
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 25.11.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 02.05.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.268874	

Betonarme kirişlerin deneysel ve teorik burulma momenti değerlerinin karşılaştırılması

Abdülkadir Cüneyt Aydın^{*1}, Barış Bayrak²

ÖZ

Betonarme kiriş elemanlarda etriye oranı, beton sınıfı ve beton tipinin burulma davranışının üzerinde etkisinin deneysel olarak incelenmesi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Deneylerde beton basınç dayanımı 20 MPa ile 40 MPa, beton tipi geleneksel beton ile kendiliğinden yerleşen beton ve etriye aralığı 80 mm ve 100 mm çalışmanın ana parametreleri olarak belirlendi. 12 adet normal betonlu 8 adet kendiliğinden yerleşen betonlu 250x300x1500 mm boyutlarında kiriş numunesi hazırlandı. Burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinin burulma momenti kapasiteleri, bu değere karşılık gelen dönme açısı, kritik burulma momenti değerleri, bu değerlere karşılık gelen kritik dönme açıları, burulma çatlakları deneysel olarak ölçüldü. Elde edilen deneysel burulma momenti kapasitesi sonuçları elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri ile karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlara en yakın değerler yanal eğilme teorisinde elde edildi. Kiriş numunelerinin burulma momenti kapasitesi-dönme açısı grafikleri çizildi. Düşük etriye aralığının, yüksek dayanımlı betonun ve beton tipi olarak kendiliğinden yerleşen betonun burulma davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu deneysel olarak bu çalışma kapsamında belirlendi. Deneysel kritik burulma momenti değerleri ilgili çalışmalardan elde edilen ampirik değerlerin karşılaştırılması yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, burulma momenti, kendiliğinden yerleşen beton, yanal eğilme teorisi

The comparison of the experimental and theoretical torsional moment results of reinforcement concrete beams

ABSTRACT

The experimental investigation effect on the torsional behavior of web spacing, concrete class and concrete type of reinforcement concrete beams constitute basis of this work. The compressive strength of concrete, 20 MPa and 40 MPa, the type of concrete, conventional concrete and self-compacting concrete, web spacing of 80 mm and 100 mm, was determined the main parameters of this work. 12 unit of conventional concrete beams and 8 unit of self-compacting concrete beams of 250x300x1500 mm was manufactured. The torsional moment capacities and corresponding rotation angle values, the critical torsional moment values and corresponding critical rotation angles, torsional cracks of the beam samples that subjected to the torsion was measured experimentally. The torsional moment capacity results that were measured experimentally

¹ Ataturk University, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, 25240, Erzurum, Turkey.
e-mail: acaydin@atauni.edu.tr

² Ataturk University, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, 25240, Erzurum, Turkey.
e-mail: baris.bayrak@atauni.edu.tr

were compared with the elastic, plastic and skew-bending theories. The most closed results were get to the skew-bending theory. The graphic of torsional moment capacity- unit rotational angles were plotted. The low web spacing, high concrete class and self-compacting concrete type that have a positive effect on the torsional behavior was determined experimentally in this study. Experimental critical torsion values were compared with empirical values obtained from related studies.

Keywords: Reinforced concrete beam, torsional moment, self-compacting concrete, skew-bending theory

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme kiriş elemanlarda burulma momentine gerek Türk Standardında gerekse uluslararası standartlarda fazla yer verilmemektedir. Betonarme kirişlerin donatılabilmesi yapılırken eğilme momenti yeterli görülmektedir. Bu çalışma kapsamında burulma momentine maruz kalan betonarme kirişlerin burulma davranışları incelenmiştir. Burulma davranışı incelenirken de son yıllarda beton teknolojisinde yükselen bir trende sahip olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) ve normal beton kullanılmıştır. Bu çalışmanın ana parametrelerinden olan burulma ve KYB' nin detaylı bir şekilde incelenmesinde fayda vardır.

2. GENERAL REQUIREMENTS

2.1. Burulma Momenti (Torsional Moment)

Burulma, burulma momenti etkisinde aynı eksen üzerinde eleman en kesitlerinin dönmesi olarak tanımlanır. Burulma olayı eleman en kesitlerinde kayma gerilmeleri meydana getirir ve elemanda kesit düzeyinde meydana gelir. Burulma momenti uygunluk ve denge burulması olmak üzere ikiye ayrılır. Uygunluk burulması hiperstatik sistemlerde şekil değişimlerin sürekliliği sonucu ortaya çıkan ve sistemde denge kaybına neden olmayan burulma şeklidir. Denge burulması ise taşıma gücü ve kullanılabilirlik sınır durumlarında taşıyıcı sistemdeki dengenin sağlanması için hesaba katılması zorunlu olan ve hem hiperstatik hem de izostatik sistemlerde görülen burulma şeklidir [1]. Betonarme kirişlerde meydana gelen burulma momentinin değeri çeşitli teorilerle hesaplanmaktadır. Bu çalışmada dünya genelinde kabul görmüş elastik, plastik ve yanal-eğilme teorileri üzerinde duruldu.

Burulma momentine maruz kalan betonarme kirişlerde meydana gelen kayma gerilmeleri ilk başlarda elastik teoriye göre hesaplanıyordu. Bu teoriye göre maksimum kayma gerilmelerinin

kirişin uzun kenarının orta noktasında meydana geldiği kabul ediliyordu. Kiriş en kesitinde meydana gelen kayma gerilmeleri Şekil 1a' da görülmektedir. Ayrıca elastik teoriye göre burulma momentini (T_e) Denklem 1' de verilmiştir [2].

$$T_e = \alpha_e x^2 y f_{ctk} \quad (1)$$

Burada, α_e elastik teori sabitini, x kiriş en kesitinde kısa kenarı, y kiriş en kesitinde uzun kenarı, f_{ctk} betonun karakteristik çekme dayanımını ifade etmektedir.

Nylander 1955 yılında elastik teori denklemini baz alarak plastik teoriyi denklemini oluşturmuştur. Plastik teoriye göre burulma momentini (T_p) Denklem 2' de verilmiştir. Plastik teoriye göre kayma gerilmeleri Şekil 1b' de de görüleceği üzere kesitin karşılıklı yüzeylerinde aynı büyüklükte fakat ters yönde meydana gelmektedir [2].

$$T_p = \alpha_p x^2 y f_{ctk} \quad (2)$$

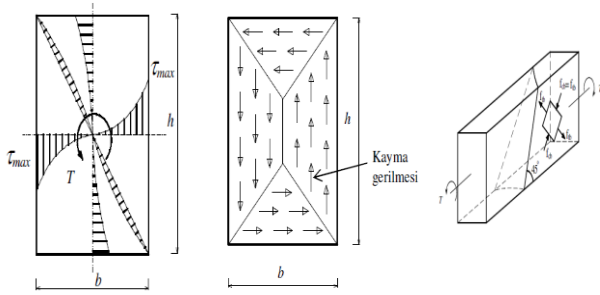
$$\alpha_p = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \frac{x}{y} \right) \quad (3)$$

Burada, α_p plastik teori sabitini ifade etmektedir.

Yanal-eğilme teorisine göre betondaki ilk çatlama kirişin büyük yan yüzeylerinden birinde 45 derecelik bir açı ile başlar ve çatlak alt ve üst yüzeylere diyagonal olarak uzanır. Daha sonra kirişin dördüncü yüzeyinde mevcut çatlak uçlarını birleştiren doğru üzerinde betonun aniden kırılmasıyla Şekil 1c' de gösterildiği gibi eleman kırılır [3]. Yanal eğilme teorisine göre burulma momentini (T_y) Denklem 4' de verilmiştir.

$$T_y = \frac{x^2 y}{3} f_{cts} \quad (4)$$

Burada, f_{cts} betonun yarmada çekme dayanımını göstermektedir.



Şekil 1. a) Elastik b)Plastik c) Yanal eğilme teorilerine göre kiriş en kesitindeki kayma gerilmelerinin dağılımı (The distribution of shear stress at the cross section according to the a) elastic b) plastic c)skew-bending theory) [3]

Betonarme kirişlerde çatlağa sebep olana ilk kuvvete kritik kuvvet ve kuvvete karşılık gelen burulma momentine de kritik burulma momentini (T_{cr}) denir. Kritik burulma momentini değerini hesaplamak için araştırmacılar kendi çalışmalarından yola çıkarak bir takım ampirik formüller üretmişlerdir. Ayrıca Türk Standardı TS500-2000 [4]' de kritik burulma momentini değeri için formül önerilmiştir. Türk Standardındaki kritik burulma momentini Denklem 5' de verilmiştir.

$$T_{cr(TS)} = 1.35f_{ctd}S \quad (5)$$

Burada, f_{ctd} betonun tasarım çekme dayanımını, S burulma dayanım momentidir.

Hsu [5] kendi çalışmalarını baz alarak kritik burulma momentini için önermiş olduğu formül Denklem 6'da verilmiştir.

$$T_{cr(Hsu)} = \frac{1.015}{\sqrt{b}} b^2 h \sqrt{f_c} + \left(0.66m \frac{f_{yd}}{f_{ywd}} 0.33 \frac{h_j}{b_j}\right) \frac{A_{sw} f_{ywd} h_j b_j}{s} \quad (6)$$

$$m = \frac{A_s s}{2(h_j + b_j) A_{sw}} \quad (7)$$

Burada, b kiriş en kesitinin kısa kenarını, h kiriş en kesitinin uzun kenarını, f_c betonun tasarım basınç dayanımını, f_{yd} boyuna donatı çeliğinin akma dayanımını, f_{ywd} etriye çeliği akma dayanımını, b_j ve h_j sırasıyla etriye kolunun yatay ve dikey uzunluğunu, A_{sw} etriye kesit alanını, s etriye aralığını göstermektedir. A_s kirişteki bütün boyuna donatıların alanıdır.

Kuty [6] kritik burulma momentinin etriye ve boyuna donatıya göre iki şekilde hesaplanması

gerektiğini belirtmiştir ve Denklem 8 ve 9'daki formülleri önermiştir.

Etriye için,

$$T_{cr(Kuty)} = A_{sw} f_{ywd} \frac{2A_c}{s} \cot\theta \quad (8)$$

Boyuna donatı için,

$$T_{cr(Kuty)}^l = 2b_j h_j \sqrt{\frac{A_{sl} f_{yd}}{2(h_j + b_j)}} \frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} \quad (9)$$

Burada, A_c betonun kesit alanını, A_{sl} boyuna donatı kesit alanını ifade etmektedir.

Thurliman [7] da kritik burulma momentini değerini hesaplariken etriye ve boyuna donatı olmak üzere iki şekilde ele almıştır ve Denklem 10 ve 11'deki formülü önermiştir.

Etriye için,

$$T_{cr(Thur)} = \frac{2A_k A_{sw} f_{ywd}}{s} \cot\theta \quad (10)$$

Boyuna donatı için,

$$T_{cr(Thur)}^l = \frac{2A_k A_{sl} f_{yd}}{u_k} \text{tg}\theta \quad (11)$$

Burada, A_k merkezi boyuna donatıların ortası olan kesitin alanını, u_k A_k 'nin çevresidir.

Bu ampirik bağıntıların dışında kritik burulma momentini ile ilgili bir diğer formül ise ince cidarlı tüp benzeşimi teorisidir[8]. Bu teoriye göre kritik burulma momentini formül Denklem 12'de verilmiştir.

$$T_{cr(\text{Thin-Walled})} = [1 + (n - 1)\rho] \left(\frac{A_c^2}{u_c}\right) f_{cr} \quad (12)$$

Burada, ρ donatı oranını, u_c beton kesit alanının çevresini, f_{cr} betonun çatlama dayanımıdır.

2.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton (Self-compacting Concrete)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) 1986 yılında Tokyo Üniversitesinde Prof. Okamura ve ekibi tarafından bulunmuştur[9]. KYB, özel bir karışım hesabı ve dizaynı bulunan, slump kavramı yerine yayılma kavramı ile değerlendirilen ve yerine kendiliğinden yerleşen, bu amaçla vibratör kullanılmamasına gerek olmayan, kolay

pompalanabilen, su/çimento oranı düşük, yüksek dayanımlı, segregasyon olmayan, kendiliğinden sıkışan ve seviyelenebilen, kolaylıkla döküldüğü kalıbın şeklini alan yüksek dayanımlı özel bir beton türüdür[9-13]. Tüm bu avantajlarından dolayı KYB beton endüstrisinde giderek kabul görmüştür ve kullanımı her geçen gün artmaktadır[14]. Öyle ki günümüzün yaygın olarak bilinen Dubai'deki Burj Khalifa, İspanya'daki Dragon Köprüsü, İtalya'daki 21. Yüzyıl Sanat Merkezi Binası'nın yapımında KYB kullanılmıştır[15].

KYB'nin basınç dayanımı, geleneksel betonda olduğu gibi tanımlayıcı en önemli özellik olmakla beraber tespiti geleneksel betonla aynıdır. KYB'nin çekme dayanımı geleneksel betonda olduğu gibi düşük olduğu, dayanım kazanma hızının kullanılan süperakışkanlaştırıcının türüne göre azalır veya artacağı, sünmenin geleneksel betona oranla daha olumlu davranışlar gösterdiği rapor edilmiştir [16].

Gerek ulusal gerek uluslararası standartlarda fazla yer verilmeyen burulma momentinin betonarme kiriş elemanlardaki etkisi bu çalışma kapsamında amaçlanmıştır.

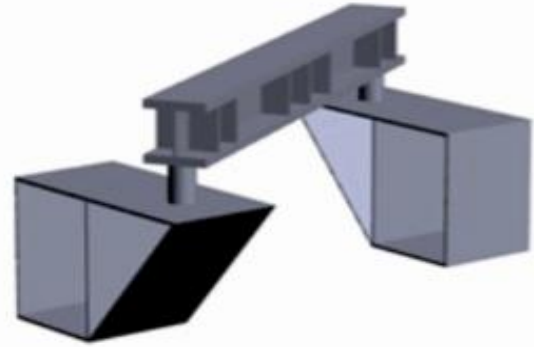
3. MATERYAL METOT (MATERIAL AND METHOD)

Betonarme kirişlerde burulma davranışının incelendiği bu çalışmada 20 adet 250x300x1500 mm ebatlarında kiriş numunesi hazırlandı. Normal betonlu kirişlerde her bir kiriş numunesinden 3 adet, KYB'li kiriş numunelerinden ise 2 adet döküldü. Daha sağlıklı sonuçların elde edilip yorumlanabilmesi için bu değerlerin ortalaması alındı. Kiriş numunelerinin 12 tanesi normal betonla 8 tanesi de KYB ile üretildi. Çalışmanın ana parametreleri beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranı olarak belirlendi. Beton sınıfı normal beton ve KYB, beton sınıfı olarak 20 MPa ve 40 MPa, etriye aralığı olarak da 80 mm ve 100 mm seçildi. Kirişlerin donatılabilmesi yapılırken ikisi kiriş en kesitinde yukarıda ikisi de aşağıda olmak üzere dört adet 16 mm çaplı nervürlü inşaat demiri boyuna donatı olarak, 8 mm çaplı nervürlü inşaat demiri etriye olarak kullanıldı. Kirişlerde pas payı 30 mm bırakıldı.

Kiriş numunelerinin beton döküm işlemleri ilgili standartlara uygun bir şekilde laboratuvar ortamında yapıldı. KYB deneyleri yapılırken EFNARC [17]'ye uygunluğu göz önünde bulundurulmuştur. Beton dökümü bitirilen kirişler

28 gün boyunca su küresine tabi tutuldu ve bu sürenin sonunda burulma momenti uygulandı. Beton dökümünde CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanıldı. Karışımda hazır beton santralinden temin edilen 0-5 mm ince agrega ve 5-15 mm iri agrega kullanıldı. KYB üretiminde mineral katkı olarak silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı olarak da Draco marka akışkanlaştırıcı kullanıldı. Karışım suyu olarak da içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanıldı.

Deneysel yük altında eğimleri ve deformasyonları ölçmek için üç adet Linear Variable Differential Transformer (LVDT) numunenin sağ tarafına, üç adet ise numunenin sol tarafına bağlandı. Kiriş numunelerinde burulma momenti oluşturmak için kirişlerin sağ ve sol baş kısımlarında 300 mm derinliğinde içi boş kutu şeklinde iki adet çelik levhadan yapılmış kelepçe hazırlandı. Kirişler deney esnasında bu kelepçelerin içine oturtulmuştur. Bu çelik levhaların üzerine ise çapraz şekilde 1460 mm uzunluğunda ve yedi adet berkitmesi bulunan HEB160 çelik profil konuldu. Bu profilin tam orta noktasına düşey şekilde yük uygulandı. Deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 2. Deney düzeneği (Test setup)

Kiriş numunelerinden elde edilen değerlerin daha kolay bir şekilde yorumlanabilmesi için kirişlere isimlendirme yapılmıştır. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi ve detayları Tablo 1' de verilmiştir.

4. BULGULAR (RESULTS)

Burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinin burulma momenti kapasiteleri (T_u) ve bu değere karşılık gelen dönme açısı θ_u ile kirişlerde burulmadan dolayı oluşan ilk çatlağa

neden olan kritik burulma momenti değeri (T_{cr}) ve bu değere karşılık gelen dönme açısı (θ_{cr}) deneysel olarak ölçülmüştür. Deneysel olarak elde edilen burulma momenti kapasitesi değerlerinin, elastik, plastik ve yanal eğilme teorisine göre hesaplanan teorik değerlerle karşılaştırılması yapıldı. Kritik burulma momenti değerlerinin de ilgili çalışmalardan elde edilen ampirik bağıntılarla karşılaştırılması yapıldı. KYB beton dökümü işlemi sırasında betonun akıcılığını, viskozitesini ve geçme kabiliyetini ölçmek için yapılan deneylerin sonuçları Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 1. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi (Naming of beam samples)

Kiriş Adı	Beton Sınıfı MPa	Beton Tipi	Etriye Aralığı mm
N20E80	20	Normal Beton	80
N20E100	20	Normal Beton	100
N40E80	40	Normal Beton	80
N40E100	40	Normal Beton	100
K20E80	20	KYB	80
K20E100	20	KYB	100
K40E80	40	KYB	80
K40E100	40	KYB	100

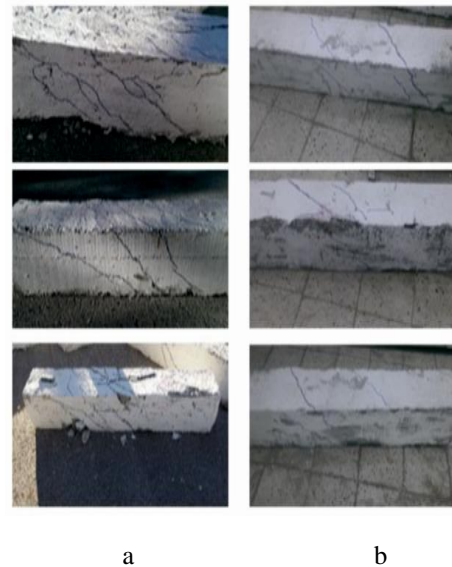
Tablo 2. KYB deney sonuçları (SCC test results)

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

Burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinin deney sonrasındaki görüntüleri Şekil 3’ de gösterilmektedir. Şekil 3a’ da normal beton serilerindeki çatlaklar Şekil 3b’ de ise KYB serilerindeki çatlaklar görülmektedir. Kiriş numunelerinde çatlakların ani bir şekilde meydana geldiği deney esnasında gözlemlenmiştir. Artan burulma momenti etkisindeki kirişte meydana gelen ilk çatlağı ikinci, üçüncü ve hatta bazı numunelerde dördüncü çatlak takip etmiştir. İlk çatlakta oluşan çatlak genişliğine diğer çatlaklar ulaşamamışlardır. Şekil 3’ den de anlaşılacağı üzere normal beton serilerinde meydana gelen çatlaklar KYB serilerindekilere göre daha fazladır. Normal beton serilerinde meydana gelen çatlak dallanmaları daha fazladır. Ayrıca normal betonlu kirişlerde ki çatlak genişlikleri KYB’ li betonlara göre daha fazladır.

Tablo 3’ de deneysel olarak ölçülen T_u ve θ_u değerlerinin teorik değerlerle karşılaştırılması

yapılmıştır. Betonun davranışı ne tam elastik ne de tam plastik olmadığından, elastik teori burulma kapasitesinin altında plastik teori ise burulma kapasitesinin üzerinde sonuçlar vermiştir. Gerçeğe en yakın değerler ise yanal eğilme teorisinde elde edilmiştir. Tablo 3’deki değerler, etriye adım mesafesi ile burulma momenti kapasitesinin (T_u) orantılı olduğunu göstermektedir. Etriye adım mesafesi daha az olan kiriş numuneleri daha büyük değerlerde kırılmıştır. Etriye adım mesafesi 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. Tablo 3’de görüldüğü gibi beton basınç dayanımı yüksek olan grupta daha büyük burulma momenti değerleri kaydedilmiştir. Buda betonun basınç dayanımı ile ilgilidir. Yani daha fazla basınç dayanımına sahip olan numuneler daha büyük kesme kuvveti ve dolayısıyla daha büyük burulma momenti değerleri karşılarlar. Ayrıca KYB’ li beton numunelerinin normal betonlu numunelere göre daha yüksek değerlerde burulma momenti karşıladıkları deneysel olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. a) Normal beton b)KYB serileri burulma çatlakları (The torsional cracks of a) Conventional concrete b)SCC series)

Tablo 3. Deneysel ve teorik burulma momentleri sonuçları
(The torsional moement results of experimental and theoretical)

Kiriş Adı	Tu	Ort Tu	θ_u (deg/m)	T _E	T _P	T _Y
	(kNm)			(kNm)		
N20E80-1	11.2	11.7	3.13	6.51	10.8	12.5
N20E80-2	11.3		2.77	6.51	10.8	12.5
N20E80-3	12.6		4.27	6.51	10.8	12.5
N20E100-1	11.9	11.4	3.31	6.51	10.8	12.5
N20E100-2	10.6		3.24	6.51	10.8	12.5
N20E100-3	11.9		3.84	6.51	10.8	12.5
N40E80-1	12.1	14.0	3.64	8.95	14.8	17.2
N40E80-2	16.1		2.91	8.95	14.8	17.2
N40E80-3	13.9		3.69	8.95	14.8	17.2
N40E100-1	14.2	13.3	3.19	8.95	14.8	17.2
N40E100-2	15.2		4.58	8.95	14.8	17.2
N40E100-3	10.7		3.43	8.95	14.8	17.2
K20E80-1	17.9	16.1	5.71	6.51	10.8	12.5
K20E80-2	14.4		3.82	6.51	10.8	12.5
K20E100-1	13.2		1.8	6.51	10.8	12.5
K20E100-2	14.5	13.8	4.5	6.51	10.8	12.5
K40E80-1	20.0	20.3	5.05	8.95	14.8	17.2
K40E80-2	20.6		3.32	8.95	14.8	17.2
K40E100-1	18.1		5.09	8.95	14.8	17.2
K40E100-2	18.9	18.5	4.95	8.95	14.8	17.2

Deneysel olarak elde edilen T_{cr} ve θ_{cr} değerlerinin ilgili ampirik bağıntılarla karşılaştırılması Tablo 4 ve 5’ de yapılmıştır. Tablo 4 ve 5’ i incelediğimiz zaman deneysel sonuçlara en yakın değerler Hsu’ nun önermiş olduğu formülde elde edilmiştir. Ayrıca kritik burulma momentleri değerinin boyuna donatı kullanılarak elde edilen teorik değerlerle deneysel değerleri karşılaştırdığımız zaman burulma momentinin kiriş kesiti ile ilgili olduğunu görmekteyiz. Tablo 3 ve Tablo 4’ deki T_u ve T_{cr} değerlerine baktığımız zaman bu değerlerin bir birleri ile oldukça yakın olduklarını görmekteyiz. Yani kirişte ilk burulma çatlağı meydana geldikten sonra kiriş çok az miktarda burulma momentleri karşılamaktadır.

Normal betonlu ve KYB’ li kiriş numunelerinin burulma momentleri kapasitesi-dönme açısı arasındaki ilişki Şekil 4’ deki grafiklerde

görülmektedir. Grafikleri incelediğimiz zaman artan burulma momentleri altında dönme açısı ilk başlarda lineer bir şekilde artmıştır. Daha sonra eğri lineerliğini kaybetmiştir ve nonlineer bir şekil almıştır. Burulma momentine maruz bırakılan bir kirişte mukavemetin yanı sıra aranan bir diğer özellikte düktil davranıştır. Düktil davranıştan kasıt, burulma çatlaması oluşuktan sonra kirişin gevrek bir şekilde kırılmaması, taşınan burulma momentinde bir azalma olmadan deformasyonların artabilmesidir. Yapılan deneyler düktil davranışın kayma donatısının bir fonksiyonu olduğunu kanıtlamıştır. Burulma momentleri kapasitesi-dönme açısı grafiklerine baktığımız zaman grafiklerin altında kalan alan bize düktil davranış hakkında bilgi vermektedir.

Burulma momentleri dönme açısı grafiklerinde grafiğin altında kalan alan ne kadar büyük ise düktil davranışta o kadar iyidir diyebiliriz. Yani grafiğin altında kalan alanın büyük olması o numunede burulma çatlakları meydana geldikten sonra kırılmanın sünek bir şekilde gerçekleştiğini gösterir. Bu da bize betonarme elemanlarda istediğimiz kırılma şeklinin gerçekleştiğini gösterir. Deney grafiklerine baktığımız zaman normal beton serilerinde N40E80 serisinin, KYB serilerinde ise K40E80 serisinin burulma momentleri dönme açısı grafiklerinin altında kalan alanların daha fazla olduğunu görmekteyiz. Yani bu seriye ait numunelerde meydana gelen kırılma diğer numunelere göre daha sünek bir şekilde gerçekleşmiştir. Deneylerden elde edilen grafiklerden yola çıkarsak beton sınıfını yüksek tutmanın ve etriye aralığını ise düşük tutmanın düktil davranış üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu yani bir deprem anında burulma etkisine maruz, betonarme bir kirişin taşıma kapasitesine daha geç ulaşmasını sağlayacağını söyleyebiliriz.

Tablo 4. Kritik burulma momentleri değerleri (Critical torsional moment results)

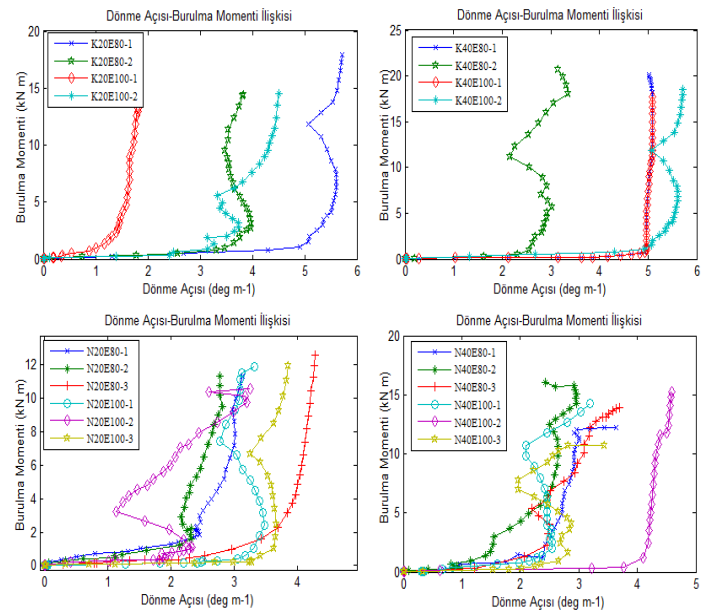
Kiriş Adı	T _{cr} kNm	θ_{cr} deg/m	T _{cr} (TS) kNm	T _{cr} (Hsu) kNm
N20E80-1	10.72	3.09	8.77	12.51
N20E80-2	10.2	2.56	8.77	12.51
N20E80-3	11.24	4.24	8.77	12.51
N20E100-1	9.31	3.01	8.77	11.08
N20E100-2	9.19	2.98	8.77	11.08
N20E100-3	9.28	3.70	8.77	11.08
N40E80-1	12.10	3.43	12.49	14.74

N40E80-2	15.75	2.43	12.49	14.74
N40E80-3	13.8	3.69	12.49	14.74
N40E100-1	12.67	2.80	12.49	13.32
N40E100-2	13.32	4.55	12.49	13.32
N40E100-3	1.70	3.40	12.49	13.32
K20E80-1	16.58	5.68	8.77	12.51
K20E80-2	13.41	3.74	8.77	12.51
K20E100-1	11.85	1.75	8.77	11.08
K20E100-2	12.43	4.45	8.77	11.08
K40E80-1	19.52	5.02	12.49	14.74
K40E80-2	19.03	3.15	12.49	14.74
K40E100-1	16.53	5.08	12.49	13.32
K40E100-2	15.5	4.91	12.49	13.32

Tablo 5. Ampirik kritik burulma momenti değerleri (The empirical torsional moment results)

Kiriş Adı	T _{cr} (Kuyt) (Etriye)	T _{cr} (Kuyt) (Boy. Donatı)	T _{cr} (Thur) (Etriye)	T _{cr} (Thur) (Boy. Donatı)	T _{cr} (Thin-Walled)
N20E80-1	18	1.18	10.95	4.1	8.16
N20E80-2	18	1.18	10.95	4.1	8.16
N20E80-3	18	1.18	10.95	4.1	8.16
N20E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
N20E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
N20E100-3	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
N40E80-1	18	1.18	10.95	4.1	11.12
N40E80-2	18	1.18	10.95	4.1	11.12
N40E80-3	18	1.18	10.95	4.1	11.12
N40E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
N40E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
N40E100-3	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
K20E80-1	18	1.18	10.95	4.1	8.16
K20E80-2	18	1.18	10.95	4.1	8.16
K20E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
K20E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
K40E80-1	18	1.18	10.95	4.1	11.12
K40E80-2	18	1.18	10.95	4.1	11.12
K40E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
K40E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12

Tablodaki değerler kNm cinsindedir.



Şekil 3. Burulma momenti-dönme açısı grafikleri (The torsional moment-rotation angles graphic)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND RESULTS)

Beton sınıfı olarak daha yüksek dayanıma sahip olan kiriş numunelerinin burulma momenti kapasitelerinin daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda N40 serisinin N20 serisine göre, K40 serisinin de K20 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. Etriye aralığını azaltmak burulma momenti kapasitesini N20 serisinde % 2, N40 serisinde % 5, K20 serisinde % 17, K40 serisinde % 9 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

Deney numunelerindeki kritik burulma momenti değerleri karşılaştırıldığı zaman KYB serilerinin normal beton serilerine göre % 35 daha fazla burulma momenti değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde beton sınıfını arttırmak kritik burulma momenti değerini % 30 arttırmıştır. Etriye aralığını azaltmak kritik burulma momenti değerini normal beton serilerinde % 15, KYB serilerinde % 20 oranında artmasına sebep olmuştur. Ampirik bağıntılar arasında kritik burulma momenti değerlerine en yakın sonuçlar Hsu'nun önermiş olduğu formülde elde edilmiştir. Deneysel T_{cr} değerleri Hsu'nun ampirik bağıntısının sonuçlarından yaklaşık % 2 daha fazla

çıkmiştir. Ayrıca deneysel T_{cr} sonuçları, $T_{cr}(TS)$ değerlerinden % 23, $T_{cr}(\text{Thin-Walled})$ değerlerinden yaklaşık % 36, $T_{cr}(\text{Thur})$ değerlerinden yaklaşık % 36 daha fazla, $T_{cr}(\text{Hsu})$ değerlerinden % 18 daha az çıkmıştır.

Deneysel T_u değerlerine teoriler arasında en yakın sonuçlar yanal eğilme teorisinde elde edilmiştir. Yanal eğilme teorisi değerleri deneysel T_u değerlerinden yaklaşık % 2 daha fazla çıkmıştır. Deneysel T_u değerleri elastik teori değerlerinden % 87, plastik teori değerlerinden yaklaşık % 12 daha fazla çıkmıştır.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Doğangün, A., Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı 2008, İstanbul Birsen Yayınevi
- [2] Csikós, Á. and I. Hegedûs, Torsion of reinforced concrete beams. Technical University of Budapest, Department of Reinforced Concrete Structures H-1521 Budapest, 1998.
- [3] Zhang, Y., Torsion in high strength concrete rectangular beams 2002.
- [4] TS500, TS500 Requirements for design and construction of reinforced concrete structures, 2000, Turkish Standards Institute Ankara,, Turkey.
- [5] Hsu, T.T., Torsion of Structural Concrete-Plain Concrete Rectangular Sections. Special Publication, 1968. **18**: p. 203-238.
- [6] Kuyt, B., Ultimate Torsional Resistance Of Rectangular Reinforced Concrete Beams. Concrete, 1968. **2**(12): p. 522-&.
- [7] Lampert, P. and B. Thürlimann, Torsionsversuche an Stahlbetonbalken. 1968.
- [8] Valipour, H.R. and S.J. Foster, Nonlinear reinforced concrete frame element with torsion. *Engineering Structures*, 2010. **32**(4): p. 988-1002.
- [9] Pineaud, A., et al., Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. *Construction and Building Materials*, 2016. **112**: p. 747-755.
- [10] Gesoğlu, M., et al., Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials*, 2012. **37**: p. 160-170.
- [11] Naik, M.P.P. and M. Vyawahare. Strength And Durability Investigations On Self Consolidated Concrete With Pozzolanic Filler And Inert Filler. in International Journal of Engineering Research and Technology. 2013. ESRSA Publications.
- [12] Aydın, A.C., et al., Effects of the different atmospheric steam curing processes on the properties of self-compacting-concrete containing microsilica. *Sadhana*, 2015. **40**(4): p. 1361-1371.
- [13] Sadek, D.M., M.M. El-Attar, and H.A. Ali, Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 2016. **121**: p. 19-32.
- [14] Golafshani, E.M. and A. Ashour, Prediction of self-compacting concrete elastic modulus using two symbolic regression techniques. *Automation in Construction*, 2016. **64**: p. 7-19.
- [15] Okrajnov-Bajić, R. and D. Vasović, Self-compacting concrete and its application in contemporary architectural practice. *Spatium*, 2009(20): p. 28-34.
- [16] Poppe, A.-M. and G. De Schutter. Creep and shrinkage of self-compacting concrete. in First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, China. 2005.
- [17] EFNARC, S., Guidelines for self-compacting concrete. EFNARC Publication, London, UK, 2002: p. 1-32.