

# YÜKSEK VE ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARDA GERİLME-BİRİM KISALMA KARAKTERİSTİKLERİ

## 1. GİRİŞ

Yakın zamanda (1980 yılından beri) yüksek ve çok yüksek dayanımlı ( $\emptyset 15 \times 30$  cm silindir dayanım alt değeri 40 MPa) betonların kullanımı, yüksek, çok katlı binalarda, okyanus petrol platformlarında ve öngermeli büyük açıklıklı köprü inşaatlarındaki uygulamalarda oldukça artmıştır. Yüksek dayanımlı betonların en önemli karakteristik büyüklüklerinden birisi de tek eksenli gerilme altında gerilme-birim kılma ( $f_c - \epsilon$ ) karakteristiğidir. Bu eğrinin analitik tanımlanması için 1980 yılından buyana, beton literatüründe bir çok yaklaşımlar teklif edilmiştir. Bu yaklaşımların bir çoğunda, bu karakteristiğin yükselen kısmı ( $0 - f_c'$ ) ve azalan kısmı ( $f_c' - f_u$ ) ayrı ifadelerle modellenmekte ve bu eğrinin belirlenmesi için bir çok matematik işlem yapılması ve yardımcı parametreler belirlenmesi gerekmektedir. Bu da, hesap kompleksliği ve zaman kaybı getirmektedir. Bu özelliği taşıyan tipik bir örnek olan Ahmad (1985)'in yüksek dayanımlı betonlar için önerdiği bağıntı, deney noktalarına ( $15 \times 30$  cm silindir mukavemeti 50-95-140 MPa) çok uygun olmasına rağmen (ARIOĞLU, ARIOĞLU, 1991) matematik olarak eğrinin tanımlanması basit olmadığı ve uzun zaman aldığı için olumsuz olmaktadır. Sonraki modellerde, tek bir eğri ile tüm karakteristiği veren bağıntılar ise deney datalarına olan uyumu açısından farklılıklar yaratmaktadırlar. Bu farklılık ise, büyük ölçüde bu ifadelerin temel karakteristik büyüklükleri olan beton elastik modülü ( $E_{it}$ ) ve maksimum gerilmedeki birim kılmanın ( $\epsilon_0$ ), kullanılan iri agreganın mekanik büyüklükleri (basınç dayanımı, poisson oranı), silika füme miktarı, kimyasal bileşenler (örneğin, silisyum, alkali oksit yüzdeleri) ve yükleme hızı ile denetlenmektedir. Bunlara ek olarak, kimi bağıntılarda ise, post-failure'dan sonra eğrinin alçalan kısmı sabit bir eğimle sonuç-

lanmaktadır. Halbuki Yapı Merkezi Yüksek Dayanımlı Beton Projesi kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda (Yapı Merkezi 1990) numunelerin tek eksenli basınç altında kırılmaları dikkatle incelendiğinde, maksimum yük altındaki kırılma noktasında tek bir oblik kayma çatlağı gözlenirken, artan birim kılmalarda bunu belirli bir açıyla kesen ikinci kayma çatlağı oluşmakta ve daha sonra sabit bir gerilme altında  $\epsilon$  önemli ölçüde büyük değerler almakta, diğer bir deyişle numune bu çatlak sistemi üzerinde büyük deplasman yapmaktadır. Bu  $\epsilon$ 'un teorik olarak sonsuz olma durumundaki sabit gerilme, numunenin kalıcı dayanımı olarak tariflenebilir ve bu büyüklük özellikle yüksek dayanımlı betonlara özgü olarak tanımlanabilir. Geliştirilen bazı denklemlerde, yukarıda değinilen deneysel olgu gözönüne alınmamaktadır. Yüksek dayanımlı betonlarda  $f_c - \epsilon$  karakteristiğinin kırılma sonrası kısmının deneysel bulgularla üst üste olması, bu konuda teklif edilen bağıntıların gerek kestirim prezisyonu bakımından, gerekse fiziksel gerçeğin modellenmesi açısından gerekmektedir. Bu çalışmamızda, özellikle yukarıda değinilen hususu gözönünde tutarak, 1990 yılına ait en yeni literatürde önerilen bağıntılar (Ahmad and Shah, 1992; Murgurama, Nishiyama, Watanabe, 1993; Collins and MacGregor, 1993; Hsu and Hsu, 1994a,b; Almussalam and Alsayed, 1995; ARIOĞLU, 1995) incelenmekte ve deneysel datalara uygunluğu tartışılmakta, ayrıca teorik olarak tanımlanan düktilite büyüklüğünün deneysel datalarla uyumu tartışılmaktadır.

## 2. GERİLME-BİRİM KISALMA BAĞINTILARI VE DENEYLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Daha önce bu konuda yapılmış olan çalışmalardan bilinen (ARIOĞLU ve KÖYLÜOĞLU, 1995a), deneylerle uyumu en iyi olan üç bağıntı seçilerek tartışmaya açılmıştır. Bağıntılar,



Prof. Dr. Müh. ERGİN ARIOĞLU (49)

İTÜ Maden Fakültesi'nden 1969 Haziran döneminde Maden Y. Müh. olarak mezun oldu. Aynı üniversitenin maden mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak akademik çalışmalarını sürdüren Prof. ARIOĞLU'nun toplam 10 adet (3'ü yabancı dilde; İngilizce, İspanyolca, Farsça) telif kitabı, 200'ü aşkın bildiri ve makalesi çeşitli bilimsel ve teknik kongre kitaplarında ve dergilerinde yayımlanmıştır. İTÜ Dergisinin Yayın Kurulu Üyesidir.



Dr. Müh. Ö. SÜMER KÖYLÜOĞLU (29)

Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Temmuz 1988'de mezun oldu. Aynı üniversiteden Mart 1990'da Yük. Müh. ve Eylül 1995'de doktora ünvanlarını aldı. Doktora konusu Soğukta Haddelenmiş Çelik Elemanlar (Cold Formed Steel) alanında olup "A Non-Linear Analysis and Design of Thin-Walled Members with Intermediate Stiffeners" başlığını taşımaktadır. Birisi uluslararası hakemli dergide olmak üzere 5 adet yayını arasında, AISI-Şartnamesi Alt Komitelerine sunulmuş raporları da bulunmaktadır. IABSE üyesidir. Ekim 1995'den beri Yapı Merkezi AR-GE Bölümü'nde çalışmaktadır.

yardımcı ifadeleri ile birlikte Çizelge 1'de verilmiştir.

Yüksek dayanımlı betonlar için önerilen bağıntıların deneylerle karşılaştır-

ması ise Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1 çizilirken, bağıntılarda verilen  $\epsilon_0$  formülleri yerine, ARIOĞLU formülü kullanılmıştır (Çizelge 1). Almussalam (1995) bağıntısı betonun elasti-

site modülü ile eğrinin kırılma sonrası eğimi açısından başarılı olmakla beraber, deneylerde hep gözlenen rezerv kapasiteyi modelleyememektedir. Bu açıdan, Collins (1993) ve Hsu

Çizelge-1 Gerilme-Birim Kısalma Bağıntıları

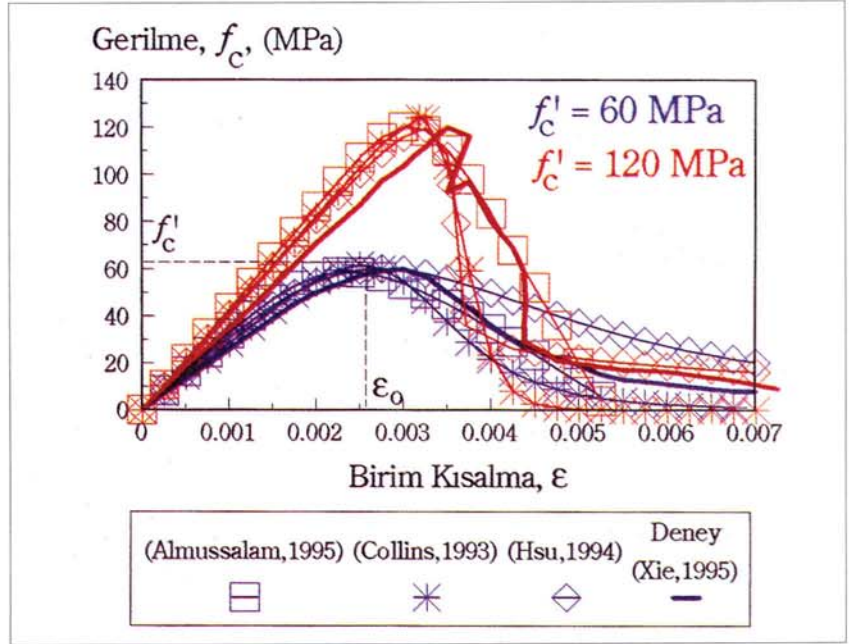
<p><b>Almussalam &amp; Alsayed (1995)</b></p> $f_c = \frac{(E - E_p)\epsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_{it} - E_p)\epsilon_c}{f_o}\right)^n\right]^{1/n}} + E_p\epsilon_c$ <p><b>Deney aralığı:</b>  <math>30 \leq f'_c \leq 85</math> MPa</p> <p><b>Betonun Mekanik Özellikleri:</b>  <math>\epsilon_o = (0.2f'_c + 13.06) \times 10^{-4}</math>  <math>E_{it} = 3320\sqrt{f'_c} + 6900</math> (MPa)</p>	$n = -\frac{\ln 2}{\ln\left(\frac{f_1 - E_p}{f_o - E_p}\right)} ; \epsilon_1 = \frac{f_o}{E_{it} - E_p}$ $f_o = 5.6 + 1.02f'_c - E_p\epsilon_o$ (MPa) $f'_c \leq 55$ MPa $\rightarrow E_p = 5470 - 375f'_c$ (MPa) $f'_c > 55$ MPa $\rightarrow E_p = 16398.23 - 676.82f'_c$ $f_1 = f'_c \left[ 2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_o} - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_o}\right)^2 \right]$ (MPa)
<p><b>Collins, Mitchell &amp; MacGregor (1995)</b></p> $\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \frac{n}{n-1 + (\epsilon_c / \epsilon_o)^{nk}}$ <p><b>Betonun Mekanik Özellikleri:</b>  <math display="block">\epsilon_o = \frac{f'_c}{E_{it}} \frac{n}{n-1}</math>  <math display="block">E_{it} = 3320\sqrt{f'_c} + 6900</math> (MPa)</p>	$k = 0.67 + \frac{f'_c}{62}$ $n = 0.8 + \frac{f'_c}{17}$ $f'_c$ (MPa)
<p><b>Hsu &amp; Hsu (1994)</b></p> <p><math>0 \leq x &lt; x_d</math> için <math>\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n\beta x}{n\beta - 1 + x^{n\beta}}</math></p> <p><math>x_d \leq x</math> için <math>\frac{f_c}{f'_c} = 0.3e^{[-0.8(x-x_d)^{0.5}]}</math></p> <p><b>Deney aralığı:</b>  <math>64.1 \leq f'_c \leq 92.4</math> MPa</p> <p><b>Betonun Mekanik Özellikleri:</b>  <math display="block">\epsilon_o = 8.9 \times 10^{-5} f'_c + 2.114 \times 10^{-3}</math>  <math display="block">E_{it} = 1.2431 \times 10^2 f'_c + 3.28312 \times 10^3</math> (ksi)</p>	$\beta = \left(\frac{f'_c}{9.46}\right)^3 + 2.59 ; f'_c$ (ksi) $x = \epsilon_c / \epsilon_o$ $0 \leq x \leq 1$ için $n=1$ $1 < x \leq x_d$ için: $0 \leq f'_c \leq 62$ MPa ise $n=1$ $62$ MPa $\leq f'_c \leq 76$ MPa ise $n=2$ $76$ MPa $\leq f'_c \leq 90$ MPa ise $n=3$ $90$ MPa $\leq f'_c$ ise $n=5$ $x_d : (0.3 f'_c)$ gerilmesi için birim kısalma
<p><b>Arıoğlu (1995a); Arıoğlu (1995b)</b></p> $\epsilon_o = 1.753 f'_c^{0.27756} V^{-0.09314}$ $\epsilon_o = 0.7887 f'_c^{0.27756}$ ( $\phi 15 \times 30$ cm silindir)	<p>V: Numunenin hacmi (cm<sup>3</sup>)  <math>\epsilon_o</math>: Maksimum gerilmede birim kısalma (%)  <math>f'_c</math>: Maksimum gerilme (MPa)</p>

(1994) bağıntıları öne çıkmaktadır. Collins bağıntısı 60 MPa'lık betonun eğrisi için daha uygun olurken, Hsu bağıntısı da 120 MPa betonu ile tam bir uyum içindedir. Özellikle çok yüksek dayanımlı beton için uyumu nedeniyle bu çalışmada verilen nümerik değerlendirmelerde Hsu (1994) bağıntısı kullanılmıştır.

### 3. GERİLME-BİRİM KISALMA KAREKTERİSTİK EĞRİLERİNE ETKİ EDEN BELLİ BAŞLI FAKTÖRLERİN SAYISAL DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde  $f_c$ - $\epsilon$  eğrilerini etki eden faktörleri açacak şekilde bazı sayısal değerlendirmeler çıkarılacaktır. Önce, basınç düzeyinin eğrinin genel karakteristiğine olan etkisi ortaya koyulacaktır. Bunun için, basınç dayanımları 40'tan 140'a kadar olan betonların elastik modülü Hsu bağıntısından ve maksimum gerilmedeki birim kısalmaları ARIÖĞLU bağıntısından hesaplanarak (Çizelge 1) Şekil 2. (a)'daki karakteristikler üretilmiştir. Ayrıca, aynı şekil üzerinde gerilme-birim kısalmanın diğer bir karakteristik büyüklüğü olan süneklik (düktilite)  $\beta = \epsilon_{0.85} / \epsilon_0$ 'in basınç dayanımına göre değişimi keza incelenmiştir, Şekil 2. (b). Ayrıca teorik olarak gerilme-birim kısalma eğrilerinden kaynak bazında üretilen  $\beta$  büyüklükleri, ARIÖĞLU, KÖYLÜOĞLU (1996) çalışmasında, yüksek-çok yüksek beton dayanım düzeyleri için deneysel data'lara dayandırılan regresyon ifadesi işlenmiştir. Her iki eğri yakından incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar ön plana çıkmaktadır.

- Yüksek dayanımlı betonlarda  $f_c$ - $\epsilon$  eğrisinin "yükselen kısmının" lineerliği (%80-90)  $f_c$ 'ye kadar devam etmektedir. Halbuki, normal dayanımlı betonlarda aynı kısmın lineerliği (%40-45)  $f_c$  dayanım düzeylerine kadar olmaktadır. Bu olgu, tamamen harç-harç, agrega-harç arasındaki geçiş bölgesindeki süper akışkandırıcı/mineral katkı (silika füme, uçucu kül) ile oluşturulan güçlü mekanik-kimyasal aderans köprüsünden kaynaklanmaktadır.
- Artan dayanım düzeyi  $f_c$  ile maksimum gerilmedeki birim kısılma büyüklüğü ( $\epsilon_0$ ) artmaktadır.



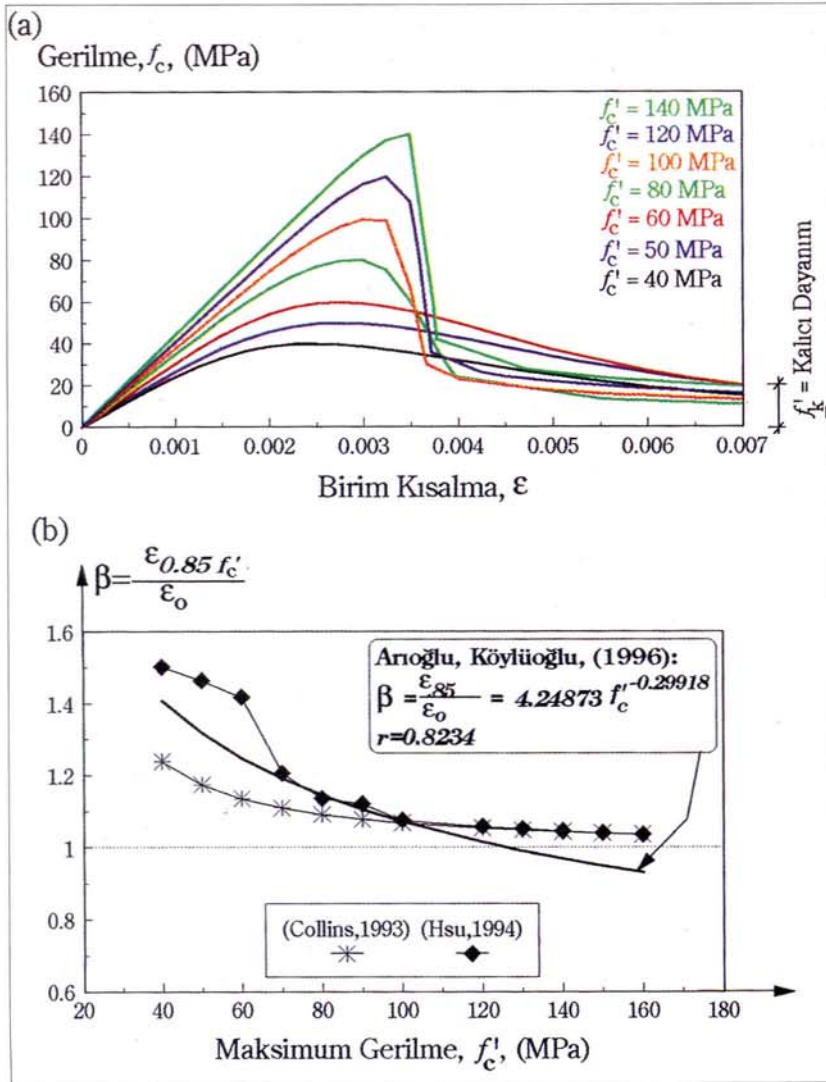
Şekil 1. Önerilen Bağıntıların Deneylerle Karşılaştırılması

- Kırılmadan sonraki kısmın eğimi, artan dayanım düzeyleri ile artmaktadır (Şekil 2.a.). Dolayısıyla malzeme daha kırılğan olmaktadır. (Şekil 2.b.). Bu tür kırılma modu, özellikle ani ve habersiz olma özellikleri nedeniyle tercih edilmemektedir. Bu olumsuz özellik, yanal gerilme temin eden kuşatma donatıları ile ortadan kaldırılmaktadır.
- Daha belirgin olarak yüksek dayanımlı betonlara özgü bir özellik olarak gözlenebilecek rezidüel (kalıcı) dayanım ( $f_k$ ), maksimum gerilmeden bağımsız gözükmemektedir. Kalıcı dayanım, numunede gelişen ana kayma çatlak sisteminin arasında gelişen kontaklardan kaynaklanmaktadır. Aynı olgu kayalarda gözlenmektedir (Pininska, Lukaszewski, 1991).
- Süneklik parametresinin ( $\beta$ ) bu çalışmada verilen bağıntılardan hesaplanan değeri ile ARIÖĞLU, KÖYLÜOĞLU (1996) çalışmasında deneysel verilere dayanarak çıkarılan regresyon ifadesi karşılaştırıldığında (Şekil 2.b.) 70-100 MPa dayanım düzeyi aralığında hesaplanan değerler regresyon ifadesi ile üst üste düşmektedir. Hsu bağıntısından hesaplanan  $\beta$  değerle-

ri, 70 MPa'dan küçük dayanımlarda, bağıntının tariflediği eğrinin n parametresindeki değişiklik nedeniyle oldukça yüksek bir süneklik tanımlamaktadır. 100 MPa'dan büyük dayanımlar için Collins ve Hsu bağıntılarından hesaplanan değerler üst üste olmakta, bu bölgede regresyon ifadesi de güvenli kalmaktadır.

### 4. SONUÇLAR

- Yüksek ve çok yüksek dayanımlı betonların gerilme-birim kısılma karakteristikleri, normal dayanımlı betonlardan çok farklıdır. Özellikle yüksek dayanımlı beton deneylerinde gözlenen kalıcı dayanımın, ( $f_c$ - $\epsilon$ ) eğrisi çıkarılırken dikkate alınması gerekmektedir. Bu yapılırken de, tanımlanan eğrinin matematik kullanımının kolay olması gerekmektedir. Tüm bu açılardan bakıldığında, Hsu bağıntısı (Çizelge 1), ARIÖĞLU bağıntısıyla hesaplanan  $\epsilon_0$  değeri (Çizelge 1) ile birlikte kullanıldığında, hem deneylerle çok iyi uyum göstermekte, hem de istenen şartları sağlayan bir bağıntı olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1).
- Özellikle yüksek dayanımlı betonlara özgü bir özellik olan "kalıcı dayanım", betonun maksimum



Şekil 2. Önerilen Bağlıntıların Deneylerle Karşılaştırılması ve  $\beta = \epsilon_{0.85} / \epsilon_0$  ile Beton Dayanımı arasındaki Değişimlerle Deneysel Verilere Dayandırılan Regresyon İfadeleri ile Karşılaştırılması

gerilme düzeyinden bağımsız görünmektedir (Şekil 2.a.). Bu özellik ayrıntılı deneylerle tahkik edilmelidir.

- Yüksek dayanımlı betonlarda, ( $f_c - \epsilon$ ) eğrisinin lineerliği, artan kısımda maksimum gerilmenin ( $f_c^i$ ) %80-90'ına kadar devam etmektedir. Maksimum gerilmedeki birim kısılma değeri ise artan dayanımla birlikte artmakta, ancak kırılmadan sonraki eğim arttığı için betonun sünekliği azalmaktadır (Şekil 2.a.). 70-100 MPa aralığı için önceki çalışmada önerilen regresyon bağıntıları, burada incelenen bağıntılardan hesaplanan süneklik

" $\beta = \epsilon_{0.85} / \epsilon_0$ " değerleri ile iyi bir uyum sergilemektedir. (Şekil 2.b.)

#### TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmanın yapılması ve yayımlanmasını teşvik eden Yapı Merkezi A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Dr. Yük. Müh. Sn. Ersin ARIOĞLU'na teşekkür ederler.

Çalışmada ileri sürülen sonuçlar sadece yazarlara aittir.

#### KAYNAKÇA

Ahmad, S.H. and Shah, S.P., "Behaviour of Hoop Confined Concrete Under High Strain Rates", ACI Journal, September-October 1995, p.p.634-647.

Ahmad and Shah, Cast-in-Place Concrete in Tall Building Design and Construction, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, editörler : H. Microys, D. Michael and M. Saiidi, McGraw-Hill, Inc., New York, 1992.

Almussallam, T.H. and Alsayed, S.H., "Stress-Strain Relationship of Normal, High-Strength and Lightweight Concrete", Magazine of Concrete Research, 47, No.170, March 1995, pp. 39-44

ARIOĞLU, ERDEM ve ARIOĞLU, ERGİN "Yüksek Dayanımlı Betonların Bünyesel Davranış Parametreleri Üzerine Bir Araştırma", Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi, Bildiriler Kitabı, I. Cilt, 8-11 Ekim 1991, İstanbul, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.

ARIOĞLU, Ergin, "Strain of Concrete at Peak Compressive Stress for a Wide Range of Compressive Strengths", B. de Nicolo, L. Pani and E Pozzo, Materials and Structures, Vol.28, 1995 (a), pp 611-614.

ARIOĞLU, Ergin, (b) "Tek Eksenli Basınç Altında-Maksimum Gerilmedeki Beton Birim Kısılma Büyüklüğünün İstatistiksel Yaklaşımla Belirlenmesi", Prof. i. Turgan Sabis Sempozyumu, 24 Kasım 1995, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul 1995 (b).

ARIOĞLU, Ergin, KÖYLÜOĞLU, Ö.S., "Yüksek ve Çok Yüksek Dayanımlı Betonlarda (Donatısız ve Donatılı) Basınç Dayanımı - Birim Kısılma Karakteristiklerinin İncelenmesi ve Deneysel Verilerle Karşılaştırılması", Yapı Merkezi, AR/GE Raporu, Kasım 1995.

ARIOĞLU, Ergin, KÖYLÜOĞLU, Ö.S., "Yüksek ve Çok Yüksek Dayanımlı Betonlarda Süneklik Özelliğinin İncelenmesi ve Çeşitli Şartnamelerle Karşılaştırılması", Beton Prefabrikasyon Dergisi, Ocak 1996.

COLLINS, M.P., MITCHELL, D. and MacGregor, J.G., "Structural Design Considerations for High-Strength Concrete", Concrete International, pp.27-34, May, 1993.

Hsu, L.S. and Hsu, C-T. T., (a) "Complete Stress-Strain Behaviour of High-Strength Concrete under Compression", Magazine of Concrete Research, 46, No. 169, Dec. 1994, pp.310-312.

Hsu, L.S. and Hsu, C-T. T., (b) "Stress-Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete under Compression", ACI Structural Journal, V.91, No. 4, pp.448-457, July-August 1994.

Muguruma, H., Nishiyama, M. and Watanabe, F., "Stress-Strain Curve Model for Concrete with a Wide Range of Compressive Strength", in I. Holand and E. Sellevold (Eds.), Proceedings, Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Vol. 1, pp.314-321, Lillehammer, Norway, June 20-23, 1993.

Pininska, J. and Lukaszewski, P., "The Relationships Between Post-Failure State and Compression Strength of Sudetic Fractured Rocks", Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 43, Paris 1991, pp.81-86.

Xie, J., Elwi, A.E. and MacGregor, J.G., "Mechanical Properties of Three High-Strength Concretes Containing Silica Fume", ACI Materials Journal, Vol.92, No. 2, March-April 1995, pp.135-145.

Yapı merkezi 100-170 MPa Yüksek Dayanımlı Beton Projesi, 1990.