



ÇENTİKLİ, ÇENTİKSİZ BETON KRIŞLERDE BOYUT ETKİSİ

Yasin Çağlar¹ ve Sıddık Şener²

¹Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale

³İstanbul Bilgi Üniversitesi, İstanbul

ABSTRACT

Test results from a size effect study of Type I&II on notched and unnotched beams are presented. The test specimens were geometrically similar but with different sizes (in the ratio 1:12.5) with different notch length ratios of 0, 0.02, 0.075, 0.15 and 0.3. The beams had rectangular cross sections with constant thickness of 40 mm, depth varied from 40 mm to 500 mm. It was observed that all the notch length ratios exhibited a size effect in which the nominal stress at maximum load (failure load divided by cross-sectional area) decreased as the size was increased. This contradicts with the current codes, which do not account for such a size effect, and indicates that the failure is governed by fracture mechanics. The rotations measured at the supports of each specimen using clinometer are also presented in this study.

ÖZET

Çentikli, çentiksiz beton kirişlerde Tip I&II boyut etkisi deney sonuçları verilmiştir. Deney kirişleri, geometrik olarak benzer farklı boyutlarda (1:12.5 oranında), 0, 0.02, 0.075, 0.15 ve 0.30 çentik uzunlukludur. Dikdörtgen kesitli kirişlerin kalınlıkları sabit olup 40 mm, yükseklikleri 40 mm den 500 mm ye değişmektedir. Bütün çentik uzunlukları için en büyük yükteki göçme gerilmesi (göçme yükünün, kesite oranı) boyut arttıkça azalmaktadır. Geçerli yönetmelikler boyut etkisini göz önüne almadığı için bu durum aykırı olup göçmede kırılma mekaniği kullanılmalıdır. Bu çalışmada her bir numune için clinometer kullanılarak mesnet dönmeler de elde edilmiştir.

GİRİŞ

Beton yarı gevrek bir malzeme olup, göçmesinin plastik teoriler ile açıklanması doğru değildir. Beton elemanlarda yük altında yayılı çatlaklar oluşur, sonra yayılı çatlaklar göçme yüküne yaklaşıncı tek bir çatlağa dönüşerek eleman göçer. Beton yapıların modellemesi için davranışın kırılma mekaniği ilkelerine dayandırılması gerekir. Beton yapılarda kırılma mekaniği kullanılarak gerçek davranış belirlenebilir. Kırılma mekaniğinin kullanılma nedenlerinden en önemlisi boyut etkisidir. Aynı bir beton karışımdan hazırlanmış geometrik olarak benzer beton yapıların göçme yükleri karşılaştırıldığında, yapı boyutu D arttıkça, göçme gerilmesi σ_N azalmaktadır.

Yapılan araştırmalar, beton yapıların göçme yüklerinde boyut etkisi olduğunu göstermiştir. Beton yapıların boyut etkisi üzerine yapılmış çalışmaları, (i) betonarmenin çekme, kesme göçmesi (eğik kesme [1], burulma [2, 3], çekip çıkarma [4], aderans eki [5], çelik lifli beton [6] ve diğ.), (ii) merkezi basınç yükü altındaki elemanların göçmesi (kompakt elemanlar [7],

donatısız [8] ve donatılı [9] kolonlar, çentikli kolonlar [10], yüksek dayanımlı silindirler [11] ve diğ.), (iii) eğilmede basınç betonun ezilmesi (aşırı donatılı kirişler [12]) dir.

Yapılan çalışmalar yalnız göçme yüklerinde değil yük-yerdeğiştirme ile yük-mesnet dönmelerinde de boyut etkisi göstermiştir. Eğilme kirişlerinde Tip I&II boyut etkileri için beş deney serisi hazırlanmıştır. Deney serilerinde kirişler aynı boyutlu olup, çentik boyları değiştirilmiştir. Bu çalışmanın ana amacı boyut etkisi deneylerinde göçme yükü, yerdeğiştirmeler yanında mesnet dönmelerinin etkisini araştırmaktır. Daha önceki benzeri çalışmalarda kirişler yatay dökülmüştür. Burada ise kirişler alışılagelen biçimde düşey dökülüp, düşey denenmişlerdir.

Bu çalışma, deneysel çalışma yanında analitik çalışmaları da içermektedir. Deneysel bulgular, göçme yükleri yanında yük-düşey yerdeğiştirmeler, yük-mesnet dönmelerini içermektedir. Göçme yükleri Tip I&II boyut etkisi bağıntılarının elde edilmesi için kullanılmıştır. Bu deneylerdeki önemli konu beton kirişlerin eğilme göçmelerinde “clinometer” ile mesnet dönmelerinin elde edilmesidir.

DENEY KIRIŞLARI

Tip I&II boyut etkisini araştırmak için Gazi Üniversitesinde geometrik olarak benzer farklı boyutta kiriş deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kirişlerde iki boyutta benzerlik olup; kiriş yüksekliği D , kiriş uzunluğu L ile orantılıdır. Boyut etkisinin etkilenmemesi için kalınlık bütün kirişlerde aynı $b=40$ mm seçilmiştir.

Bu çalışmada yapılan deneysel program farklı boyutlu deney kirişlerini içermektedir. Kirişler 4 farklı karışımında 6 Aralık 2012 de düşey olarak dökülmüşlerdir. Betonun dökümü sırasında agreganın ayrışmasını önlemek için kalıplarda vibratör kullanılmıştır. Kirişlerin açıkta kalan üst yüzü mala ile düzeltildikten sonra naylon örtü altında 48 saat bekletilmişlerdir. Kirişler 8 saat içinde dökülmüştür.



Şekil 1. Deney kirişleri

Beton kirişler, aynı bir karışım oranında dökülerek dört karışımında bağıl olarak aynı elde edilmiştir. Deneyler geometrik olarak benzer dört farklı boyutta 80 kirişi içermektedir (Çiz.1). Kiriş yükseklikleri 40, 93, 215 ve 500 mm olup, boyut değişim aralığı en küçükten en büyüğe 1:12.5 dur. Çiz.1 ile Şek.2 den görüldüğü gibi bütün kirişlerde uzunluğun, yüksekliğe oranı (L/D) 2.4 dür. Kirişlerin çentik aralığı sabit 4 mm olup beş farklı çentik uzunluğu/yükseklik oranı $\alpha = 0, 0.02, 0.075, 0.15, 0.30$ elmas uçlu sulu testere ile kesilerek elde edilmiştir. Burada a =çentik uzunluğudur.

katsayısı=3%), yedi adet 75x150 lik silindirin ortalama basınç dayanımı 36.9 MPa (değişim katsayısı=11%) bulunmuştur. Silindir kalıpları metal, küp kalıpları ise sert plastiktir.

Çalışma ile ilgili, deney düzeneği, ölçüm yerleşimi, gibi bilgiler diğer çalışmalarda verilmiştir [18-20].

DENEY DÜZENEGİ

Deney kirişleri yatay etkinin göçme biçimini etkilememesi için her iki uçta kayıcı olarak, simetrik mesnetli, ortadan P ile yüklenmiştir (Şek.2). Kiriş yüklemelerinde, yük ve mesnetler arasında düzlem dışı yerdeğiştirmeleri azaltma amacı ile aynı bir doğrultuda yüklenmesi için gerekli özen gösterilmiştir. Yük aktarımının uygun olması, yanal burkulmanın önlenmesi için en büyük boyutlu kirişlerin ($h=500$ mm) her iki yüzünde düşey kayıcı mesnetler, kullanılmıştır. Bütün deneylerde, uygulanan yükü ölçmek için “yük hücresi”, düşey yerdeğiştirmeleri ölçmek için “LVDT”, kirişlerin mesnet dönmelerini ölçmek için “clinometer” kullanılmıştır. Bütün ölçüm aletlerinin deney öncesi doğrulukları kontrol edilmiştir.

Deneyler, uzun süre alacağından, deney kirişleri 200 gün bekletilmiştir. Deneylere 15 Temmuz 2013 de başlanılarak 8 günde tamamlanmıştır. Kirişlerin uzun süre bekletilmesi sonucu beton dayanım artışı ile 7 aylık betonda hidratasyon azaldığından (hidratasyon hızı 3 aydan sonra çok azalır [21]), yaş farkı etkisi en aza indirilmiştir. Yükleme çerçevesinin “katılık” etkisinin deney sonuçlarına etkisini en aza indirmek için bütün kirişler 500 kN kapasiteli çerçevede, 50 kN duyarlılık “load cell” ile denenmiştir.

Yük ile mesnetlerin olduğu yerlere yükleri kirişlere düzgün dağılı vermek için çelik prizmatik bloklar kullanılmıştır. Çelik blokların boyutları kiriş boyları ile orantılıdır. Yük altında, mesnetlerde betonun yerel ezilmesini önlemek çelik prizmalar superglue ile kirişlere yapıştırılmıştır (Şek.2). Kesitleri 60x36, 25.8x15, 11.1x7, ile 5x340 mm, uzunlukları 40 mm olan 4 adet mesnet seti farklı boyutlu kirişler için kullanılmıştır. Mesnet çapları (ϕ), kiriş boyutu ile değişmekte olan, yarım daire mesnetlere oturmaktadır. Geometrik benzerlik yük altında, kenar mesnetlerdeki çelik mesnetlerde de sağlanmıştır. Mesnet ile yük altına konacak çelik blokların yerleri kirişlere işaretlenerek, prizmalar yapıştırılmıştır. Mesnet ortasından diğer mesnete olan açıklığın, kiriş yüksekliğine oranı 2.176 dır. Yükleme hızının göçme yüklerine etkisini en aza indirmek için bütün kirişlerde, en büyük yüke 5-10 dakika arasında ulaşılmıştır.

Bütün çentikli, çentiksiz kirişlerde iki ölçme aleti kullanılmıştır. Ölçüm aralığı 200 mm olan, doğrusal değişen çok küçük değişimleri ölçen LVDT, kiriş dışında, kirişin oturduğu plağın düşey yukarı yerdeğiştirmesinden ölçmüştür. LVDT yükleme çerçevesine manyetik mesnet ile oturtulmuştur.

Mesnet dönmelerini (θ) ölçmek için kiriş yüzünde kullanılan, diğer ölçüm aleti “clinometer”, olası göçme yerlerinden uzak yere konmuştur. Elektronik ölçüm yapan “Clinometer” in markası AccuStar olup, 0.001⁰ duyarlılıkta olup, analog çıkışı vardır. Analog çıkış, bir başka düzenleyici (conditioner) devre ile veri toplayıcısına iletilmektedir. Dairesel olan “clinometer” in oturma çapı 44 mm olup bu çapta etkilidir. Clinometer, kiriş yüzüne C biçimli tutucu ile sıkı bir biçimde tutturularak, mesnet döndükçe, clinometer mesnet ortasındaki dönme açısını vermektedir.

BOYUT ETKİSİ

Deneyler, Tip I ile Tip II arasındaki geçiş bağıntısını elde etmek için önemlidir. Tip I boyut etkisi, çentiksiz kirişlerde ya da önceden büyük çatlağı olmayan, büyük çatlağı birden oluşmayan yapılarda oluşur. Tip II boyut etkisi ise derin çentikli ya da en büyük yüke kontrollü çatlak gelişimi ile ulaşan (betonarme yapılar gibi) yapılarda oluşur. Tip II boyut etkisi eğrisi, D kirişin karakteristik boyutu olmak üzere ya $D^{-1/2}$ kuvvet yasası ile sonlanır. Tip

I boyut etkisi ya olasılıksal boyut etkisi ihmal edildiğinde yatay asimptot olarak ya da -1/2 eğiminden daha küçük eğimli kuvvet yasası LEFM (Lineer elastic fracture mechanics) ile sonlanır. Tip II boyut etkisindeki davranış, çentiğin ya da daha önceden var olan büyük çatlakların kırılma işlem bölgesinden (FPZ) büyük olması, Tip I de en büyük yükte ancak görünür çatlak oluşmasındandır [14]. Bu çalışma Tip I ile II arasındaki geçişi verir. Bu çalışmada sığ çatlaklı kirişlere de yer verilmiştir.

Yapı dayanımında boyut etkisi, yapının σ_{Nu} bilinen dayanımı olmak üzere, en büyük (göçme) yükünden elde edilerek Bağ.(1) ile tanımlanır.

$$\sigma_{\square} = c_N P_u / (bD) \quad (1)$$

Burada, D kiriş ya da yapının karakteristik boyutu, b kirişin genişliği, c_N uygunluk için seçilen boyutsuz katsayıdır. Çentiksiz kirişler için boyut etkisi Tip I, Bağ.(2) ile verilmiştir [14].

$$\sigma_N = f_{r\infty} [1 + r D_b / (D + l_p)]^{1/r} \quad (2)$$

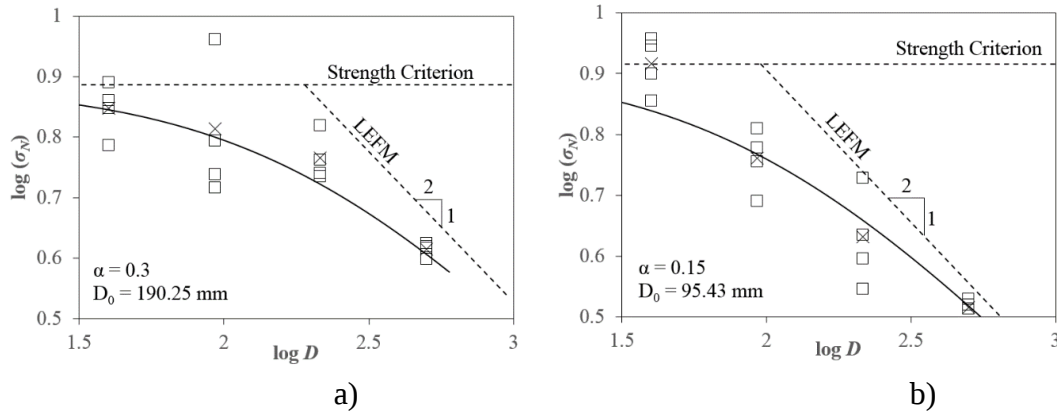
Çentikli kirişler (Tip II) için ise Bağ.(3) verilmiştir.

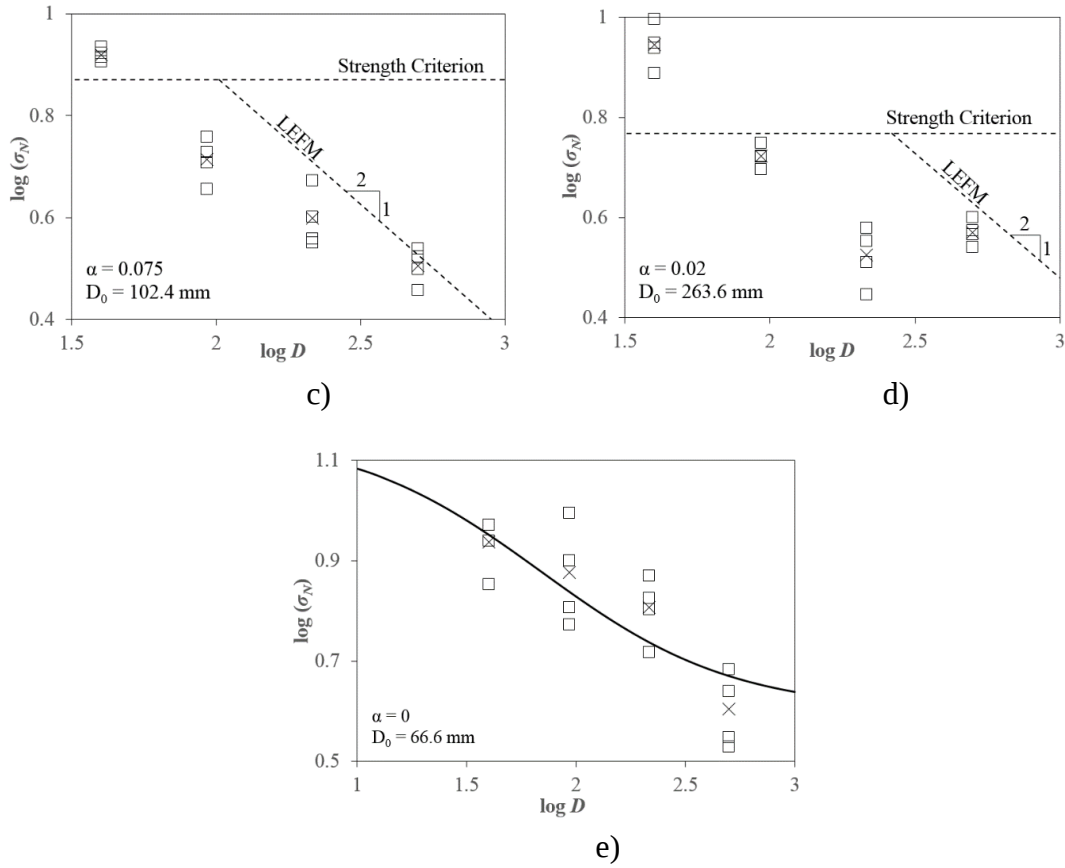
$$\sigma_N = B f_t / \sqrt{1 + D/D_0} \quad (3)$$

Burada $f_{r\infty}$, r , D_b , l_p , $B f_t$, D_0 deney sonuçlarından bulunacak ampirik sabitlerdir. σ_N =nominal gerilme, $f_{r\infty}$ =çok büyük yapılarda nominal gerilme, r =dataya uydurulan eğriden bulunan boyutsuz büyüklük olup optimizasyonda 0.50 ile 0.52 arasında değişmekte [14], D_b = çatlak sınır tabakasının derinliği (yaklaşık FPZ na eşit), l_p =en büyük agrega boyutu ile ilgili malzemenin karakteristik boyutu, B =boyutsuz parametre, f_t = betonun çekme dayanımı, D_0 =yapı geçiş boyutudur.

DENEY ANALİZLERİ

Beton kirişlerin boyut etkisi deney sonuçları Çiz.2 de özetlenmiştir. Bu çizelgede P_0 deneyden ölçülen en büyük yüküdür. Şek.3 ise her bir çentik-uzunluk oranı α için $\log(\sigma_{\square})$ in $\log(D)$ değişimi olan bütün boyut etkisi eğrilerini göstermekte olup, kiriş dayanımı artan boyut ile azaldığını göstermektedir.





Şekil 3. Boyut etkisi eğrileri

Çizelge 2. Her bir kiriş için ölçülen en büyük yük ile göçme gerilmeleri.

Beam	D (mm)	P_0 (kN)	σ_N (MPa)	Beam	P_0 (kN)	σ_N (MPa)	Beam	P_0 (kN)	σ_N (MPa)
C1	500	20.07	7.23	NS1	18.97	7.11	NM1	16.76	7.07
C2	500	19.25	6.93	NS2	21.82	8.18	NM2	15.26	6.43
C3	500	24.97	8.99	NS3	20.49	7.68	NM3	13.79	5.81
C4	500	27.6	9.94	NS4	20.11	7.54	NM4	16.16	6.81
C5	215	15.88	13.29	NS5	9.06	7.88	NM5	10.02	9.79
C6	215	12.99	10.88	NS6	6.64	5.77	NM6	7.69	7.52
C7	215	16.69	13.97	NS7	7.73	6.72	NM7	7.55	7.38
C8	215	18.52	15.51	NS8	8.53	7.41	NM8	8.48	8.29
C9	93	10.73	20.75	NS9	5.51	11.13	NM9	5.32	12.03
C10	93	8.62	16.67	NS10	5.85	11.82	NM10	4.74	10.72
C11	93	6.95	13.44	NS11	5.17	10.44	NM11	4.2	9.50
C12	93	6.42	12.41	NS12	5.48	11.07	NM12	4.96	11.22
C13	40	4.37	19.67	NS13	3.47	16.43	NM13	3.22	16.93
C14	40	4.38	19.71	NS14	4.46	21.11	NM14	3.29	17.30
C15	40	3.33	14.99	NS15	3.99	18.89	NM15	3.35	17.62
C16	40	4.07	18.32	NS16	3.9	18.46	NM16	3.44	18.09

Beam	D (mm)	P ₀ (kN)	σ _N (MPa)	Beam	P ₀ (kN)	σ _N (MPa)
NB1	500	13.22	6.59	ND1	11.34	8.33
NB2	500	12.81	6.38	ND2	11.38	8.36
NB3	500	13.45	6.70	ND3	10.82	7.95
NB4	500	13.77	6.86	ND4	11.54	8.48
NB5	215	7.73	8.93	ND5	6.69	11.51
NB6	215	6.28	7.26	ND6	7.04	12.11
NB7	215	7.06	8.16	ND7	6.60	11.35
NB8	215	9.62	11.12	ND8	8.04	13.83
NB9	93	3.84	10.29	ND9	3.30	13.06
NB10	93	4.46	11.95	ND10	4.86	19.24
NB11	93	4.70	12.60	ND11	2.90	11.48
NB12	93	5.06	13.56	ND12	2.76	10.93
NB13	40	2.98	18.56	ND13	1.78	16.35
NB14	40	2.68	16.69	ND14	1.66	15.24
NB15	40	3.06	19.06	ND15	1.40	12.86
NB16	40	2.42	15.07	ND16	1.61	14.79

SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki verilmiştir.

1-Boyut değişim aralığı 1:12.5 olan düşey döküm kirişlerin bütünü boyut etkisi göstermiştir.

2-Çentik değişim aralığı $\alpha=0:0.3$ □□□□ kirişler Bazant'ın Tip I, Tip II boyut etkileri ile uyum göstermiştir.

3-Kiriş boyutu arttıkça, boyut etkisi, gevreklik artmıştır.

4-Dataya uygun eğrilerin geçirilmesi ile Bazant'ın $f_{r\infty}=5.27$ MPa, $D_b=73.2$ mm, $l_p=126.6$ mm değerleri yerine aynı bir $r=0.52$ için $f_{r\infty}=4$ MPa, $D_b=90$ mm, $l_p=50$ mm bulunmuştur.

5-Bazant'ın Tip I boyut etkisi küçük çentikli kirişler için, Tip II boyut etkisi derin çentikli kirişler için uygun olduğu görülmüştür.

6- Tip I, Tip II boyut etkisi gözlenmiş olup yönetmeliklerde göz önüne alınmalıdır.□

Ek Bilgi: Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) dan Gazi, İstanbul Bilgi Üniversitelerine sağlanan Proje No:111M374 ile gerçekleştirildiği için TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç biliriz. Deneylerin yapılmasında emeği geçen, Dr.Çağatay M. Belgin'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Z.P. Bazant, M.T. Kazemi, Size effect on diagonal shear failure of beams without stirrups. *ACI Struct. J.* 88 (1991) 268-276. doi:10.14359/3097.
- [2] Z.P. Bazant, S. Şener, Size effect in torsional failure of concrete beams. *J. Struct. Eng.-ASCE*. 113 (1987) 2125-2136. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:10(2125).
- [3] Z.P. Bazant, S. Şener, P.C. Prat, Size effect tests of torsional failure of plain and reinforced concrete beams. *Mater. Struct.* 21 (1988) 425-430. doi:10.1007/BF02472322.
- [4] Z.P. Bazant, S. Şener, Size effect in pullout tests. *ACI Mater. J.* 85 (1988) 347-351. doi:10.14359/2257.
- [5] S. Şener, Z.P. Bazant, E. Becq-Giraudon, Size effect on failure of bond splices of steel bars in concrete beams. *J. Struct. Eng.-ASCE*. 125 (1999) 653-660. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:6(653).

- [6] S. Şener, M. Begimgil, Ç.M. Belgin, Size effect on failure of concrete beams with and without steel fibres. *J. Mater. Civil Eng.-ASCE*. 14 (2002) 436-440. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(436).
- [7] B.I.G. Barr, H.F. Abusiaf, S. Şener, Size effect and fracture energy studies using compact compression specimens. *Mater. Struct.* 31 (1998) 36-41. doi:10.1007/BF02486412.
- [8] S. Şener, B.I.G. Barr, H.F. Abusiaf, Size effect tests in unreinforced concrete columns. *Magazine of Concrete Res.* 51 (1999) 3-11. doi:10.1680/mac.1999.51.1.3.
- [9] S. Şener, B.I.G. Barr, H.F. Abusiaf, Size effect in axially loaded reinforced concrete columns. *J. Struct. Eng.-ASCE*. 130 (2004) 662-670. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:4(662).
- [10] V. Koç, S. Şener, Size effect in normal and high strength concrete with different notches under the axial load. *J. Mater. Civil Eng.-ASCE*. 21 (2009) 433-445. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:9(433).
- [11] S. Şener, Size effect tests of high strength concrete. *J. Mater. Civil Eng.-ASCE*. 9 (1997) 46-48. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:1(46).
- [12] Ç.M. Belgin, S. Şener, Size effect on failure of overreinforced concrete beams. *Engin. Fract. Mech.* 75 (2008) 2308-2319. doi:10.1016/j.engfracmech.2007.09.006.
- [13] C.G. Hoover, Z.P. Bazant, J. Vorel, R. Wendner, M.H. Hubler, Comprehensive concrete fracture tests: description and results. *Engin. Fract. Mech.* 114 (2013) 92-103. doi:10.1016/j.engfracmech.2013.08.007.
- [14] C.G. Hoover, Z.P. Bazant, Comprehensive concrete fracture tests: size effects of Type I&II, crack length effect and postpeak. *Engin. Fract. Mech.* 110 (2013) 281-289. doi:10.1016/j.engfracmech.2013.08.008.
- [15] C.G. Hoover, Z.P. Bazant, Cohesive crack, size effect, crack band and work-of-fracture models compared to comprehensive concrete fracture tests. *Inter. J. Fract.* 187 (2014) 133-143. doi:10.1007/s10704-013-9926-0.
- [16] C.G. Hoover, Z.P. Bazant, Universal size-shape effect law based on comprehensive concrete fracture tests, *J. Engin. Mech., ASCE*, 140 (2014) 473-479. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000627.
- [17] C.G. Hoover, Z.P. Bazant, Comparison of the Hu-Duan boundary effect model with the size-shape effect law for quasi-brittle fracture based on new comprehensive fracture tests, *J. Engin. Mech.-ASCE*, 140 (2014) 480-486. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000632.
- [18] S. Şener, Y. Çağlar, Ç.M. Belgin, R. Hasanpour, *Nano parçacık içeren betonların kırılma mekaniği analizleri*. Rapor No. 111M374, TÜBİTAK, İstanbul Bilgi ve Gazi Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [19] Y. Çağlar, *Mod I beton kırılmasında çentik ve boyut etkisi üzerine bir çalışma*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, 2014.
- [20] S. Şener, Y. Çağlar, Ç.M. Belgin, Size effect tests for Type I and Type II. *Proc. 11th Inter. Cong. Advan. Civil Eng.* İstanbul, 2014: s. 51.
- [21] Z.P. Bazant, S. Şener, J.K. Kim, Effect of cracking on drying permeability and diffusivity of concrete. *ACI Materials Journal*, 84 (1987) 351-357. doi: 10.14359/1739.