

## Yüksek dayanımlı betonlarda çimento hamurunun boşluk yapısının beton özelliklerine etkisi

Hakan N. ATAHAN\*, Mehmet A. TAŞDEMİR, Osman N. OKTAR

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

### Özet

*Bu çalışmada aynı Portland çimentosu ve aynı agregalar kullanılarak 4 değişik granülometri ve 5 değişik su/çimento oranında olmak üzere 20 değişik beton karışımı hazırlandı. Beton agregasının karışımında en büyük tane boyutu 16 mm'de sabit tutuldu ve karışım oranları A16-B16, B16, B16-C16 ve C16 ISO referans eğrilerine uygun olacak şekilde seçildi. Su/çimento oranları 0.26 ile 0.42 arasında ve 0.04 artımlara karşılık gelecek biçimde belirlendi. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde mekanik deneyler 7., 14., 28. ve 365. günlerde yapıldı. Deney sonuçları, yüksek dayanımlı betonların dayanımlarının tahmininde çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıklarını gözönüne almanın normal dayanımlılarınkine göre daha büyük yarar sağlayacağını gösterdi.*

**Anahtar Kelimeler:** Duyarlı özellik, sertleşmiş çimento hamuru, su/çimento oranı.

### The effect of the pore structure of hardened cement paste on the properties of high strength concretes

#### Abstract

*In this work, 20 mixes were prepared using the same Portland cement and the same aggregates. In the mixes, the following four different grading curves were used: A16-B16, B16, B16-C16, and C16, known as ISO reference curves. The maximum particle size of concrete aggregate was kept constant at 16 mm. Five different water/cement ratios were used from 0.26 to 0.42, in steps of 0.04. The mechanical tests on the hardened concretes were done at the following ages: 7, 14, 28, and 365 days. At these ages, the hydration degrees were also measured in the hardened cement paste specimens with the same water/cement ratios used for concrete mixes. Experimental results have shown that taking into account the sensitivities to the pore structure of the hardened cement paste provides more benefits in the strength prediction of high strength concretes than those of normal strength concretes. The compressive and tensile strengths could be adequately explained by a variable such as  $\{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c\} / \{n_i(w - (p-1)\alpha c) + a\}$ . The energy absorption capacities in compression were determined by calculating the area under the stress-strain curve up to peak stress. It is observed that, as the compressive strength of concrete increases the relative adsorbed energy up to peak stress decreases significantly.*

**Keywords:** Hardened cement paste, hydration degree, sensitive property, water - cement ratio.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hakan N. ATAHAN. hnatahan@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 68.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Düşük su/çimento oranlı betonlarda özelliklerin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığı" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 29.07.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 28.11.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Günümüzdeki büyük gelişmelerin sonucu olarak hem bilgisayar teknolojisinde hem de deney tekniklerinde sağlanan ilerlemeler betonun mekanik davranışına da yansımıştır. Özellikle betonun iç yapısı ve mekanik davranışının birlikte incelenip değerlendirilmesi araştırmalara yeni boyutlar kazandırmıştır. Yeni gelişmelerin ışığında beton davranışının daha iyi anlaşılacağı, içinde bulunduğumuz 21. yüzyılda mühendislik yapılarının projelendirilmesinde daha gerçekçi ilkelerin ve çok daha gelişmiş yöntemlerin kullanılabilmesi beklenmektedir. Bu yüzden betonun daha etkin bir biçimde kullanılması oldukça önemlidir. Yüksek dayanımlı betonların reaktörler, açık deniz yapıları, yüksek katlı binalar ve savunma amaçlı depolama siloları gibi özel yapılarda kullanılması, çatlama davranışında artan bir ilginin oluşmasına neden oldu (Malhotra, 1992; Taşdemir v. diğ., 1995 a,b; Taşdemir v. diğ., 1999).

Alt yapısını tamamlama çabasında olan ülkemizin önemli miktarda çimento esaslı malzemelere gereksinimi vardır. Çimento üretiminde ülkemizde sürekli artış kaydedilmektedir. Örnek olarak yaklaşık aynı nüfusa sahip olmamıza karşın İngiltere'deki çimento üretiminin üç katı kadar çimento üretilmektedir. Son yıllarda ülkemizde üretilen çimento miktarı 35 milyon ton civarındadır. Böyle bir üretimle Türkiye Avrupa'da ilk üç içinde, dünyada ise büyük miktarda çimento üreten ülkelerden ilk sekizi arasında sayılmaktadır. Buna karşılık çok yaygın kullanım alanı olan betonun kısa ve uzun süreli mekanik davranışı ile dürabilitesine yönelik araştırmalar olması gereken düzeyde değildir.

Son yıllarda hem dünyada hem de ülkemizde yüksek mukavemetli betonlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. TS 500, C50 (28 günlük silindir basınç dayanımı 50 MPa) ye varan beton sınıflarını öngörmekle birlikte TS 11222, C100'e kadar beton sınıflarını hedeflemektedir. Ancak ülkemizde en yaygın kullanılan beton sınıfları C14, C16 ve C20 dir. Yüksek yapılarda ise C30 veya C35 sınıfları kullanılmaktadır.

Buna karşın Eurocode 2 de normal beton sınıfları C80'e varmaktadır. Avrupa'da Almanya'nın öncülüğünde C60-C100 arasındaki beton sınıfları için yeni tasarım kodları geliştirilmektedir. Bu aralıktaki betonlar yüksek dayanımlı olarak kabul edilirler. 1960'lı yıllarda basınç dayanımı bakımından alt sınır 40 MPa olarak tanımlanan yüksek mukavemetli betonun günümüzde 100 Mpa'ya kadar olanlarının rutin olarak hazır beton tesislerinde üretilmesi artık sözkonusudur, hatta 100 MPa ile 120 MPa dayanım değerine sahip betonlar da bazı yapılarda kullanılmıştır (Malhotra, 1992). Yapılan araştırmalarda basınç dayanımı 150 MPa' ı aşan betonların üretildiği bilinmektedir. Ancak 100 MPa' ı aşan dayanıma sahip betonları rutin olarak üretmek hem pratik hem de ekonomik değildir. Böylece çok yüksek dayanımlı betonlar yerine dayanımları bu değerlerin altında (örnek olarak CEB-FIB Model Code, 1990) üst sınır beton sınıfı olarak verilen 80 MPa civarında olan) fakat daha düşük geçirimsizliğe sahip, donma-çözölmeye ve zararlı ortamların etkisine dayanıklı betonları ülkenin önemli yapılarında kullanmak daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır.

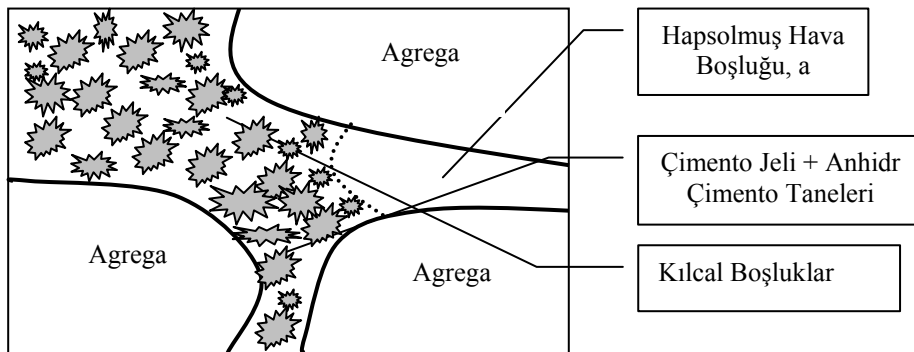
Betonun dayanımı yanında dürabilitesinin de yeterli olması istenir. Geçirimsiz olması istenen bir betonun dürabilitesinin de yeterli olacağı beklenir (Garbozci, 1990; Rössler ve Odler, 1985; Odler ve Rössler, 1985). Geçirimli ve boşluklu bir beton içindeki çeliği koruyamaz. Karbonatlaşma ve klor difüzyonu nedeni ile oluşan çelik korozyonu betonarme yapıda dayanım azalmasına neden olur. Sismik yüklemeler sırasında bu tür çatlaklar ilerler ve kalan dayanım daha da azalır. Ülkemiz etkin bir deprem kuşağındadır. Bundan dolayı depremle korozyon arasında doğrudan ilişki vardır. Böylece betonun çatlama, kırılması, betonun iç yapısı ile mekanik davranışı arasındaki ilişkinin saptanması büyük önem kazanmaktadır. Ülkemizin önemli alt yapılarında kullanılacak yüksek dayanımlı betonların aynı zamanda ekonomik ve dayanıklı olmaları için iç yapı ve mekanik davranış bakımından en yeni tekniklerin kullanılarak incelenmeleri önemli yarar sağlayacaktır. Bunun

sonucu olarak da kaynakların daha rasyonel kullanımı söz konusu olabilecektir. Beton, çimento hamuru, agrega ve çimento hamuru ile agrega arasındaki ara yüzeyden oluşan üç fazlı bir kompozit malzeme olarak tanımlanabilir. Özellikle betonun kırılması ve deformasyonu çimento hamurunun yapısı ile çok yakından ilgilidir (Jennings, 1988 a, b). Betonun mekanik özellikleri ile mikroyapısını birlikte değerlendiren çalışmalar geçmiş yıllarda yapılmıştır (Oktar, 1977; Winslow v. diğ., 1994). Geleneksel yaklaşımların sınırlı olması yeni araştırma konularının gündeme gelmesini zorunlu kılmaktadır. Günümüze dek, sertleşmiş çimento hamuru yapısının normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışlarına etkisini incelemek amacıyla bazı malzeme bilimi yaklaşımları da denenmiştir, fakat, bu alandaki bilgi kısıtlıdır (Skalny, 1989; Oktar v. diğ., 1996 a, b). Bu çalışmada, su/çimento oranları 0.26 ile 0.42 arasında değişen betonların basınç ve yarma-çekme dayanımlarının tanımlanan “çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıkları” incelenmiş ve bu özelliklerin tahmininde kullanılacak formüllerin geliştirilmesine çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca, su/çimento oranının bu sınırlar içerisinde değiştirilmesi ile betonlarda gevrekliğin ne ölçüde değiştiğini görebilmek amacıyla, basınç dayanımları ile bağıl kırılma enerjileri (Taşdemir v. diğ., 1998) ve basınç dayanımı ile yarma dayanımının basınç dayanımına oranı arasındaki ilişkiler de incelenmiştir.

### Sertleşmiş beton özelliklerinin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığı

Çimento hamuru fazı içerisindeki boşlukların kılcal boşluklar mı yoksa hapsolmuş hava boşlukları mı olduğu betonun herhangi bir özeliği için önemli değilse, yani bu özeliğin aldığı değerleri sadece bu boşlukların miktarı belirliyorsa, bu beton özeliği çimento hamurunun boşluk yapısına duyarsız bir özelliktir. Bu ifadenin tersi sayılabilecek şekilde, çimento hamuru fazı içerisindeki boşlukların miktarından başka türü veya geometrisi herhangi bir beton özeliğine etki ediyorsa, bu beton özeliği için de çimento hamuru boşluk yapısına duyarlıdır diyebiliriz.

Sertleşmiş betonun yapısı ise basitleştirilmiş olarak Şekil 1’de gösterilmektedir. Sertleşmiş betonun yapısında, hidratasyon sonucunda çimento tanelerinin yüzeylerinden başlayarak jelleşme oluşur. Powers (1958)’in çalışmalarına göre hidratasyona uğrayan her  $1 \text{ cm}^3$  çimento tanesi  $2.06 \text{ cm}^3$  çimento jeli oluşturmaktadır. Oluşan bu jelleşmeden dolayı çimento taneleri arasındaki kılcal boşlukların hacimleri daralmaktadır.  $1 \text{ m}^3$  sertleşmiş betondaki çimentonun anhidr haldeki hacmine c dersek, hidratasyon derecesi  $\alpha$  olduğunda  $2.06\alpha c$  kadar çimento jeli oluşur. Bunun  $\alpha c$  kadarlık bir kısmı çimentonun anhidr haldeki sınırları içinde kalacağından kılcal boşluklardaki azalma,  $2.06\alpha c - \alpha c = 1.06\alpha c$  kadar olacaktır. Kılcal boşlukların hacmi ise,  $w - 1.06\alpha c$  olup, çimento hamurundaki toplam boşluk hacmi:



Şekil 1. Sertleşmiş beton yapısının şematik gösterimi

$$V = (w - 1.06\alpha c) + a \quad (1)$$

olur. Burada hapsolmuş hava boşluğu miktarının pratik olarak değişmediği kabul edilmektedir.

$P_{hi}$  herhangi bir sertleşmiş beton özeliği olsun.  $n_i$  bir parametre olmak üzere yeteri kadar çeşit ve sayıdaki bir beton gurubunda  $P_{hi}$ 'nin aldığı değerleri  $n_i \cdot (w - 1.06\alpha c) + a$  değişkenine göre ve  $n_i$ 'ye değişik değerler vererek incelediğimizde  $n_i = n_i^*$  için en büyük korelasyon katsayısı elde edilsin ( $n_i = n_i^* \rightarrow [R(n_i^*)]_{\text{maks}}$ ).

Korelasyon katsayısının maksimum olmasının,  $n_i^* \cdot (w - 1.06\alpha c) + a$  değişkeninin  $P_{hi}$  özeliği üzerinde çimento hamuru boşluk yapısının etkisini en iyi şekilde ifade etmesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Bu durumda eğer,  $n_i^* = 1$  ise  $P_{hi}$  özeliği çimento hamurunun boşluk yapısına duyarsız bir özeldir.  $n_i^* \neq 1$  ise,  $P_{hi}$  özeliği çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlı bir özeldir.  $n_i^*$  değerine gözönüne alınan  $P_{hi}$  özeliğinin “çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık katsayısı” denir.

### Özeliklerin çimento hamuru boşluk yapısına

#### 1. tip duyarlılık derecesi: (SD1)<sub>i</sub>

Yukarıda sertleşmiş betonun yapısı için tanımlanan duyarlılık katsayısına, yani, herhangi bir sertleşmiş  $P_{hi}$  beton özeliği ile değişkenler arasındaki ilişkileri değişken içinde  $n_i$  değerine değişik değerler koyarak incelediğimizde maksimum korelasyon katsayısını veren  $n_i^*$  değerine 1. tip duyarlılık derecesi denir. Bu duyarlılık derecesi bundan sonra metin içinde (SD1) ile gösterilmiştir.

### Özeliklerin çimento hamuru boşluk yapısına

#### 2. tip duyarlılık derecesi, (SD2)<sub>i</sub>

Herhangi bir  $P_{hi}$  beton özeliğine ait (SD2)<sub>i</sub>, 2. tip duyarlılık derecesi olup aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

$$(SD2)_i = \frac{R(n_i^*)}{R(n=1)} \quad (2)$$

Burada  $R(n_i^*)$ ,  $P_{hi}$  özeliğinin değişimi,  $n$  parametresine değişik değerler verilerek incelendiğinde elde edilen en büyük korelasyon katsayısı ve  $R(n=1)$ ,  $P_{hi}$  özeliği için yapılan aynı incelemede,  $n$  parametresine 1 değeri verildiğinde bulunan korelasyon katsayısıdır. Yani, duyarlılığı gözönüne almakla korelasyonların ne oranda güçlendiğini SD2 göstermektedir.

### Deneysel çalışma

Aynı agregaya ve aynı portland çimentosu (PÇ 42.5) kullanılarak 20 değişik karışım hazırlandı. Agregalarda maksimum tane boyutu 16 mm'de sabit tutuldu ve karışım oranları TS 706 (1980)'da belirtilen A16-B16, B16, B16-C16 ve C16 referans eğrilerine uygun olacak şekilde seçildi. Betonlarda su/çimento oranları 0.26 ile 0.42 arasında olmak üzere 0.04 artımlara karşılık gelecek şekilde 5 değişik oran belirlendi. Üretilen betonlarda yeterli işlenebilmeyi sağlayabilmek amacı ile su/çimento oranları 0.26 ile 0.34 arasında olan betonlarda polikarboksil etilen esaslı bir hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi ve su/çimento oranları 0.38 ve 0.42 olan ve diğer betonlara göre nisbeten daha yüksek su/çimento oranına sahip betonlarda ise naftalin ve melamin esaslı bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanıldı. Üretimlerde herhangi bir mineral katkı maddesi kullanılmadı. Sertleşmiş beton deneyleri 7., 14., 28. ve 365. günlerde yapıldı. Bu deney yaşlarında, betonlarda kullanılan su/çimento oranları ile üretilmiş çimento hamuru numuneleri üzerinde hidrasyon dereceleri ( $\alpha$ ) belirlendi (Lam v. diğ., 2000; Powers, 1964). Hidrasyon derecelerinin belirlenmesinde buharlaşmayan su miktarının saptanması yöntemi kullanıldı. Hidrasyon dereceleri ( $\alpha$ ) sertleşmiş çimento hamuru numunelerinde saptanan buharlaşmayan su miktarının ( $w_n$ ), çimento tanelerinin tamamen hidrate olabilmeleri için gerekli su miktarına oranlanmasıyla hesaplandı. Bilindiği üzere çimento tanelerinin tamamen hidrate olabilmesi için çimento ağırlığının 0.23'ü oranında suya gereksinim vardır (Neville, 1997). Hesaplar

kızdırma esasına dayanarak yapılmıştır. Böylece hidrasyon derecesi  $\alpha$ :

$$\alpha = 100 \left[ \frac{w_n / C}{0.23} \right] \quad (3)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır.

Deneysel her su/çimento oranı ve her deney yaşı için üçer numune üzerinde tekrarlanmıştır.

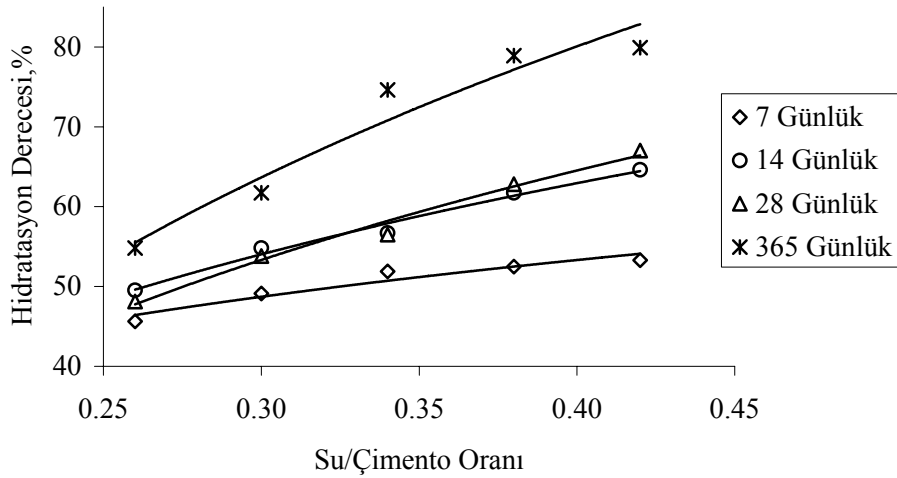
Deneysel sonuçlarında bulunan  $w_n/C$  oranları Tablo 1’de ve hidrasyon dereceleri Tablo 2’de verilmektedir. Su/çimento oranı ile hidrasyon dereceleri arasındaki ilişki grafik olarak Şekil 2’de gösterilmektedir.

Tablo 1. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde bulunan “buharlaşamayan su/çimento” oranları

Su/Çimento Oranı	“Buharlaşamayan su/çimento” oranları, $w_n/C$			
	7 gün	14 gün	28 gün	365 gün
0.26	0.1049	0.1139	0.1106	0.1260
0.30	0.1129	0.1260	0.1228	0.1419
0.34	0.1194	0.1304	0.1300	0.1716
0.38	0.1208	0.1419	0.1444	0.1815
0.42	0.1226	0.1486	0.1491	0.1840

Tablo 2. Hidrasyon dereceleri

Su/Çimento Oranı	Hidrasyon Derecesi, $\alpha$ , (%)			
	7 gün	14 gün	28 gün	365 gün
0.26	45.8	49.5	48.1	54.8
0.30	49.1	54.8	53.4	61.7
0.34	51.9	56.7	56.5	74.6
0.38	52.5	61.7	62.8	78.9
0.42	53.3	64.6	64.8	80.0



Şekil 2. Hidrasyon derecelerinin su/çimento oranına ve yaşa bağlı olarak değişimi

### Anhidr çimento tanelerinin jele dönüşmesi ile oluşan hacim artış oranlarının bulunması

Anhidr çimento taneleri jele dönüştüğünde hacimleri “p” katına çıkacak dersek, kılcal boşluklardaki azalma  $p\alpha c - \alpha c = (p-1)\alpha c$  ve çimento hamurundaki toplam boşluk hacmi,

$$V = [w - (p - 1)\alpha c] + a \quad (4)$$

kadar olacaktır. Burada  $\alpha$ , hidrasyon derecesi; c, w, a sırası ile  $1m^3$  taze betondaki çimento hacmi, su hacmi ve hava miktarıdır. Birim ağırlık ( $\Delta$ ) ile V toplam hacim arasındaki bağıntılar incelendiğinde “p” ye en uygun değer verildiğinde en yüksek korelasyon katsayısının elde edileceği düşünülmüştür. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde  $\Delta$ -V bağıntılarında “p”ye değişik değerler verilerek her defasında korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Maksimum korelasyon katsayılarını veren “p” değerleri Tablo 3’de görülmektedir. Bunların, ölçüm hatalarının sınırları içerisinde “p” lerin gerçek değerleri oldukları düşünülmektedir.

Tablo 3.  $\Delta$ -V bağıntılarında maksimum korelasyon katsayılarını veren “p” değerleri

Deney yaşı (gün)	p	$\Delta$ -V Bağıntısının Korelasyon Katsayısı
7	1.80	0.988
14	1.81	0.995
28	1.75	0.980
365	2.14	0.957

Tablo 3’te 7., 14. ve 28. günlere ait “p” değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları ve 365. güne ait 2.14 değerinin bunlardan belirgin olarak büyük ve Powers tarafından verilen 2.06 değerine yeteri kadar yakın olduğu görülmektedir. Yani Powers’ın ölçtüğü değere süre ilerledikçe varılmaktadır. Bu araştırmada incelenen su/çimento oranları oldukça düşük olan betonlarda, çimento hamuru fazı içindeki boşlukların çapları küçüktür. Muhtemelen bu boşluklara hapsolan su, jelin büyümesine karşı koyarak belirtilen gecikmeye neden olmaktadır.

### Basınç ve yarma-çekme dayanımlarının ifadesinde kullanılan değişkenlerin oluşturulması

Klasik basınç dayanımı formüllerinde (Bolomey formülü gibi) kullanılan bir değişken  $C/(w+a)$  oranıdır. Burada, C çimento dozajı olup, w ve a sırasıyla  $1m^3$  taze betondaki su ve hava miktarlarıdır. Görüldüğü gibi bütün büyüklükler betonun hidrasyonundan önceki hali ile ilgilidir.

Sunulan bu çalışmada sözkonusu değişken önce  $c/(w+a)$  haline getirilmiştir (burada c  $1m^3$  taze betondaki çimento hacmidir). Hidrasyon derecesi  $\alpha$  olduğunda c hacmi  $p\alpha c$  jel hacmine ve  $(1-\alpha)c$  henüz hidrate olmamış tanelerin hacmine dönüşecektir. w su hacmi ise  $w-(p-1)\alpha c$  kılcal boşluk hacmine dönüşecektir. Hava hacmi “a” ise, pratik olarak değişmeyecektir. Bu durumda yukarıdaki değişkenin:

$$\frac{p\alpha c + (1 - \alpha)c}{[w - (p - 1)\alpha c] + a} \quad (5)$$

şekline dönüştüğü düşünülebilir.

Diğer taraftan paydaki iki terimin dayanımları aynı derecede etkilemeyeceği gözönüne alınarak ikinci terimin (henüz hidrate olmamış çimento hacminin) önüne bir “Y” katsayısı konmuştur. Aynı düşünceyle paydadaki birinci terimin (kılcal boşluklar) önüne de  $n_i$  duyarlılık katsayısı getirilmiştir. Böylece değişken:

$$\frac{p\alpha c + Y(1 - \alpha)c}{n_i [w - (p - 1)\alpha c] + a} \quad (6)$$

şeklini almıştır. Bu değişken ile birim ağırlıklar ( $\Delta$ ) ifade edilmek istense,  $n_i=1$  almak gerekir. Çünkü birim ağırlık çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlı bir özellik değildir. Birim ağırlığı etkileyen boşlukların çeşidi ve şekli değil, toplam miktarıdır. Böylece  $\Delta$ ’yı ifade edebilmek amacı ile değişken:

$$\frac{p\alpha c + Y(1 - \alpha)c}{[w - (p - 1)\alpha c] + a} \quad (7)$$

şeklini alır. Bu değişkende “Y” ye değişik değerler verilmiş, her bir “Y” için  $\Delta$ 'yı en büyük korelasyon katsayısıyla ifade eden “p” değerleri her bir beton yaşı için saptanmıştır. Sonuçta Y=0.12 için her bir beton yaşında elde edilen “p” lerin ortalaması, (4) denkleminde ifade edilen V değişkeni kullanılarak elde edilen “p” lerin ortalaması olan (1.88) değerine eşit çıkmıştır. Bu durumda yukarıdaki değişkende Y=0.12 alınmasının uygun olduğu düşünülmüştür. Dayanımların duyarlılık katsayılarının hesaplanmasında esas alınan değişkenin son şeklinin aşağıdaki gibi olmasına karar verilmiştir:

$$\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i[w-(p-1)\alpha c] + a} \quad (8)$$

Formülleri basitleştirmek amacıyla Y=0 alındığında,

dayanımları ifade eden bağıntılarda korelasyon katsayılarının pratik olarak değişmediği görülmüştür.

### Dayanımlarla çimento hamuru boşluk yapısı arasındaki bağıntılar

Y için bu değer kabul edildikten sonra dayanımlar gözönüne alınmış ve  $[p\alpha c + Y(1-\alpha)c] / [n_i\{w-(p-1)\alpha c\} + a]$  değişkeninde dayanımlar için maksimum korelasyon katsayısını veren  $n_i^*$  duyarlılık katsayıları bulunmuştur. Bu katsayılar, bulunan bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları Tablo 4, 5, 6 ve 7’de görülmektedir. Tablolarda  $f_{cc}$ , 150x150x150 mm boyutlu küp basınç dayanımlarını,  $f_{cs}$ , çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan silindir numunelerin basınç dayanımlarını ve  $T_s$  ise aynı boyutlu silindirlerde ölçülen yarma-çekme dayanımlarını göstermektedir.

Tablo 4. 7 günlük betonlarda dayanımlara ait bağıntılar

Bağıntı	p	$n_i^*$	Korelasyon Katsayısı
$f_{cc} = 51.85 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 83.1$		1.73	0.978
$f_{cs} = 64.07 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 115.0$	1.80	5.92	0.966
$T_s = 0.075 \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{a} \right] + 3.24$		0	0.767

Tablo 5. 14 günlük betonlarda dayanımlara ait bağıntılar

Bağıntı	p	$n_i^*$	Korelasyon Katsayısı
$f_{cc} = 47.3 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 90.6$		2.37	0.934
$f_{cs} = 50.84 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 140.3$	1.81	7.26	0.923
$T_s = 2.12 \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2.73$		2.36	0.575

Tablo 6. 28 günlük betonlarda dayanımlara ait bağıntılar

Bağıntı	p	$n_i^*$	Korelasyon Katsayısı
$f_{cc} = 84.6 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 231.1$		10.7	0.943
$f_{cs} = 108.5 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 13.3$	1.75	$\infty$	0.928
$T_s = 2.76 \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 0.25$		$\infty$	0.849

Tablo 7. 365 günlük betonlarda dayanımlara ait bağıntılar

Bağıntı	p	$n_i^*$	Korelasyon Katsayısı
$f_{cc} = 92.2 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 145.9$		10.7	0.961
$f_{cs} = 113.8 \ln \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 267.7$	2.14	28.7	0.968
$T_s = 0.37 \left[ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 2.12$		$\infty$	0.673

Tablolar incelendiğinde bazı bağıntılarda  $n_i^* = \infty$  olduğu görülmektedir. Bu bağıntılarda  $n_i^*$ 'ye verilen değerler büyüdükçe, korelasyon katsayılarının devamlı olarak yükseldiği gözlenmiştir. Buradan, bu bağıntıların belirttiği özellikler üzerinde kılcal boşlukların etkisinin, hava boşlukların etkisinden çok daha önemli olduğu anlaşılmaktadır. Gerçekten bu bağıntılarda payda  $w - (p-1)\alpha c$  şeklinde yazıldığında, yani  $a$  terimi hiç gözönüne alınmadığında maksimum korelasyon katsayıları elde edilmektedir. Buna karşı 7 günlük yarma çekme dayanımı için  $n_i^* = 0$  bulunmuştur. Burada da tamamen zıt durum söz konusudur, yani, bu bağıntıların belirttiği özellikler üzerinde, hava boşlukların ( $a$ ) etkisinin, kılcal boşlukların etkisinden çok daha önemli olduğu anlaşılmaktadır.

### Dayanımların duyarlılık dereceleri

Tablo 4, 5, 6 ve 7'deki sonuçlardan yararlanarak daha önce tanımlanan  $(SD1)_i$  ve  $(SD2)_i$  duyarlılık dereceleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 8'de görülmektedir. Bu tabloda 28 günlük  $(SD2)_i$  lerin yanında parantez içinde yazılan değerler Oktar v. diğ. (1996a)'in çalışmasına aittir; incelenen betonlar orta ve düşük dayanımlı olup, su/çimento oranları bu çalışmadakilerden daha yüksektir.

Tablo 8'de görüldüğü gibi bu çalışmada elde edilen  $(SD2)_i$  ler sözkonusu çalışmada bulunan değerlerden belirgin derecede büyüktür. Böylece, yüksek dayanımlı betonların dayanımlarının tahmininde çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıklarını göz önüne almanın, normal dayanımlı betonlardakine göre



daha büyük yarar sağladığı anlaşılmaktadır. Gerçekten de Tabloda görüldüğü gibi, betonun standart dayanımı kabul edilen 28 günlük silindir basınç dayanımında, duyarlılığı gözönüne almakla korelasyon katsayısı 0.65'ten 0.93'e yükselmektedir.

Tablo 8. Dayanımların duyarlılık dereceleri

Dayanımlar	7 gün			
	R(n <sub>i</sub> <sup>*</sup> )	R(n=1)	(SD1) <sub>i</sub>	(SD2) <sub>i</sub>
f <sub>cc</sub>	0.978	0.963	1.73	1.016
f <sub>cs</sub>	0.966	0.873	5.92	1.106
T <sub>s</sub>	0.767	0.562	0	1.364
14 gün				
f <sub>cc</sub>	0.934	0.886	2.37	1.055
f <sub>cs</sub>	0.923	0.723	7.26	1.277
T <sub>s</sub>	0.575	0.547	2.36	1.051
28 gün				
f <sub>cc</sub>	0.943	0.785	10.72	1.201 (1.12)
f <sub>cs</sub>	0.928	0.652	∞	1.423 (1.08)
T <sub>s</sub>	0.849	0.650	∞	1.306 (1.06)
365 gün				
f <sub>cc</sub>	0.961	0.645	10.70	1.490
f <sub>cs</sub>	0.968	0.552	28.70	1.754
T <sub>s</sub>	0.673	0.254	∞	2.649

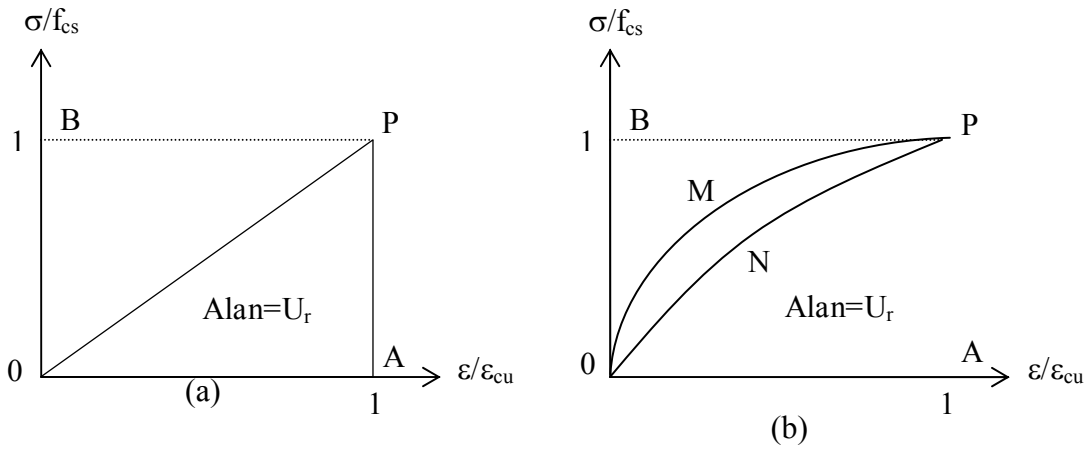
### Bağlı kırılma enerjileri

Yüksek mukavemetli betonların normal mukavemetli betonlara göre daha gevrek bir davranış gösterdiği bilinmektedir.

Bu çalışma kapsamında üretilen 4 değişik granülometri, 5 değişik su/çimento oranı ve 4 farklı deney yaşına sahip silindir deney numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneylerinin sonuçlarından faydalanarak, bu betonlara ait gevrek davranışın belirlenmesine çalışılmıştır. Bunun için deney numunelerine ait gerilme boyuna şekildeğiştirme eğrilerinin basınç dayanımına kadar olan kısmı altındaki alanlardan (kırılma şekil değiştirme enerjileri) faydalanılmıştır. (KE)<sub>maks</sub>, kırılma şekil değiştirme enerjisi, f<sub>cs</sub>, betonun basınç dayanımı, ε<sub>cu</sub>, betonun kırılma anındaki birim boy kısalması olmak üzere, σ/ f<sub>cs</sub> ile ε /ε<sub>cu</sub> arasındaki ilişkiyi gösteren grafiğin altında kalan alanı bağıl kırılma enerjisini (U<sub>r</sub>) verir:

$$U_r = \frac{1}{f_{cs} \epsilon_{cu}} \int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (9)$$

U<sub>r</sub>' leri hesaplamakla, gevrekliği sayısal olarak tanımlayabilen değerler bulunabilir. Eğer malzeme lineer elastik ise, Şekil 3a'da gösterilen grafiğin altındaki alan 0.5 olacaktır. Grafik altındaki alanın 1'e eşit olması durumunda ise malzeme tamamen plastiktir. Dolayısıyla malzemelerde bağıl kırılma enerjileri, 0.5 ile 1.0 arasında değişen değerler almaktadır (0.5<U<sub>r</sub><1.0). Şekil 3b'ye bakıldığında, eğer eğri OMP yolu yerine ONP yolunu takip ederse, betonun davranışının daha gevrek olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Bağlı kırılma enerjileri  
(a) Lineer-elastik gevrek malzeme (b) İnelastik malzeme

Şekil 4’de basınç dayanımının artması ile birlikte, bağıl kırılma enerjilerinin de belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu ilişkiden faydalanarak bağıl kırılma enerjisi ( $U_r$ ) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

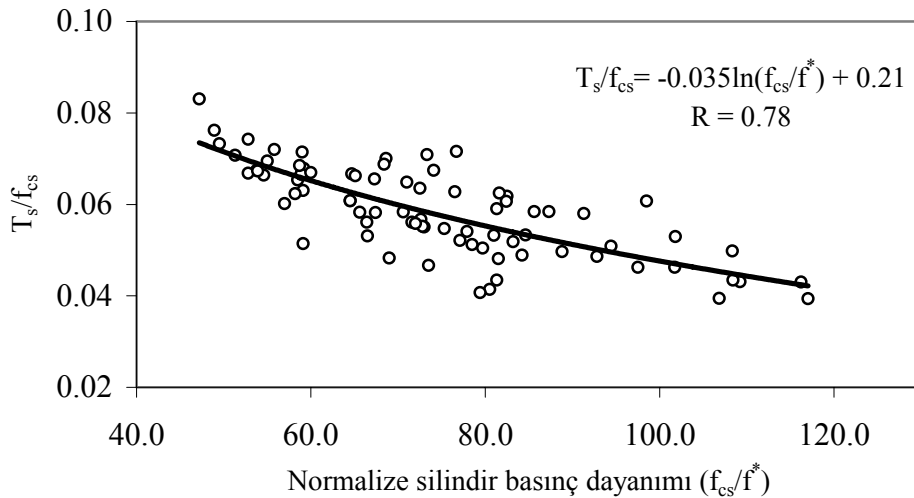
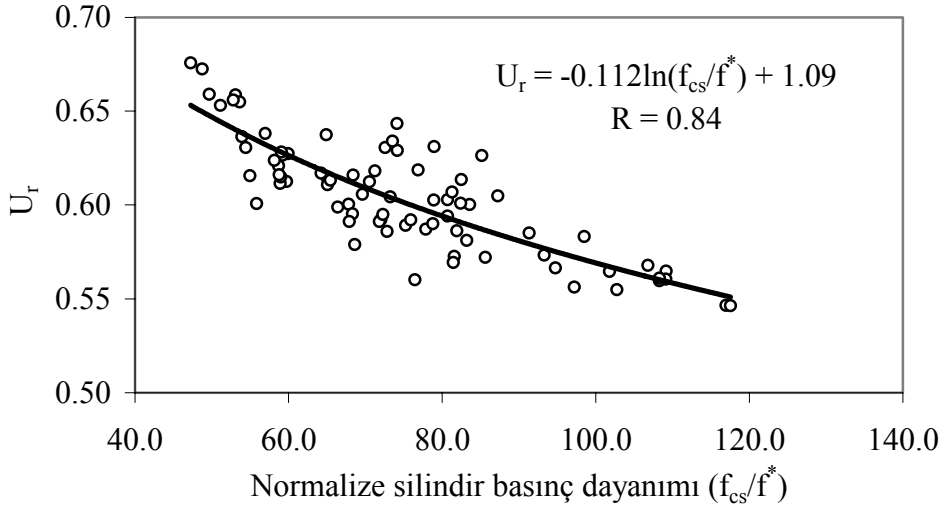
$$U_r = -0.112 \ln(f_{cs}/f^*) + 1.09 \quad (10)$$

Burada  $f^* = 1 \text{ N/mm}^2$  dir. Bu bağıntının korelasyon katsayısı 0.84 olup yüksek bir değerdir. Ayrıca bağıntı, basınç dayanımları 46 MPa ile 118 MPa arasında oldukça geniş bir bölgede geçerlidir.

Şekil 5’te görüldüğü gibi, silindir basınç dayanımı ile silindir yarma dayanımının, silindir basınç dayanıma oranı ( $T_s/f_{cs}$ ) arasındaki ilişkiye ait korelasyon da güvenilir bir seviyededir. Bu ilişkide en yüksek korelasyon katsayısını veren fonksiyon belirlenmiş ve bağıntı aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$(T_s/f_{cs}) = -0.035 \ln(f_{cs}/f^*) + 0.21 \quad (11)$$

Bu bağıntıya ait korelasyon katsayısı 0.78 dir. Basınç dayanımının artması ile birlikte ( $T_s/f_{cs}$ ) oranının belirgin bir şekilde düştüğü Şekil 5’te görülmektedir. Bu da, betonda dayanımın artması ile birlikte gevrekliğin arttığının belirgin bir göstergesidir.



## Sonuçlar

Çalışmanın sınırları içerisinde başlıca şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Basınç ve yarma dayanımları  $\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i(w-(p-1)\alpha c) + a}$  değişkeni ile başarılı bir

şekilde ifade edilebilmektedir. Burada, p: anhidr çimento tanelerinin jele dönüştüğünde hacimlerinde meydana gelen hacim artış oranını,  $\alpha$ : hidratasyon derecesini,  $n_i$ : sertleşmiş beton özeliğinin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık katsayısını ve c, w, a ise sırası ile  $1m^3$  taze betondaki çimento, su ve havanın mutlak hacimlerini ifade etmektedir.

2. Yüksek dayanımlı betonların dayanımlarının tahmininde çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıklarını gözönüne almanın, normal dayanımlı betonlardakine göre daha büyük yarar sağladığı görülmüştür. Betonun standart dayanımı kabul edilen 28 günlük silindir basınç dayanımları dikkate alındığında, duyarlılığı göz önüne almakla korelasyon katsayısının 0.65'den 0.93'e yükseldiği görülmüştür.

3. Yüksek dayanımlı betonlarda anhidr çimentonun jelleşmesi ile meydana gelen hacim artışı gecikerek oluşmaktadır. Su/çimento oranları düşük olan bu betonlarda, çimento hamuru fazındaki kılcal boşlukların çapları küçüktür. Muhtemelen bu boşluklara hapsolan su, jelin genişlemesine karşı koyarak belirtilen gecikmeye sebep olmaktadır.

4. Betonlarda kullanılan su/çimento oranları ile üretilmiş çimento hamuru numuneleri üzerinde yapılan hidratasyon derecesi ölçümlerinde, yaşın ilerlemesi ve aynı yaşa sahip numunelerde su/çimento oranının artması ile birlikte hidratasyon derecelerinin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. 7 günlük numunelerde su/çimento oranının artması ile birlikte hidratasyon dereceleri 0.46 ile 0.53 arasında değişirken, 1 yıllık numunelerde bu değer 0.55 ile 0.80 arasında değişmektedir.

5. Hem basınç durumundaki bağıl kırılma enerjileri hem de ( $T_s/f_{cs}$ ) oranları gevrekliğin bir göstergesi olarak basınç dayanımının artması ile birlikte belirgin bir şekilde azalmaktadır.

## Semboller

$\alpha$  : Hidratasyon derecesi, %

p : Hacim artış oranı

$n_i$  : Duyarlılık katsayısı

$f_{cc}$  : Küp basınç dayanımı, (MPa)

$f_{cs}$  : Silindir basınç dayanımı, (MPa)

$T_s$  : Silindir yarma dayanımı, (MPa)

$U_r$  : Bağıl kırılma enerjisi

## Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan çimento Nuh Çimento San. A.Ş. tarafından karşılanmış, hidratasyon derecelerinin ölçülmesi ile ilgili ilk çalışmalar ise Akçansa A.Ş. Çimento Laboratuvarlarının katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. Çimento hamuru boşluk yapısının belirlenmesi için TÜBİTAK MAM'da yapılan deneyler Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından desteklenmiştir. İlk yazar, doktora süresinde kendisine verilen burs dolayısıyla Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'ne teşekkürü bir borç bilir.

## Kaynaklar

- CEB-FIB Model Code, (1990). *Bullation D'Information*, 23, July 1991, CEB, Laussane, Switzerland.
- Garbozci, E. J., (1990). Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review, *Cement and Concrete Research*, **20**, 591-601.
- Jennings, H. M., (1988a). Design of high strength cement based materials: Part 2 Microstructure, *Material Science and Technology*, **4**, 285-290.
- Jennings, H. M., (1988b). Design of high strength cement based materials: Part 3 State of art, *Material Science and Technology*, **4**, 291-299.
- Lam, L., Wong, Y. L. ve Poon, C. S., (2000). Degree of hydration and gel/space ratio of high volume fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Research*, **30**, 747-756.
- Malhotra, V. M., eds (1992). *Advances in concrete technology*, CANMET, Ottawa.
- Neville, A. M., (1997). *Properties of concrete*, 4th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.

- Odler, I. ve Rössler, M., (1985). Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes: II. Effects of pore structure and degree of hydration, *Cement and Concrete Research*, **15**, 401-410.
- Oktar, O. N., (1977). Bağlayıcı hamur yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışındaki işlevi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.
- Oktar, O. N., Moral, H. ve Taşdemir, M. A., (1996a). Sensitivity of concrete properties to the pore structure of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, **26**, 11, 1619-1627.
- Oktar, O. N., Moral, H. ve Taşdemir, M. A., (1996b). Factors determining the correlations between concrete properties, *Cement and Concrete Research*, **26**, 11, 1629-1637.
- Powers, T. C., (1958). The physical structure and engineering properties of concrete, *Port. Cem. Assoc. Res. Dept. Bul.*, Chicago.
- Powers, T. C., eds. (1964). The physical structure in portland cement paste, *The Chemistry of Cements*, Academic Press, London and New York, **1**.
- Rössler, M. ve Odler, I., (1985). Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes: I. Effects of porosity, *Cement and Concrete Research*, **15**, 320-330.
- Skalny, J. P., eds (1989), Materials science of concrete I, American Ceramic Society.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Lydon, F. D., ve Barr, B. I. G., (1995a). Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete, *Cement and Concrete Research*, **26**, 1, 63-68.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Mills, N., Barr, B.I.G. ve Lydon, F. D., (1999). Combined effects of silica fume and aggregate type and size on post-peak response of concrete in bending, *ACI Materials Journal*, **96**, 1-10.
- Taşdemir, M. A., Grimm, R., Taşdemir, C., ve König, G., (1995b). Microstructural effects on the brittleness of high strength concrete, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, **1**, 125-134, Wittmann, F. H. (Ed.), Aedificatio Publishers, Freiburg.
- Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A. D. ve Lydon, F. D., (1998). Evaluation of strains at peak stresses in concrete: a three-phase composite model approach, *Cement and Concrete Research*, **20**, 301-318.
- TS 706, (1980). Beton agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Winslow, D. N., Cohen, M. D., Bentz, D. P., Sydner, G. A., ve Garbozci, E. J., (1994). Percolation and pore structure in mortars and concrete, *Cement and Concrete Research*, **24**, 25-37.