13, 20, 21] araştırmacılar KYB' nin daha çok mekanik özellikleri üzerinde durmuşlardır fakat bu çalışma kapsamında KYB betonarme de kullanılacak şekli ile ele alınmıştır.

Materyal- Yöntem

Betonarme kirişlerin burulma davranışının incelendiği bu çalışmada 250x300 mm en kesitli 1500 mm boyunda 20 adet betonarme kiriş hazırlanmıştır. 20 adet kiriş numunesinin 12 tanesi normal beton ile 8 tanesi de KYB ile üretilmiştir. Normal beton serilerinde her bir kirişten 3 adet üretilmiş olup sonuçlar kullanılırken ortalama değer hesaplanmıştır. KYB serilerinde ise her bir kirişten 2 adet üretilmiş olup bu 2 kiriş numunesinin ortalaması hesaplanmıştır. Beton basınç dayanımı 20 MPa ile 40 MPa; beton tipi normal beton ile KYB etriye oranı için 80 mm ile 100 mm aralık bu çalışmanın ana parametrelerini oluşturmuştur. Kiriş numunelerinin beton döküm işlemleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Kiriş numunelerinin beton döküm işlemleri KYB ve normal beton olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. Beton karışımlarında CEM I 42.5R Portland çimentosu, 0-5 mm çaplı ince agrega ile 5-15 mm çaplı kaba agrega, mineral katkı olarak silis dumanı, kimyasal katkı olarak Draco marka süperakıştırtıcı, su olarak içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanılmıştır. CEM I 42.5R Portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2' de, mineral katkının (silis dumanı) kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3' te verilmiştir. Kiriş numunelerinde boyuna donatı için 16 mm, etriye için 8 mm çaplı nervürlü S220a inşaat çeliği kullanılmıştır. Kiriş numunelerinin donatı çizimleri Şekil 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. CEM I 42.5R Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	C'
18.11	4.60	2.96	64.49	2.95	0.13	0.66	0.05

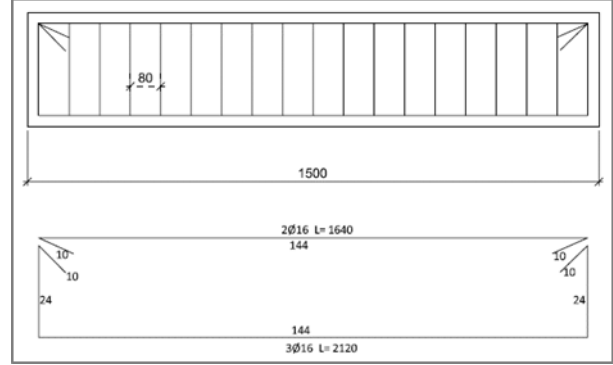
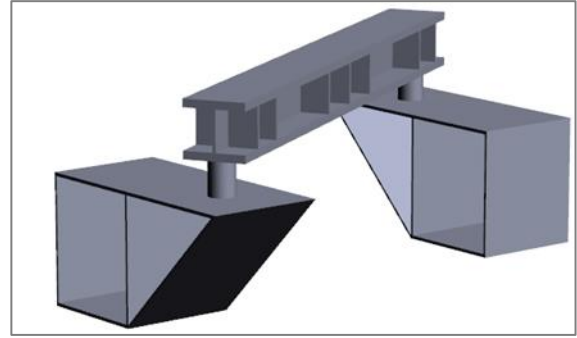
Tablo 2. CEM I 42.5R Portland çimentosunun fiziksel özellikleri

		Birim
Priz Başlangıcı	140	dk
Priz Sonu	208	dk
Özgül Ağırlığı	3.15	gr/cm ³
Hacim Genişlemesi	1.0	mm
Özgül Yüzey Alanı	3954	cm ² /gr
2 Günlük Dayanım	27.1	MPa
28 Günlük Dayanım	58.8	MPa

Tablo 3. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Bileşen		Birimi
SiO ₂	79.94	%
Al ₂ O ₃	0.83	%
Fe ₂ O ₃	0.20	%
CaO	2.53	%
MgO	7.68	%
Kızdırma	2.96	%
Özgül Ağırlık	2.34	
Boyut	<90	µm

Burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinde dönme açısını hesaplamak için 3 adet LVDT (doğrusal değişken fark transformatörü) kirişin sağ tarafında 3 adet LVDT kirişin sol tarafında bağlanmıştır. Deneylerde kullanılan LVDT'lerin deformasyon ölçüm aralığı 100-250 mm arasındadır. Deney düzeneğinde burulma momenti oluşturmak için 90 ton kapasiteli aksel yük uygulayabilen hidrolik pompa kullanılmıştır. Kiriş numunelerine uygulanan aksel kuvveti burulma momentine çevirmek için, kiriş numuneleri baş kısımlarında 30 cm içi boş kelepçelere oturtulmuştur. Bu kelepçelerin üzerine ise çapraz şekilde 7 adet berkitmesi bulunan HEB160 çelik profili monte edilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2' de, hidrolik pompa sistemi Şekil 3' de verilmiştir. Ayrıca deney düzeneğine yerleştirilen kiriş numunesi Şekil 4' de gösterilmektedir.

**Şekil 1.** Kiriş numunelerinin donatı çizimi**Şekil 2.** Deney düzeneği**Şekil 3.** Hidrolik pompa sistemi**Şekil 4.** Deney düzeneğine yerleştirilen kiriş numunesi

Beton dökümü sırasında normal beton ve KYB serileri için yayılma deneyi yapılmış olup aynı zamanda hedeflenen beton basınç dayanımının tutturulduğunu teyit etmek için basınç dayanımı 20 MPa ve 40 MPa olan serilerinin her birinden 3 adet küp numune alınmıştır. Bu numuneler 28 gün sonra kırılmıştır. KYB döküm sırasında ayrıca betonun kıvamını ve akıcılığını belirlemek için gerekli deneyler EFNARC standardına [22] uygun şekilde yapılmıştır. KYB dökümü sırasında betonun akmasını ölçmek için yayılma deneyi, akma direncini (viskozite) belirlemek için V hunisi deneyi, geçme kabiliyetini ölçmek için ise 3 aralıklı L kutusu deneyi yapılmıştır. Beton döküm işlemi biten kiriş numunelerine 28 gün kür işlemi uygulandı ve kiriş numuneleri 28. gün burulma momenti testine tabi tutulmuştur.

Tablo 4. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi

Kiriş Adı	Beton sınıfı (MPa)	Beton tipi	Etriye aralığı (mm)
NBC20EA80(1)	20	NB	80
NBC20EA80(2)	20	NB	80
NBC20EA80(3)	20	NB	80
NBC20EA100(1)	20	NB	100
NBC20EA100(2)	20	NB	100
NBC20EA100(3)	20	NB	100
NBC40EA80(1)	40	NB	80
NBC40EA80(2)	40	NB	80
NBC40EA80(3)	40	NB	80
NBC40EA100(1)	40	NB	100
NBC40EA100(2)	40	NB	100
NBC40EA100(3)	40	NB	100
KYC20EA80(1)	20	KYB	80
KYC20EA80(2)	20	KYB	80
KYC20EA100(1)	20	KYB	100
KYC20EA100(2)	20	KYB	100
KYC40EA80(1)	40	KYB	80
KYC40EA80(2)	40	KYB	80
KYC40EA100(1)	40	KYB	100
KYC40EA100(2)	40	KYB	100

NB: Normal beton

KYB: Kendiliğinden yerleşen beton

Kiriş numunelerinin test sonuçlarının daha kolay bir şekilde yorumlanabilmesi için her bir kirişe isimlendirme yapılmıştır. İsimlendirme yapılırken çalışmanın ana parametreleri olan beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranı dikkate alınmıştır. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi ve özellikleri Tablo 4’ de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Bulgular

Normal beton C20 beton sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 21 MPa, 22 MPa ve 22 MPa; C40 sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 38 MPa, 38MPa ve 40 MPa çıkmıştır. KYB C20 beton sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 21 MPa, 21 MPa ve 24 MPa; C40 sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 44 MPa, 42 MPa ve 40 MPa çıkmıştır. Bu sonuçlara göre de deneyler için seçilen hedef dayanım tutturulmuştur. KYB serileri için yapılan deney sonuçları Tablo 5’ de verilmiştir.

Tablo 5. KYB taze beton sonuçları

Beton Sınıfı	Slump Değeri	L- Kutusu Deneyi	V- Hunisi Deneyi (s)
D (mm)			
C20	640	0.11	9.8
C40	640	0.14	8.6

Bu çalışma kapsamında burulma momentine maruz bırakılan numunelerde, kiriş yüzeyinde ilk çatlığa neden olan kritik burulma momenti (T_{cr}) ve bu değerde kirişin yapmış olduğu dönme açısı (θ_{cr}) ile birlikte kirişlerin burulma momenti kapasiteleri (T_u) ve bu moment değerine karşılık gelen (θ_u) değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar Tablo 6’ da gösterilmiştir.

Tablo 6. Deneysel burulma momenti ve dönme açısı sonuçları

Kiriş Adı	T_u (kNm)	θ_u (deg/m)	T_{cr} (kNm)	θ_{cr} (deg/m)
NBC20EA80(1)	11.20	3.13	10.72	3.09
NBC20EA80(2)	11.33	2.77	10.20	2.56
NBC20EA80(3)	12.60	4.27	11.24	4.24
NBC20EA100(1)	11.90	3.31	9.31	3.01
NBC20EA100(2)	10.60	3.24	9.19	2.98
NBC20EA100(3)	11.90	3.84	9.28	3.70
NBC40EA80(1)	12.18	3.64	12.10	3.43
NBC40EA80(2)	16.10	2.91	15.75	2.43
NBC40EA80(3)	13.92	3.69	13.80	3.69
NBC40EA100(1)	14.20	3.19	12.67	2.80
NBC40EA100(2)	15.20	4.58	13.32	4.55
NBC40EA100(3)	10.74	3.43	10.70	3.40
KYC20EA80(1)	17.92	5.71	16.58	5.68
KYC20EA80(2)	14.45	3.82	13.41	3.74
KYC20EA100(1)	13.24	1.80	11.85	1.75
KYC20EA100(2)	14.51	4.50	12.43	4.45
KYC40EA80(1)	20.01	5.05	19.52	5.02
KYC40EA80(2)	20.67	3.32	19.03	3.15
KYC40EA100(1)	18.17	5.09	16.53	5.08
KYC40EA100(2)	18.90	4.95	15.50	4.91

Elde edilen deneysel burulma momenti sonuçlarının Denklem 1, 2, 3, 4 ve 5' e göre hesaplanan teorik değerlerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Tartışma

Kiriş numunelerindeki çatlaklar elastisite teorisine uygun olarak kiriş yatay eksenine ile 45 derecelik açı yapacak şekilde oluşmuşlardır. Bunun nedeni ise çekme kuvvetinin kayma düzlemine paralel veya dik etki etmesi durumunda kayma gerilmesinin oluşmadığı veya sıfır olduğu, 45 derecelik açı ile etki etmesi durumunda ise kayma gerilmesinin en yüksek değerine ulaşmasından kaynaklanmaktadır.

Çatlakların başlangıç noktaları kiriş üst kısmında meydana gelmiştir ve artan yük dolayısıyla artan burulma momenti etkisiyle çatlaklar kirişin yan yüzeyi boyunca aşağı doğru

ilerlemiştir. İlk çatlak takip eden diğer çatlaklar ise kirişin orta noktalarına doğru meydana gelmiştir. Bazı numunelerde meydana gelen ikinci ve üçüncü çatlaklar ilk çatlakla yaklaşık 10 cm mesafede meydana gelmiştir. Burulma momentine maruz kalan kiriş numunelerinde ilk çatlak deney esnasında ani bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. İlk çatlak meydana geldikten sonra artan yük altında çatlak genişliği de giderek artmıştır. İkinci ve üçüncü çatlaklarda meydana gelen çatlak genişliği ilk çatlaktaki çatlak genişliğine ulaşamamıştır. KYB serilerinde meydana gelen çatlak dallanması normal beton serilerindekilere göre daha azdır. Ayrıca çatlak genişliği KYB serilerinde normal beton serilerine göre daha düşük değerlerde kalmıştır. Normal beton ve KYB serilerinde meydana gelen burulma çatlakları Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Normal beton serilerinde meydana gelen çatlaklar



Şekil 6. KYB serilerinde meydana gelen çatlaklar

Tablo 6' ya bakıldığı zaman kendiliğinden yerleşen beton tipi burulma momenti kapasitesinde yaklaşık %40'lık bir artışa neden olmuştur. Burulma momenti kapasitesindeki bu artışın sebebi, KYB' nin normal betona göre daha akıcı, daha iyi gradasyona sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. KYB' nin karışımında kullanılan silis dumanı çok ince bir yapıya sahip olmasından dolayı KYB ile dökümü yapılan numunelerin daha geçirimsiz bir yapıya sahip olmalarına neden olmuştur. Tablo 6' yı incelediğimiz zaman en büyük burulma momenti değerine 20.67 kNm değeri ile KYC40EA80(2) numunesinin ulaştığını görülmektedir. En büyük burulma momenti değerlerine KYC40 serisinin ulaştığını görülmektedir. En düşük burulma momenti değerlerinin ise 10.60 kNm değeri ile NBC20EA100(2) numunesine ait olduğunu görülmektedir. Numuneleri karşılaştırdığımız zaman NBC20 serisinin NBC40 serisinden, KYC20 serisinin de KYC40 serisinden daha büyük değerlerde burulma açısı ve daha az burulma momenti taşıdığını görülmektedir. Aynı şekilde etriye oranı 80 mm olan serilerin 100 mm olan serilere göre daha düşük değerlerde burulma açısı ve daha fazla burulma momenti karşıladığını söyleyebiliriz. Dolayısıyla burulma momenti ve burulma açısı

ile beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranı arasında bir ilişkinin olduğunu bu çalışma kapsamında görülmüştür. Beton sınıfı yüksek olan numunelerin daha fazla burulma momenti karşıladığını ve daha düşük değerlerde dönme eylemi gerçekleştirdiğini söyleyebiliriz. Yani daha fazla basınç dayanımına sahip olan numuneler daha büyük kesme kuvveti ve dolayısıyla daha büyük burulma momenti değerleri karşılarlar. Etriye oranını düşük tutmanın burula momenti üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Benzer şekilde etriye oranı düşük olan seriler daha az değerlerde dönme eylemi göstermişlerdir. Etriye oranı az olan numunelerin daha fazla burulma momenti karşılamalarının sebebi etriye aralığı az olan numunelerde etriyeler boyuna donatılara daha iyi bir şekilde sargı görevi görmüşlerdir. Dolayısıyla beton numune üzerine gelen kesme kuvvetlerini daha iyi karşılamıştır. Burulma momentinin de kesme kuvvetinden kaynaklandığını düşünürsek etriye aralığı az olan numunelerin daha yüksek burulma momenti değerlerine çıkması normaldir. Ayrıca etriye aralığının az olması numunelerde daha fazla plastik şekil değiştirme özelliği kazandırmıştır ve dolayısıyla elemanların sünekliğini artırmıştır. Bir diğer husus ise burulma çatlakları oluştuğundan sonra, kiriş burulma rijitliği büyük çapta azalmaktadır.

Tablo 7' deki deneysel burulma momenti kapasitesi değerleriyle Tablo 6' daki teorik değerler karşılaştırıldığında, [23] çalışmasında olduğu gibi standartlara göre hesaplanan değerlerin bir birinden farklı sonuçlar vermesi gibi bir problemle karşılaşmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlar bu problemle karşılaşan mühendislere fayda sağlaması amacıyla da yapılmıştır. Deneysel sonuçlar teorik değerlerden hemen hemen her numunede daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni numunelerde kullanılan donatı oranı standartlarda belirtilen orandan daha yüksek kullanılmasıdır. AS3600 standardına göre hesaplanan değerler diğerlerinden daha yüksektir. AS3600 standardı burulma momentini hesaplarırken diğer standartlara göre daha büyük bir kesit alanının kullanılmasını önermektedir. AS3600 standardı burulmanın kiriş kesitinde boyuna donatıların merkezinin

çevrelediği alan tarafından karşılandığını baz almaktadır. Teorik sonuçlarda en düşük değerler de Avrupa Standardına göre hesaplanan sonuçlarda elde edilmiştir. Türk Standardının da deneysel sonuçlara yakın çıktığı deneysel olarak elde edilmiştir.

Tablo 7. Teorik burulma momenti değerleri

Kiriş Adı	ACI	EU	TS	AS	BS
	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm
NBC20EA80(1)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
NBC20EA80(2)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
NBC20EA80(3)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
NBC20EA100(1)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
NBC20EA100(2)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
NBC20EA100(3)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
NBC40EA80(1)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
NBC40EA80(2)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
NBC40EA80(3)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
NBC40EA100(1)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
NBC40EA100(2)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
NBC40EA100(3)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
KYC20EA80(1)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
KYC20EA80(2)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
KYC20EA100(1)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
KYC20EA100(2)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
KYC40EA80(1)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
KYC40EA80(2)	9.3	6.6	10.9	12.8	7.6
KYC40EA100(1)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1
KYC40EA100(2)	7.4	5.9	8.7	10.3	6.1

Bundan önceki çalışmalarda [13, 20, 21, 24] araştırmacılar daha çok KYB' nin durabilite ve mekanik gibi özellikleri üzerinde durmuşlardır. Fakat bu çalışmada KYB' nin betonarme özelliği araştırılmıştır. Burulma ile ilgili olarak ise araştırmacılar önceki çalışmalarda [25-28] betonarme kirişlerin normal betonlu betonarme kirişlerin burulma davranışı üzerinde durmuşlardır.

Sonuç

Normal beton ve KYB ile üretilen betonarme kirişlerin burulma momentine maruz bırakıldığı bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Beton sınıfı olarak daha yüksek dayanıma sahip olan kiriş numunelerin burulma momenti kapasitelerinin daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda NBC40 serisinin NBC20 serisine göre, KYC40 serisinin de KYC20 serisine oranla daha yüksek burulma momenti kapasitesine ulaştıkları deneysel olarak belirlenmiştir.

KYB serilerinin normal beton serilerine göre yaklaşık %40 daha fazla burulma momenti kapasitesine sahip oldukları deneysel olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla betonarme yapılarda kendiliğinden yerleşen beton kullanmanın burulma momenti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Etriye aralığını azaltmak burulma momenti kapasitesini NBC20 serisinde %2, NBC40 serisinde %5, KYC20 serisinde %17, KYC40 serisinde %9 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Burulma momenti kapasitesindeki bu değişimin kendiliğinden yerleşen betonların normal betona göre burulma momenti kapasitesinde daha etkili olduğu ifade etmektedir.

Standartlarla karşılaştırdığımız değerlere baktığımız zaman, normal beton serisinde ölçülen burulma momenti değerleri KYB serisindeki değerlere göre standartlara daha yakın çıkmıştır. KYB serilerinde standartlara göre hesaplanan teorik değerlerden çok yüksek çıkmıştır. Özellikle de EU'ya göre hesaplanan teorik burulma momenti değerleri diğer burulma momenti değerlerinin yanında oldukça düşük kalmıştır. Deneysel burulma momenti sonuçları TS' ye göre hesaplanan teorik sonuçlardan yaklaşık %47, ACI' ye göre hesaplanan teorik sonuçlardan ise %73 daha fazla çıkmıştır. Deneysel burulma momenti kapasitesine en uzak sonuçlar ise %128 ile Eurocode-2'ye göre hesaplanan teorik burulma momenti kapasitesinde elde edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Kamiński M, Pawlak W, 2011. Load capacity and stiffness of angular cross section reinforced concrete beams under torsion. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4): 885-903.
- [2] Doğangün A, 2008. *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. 6 Baskı. İstanbul Birsen Yayınevi.
- [3] Committee A, 2008. A.C. Institute, and I.O.f. Standardization. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- [4] EN, B., 1-2: 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design. European Standards, London, 2004.
- [5] AS, A.S., Concrete structures. AS3600-2001. Sydney (Australia): Standards Australia, 2001.
- [6] Rowe R.E., Handbook to British Standard BS 8110: 1985: Structural Use of Concrete 1987: Palladian Publications.
- [7] TS500, TS500 Requirements for design and construction of reinforced concrete structures, 2000, Turkish Standards Institute Ankara,, Turkey.
- [8] Ameli M, Ronagh H, 2007. Treatment of torsion of reinforced concrete beams in current structural standards. *Asian Journal of Civil engineering (Building and Housing)*, 8(5): 507-519.
- [9] Cattaneo S, Mola F, 2011. Assessing the quality control of self-consolidating concrete properties. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2): 197-205.
- [10] Okamura H, Ouchi M, 1998. Self-compacting high performance concrete. *Progress in structural Engineering and Materials*,1(4): 378-383.
- [11] Aydın A.C, Öz A, Polat R, Mindivan H, 2015. Effects of the different atmospheric steam curing processes on the properties of self-compacting-concrete containing microsilica. *Sadhana*,40(4):1361-1371.
- [12] Aydın A.C, 2007. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 21(6):1149-1154.
- [13] Pineaud A, Pimienta P, Remond S, Carre H, 2016. Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. *Construction and Building Materials*, 112:747-755.
- [14] Verma N, Misra A.K, 2015. Bond characteristics of reinforced TMT bars in Self Compacting Concrete and Normal Cement Concrete. *Alexandria Engineering Journal*,54(4): 1155-1159.
- [15] Nehdi M, Pardhan M, Koshowski V, 2004. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. *Cement and Concrete Research*,34(11): 2103-2112.
- [16] Okrajnov-Bajić R, Vasović D, 2009. Self-compacting concrete and its application in contemporary architectural practice. *Spatium*,(20): 28-34.
- [17] Sadek D.M, El-Attar M.M, Ali H.A, 2016. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121: 19-32.
- [18] Deeb R, 2013. Flow of self-compacting concrete, Cardiff University.
- [19] Sabet F.A, Libre N.A., Shekarchi M, 2013 Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, 44: 175-184.
- [20] Alhussainy F, Hasan H.A, Rogic S, Sheikh M.N, Hadi M, 2016. Direct tensile testing of Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 112: 903-906.
- [21] Kurt M, Said M, Gül R, Aydın A.C, Kotan T, 2016. The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 103: 36-46.
- [22] EFNARC S, 2002. Guidelines for self-compacting concrete. EFNARC Publication, London, UK: 1-32.
- [23] Csikós Á. and Hegedűs I, 1998. Torsion of reinforced concrete beams. Technical University of Budapest, Department of Reinforced Concrete Structures H-1521 Budapest.
- [24] Gesoglu M, Güneyisi E, Öz H.Ö, Taha I, Yasemin M.T, 2015. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 98: 334-344.
- [25] Behera G.C, Rao T.G, Rao C, 2016. Torsional behaviour of reinforced concrete beams with ferrocement U-jacketing—Experimental study. *Case Studies in Construction Materials*, 4: 15-31.

[26] Bernardo L, Lopes S, 2013. Plastic analysis and twist capacity of high-strength concrete hollow beams under pure torsion. *Engineering Structures*,49: 190-201.

[27] Deifalla A, Ghobarah A, 2014. Behavior and analysis of inverted T-shaped RC beams under shear and torsion. *Engineering Structures*, 68: 57-70.

[28] Lopes S, Bernardo L, 2014. Cracking and failure mode in HSC hollow beams under torsion. *Construction and Building Materials*, 51: 163-178.