

# SİLİS DUMANI İÇEREN YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN BASINÇ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Canan Taşdemir<sup>1</sup> Saim Akyüz<sup>2</sup> M. Ali Taşdemir<sup>3</sup> Cengiz Koca<sup>4</sup>  
<sup>1</sup> İ.T.Ü., İnşaat Fakültesi 80626 Maslak, İstanbul <sup>2</sup> Koca Hazır Beton, Kocaeli.

## ÖZET

Bu çalışmada agrega boyutunun ve son yıllarda hazır betonda uygulama alanı bulmaya başlayan silis dumanının betonun basınç altındaki mekanik davranışına etkisi araştırıldı. Betonda silis dumanı kullanımının agrega-harç temas yüzeyinin mikroyapısal özelliklerini değiştirdiği, bu arayüz bölgesinin daha yoğun ve daha homojen hale geldiği, bunun sonucu olarak malzemenin daha gevrek davranış sergilediği görüldü. Silis dumanı içeren betonlarda incelenen aralıkta agrega boyutunun betonun gerilme şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasının yakınında yutulan deformasyon enerjisine bir etkisinin olmadığı sonucuna varıldı.

## 1. GİRİŞ

Yüksek mukavemetli betonlar taze halde iken fazla çökme ve yayılmaya sahip olmalarına karşın ayrışma eğilimi göstermezler. Çünkü, silis dumanı (SD) taze betonun kohezyonunu artırır ve fazla miktarda küçük tanelere sahip bu betonlarda terleme nadiren gözlenir. Bazı batı ülkelerinde 120 N/mm<sup>2</sup> lik küp basınç mukavemetine sahip yüksek mukavemetli betonlar hazır beton santrallerince sağlanabilmekte ve pompa ile yerine iletelebilmektedir (1).

Betonun özellikleri sadece bileşenlerinin özelliklerine bağlı olmayıp temas yüzeyinden de etkilenir. Agreg-a-bağlayıcı faz temas yüzeyi betonda en zayıf halka olarak bilinir. Normal bir betonun kırılması bu zayıf bölgeye oldukça duyarlıdır. Agreg-a-matris temas yüzeylerinde bağ çatlaklarının oluşması betonun inelastik davranışında önemli rol oynar. Toplam şekil değiştirmenin büyük bir bölümü bu ara yüzlerde oluşur ve en son göçme bağ çatlaklarının köprülenmesi sonucu harçta oluşur (2-6).

Yakın zamanda, agreg-a-harç temas yüzeyi araştırmalarında gittikçe artan bir ilerleme olmuştur. Bu araştırmalar agreg-a-harç temas yüzeyinin mikroyapısına veya bu bölgenin mekanik davranışına ya da betonda en zayıf halka olan arayüz bölgesinin güçlendirilmesine yöneliktir. Normal betonlarda agreg-a-matris ara yüzeyinin mikroyapısı ve kırılması üzerine yapılan son araştırmalar önemli bilgi birikiminin oluşmasını sağlamıştir. Bununla birlikte, daha çok araştırma ve kantitatif ölçümler silis dumanı içeren ve içermeyen yüksek mukavemetli betonlar için gereklidir. Günümüzde gittikçe yaygın uygulama alanı bulmakta olan yüksek mukavemetli betonların davranışının daha iyi anlaşılması için bu yöndeki araştırmalara daha çok gereksinme olduğu açıktır. Özellikle model agreg-a-harç temas yüzeyi ve mekanik davranışı doğrultusundaki araştırmalar yanında gerçek betonda agreg-a-harç ara yüzeyinin mikroyapısının incelenmesi ve bunun mekanik davranışına yansımalarının araştırılması daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır.

## **2. DENEYSSEL ÇALIřMALAR**

### **2.1. KULLANILAN MALZEMELER**

#### **2.1.1. Çimento ve Silis Dumanı**

Deneylerde kullanılan çimento Akçimento Fabrikası üretimi olup, aynı bir gündeki üretimden alınarak laboratuvarımıza getirilen PÇ 325 cinsindeki çimentodur. Bu çimentonun 28 günlük standard harçlarının basınç ve eğilme-çekme mukavemetleri sırasıyla 37,0 N/mm<sup>2</sup> ve 8,3 N/mm<sup>2</sup> dir.

Silis dumanı ise Koca Hazır Beton-Elkem Chemicals üretimi olup toz halindeydi. Betonda kullanılmadan önce bulamaç haline getirildi.

## 2.1.2. Agregalar

Bütün betonlarda aynı podima kumu, iri agrega olarak da Cebeciköy yöresinden getirilen kalker kökenli kırmataş kullanıldı. Agregalara ait granülometrik bileşimler Tablo 1'de verilmektedir. Kumun özgül ağırlığı  $2620 \text{ kg/m}^3$ , kırmataşların ki ise  $2720 \text{ kg/m}^3$  tür.

Tablo 1. Agregaların granülometrik bileşimleri  
Elekten Geçen (%)

	31.5mm	16mm	8mm	4mm	2mm	1mm	0.5mm	0.25mm
Kum	100	100	100	97	89	85	79	5
Kırmataş I	100	100	59	8	0	0	0	0
Kırmataş II	100	68	1	0	0	0	0	0

## 2.2. Beton Üretimi

Aynı su/çimento oranında, aynı Portland çimentosu ile, aynı kökenli fakat farklı iki boyutta (4-16 mm veya 16-32 mm) kalker kırmataş agregası için silis dumanı içeren ve içermeyen dört karışımdan oluşan yüksek mukavemetli betonlar üretildi. Çimento ağırlığına oranla silis dumanı içeriği %10 idi. Bu betonların tümünde su/çimento oranı 0.45 olarak sabit tutuldu ve sodyum naftalin sülfonat esaslı bir süper akışkanlaştırıcı hem silis dumanı içeren hem de içermeyen betonlarda işlenebilmeyi sabit tutabilmek için farklı oranlarda kullanıldı. Bütün betonlar yaklaşık aynı çökme değerine (45 mm-95 mm) sahipti. Üretilen betonların kodları NB16, SB16, NB32, SB32 dir. NB ve SB sırasıyla normal ve silis dumanı içeren betonları göstermektedir. NB ve SB yi izleyen sayılar ise üretilen betonların en büyük agrega boyutunu göstermektedir. Tablo 2'de betonların bileşimi ile taze beton özellikleri görülmektedir.

Tablo 2. Silis dumanı içeren ve içermeyen betonların bileşimleri ve taze beton özellikleri.

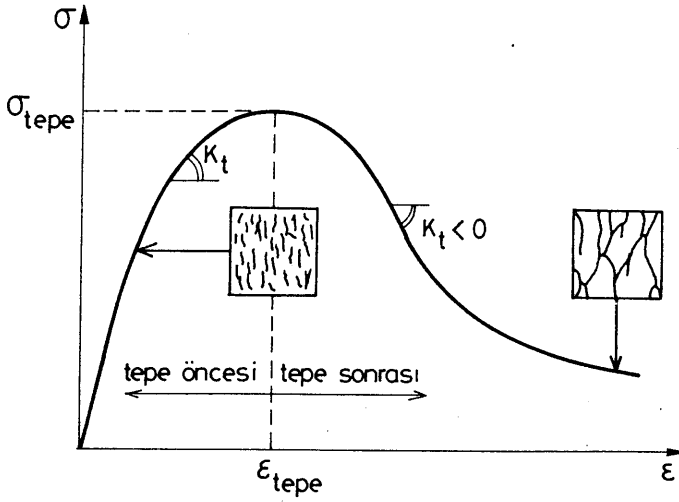
Karışım Kodu	NB16	SB16	NB32	SB32
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	398	356	395	356
Silis Dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	-	36	-	36
Kum (kg/m <sup>3</sup> )	710	698	704	698
İri Agrega (kg/m <sup>3</sup> )	1106	1086	1096	1087
Super Akışkanlaştırıcı (lt/m <sup>3</sup> )	3.9	5.3	1.7	3.4
Su (lt/m <sup>3</sup> )	179	176	178	176
E / (C+SD)	0.45	0.45	0.45	0.45
SD / C	-	0.10	-	0.10
Hava İçeriği (%)	1.4	2.7	2.4	2.8
Çökme (mm)	45	55	95	75
Taze Beton Birim Ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	2398	2356	2375	2356

Numuneler üretimi izleyen 24 saat kalıbında tutulduktan sonra 28 gün süreyle kirece doygun suda bekletildiler ve sertleşmiş beton deneylerinin yapıldığı 90. güne kadar naylon örtü altında laboratuvar ortamında tutuldular.

### 3. SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ

#### 3.1. BASINÇ ALTINDA BETONUN GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME EĞRİSİ

Betonun tek eksenli basınç altında gerilme şekil-değişirme eğrisi Şekil 1'de şematik olarak görülmektedir. Tepe noktasına kadar numunenin pozitif teğetsel rijitliği ( $K_t$ ) giderek azalmaktadır. Tepe noktası geçilince



Şekil 1. Betonun tek eksenli basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi (7).

deformasyonun sürekli artmasının sonucu olarak betonun mekanik direnci azalır. Böylece gerilme-şekil değiştirme eğrisinin inen kolu negatif teğelsel rijitliğe ( $K_t$ ) sahip olur. Bazen ( $K_t$ ), gevrekliğin bir ölçüsü olarak kullanılır (7). Şeklin incelenmesinden görüldüğü üzere beton, heterojenliğine bağlı olarak, içsel gerilme ve deformasyonların üniform olmayan dağılımları oluşur. Giderek artan deformasyonlar etkisindeki agrega-harç arasındaki bağ çatlaklarında artış olur ve mikroçatlamalar oluşur. Basınç mukavemetinin yaklaşık %70 - %90'ında bağ çatlakları arasında köprüler kurulur ve matriste yayılmaya başlar, böylece bileşik çatlaklar oluşur. Basınç mukavemetinin yaklaşık %90'ından sonra bu bileşik çatlakların kararsız yayılışı gözlenir ve tepe noktasına varılır. Tepe noktası öncesi nonlinearlikte ve tepe noktası sonrasında, şekil değiştirme yerelleşmesiyle birlikte makro çatlaklar oluşur.

Tepe noktası aşıldıca deformasyonlarda yerleşme olur ve inen bir kol elde edilir. Gerek eğilme halinde (8,9) gerekse basınç halinde (7) betonun inen koluna bileşimin ve deney koşullarının etkisi araştırılmıştır. Bu yönde giderek artan araştırmalar yapılmaktadır.

### **3.2. SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ**

Paragraf 2.2’de üretimleri açıklanan ve özellikleri Tablo.2’de verilen, silis dumanı içeren ve içermeyen betonların her bir karışımından  $\phi 150 \times 300$ mm. boyutundaki silindir numuneler üzerinde basınç mukavemeti ve  $100 \times 100 \times 500$ mm. boyutundaki prizmatik numunelerde eğilme mukavemeti deneyleri ve eğilme deneylerinden kalan parçalardan kesilerek hazırlanan  $100 \times 100 \times 200$ mm. boyutundaki numuneler üzerinde de yarma mukavemeti deneyleri yapıldı. Ayrıca silindir basınç deneylerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin lineer bölgesinde statik elastisite modülü değerleri hesaplandı ve deneyler sırasında yanıl deformasyonlar da okunarak Poisson oranı değerleri bulundu. Yarma deneyi öncesi hazırlanan numuneler üzerinde rezonans frekansı yardımıyla dinamik elastisite modülü değerleri de bulundu. Sertleşmiş beton deney sonuçları Tablo.3’de görülmektedir.

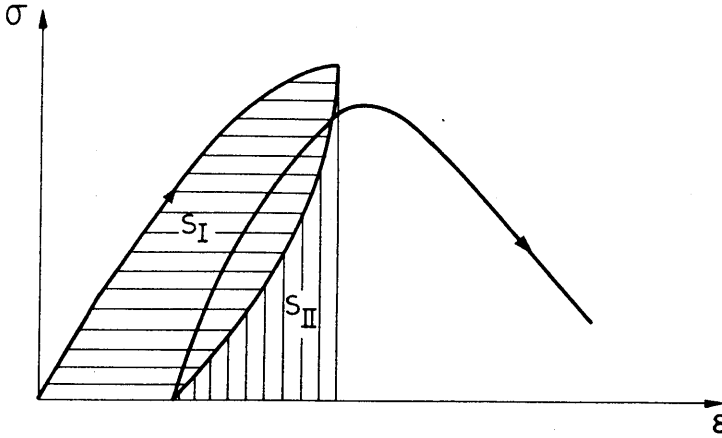
Tablo 3. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Karışım Kodu		NB16	SB16	NB32	SB32
Silindir Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		59.3	67.9	46.7	65.1
Elastisite Modülü (kN/mm <sup>2</sup> )	Statik	39.6	40.7	37.6	42.2
	Dinamik	44.8	46.0	46.0	47.6
Poisson oranı		0.24	0.25	0.24	0.25
Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		6.40	6.93	5.70	6.40
Yarma-çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		3.61	3.49	3.60	3.59

### 3.3. GEVREKLİK İNDİSİ (G.İ.)

Betonların gevreklik indisi, silindir numunelerin basınç altında gerilme şekil değiştirme eğrilerinden elde edildi. Betonun gevreklik indisi, basınç mukavemetinin %80-%100 arasında, "Tersinir deformasyon enerjisinin ( $S_{II}$ ) tersinmez deformasyon enerjisine ( $S_I$ ) oranı" olarak tanımlandı. Gevreklik İndisi (G.İ.) aşağıdaki gibi ifade edilebilir (10).

$$G. I. = \frac{S_{II}}{S_I}$$



Şekil 2. Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi ve gevreklik indisi (10).

Şekil 2'den görüldüğü üzere  $S_{II} / S_I$  oranı sifıra yaklaştıkça enerjinin tümü tersinmez,  $S_{II} / S_I$  oranı sonsuza yaklaşırsa enerjinin tümü tersinir olur.

Tablo 4'de basınç mukavemetinin çeşitli yüzdelerinde elde edilen gevreklik indisleri ile bu betonların basınç mukavemetleri birlikte gösterilmektedir.

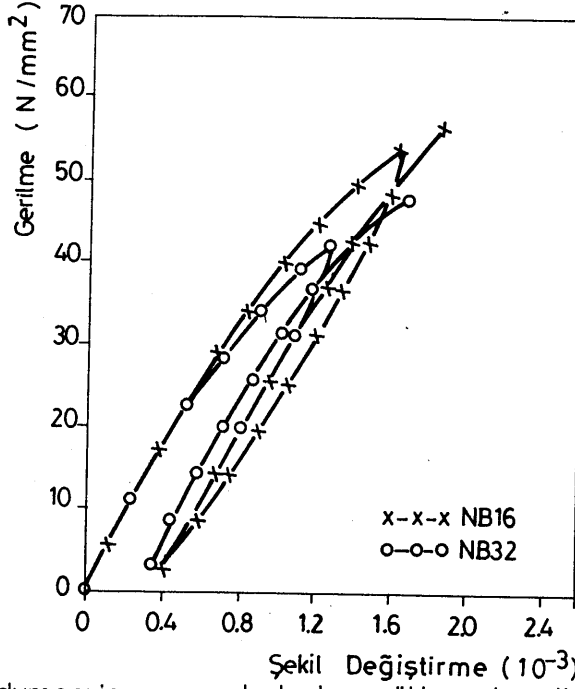
Tablo 4. Gevreklik İndisi Değerleri

Karışım Kodu	$\sigma / f_c$	$S_{II} / S_I$	Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
NB16	0.85	1.54	61.1
	0.86	1.71	62.2
	0.98	1.01	57.7
SB16	0.77	4.66	68.8
	0.88	3.19	68.3
	1.00	3.00	63.3
NB32	0.87	1.63	47.7
	0.94	1.64	47.2
	0.98	1.37	48.3
SB32	0.79	5.06	66.6
	0.85	5.06	65.0
	0.99	2.69	62.7

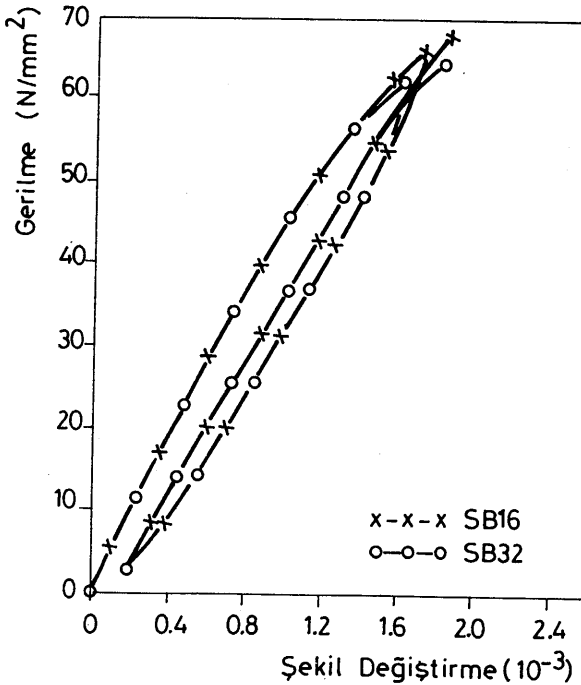
Şekil 3'de maksimum agrega boyutları 16 mm. ve 32 mm. olan ve silis dumani içermeyen betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisinin yükselen kısmında elde edilen yükleme-boşaltma eğrileri görülmektedir. Her iki boyut için basınç mukavemetinin %86'sında çevrim uygulandı.

Şekil 4'de ise yine en büyük agrega boyutları 16 mm. ve 32 mm. olan silis dumani içeren betonlara ait çevrimler basınç mukavemetinin %99 u civarında elde edildi.





Şekil 3. Silis dumanı içermeyen betonların yükleme-boşaltma eğrileri.



Şekil 4. Silis dumanı içeren betonların yükleme-boşaltma eğrileri.

### **3.4. TEMAS YÜZEYİNİN MİKROYAPISI**

Yarma deneylerinden sonra agrega-harç temas yüzeyinin mikroyapısı hem stereo mikroskop hem de SEM (Scanning Electron Microscope) ile incelendi. Silis dumanı içeren betonlarda çatlaklar genelde agregaların içinden geçerek ilerledi ve kırılma gevrek oldu. Silis dumanı içermeyen betonlarda ise çatlaklar genellikle iri agregalar civarında gelişti ve iri agregalar arası bir kırılma gözlemlendi.

Elektron mikroskop (SEM) ile inceleme sonucu silis dumanı içermeyen betonların agrega-harç temas yüzeyinde büyük hegzagonal biçimli  $\text{Ca(OH)}_2$  kristallerinin bulunduğu, yapının daha heterojen olduğu görüldü. Buna karşılık silis dumanı içeren betonlarda ise boşlukların içinde dahi  $\text{Ca(OH)}_2$  kristallerine rastlanmadığı yapının daha homojen ve yoğun olduğu görüldü (11).

## **4. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tablo 3'den görüldüğü üzere silis dumanının betonun elastisite modülünün artışına az bir katkısı olmuştur. Buna karşılık silis dumanının basınç mukavemetinin artışına belirgin bir etkisi vardır. Özellikle en büyük agrega boyutu 32 mm. olan betonlarda silis dumanının mukavemet artışına %40'a varan katkısı görülmektedir. En büyük agrega boyutu 16 mm. olan betonlarda ise silis dumanının etkisiyle oluşan artış sadece %14'dür. Öte yandan silis dumanı içermeyen betonlarda en büyük agrega boyutu 16 mm. olanların basınç mukavemeti en büyük agrega boyutu 32 mm. olanlara göre %27 daha fazla olduğu halde silis dumanı içeren betonlarda tane boyutunun değişiminden dolayı belirgin bir fark görülmemektedir. Böylece silis dumanı içeren betonlarda agrega-harç temas yüzeyi güçlendirildiğinden çatlaklar agreganın içinden geçerek ilerlediği için agrega boyutunun önemi kalmamakta ve malzeme daha homojen ve daha gevrek bir davranış sergilemektedir.

Şekil 3'de silis dumanı içermeyen betonlardaki gevreklik indisi için tipik bir çevrim görülmektedir. Bu şekilde iki değişik agrega boyutuna sahip betonlarda, agrega boyutunun önemli olduğu, küçük boyutlu olanların biraz daha gevrek davranış gösterdiği Tablo 4'ün incelenmesinden de görülmektedir.

Şekil 4'ün incelenmesinden görüldüğü üzere silis dumanı içeren betonlarda gevreklik bakımından da agrega boyutunun incelenen aralıkta önemli olmadığı sonucuna varılabilir. Bu şekilde her iki boyut için yüklenme boşaltma çevrimlerinin tamamen çakışık olması incelenen boyutlar için ileri sürülen iddiayı kanıtlamaktadır. Eğilme halinde silis dumanı içeren betonların kırılma enerjilerinde de agrega boyutunun önemli olmadığı gösterilmiştir (8,9).

Agrega-harç arayüzeyinin mikroyapısının incelenmesinden, yüklemè boşaltma çevrimi uygulanmış mekanik deneylerden ve hesaplanan gevreklik indisi deney sonuçlarının karşılaştırılmasından görüldüğü üzere silis dumanının temas yüzeyini önemli ölçüde değiştirdiği kantitatif bulgularla ortaya konmaktadır.

Tablo 4'ün incelenmesinden görüldüğü üzere silis dumanı gevrekliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Silis dumanı içeren betonlarda temas yüzeyi daha yoğun olmakta, beton içinde üniform gerilme yayılışlarının elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunun sonucu olarak betonun heterojen yapısı homojen yapıya doğru değişmekte ve malzeme bir homojen cisim gibi davranış göstermektedir. Agreg-a-harç temas yüzeyinde başlayan çatlaklar agreganın içinden geçerek betonu göçmeye götürmekte ve daha gevrek bir davranışa neden olmaktadır.

## 5. SONUÇLAR

Agrega-harç temas yüzeyinin mikroyapısının incelenmesinden, kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan gözlemlerden ve mekanik deneylerden elde edilen bulgulara dayanarak şu sonuçlar çıkarılabilir:

1°) Silis dumanı içermeyen betonlarda agrega-harç temas yüzeyi daha

heterojen yapıda olup, büyük boyutta  $\text{Ca(OH)}_2$  kristalleri içermektedir. Buna karşılık silis dumanı içeren betonlarda agrega-harç temas yüzeyini silis dumanı değiştirmekte, arayüzey daha homojen, daha yoğun olmakta ve belirgin ölçüde güçlenmektedir.

2°) Silis dumanı içeren betonlarda gevreklik indisi belirgin biçimde artmakta bunun sonucu olarak beton daha gevrek bir davranış sergilemektedir.

3°) Silis dumanı içermeyen betonlarda agrega boyutunun küçülmesiyle incelemenin yapıldığı basınç mukavemetine kadar kırılma enerjisi artmakta, buna karşılık silis dumanı içeren betonlarda agrega boyutunun değiştirilmesinin kırılma enerjisine etkisi olmamaktadır.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK-INTAG 616 projesi çerçevesinde yapılan bazı deney sonuçlarına dayanmaktadır. Bu projenin mikroyapısal incelemeler bölümünde ülkemizi "NATO-D Tipi Davetli Bilim Adamı Programı" çerçevesinde ziyaret eden Prof.Dr. Shondeep L. Sarkar'ın önerilerinden yararlanılmıştır. Yazarlar, TÜBİTAK-INTAG'na, Profesör Sarkar'a, davetin gerçekleşmesini sağlayan TÜBİTAK BAYG'na ve ziyarete ek maddi destek sağlayan Türkiye Hazır Beton Birliğine teşekkür ederler.

## 7. KAYNAKLAR

1. Held, M., König, G. and Simsch, G., "Ductility of Large High-Strength Concrete Columns in High-Rise Buildings", in Utilization of High Strength Concrete, I. Holand and E. Sellevold (eds.), Lillehammer, Vol.1, 1993, pp.200-208.
2. Mindess, S. and Shah, S.P. (Eds.), Bonding in Cementitious Composites, Pro. Sym, Materials Research Society, Pittisburgh, 1988.

3. Maso, J.M. (Ed.), *Interfaces in Cementitious Composites*, Pro. Int. Conf., Toulouse, E. and F.N. Spon, London, 1992.
4. Shah, S.P. and Taşdemir, M.A., "Role of Fracture Mechanics in Concrete Technology", *Advances in Concrete Technology*, V.M. Malhotra (ed.), CANMET, Ottawa, Second Edition, 1994, pp.161-202.
5. Mindes, S., "Interfaces in Concrete", *Materials Science of Concrete I.*, Skalny, J.P. (Ed.), The American Ceramic Society, Westerville, 1989, pp.163-180.
6. Taşdemir, M.A., Maji, A.K. and Shah, S.P., "Crack Propagation in Concrete Under Compression", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.38, No.2/3, 1991, pp.129-145.
7. Vonk, R.A., "A Micromechanical Investigation of Softening of Concrete Loaded in Compression", *Heron*, Delft, Vol.38, No.3, 1993., 94 pp.
8. Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Lydon, F.D. and Barr, B.I.G., "Influence of Microsilica on the Strain Softening Response of Concrete", in *Localized Damage III*, Udine, M.H.Aliabadi et al.(eds.), 1994, pp.149-156.
9. Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Lydon, F.D. and Barr, B.I.G. "Effect of Silica Fume on the Brittleness of High Strength Concretes", Submitted for Publication, 1994.
10. Wu, K. and Zhou, J., "The Influence of the Matrix-Aggregate Bond on the Strength and Brittleness of Concrete", *Bonding in Cementitious Composites*, S.Mindess and S.P. Shah (eds.), Materials Research Society, Pittsburgh, 1988, pp.29-34.
11. Shondeep, S.L., "The Importance of Microstructure in Evaluating Concrete", İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Special Seminar, 23.3.1994.

