

Kesme Açıklığı Kısa Kayma Donatısız Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi

Ragıp İNCE

*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ-TÜRKİYE*

Abdussamet ARSLAN

*Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 13.04.1999

Özet

Kayma donatısız betonarme kirişlerin boyutlandırılmasında, gerek boyutlandırma şartnameleri ve gerekse de araştırmacılar tarafından birçok formül önerilmektedir. Ancak bu formüller sadece çatlama yükünü dikkate aldığından, ya çok emniyetli yönde kalmakta ya da boyut etkisini içermemektedir. Oysa çatlamış bir betonarme kesit (özellikle kesme açıklığı kısa olan betonarme kirişlerde) çatlama yükünden daha fazla bir taşıma gücüne sahip olmaktadır. Bununla birlikte çatlamış bir kesitte oluşan mekanizmalar sebebiyle boyut etkisi olayı kaçınılmaz olmaktadır.

Bu gerçeklerden hareketle sunulan çalışmada, geometrik olarak birbirine benzeyen (değişim oranı 1:4) ve kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı 1.5 ($a/d=1.5$) olan kayma donatısız betonarme kirişler üzerinde dört noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Daha sonra deney sonucundan elde edilen bulgular, deterministik boyut etkisi teorileri ile analiz edilmiş ve sonuçlar literatürde mevcut olan boyutlandırma formülleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kesme açıklığı kısa, kayma donatısız betonarme kirişlerin boyutlandırılmasında kullanılabilir basit ama gerçekçi bir formül bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Boyutlandırma, Betonarme kiriş, Bazant'ın boyut etkisi teorisi, Carpinteri'nin boyut etkisi teorisi, Kayma dayanımı

Size Effect in Reinforced Concrete Beams With Short Shear Span and Without Stirrups

Abstract

For the to design of reinforced concrete beams with no stirrups, different equations have been formulated by researchers. These equations either are on the side of extreme safety or do not include the effect of size they only take into consideration the cracking loads. However, a cracked reinforced concrete zone has a greater load bearing capacity than the cracking load (especially for beams with a short shear span). In addition, the phenomena of size effect must be taken into account due to mechanisms which occur in a cracked zone.

Because of these factors four-point-bending tests are carried out on reinforced concrete beams without shear reinforcements which are geometrically similar (size range 1:4) and the shear span to effective depth ratio is 1.5 ($a/d=1.5$). Data obtained from the test results are analysed by means of deterministic size effect theories and the results are compared with the design equations in the literature. The research work presented in this paper shows that a simple and reliable equation can be found and proposed for the design of reinforcement concrete beams in the case of a short shear span without stirrups.

Key Words: Design, Reinforced concrete, Bazant's size effect theory, Carpinteri's size effect theory, Shear strength.

Giriş

Kayma donatısız betonarme kirişlerde, yükleme sonucu gövdede meydana gelen ve eğik çatlaklara sebep olan kayma gerilmelerin hesabı çok zor ve karışıktır. Bu sebeple boyutlandırma şartnameleri ve araştırmacılar, bu kayma gerilmelerinin hesabı yerine, eğik çatlama dayanımını dikkate alan formülasyonlar önermektedir (ACI-318; BS-8110; CEB-FIB; Zsutty (1968); Bazant ve Kim (1984)). Eğik çatlama dayanımı, betonun çekme dayanımına, donatı oranına ve kesme açıklığı / faydalı yükseklik (a/d) oranına bağlı bir dayanım kriteridir. Fakat bu dayanım kriteri uygulamada çok emniyetli yönde kalmaktadır. Çünkü eğik çatlak oluştuğundan sonra bile, özellikle a/d<2.5 olduğu durumlarda, betonarme kiriş hemen taşıma gücünü kaybetmemektedir. Taşıma gücündeki bu artış, ancak çatlama bir kesitte oluşan mekanizma ile açıklanabilir.

Çatlama bir betonarme kesit, kendisine etkileyen kesme kuvvetini, basınç bölgesindeki beton, donatıdaki kaldıraç kuvveti (pim (perçin) etkisi) ve oluşan eğik çatlak yüzeyindeki sürtünme kuvveti ile karşılamaktadır. Eğik çatlak yüzeyindeki sürtünme kuvveti, agregalar ile harç kısmı arasındaki etkileşimden kaynaklanan agrega-kilitlenmesi adı verilen mekanizma ile sağlanmaktadır. Walraven (1980), bu mekanizma ile karşılanan kesme kuvvetinin, yaklaşık % 50 mertebesinde olduğunu deneysel olarak kanıtlamıştır. Diğer taraftan eğik çatlakın karşıladığı kesme kuvveti, kiriş boyutu arttıkça azalmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar (Özellikle Kani, 1967), büyük boyutlu kirişlerin kayma mukavemetinin, küçük boyutlu olanlara nazaran daha az olduğunu göstermektedir. Bunun en büyük sebebi, agraga-kilitlenmesi dayanımının kiriş boyutuyla orantılı olarak değişmemesidir. Çünkü numune boyutu arttıkça, numune içerisindeki kusurların bulunma olasılığı artmaktadır (Weibull, 1939). Davranış ve güvenliği olumsuz etkileyen bu durum a/d oranının küçük olduğu betonarme kirişlerde boyut etkisinin varlığını kanıtlamaktadır.

Boyut etkisi kabaca, geometrik olarak benzer numunelerde nominal dayanım (en büyük yükün kesit alanına oranı) ile numune boyutu arasındaki negatif eğimli ilişki olarak tanımlanabilir. Bu etki, sünek malzemelerde de görülmesine karşın, gevrek malzemelerde çok daha belirgindir (Bazant ve Xi, 1990). Yüzyılın ilk yarısında Weibull (1939) tarafından tamamen istatistiksel karakterli olarak geliştirilen boyut etkisinin formülasyonu,

günümüzde Bazant (1984) ve Carpinteri (1994) tarafından ampirik ifadelerle oturtularak, deterministik (mekanik) hale getirilmiştir. Ancak mevcut teorilerin, laboratuvar ölçeğinde çok iyi sonuç vermesine karşın uygulamada nasıl bir durum arzedeceği tam olarak bilinmemektedir. Yazarlar, daha önceki çalışmalarında boyut etkisi kavramına bir yapay zeka tekniği olan, yapay sinir ağları ile yaklaşmışlar ve ilginç sonuçlar elde etmişlerdir (İnce, 1994; Arslan ve İnce, 1995; Arslan ve İnce, 1996).

Bu çalışmada, kesme açıklığı kısa, kayma donatısız betonarme kirişlerin boyut etkisini incelemek amacıyla a/d=1.5 olan, geometrik olarak birbirine benzeyen ve değişim oranı 1:4 olan kirişler, dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarından elde edilen bulgular deterministik boyut etkisi teorileri ile analiz edilmiş ve analiz sonuçları, literatürde kullanılan boyutlandırma formülleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta Carpinteri'nin boyut etkisi teorisinin bu tür problemler için daha uygun sonuçlar vereceğine karar verilmiş ve kesme açıklığı kısa olan, kayma donatısız betonarme kirişlerin boyutlandırılmasında kullanılabilen genel amaçlı, basit ama gerçekçi bir formül elde edilmiştir (İnce, 1998).

Kayma Donatısız Betonarme Kirişlerin Kayma Dayanımı

Kayma donatısız betonarme kirişlerin, kayma dayanımı için, literatürde bir çok formüller önerilmektedir. Bunların arasında, çoklu lineer regrasyon sonucu elde edilmiş Zsutty (1968)'nin formülü, doğrusal olmayan kırılma mekaniği tabanlı, boyut etkisini içeren Bazant ve Kim (1984)'in formülü ve bunların dışında, BS-8110, ACI-318, CEP-FIB gibi şartnamelerde önerilen formüller bulunmaktadır. Bu formüller [MPa] cinsinden : BS-8110,

$$v_c = \frac{0.79}{\gamma_m} \left(\frac{100A_s}{bd} \right)^{1/3} \left(\frac{400}{d} \right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{1/3}, \quad \left(\frac{a}{b} \geq 2.0 \right) \quad (1)$$

$$v_c = \left(2.0 \frac{d}{a} \right) * [fade(1)], \quad \left(\frac{a}{b} < 2.0 \right) \quad (2)$$

Burada γ_m 1.25 olarak alınan, malzemelerin kısmi emniyet faktörü, b kesit genişliği, A_s donatı

alanı, f_{cu} betonun küp basınç mukavemetidir. İfade (1) de d [mm] boyutundadır.

ACI-318,

$$v_c = 0.1578\sqrt{f'_c} + 17.25\rho\frac{V_u d}{M_u} \quad \left(\frac{l_n}{d} \geq 5.0 \right) \quad (3)$$

$$v_c = \left(3.5 - 2.5\frac{M_u}{V_u d} \right) * [ifade(3)], \quad \left(\frac{l_n}{d} < 5.0 \right) \quad (4)$$

Burada f'_c betonun silindirik basınç mukavemeti, ρ eğilme donatı oranı, V_u göçmedeki kesme kuvveti, M_u göçme momenti ve l_n serbest açıklıktır.

CEB-FIB,

$$v_c = 0.15 \left(3\frac{d}{a} \right)^{1/3} \left[1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right] (100\rho f_{ck})^{1/3} \quad (5)$$

Burada f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımıdır. d [mm] boyutundadır. Zsutty,

$$v_c = 2.1746 \left(f'_c \rho \frac{d}{a} \right)^{1/3}, \quad \left(\frac{a}{d} \geq 2.5 \right) \quad (6)$$

$$v_c = \left(2.5\frac{d}{a} \right) * [ifade(6)], \quad \left(\frac{a}{d} < 2.5 \right) \quad (7)$$

Bazant,

$$v_c = 0.54 \sqrt[3]{\rho} \left[\sqrt{f'_c} + 249 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}} \right] \frac{1 + \sqrt{5.08/d_a}}{\sqrt{1 + d/25d_a}} \quad (8)$$

Burada d_a maksimum agrega çapı olup [mm] boyutundadır.

Ülkemizde kullanılan TS-500 ise, ACI-318'in önerdiği (3) ifadesinin ilk terimini dikkate almaktadır.

Boyut Etkisi

Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) temelini atan Griffith (1920) mikron mertebesindeki cam lifler üzerine yapmış olduğu deneylerde, cam liflerin dayanımının elemanter düzeydeki dayanımdan çok daha büyük olduğunu tesbit etmiştir. Griffith, aradaki bu farkın cam numune yüzeyindeki kusurlarlardan kaynaklandığını deneylerinde gözlemlemiştir. Daha sonra Weibull (1939) hiçbir malzemenin kusursuz olamayacağı görüşünden hareket ederek, istatistiksel tabanlı ilk boyut etkisi teorisini geliştirmiştir. Weibull'ın teorisi, uzun süre malzemelerin emniyet faktörlerini tayin etmek için kullanılmış, ancak beton gibi heterojen malzemelere uygulanmasında yetersiz kaldığı

gözlenmiştir (Bazant, 1984). Daha sonraları araştırmacılar tarafından, heterojen malzemelere uygulanabilen deterministik (mekanik) yaklaşımlar önerilmiştir.

Deterministik yaklaşımlarda boyut etkisinin formülasyonunu elde etmek için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, (1) herhangi bir teori olmaksızın, her bir problem için deneylerden elde edilmiş istatistiksel eğriler, (2) numunenin boyutu ile dayanımı arasında ilişki kuran teorik, boyut etkisi kanunlarıdır. Birinci yöntem uygulama yönünden kesindir ve belirli bir problem türü için sadece sınır değişim aralığını verir. İkinci (teorik) yaklaşım ise laboratuvar şartlarında geçerliliğini ispatlamış ve bazı kabuller üzerine oturtulmuştur. Günümüzde laboratuvar ölçeğinde çakışan ancak diğer ölçeklerde birbirine zıt iki farklı boyut etkisi teorisi beton/betonarme yapılarda kullanılmaktadır.

Bazant'ın Boyut Etkisi Teorisi

Bazant (1984), en büyük yükte çatlağın ilerlemesi sonucu serbest kalan enerji ile beton tarafından absorbe edilen enerji arasındaki basit dengeyi boyut analizi (Buckingham Pi Teoremi) yardımıyla kurarak boyut etkisi teorisini geliştirmiştir. Doğrusal olmayan kırılma mekaniğinin temelini oluşturan bu teori, malzemenin kırılma özelliklerini belirleyen, çatlak boyu ve çatlak alanı gibi iki parametreye bağlıdır. Bazant, nominal dayanım σ_N ile numune boyutu d arasındaki ilişkiyi

$$\sigma_N = (C + dA)^{-1/2} \quad (9)$$

şeklinde tanımlamıştır. Burada A ve C deney verilerinin $Y = (1/\sigma_N^2)$ ve $X = (d)$ olmak üzere, lineer regresyon sonucu elde edilen $Y = AX + C$ doğrusunun sabitleridir. Ancak uygulamada genel bir formülasyon elde etmek için (9) ifadesi yerine aşağıdaki şekilde verilen, boyutsuz formun kullanılması daha uygun olmaktadır.

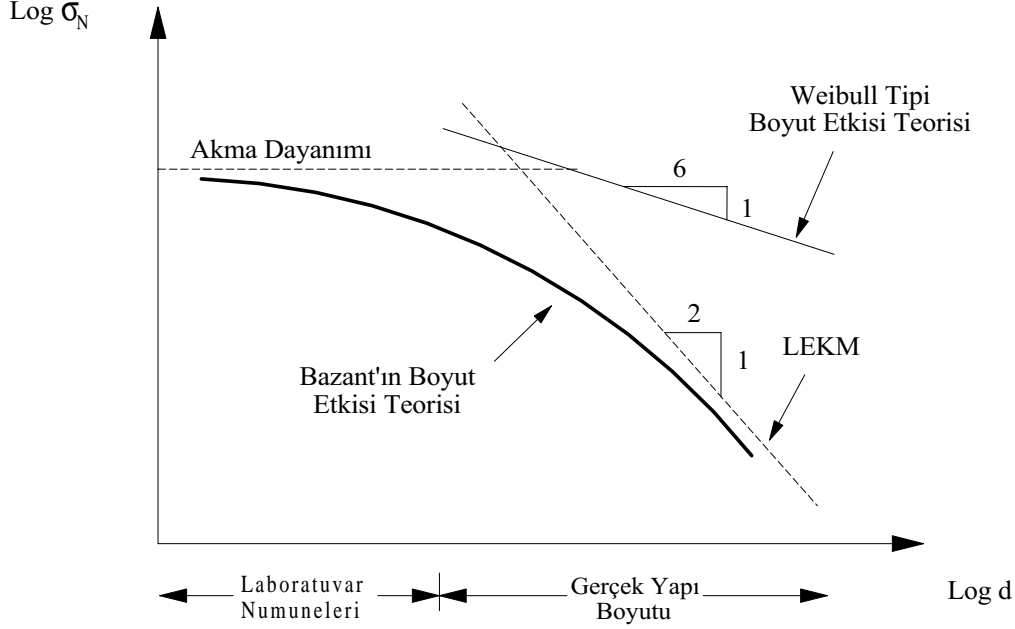
$$\sigma_N = Bf_t(1 + \beta)^{-1/2}, \quad \beta = d/d_0 \quad (10)$$

Burada f_t betonun çekme dayanımıdır. B ve d_0 ise $Y = (f_t/\sigma_N)^2$ ve $X = (d)$ olmak üzere $Y = AX + C$ doğrusundan, $B = (1/C)^{1/2}$ ve $d_0 = (C/A)$ şeklinde elde edilen ampirik sabitlerdir. Burada Y boyutsuz ve X uzunluk boyutunda olduğundan, d_0 uzunluk boyutunda elde edilmektedir.

İfade (10) da d numune boyutu çok küçük olduğu zaman ikinci taraf yaklaşık 1 olmakta ve malzemede

dayanım kriteri veya akma kriteri geçerli olmaktadır. Bu durumda $\text{Log}\sigma_N - \text{Log}d$ arasındaki ilişki yatay bir doğru şeklindedir. Diğer taraftan numune boyutu d nin çok büyük olduğu durumlarda $\text{Log}\sigma_N - \text{Log}d^{-1/2}$ şeklinde bir ilişkiden bahsedilebilir (Weibull teorisinde bu ilişki $\text{Log}\sigma_N -$

$\text{Log}d^{-1/6}$ şeklindedir). Bu durumda LEKM kriteri geçerli olmaktadır. Oysa gerçekte mühendislik yapıları bu iki limit durum arasında kalmaktadır. Bazant'ın boyut etkisi teorisi (ifade (10)) ise, Şekil 1 de görüldüğü gibi LEKM ile dayanım kriteri arasında bir geçiş eğrisini temsil etmektedir.



Şekil 1. Bazant'ın boyut etkisi teorisi

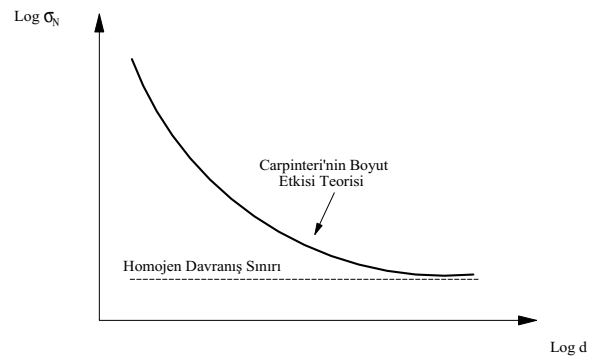
Carpinteri'nin Boyut Etkisi Teorisi

Carpinteri (1994), en büyük yükte çatlak yüzeyinde meydana gelen hasarı, fraktal geometri ile modelleyerek, boyut etkisi kavramına geometrik olarak yaklaşmıştır. Teori temelde numunenin homojenlik derecesini esas almaktadır. Küçük beton yapılarda, agrega boyutu yapı boyutunun yanında ihmal edilemeyecek mertebede olduğundan, homojenlik minimum seviyededir. Aksi durumda büyük beton yapılarda agrega boyutu, yapı boyutuna göre küçüktür ve malzeme mükemmel homojen gibi davranır. Bu açıdan bu ölçekte boyut etkisi görülmez. Fraktal hasar kavramına göre boyut etkisi

$$\sigma_N = \left(C + \frac{A}{d} \right)^{1/2} \quad (11)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada A ve C deney verilerinin $Y = (\sigma_N^2)$ ve $X = (1/d)$ olmak üzere, lineer regresyon sonucu elde edilen $Y = AX + C$ doğrusunun sabitleridir. İfade (11) de görüldüğü gibi $d \rightarrow \infty$ olduğunda boyut etkisi eğrisi sıfırdan

farklı bir sabite, homojen davranış sınırına asimtot olur. $d \rightarrow 0$ için, $\sigma_N \rightarrow \infty$ olmaktadır. Şekil 1 ve 2 karşılaştırıldığında, Bazant'ın boyut etkisi teorisi sınırlı bir boyut aralığında geçerli olmasına karşın, Carpinteri'nin boyut etkisi teorisi diğerinin aksine sınırsız bir boyut aralığında kullanılmaktadır.



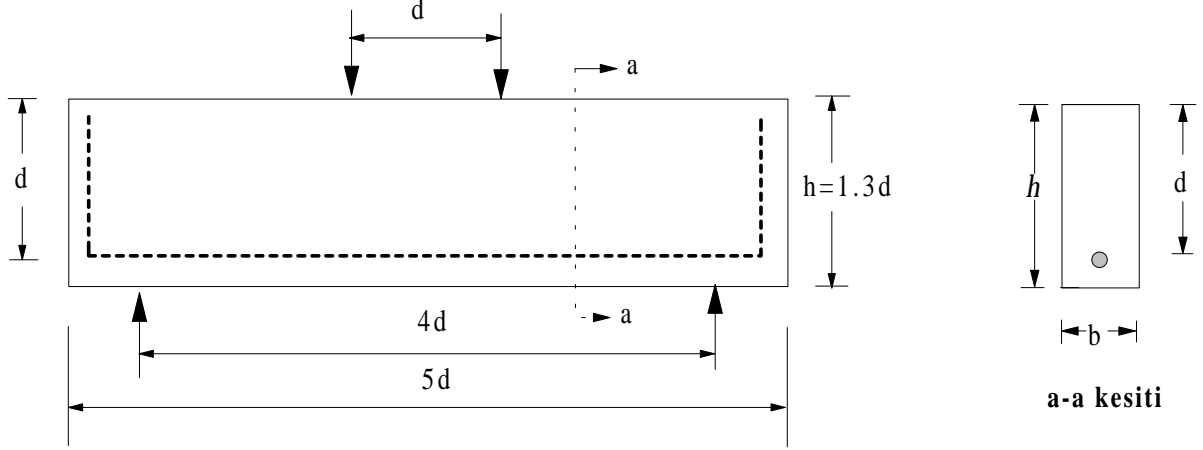
Şekil 2. Carpinteri'nin boyut etkisi teorisi

Deneysel Çalışma

Numunelerin Geometrileri, Malzeme Karakteristikleri

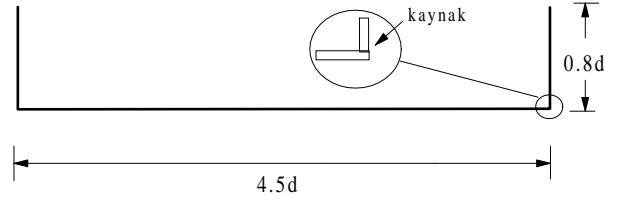
Deneyisel çalışmada faydalı yüksekliği $d=50, 100, 200$ mm olmak üzere değişim oranı 1:4 olan beton-

arme kirişler kullanılmıştır. Şekil 3 te görüldüğü gibi tüm numunelerde, uzunluğun yüksekliğe oranı $L/h=3.85$, yükleme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı $l_n/d = 4$, kesme açıklığı $a = 1.5d$, kesit yüksekliği $h = 1.3d$ ve genişlik $b = 50$ mm olarak alınmıştır.



Şekil 3. Deney kirişlerinin geometrisi

Çalışmada, standart akma dayanımı $f_y = 420$ MPa olan, S420 inşaat çeliği kullanılmıştır. Donatı çapları Tablo 1 den görüldüğü gibi 8, 12 ve 16 mm olarak seçilmiştir. Yani donatı oranının yaklaşık $\rho = \%2$ olarak alınmıştır. Ancak 12 mm lik donatının alanında % 0.3 lük bir sapma vardır. Bu sebeple normal hava koşullarına maruz kalmış donatı alınmış, yüzeyi zımparalanıp, tiner ile temizlenmiştir. Bu şekilde yaklaşık olarak % 2 lik bir donatı oranı sağlanmıştır. Donatı Şekil 4 de görüldüğü detaylandırılmıştır. Burada yan kollar ana donatıya alın kaynağı ile sabitleştirilmiştir. Deneyde kullanılan donatılara ayrıca çekme deneyi uygulanmış ve dayanımları sırası ile 455, 495 ve 510 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Donatı detayı

Çalışmada $d_a = 4$ mm olan ve granülometrisi ifade (12) de verilen Fuller parabolüne uygun mikrobeton kullanılmıştır.

$$y = \left(\frac{D}{d_a} \right)^{1/2} \quad (12)$$

Burada y , elekten ağırlıkça yüzde olarak geçen agrega miktarı D , elek çapıdır. Deneyisel çalışmada gerek numunelerin küçük olması ve gerekse de nervürlü donatı ile beton arasındaki mekanik aderansın tam sağlanması için mikrobeton kullanılmıştır. Su:Çimento:Agrega oranı ağırlıkça 1:2:4 olarak

Tablo 1. Deney kirişlerinin geometrik karakteristikleri

d [mm]	h [mm]	L [mm]	ϕ [mm]	A_s [mm ²]	ρ (%)
50	65	250	8	50.27	0.020
100	130	500	12	113.10	0.020
200	260	1000	16	201.06	0.020

alınmıştır. Betonun 28 günlük basınç dayanımı $f'_c = 23$ MPa olarak tespit edilmiştir. Çalışmada, nehir kumu kullanılmıştır. Çimento tipi, 28 günlük basınç dayanımı 32.5 MPa olan Normal Portland Çimentosudur. Her boy numuneden üç adet dökülmüştür.

Çalışmada ahşap kalıplar kullanılmıştır. Kirişler kalıplara yatay olarak dökülmüş ve bir gün priz için bekletilmiştir. Daha sonra 28 gün süre ile yaklaşık 20° de kür havuzunda bekletilmiştir.

Deney Sonuçları

Numuneler, yükleme kapasitesi maksimum 150 kN olan hidrolik yük-kontrollü makinede kırılmıştır. Tüm numunelerde maksimum yüke ortalama 6 dk.30 sn. de erişilmiştir. Tablo 2 de deney sonucunda elde edilen, deney kirişlerine ait yükseklik, maksimum yük ve nominal dayanım değerleri verilmiştir. Buradaki nominal dayanım değeri, elemanter teori yardımıyla, P_u maksimum yük olmak üzere aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$v_u = \frac{P_u}{2bd} \quad (13)$$

Tablo 2. Kirişlerin maksimum yükleri ve nominal kayma dayanımları

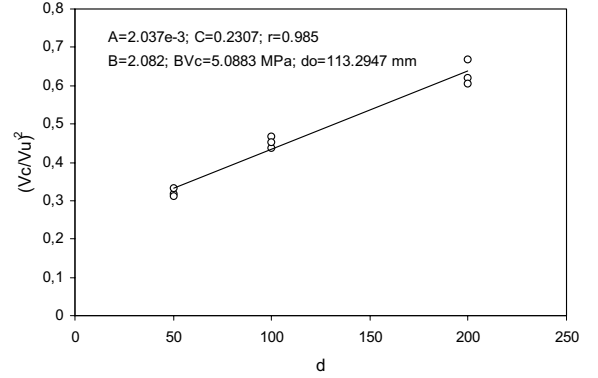
d[mm]	P_u [kN]			v_u [MPa]		
	1	2	3	1	2	3
50	21.7	21.9	21.2	4.34	4.38	4.24
100	37.0	35.7	36.3	3.70	3.57	3.63
200	59.7	62.0	62.7	2.99	3.10	3.14

İfade (13) de, nominal kayma dayanımı esas alındığından σ_N yerine, v_u kullanımı tercih edilmiştir. Aynı sebepten Bazant'ın boyut etkisi teorisinde betonun çekme dayanımı f_t yerine, eğik çekme dayanımı v_c esas alınmıştır. Burada v_c değeri için uygulamada boyutlandırma işleminde yaygın olarak kullanılan, Zsutty'e ait ifade (7) deki eğik çekme dayanımı esas alınmıştır. Bu çalışmadaki geometri ve malzeme parametrelerine göre bu dayanım $v_c = 2.444$ MPa olarak elde edilmiştir.

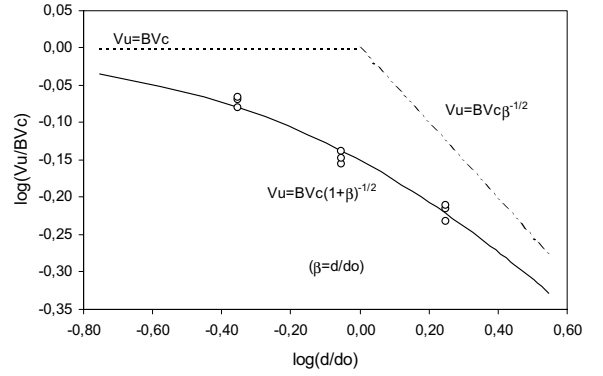
Bazant'ın boyut etkisi teorisini için, ilk önce $(v_c/v_u)^2 - d$ arasında lineer regrasyon yapılmıştır (Şekil 5a). Buradan $A = 2.037e - 3$, $C = 0.2307$, korelasyon katsayısı $r = 0.985$ ve ampirik sabitler $B = 2.08$ ve $d_0 = 113.3$ mm olarak elde edilmiştir. Bu katsayılarla göre Bazant'ın boyut etkisinin ifadesi

$$v_u = 2.08v_c \left(1 + \frac{d}{113.3} \right)^{-1/2} \quad [MPa] \quad (14)$$

şeklinde elde edilmiştir. Şekil 5b de bu çalışma için Bazant'ın boyut etkisi teorisini, dayanım kriteri ve LEKM sonuçları bir arada görülmektedir.



a



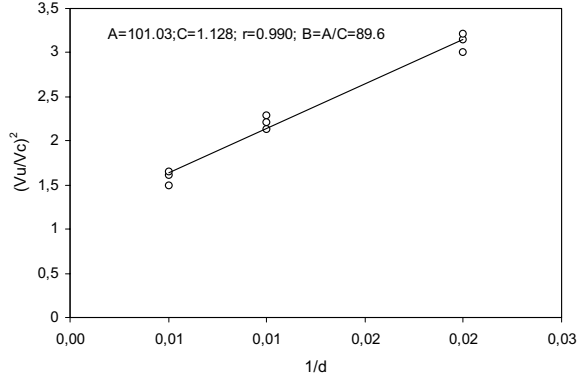
b

Şekil 5. Bazant'ın boyut etkisi teorisinin uygulanması (a) lineerizasyon (b) boyut etkisi

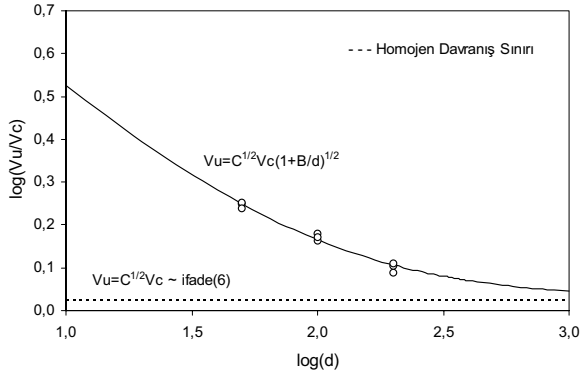
Carpinteri'nin boyut etkisi bu çalışmada literatürdeki şekilden farklı olarak, genel amaçlı bir ifade elde etmek için, ifade (14)'e benzer olarak ilk önce $(v_c/v_u)^2 - 1/d$ arasında lineer regrasyon yapılmıştır (Şekil 6a). Buradan $A = 101.03$, $C = 1.128$ ve $r = 0.990$ olarak elde edilmiştir. Bu sabitler için

$$v_u = 1.06v_c \left(1 + \frac{89.6}{d} \right)^{1/2} \quad [MPa] \quad (15)$$

şeklinde boyut etkisinin ifadesi elde edilmiştir. Şekil 6b de bu çalışma için, Carpinteri'nin boyut etkisi teorisi görülmektedir.



a



b

Şekil 6. Carpinteri'nin boyut etkisi teorisinin uygulanması (a) lineerizasyon (b) boyut etkisi

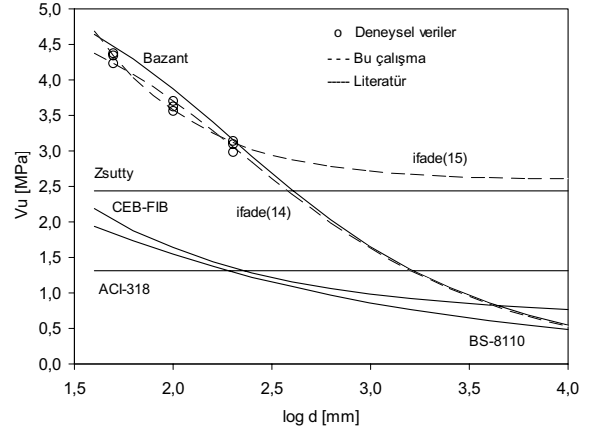
Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 7 de deneysel çalışmada incelenen betonarme kirişlere ait, literatürde kullanılan ve bu çalışmada elde edilen, ifade(14) ve (15)'e göre kayma dayanımı ile numune boyutu arasında, karşılaştırmalı bir ilişki görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde, CEB-FIB ve BS-8110 şartnamelerinin boyut etkisini dikkate aldığını, ancak gerçek yapı

boyutunda gereğinden fazla emniyetli yönde kaldığı görülmektedir. Ayrıca Bazant'ın önerdiği ifade (8) in gerçek yapı boyutunda bu iki standart ile çakışmaktadır. Diğer taraftan ACI-318 ve Zsutty'e ait ifade (7) nin boyut etkisini dikkate almadığı görülmektedir. İfade (14) ve (15) karşılaştırıldığında, ifade (14) ün Bazant'ın kayma dayanım formülü ile uyduğu, buna karşın ifade (15) in gerçek yapı boyutunda Zsutty'nin kayma dayanım formülüne asimtot (Carpinteri'nin boyut etkisi teorisi için, homojen davranış sınırı) olduğu görülmektedir. Zsutty'nin kayma dayanım formülü yaygın olarak kullanıldığı dikkate alınır, ifade(15) in kesme açıklığı kısa olan kayma donatısız betonarme kirişler için, boyut etkisini dikkate alan uygun bir kayma dayanım formülü olduğu görülmektedir. Kısaca ifade (15), Zsutty'nin önerdiği formülün boyut etkisini içeren şeklini vermektedir. İfade (15) in açık şekli ifade (16) da verilmiştir.

$$v_u = 5.76 \frac{d}{a} \left(f'_c \rho \frac{d}{a} \right)^{-1/3} \left(1 + \frac{89.6}{d} \right)^{-1/2} \quad [MPa], \quad \left(\frac{a}{d} < 2.5 \right) \quad (16)$$

Bu ifade, d nin [mm] cinsinden kullanımı için geçerlidir.



Şekil 7. İfade (14) ve (15) in literatürdeki mevcut diğer kayma dayanım formülleri ile karşılaştırılması

Sonuç ve Öneriler

Yapılan deneysel çalışma sonucunda kesme açıklığı kısa, kayma donatısız betonarme kirişlerde

boyut etkisinin varlığı gözlenmiştir. Gerek Bazant'ın ve gerekse de Carpinteri'nin boyut etkisi teorilerinin uygulanmasında elde edilen korelasyon katsayılarının yüksek olması bu savı desteklemektedir.

Laboratuvar boyutlarında birbirine yakın sonuçlar veren, fakat gerçek yapı boyutunda (boyutları 100 m den büyük olan köprüler gibi) farklı davranışlar sergileyen Bazant ve Carpinteri'nin boyut etkisi teorilerinin, pratikte nasıl bir durum arz edeceği bilinmemektedir. Çünkü gerçek yapı boyutunda deney yapmak mümkün olamamaktadır. Bu çalışmada ise, Bazant'ın boyut etkisi teorisi, gerçek yapı ölçeğinde BS-8110, CEB-FIB şartnamelerine yakın sonuçlar vermiştir. Buna karşın Carpinteri'nin boyut etkisi teorisi, gerçek yapı boyutunda, pratikte çok kullanılan Zsutty'nin boyutlandırma formülüne asimtot olmuştur. Ancak şartnamelerin gereğinden fazla emniyetli yönde olduğu dikkate alınır, Carpinteri'nin boyut etkisinin çok daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu gerçekten hareketle sunulan çalışmada, boyut etkisini içermeyen Zsutty'nin boyutlandırma formülü modife edilerek, kesme açıklığı kısa, kayma donatısız betonarme kirişlerin boyutlandırılmasında kullanılabilir pratik bir formül önerilmiştir.

Semboller

A	: ampirik sabit
a	: kesme açıklığı [mm]
A_s	: donatı alanı [mm ²]
b	: kiriş genişliği [mm]

C	: ampirik sabit
b	: kiriş genişliği [mm]
C	: ampirik sabit
D	: elek çapı [mm]
d	: faydalı yükseklik [mm]
d_0	: ampirik sabit [mm]
d_a	: maksimum agrega çapı [mm]
f'_c	: betonun silindir basınç dayanımı [MPa]
f_{ck}	: betonun karakteristik basınç dayanımı [MPa]
f_{cu}	: betonun küp basınç dayanımı [MPa]
f_y	: donatının akma dayanımı [MPa]
h	: kiriş yüksekliği [mm]
L	: kiriş boyu [mm]
l_n	: yükleme açıklığı [mm]
M_u	: maksimum moment [kNm]
P_u	: maksimum yük [kN]
r	: korelasyon katsayısı
v_c	: eğik çekme dayanımı [MPa]
v_u	: kirişin maksimum yükteki kayma dayanımı ($v_u = P_u/2bd$) [MPa]
V_u	: maksimum yükteki kesme kuvveti [kN]
y	: elekten geçen agreganın ağırlık olarak yüzdesi
β	: ampirik sabit ($\beta = d/d_0$)
ϕ	: donatı çapı [mm]
γ_m	: malzeme sabiti
ρ	: donatı oranı ($\rho = A_s/bd$)
σ_N	: nominal dayanım [MPa]

Kaynaklar

ACI-318 "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", Detroit, 1989

Arslan, A. and İnce, R. "The neural network-based analysis of size effect in concrete fracture", Proceeding of the 11. int. Conf. FRAMCOS-11, 693-707, Zurich, Switzerland, July 25-28, 1995

Arslan, A. and İnce, R. "The neural network approximation to the size effect in fracture of cementitious materials", Engineering Fracture Mechanics, 54 (2), 249-261, 1996

Bazant, Z. P. "Size effect in blunt fracture: concrete, rock and metal", ASCE J. Engng. Mech, 110, 518-535, 1984

Bazant, Z. P. and Kim, J. K. "Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams", ACI J., 81, Sept-Oct., 456-467, 1984

Bazant, Z. P. and Xi, Y. "Statistical size effect in concrete structures: nonlocal theory", Report No. 89-12/B623s, Center For Advanced Cement-Based Materials, Northwestern University, Evanston, IL, 1990

BS 8110 "Code of Practice Design and Construction", Standards Association, London, 1985

Carpinteri, A. "Scaling laws and renormalization groups for the strength and toughness of disordered materials", int. J. Solids Struct, 31, 291-302, 1994

CEB-FIP "Model code for concrete structures", Committee Euro-international du Beton, Bull 124/125, 1991 Griffith, A. A. "The phenomena of rupture and flow in solids", Phil. Trans. Roy. Soc. London A221,163-198, 1920

İnce, R. "Çimento bazlı malzemelerin kırılmasında (non-linear kırılma mekanik) boyut tesirinin yapay

sinir ağırları ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bil. Ens, Elazığ, 1994

İnce, R. “Betonarme yapı elemanlarında basınç-kesme kırılmasının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bil. Ens, Elazığ, 1998

Kani, G. N. L. “How safe are our large reinforced concrete beams?”, ACI Struct. J. 128-141, 1967

TS 500 “Betonarme yapıların hesap ve yapım kural-ları”, Türk standartları enstitüsü, Ankara, 1984

Walraven, J. C. “Aggregate interlock: a theoretical and experimental analysis”, PhD-thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1980

Weibull, W. “A Statistical Theory of the Strength of Materials”, Royal Swedish inst. for Engng. Res, Stockholm, 1939

Zsutty T. C. “Beam shear strength prediction by analysis of existing data”, ACI Struct. J. 65, Nov. 943-951, 1968