

Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı

Mehmet Ali TAŞDEMİR*, Fikret BAYRAMOV

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

Özet

Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı yalın betonlarda yutulan bağıl enerji düşük olduğundan bu malzemelere kısa kesilmiş çelik teller eklenerek sünek davranış elde edilmektedir. Böylece, son yıllarda basınç dayanımları 200 MPa'ı aşan yeni çimento esaslı sünek kompozitler geliştirildi. Bu malzemeler düşük geçirimsizlik, geliştirilmiş dürabilite, sınırlı rötre ve korozyon dayanımının artırılması gibi diğer yüksek performans özelliklerini de sağlar. Sunulan çalışma yüksek dayanımlı betonlar (YDB) ile homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemleri (DSP), büyük kusurlarından arındırılmış (MDF) çimentoyu, geleneksel çelik tel donatılı betonları (ÇTDB), karma lif donatılı betonları, reaktif pudra betonları (RPC) gibi ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitleri, yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON), kendiliğinden yerleşen betonu, sentetik lif donatılı betonları, erken yaşlardaki rötresi düşük yüksek dayanımlı yarı hafif betonu ve yangına dayanıklı polipropilen lif donatılı yüksek dayanımlı betonu gözden geçirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çelik lif, kendiliğinden yerleşen beton, polipropilen lif, reaktif pudra betonu, sifcon, yüksek dayanımlı beton.

Mechanical behavior of high performance cement-based composites

Abstract

Since the relative absorbed energy during the fracture of concrete is low in both high strength and ultra high strength plain concretes, short cut steel fibers are added in these materials to obtain ductile behavior. In recent years, however, new cement-based materials have been developed which have compressive strengths over 200 MPa. These materials provide other high performance properties; such as low permeability, improved durability, limited shrinkage and increased corrosion resistance. This work reviews high strength concretes (HSCs) and some new cement based materials such as the Densified Systems containing homogeneously arranged ultra-fine Particles (DSP), Macro-Defect-Free (MDF) cement, conventional Steel Fiber Reinforced Concretes (SFRCs), concretes with hybrid fibers, ultra high strength cement-based composites such as Reactive Powder Concretes (RPCs), Slurry Infiltrated Fibered Concrete (SIFCON), Self Compacting Concrete (SCC), Synthetic Fiber Reinforced Concretes (SFRCs), Semi-Lightweight Concretes (SLWCs) with low shrinkage at early ages, and high strength polypropylene fiber reinforced concrete against fire.

Keywords: High strength concrete, polypropylene fiber, reactive powder concrete, self-compacting concrete, sifcon, steel fiber.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Mehmet Ali TAŞDEMİR. tasdemir@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 71.

Makale metni 17.05.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 25.09.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 28.02.2002 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Beton yarı gevrek bir malzeme olduğundan çekme dayanımı düşüktür ve betonarme yapıların projelendirilmesinde gözönüne alınmaz. Günümüze dek betonun basınç altındaki davranışı üzerine çok sayıda araştırma yapıldı. Ancak betonun kırılma davranışının daha iyi anlaşılması ve çekme ile ilgili özelliklerin ve kırılma parametrelerinin belirlenmesi için daha fazla bilgiye gereksinim vardır (Taşdemir v. diğ., 1996a).

Tek eksenli basınç altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinde en büyük gerilmedeki şekil değiştirmenin hassas olarak ölçülmesi önemlidir (De Nicola v. diğ., 1994). Eğilme halinde, farklı yaşlardaki betonların eğilme dayanımı ile eğilme-çekme şekil değiştirmesi arasında kuvvetli korelasyonlar bulundu (Welch, 1966; Oladapo, 1964). Basınç dayanımı 80 N/mm^2 'ye erişen betonların eğilmede çekme şekil değiştirme kapasitesi Giovambattista v. diğ., (1992) tarafından hızlı ve yavaş yükleme koşullarında incelendi. Bu araştırmacılar beton dayanımındaki artma ile eğilmedeki şekil değiştirme kapasitesinin arttığını gösterdiler. Brooks v. diğ. (1987) de aynı dayanım ve işlenebilirlik özelliğine sahip betonların ısıtılmış şekil değiştirme kapasitesinin kullanılan agreganın tipine bağlı olacağını gösterdiler ve "şekil değiştirme kapasitesi" ile "dayanım/elastisite modülü" arasında iyi bir korelasyonun olduğunu kanıtladılar. Taşdemir v. diğ., (1996a) ise tek eksenli çekme durumunda betonun davranışını ve betonun kırılmasında çekme özelliklerinin başlıca işlevini gösteren bir çalışma yaptılar. Söz konusu çalışmada çentiksiz beton numunelerinin geniş bir aralığında, tek eksenli çekme halinde kısa süreli çekme şekil değiştirme kapasitesinin "çekme dayanımı/elastisite modülü" oranının verilmesiyle tahmin edilebileceği gösterildi. Aynı çalışmada önerilen bağıntının yayınlanmış deney sonuçları ile iyi bir uyum sağladığı belirtildi ve bağıntının kullanılan deney tekniği, agrega granülometrisi, kökeni ve en büyük agrega boyutu, ölçü boyu, betonun yaşı ve yükleme hızı gibi değişkenlerden bağımsız olduğuna işaret edildi (Taşdemir v. diğ., 1996a).

Çok geniş bir dayanım aralığına sahip betonlar için tek eksenli çekme, eğilme, burulma ve tek eksenli basınç gibi farklı yükleme koşullarında

betondaki en büyük gerilmelere karşı gelen şekil değiştirmelerin analizi için yeterli deney verisi literatürde mevcuttur.

Beton, agrega, bağlayıcı faz ve boşluklardan oluşan yüksek derecede heterojen bir malzemedir. Bu heterojenlik birkaç düzeyde gözönüne alınabilir. Malzeme modellenmesi amacıyla yönelik olarak, Wittmann (1983), bir malzemenin mikro, mezo, ve makro düzey gibi üç farklı düzeyde incelenebileceğini önerdi. Makro düzeyde gerçekçi bir göçme modeli kurmak için, kırılma mekanizmasını mezo düzeyde incelemek gereklidir. Beton mezo düzeyde incelenirken kompozit içindeki uniform olmayan şekil değiştirmeler bu heterojen yapı için tipiktir ve agrega ile matris arasındaki ara yüzeyin işlevi önemlidir. Yakın zamandaki araştırmalar (Shah ve Taşdemir, 1994; Skalny, 1989; Bentur, 1991), betondaki arayüzeylerin başlıca iki yönünü ortaya koydu. Bunlar; i) arayüzey bölgesinin mikro yapısı ve beton özelliklerine olan etkileri, ve ii) sürekli ortamlar mekaniği ile kırılma mekaniğine dayanan ve beton özelliklerine arayüzeylerin etkilerini gösteren modellerdir. Agregaya ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halka olduğundan betonun mekanik davranışı arayüzey bölgesinin özelliklerinden belirgin biçimde etkilenir ve söz konusu davranış bu geçiş bölgesinin özelliklerine çok duyarlıdır (Shah ve Taşdemir, 1994; Skalny, 1989; Bentur, 1991; Taşdemir v. diğ., 1996b). Arayüzey göçmesi mezo düzeyde gözönüne alınabilir. Agregamatrix arayüzeylerindeki bağ çatlaklarının gelişmesi betonun inelastik davranışında önemli bir işleve sahiptir. Toplam şekil değiştirmenin önemli bir bölümü arayüzeylerde yoğunlaşır ve arayüzey çatlaklarının köprülenmesiyle göçme matriste tamamlanır (Sarkar, 1994; Swamy, 1971; Hsu v. diğ., 1963).

Son yıllarda, beton teknolojisinde inanılması güç gelişmeler kaydedildi. Sadece 30 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa idi (Alexander, 1993). Böyle bir beton, küp basınç dayanımları 200-800 MPa arasında, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m^2 olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, şu anda gerçekten

oldukça düşük dayanımlı malzeme olarak kabul edilebilir (Walraven, 1999). Beton teknolojisinde söz konusu yüksek dayanımlı bu malzemeler Reaktif Pudra Betonları (RPC) olarak adlandırılırlar ve dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliğe sahiptirler. Süneklikleri normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazladır (Bonneau v. diğ., 1997; Richard ve Cheyrezy, 1995; Dugat v. diğ., 1996). Düşük porozite değerleri bu betonlara önemli dürabilite ve düşük geçirimsizlik özellikleri kazandırır. Bunlar, çeşitli iklim koşullarının etkisindeki bazı yapılar için potansiyel olarak uygun bir malzeme niteliği sağlar (Feylessoufi v. diğ., 1996; Matte ve Moranville, 1999).

Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halkadır. Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımı, yoğunluğun artırılması dolayısıyla boşlukların azaltılması taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir. Böylece dürabilite iyileştirilir ve dayanım yükseltilir. Silis dumanı veya diğer bir deyişle mikrosilika, silis ve ferrosilika endüstrilerinin bir yan ürünüdür; 1950'lerden beri betonun özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu tanelerin etkili olabilmesi için, beton içinde iyi bir dağılıma gereklidir ve bunu da bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlamak olasıdır (Taşdemir v. diğ., 1998; Taşdemir v. diğ., 1999). Bununla birlikte, reaktif pudra betonlarının iç yapısına yönelik olarak maksimum yoğunluğu sağlamak için karışımdaki tüm tanelerin boyut dağılımı hassas biçimde optimize edilmektedir. Bunun için, RPC'nin granülometri eğrisi sürekli olmalıdır. Ayrıca, çok yüksek dayanımlara erişmek için karışımdaki su miktarını azaltmak gerekmekte, sünekliği attırmak için ise kısa kesilmiş çelik teller eklenmekte ve sıcaklık yükseltilerek basınç altında sertleştirme süreci uygulanmaktadır.

Sunulan bu çalışmanın amacı, stratejik yapılar ve benzeri uygulamalarda olası kullanımlar için bazı yeni çimento esaslı kompozit malzemelerin performanslarını sergilemektir.

Bu çalışmada, önce düşük dayanımlıdan yüksek dayanımlı/yüksek performanslılara kadar geniş bir aralıkta betonun tek eksenli çekme, tek

eksenli basınç, eğilme ve burulma hallerinde şekil değiştirme kapasiteleri incelenmektedir. Daha sonra YDB, DSP, MDF çimento, SIFCON, polipropilen lif donatılı beton, kendiliğinden yerleşen beton, yarı hafif beton ve yangına dayanıklı yüksek dayanımlı beton gibi yeni çimento esaslı kompozitlerin davranışı üzerine genel bir değerlendirme yapılmaktadır.

Yüksek dayanımlı - yüksek performanslı betonlar (YDB-YPB)

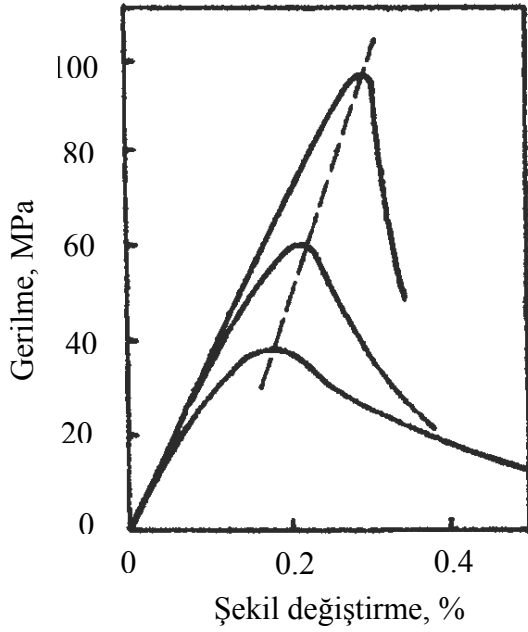
Yüksek Performanslı beton (YPB) dürabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Bununla birlikte değişik tanımlar da yapılmaktadır. ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programına (SHRP, 1991) göre Yüksek Performanslı Beton, dayanımı, dürabilitesi ve su/bağlayıcı oranı bakımından aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- i) çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı ≥ 17.5 MPa; çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa; çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa,
- ii) dürabilite çarpanı $\geq \%80$ (donma-çözülmenin 300 tekrarından sonra),
- iii) su/bağlayıcı oranı ≤ 0.35 .

Şekil 1'de görüldüğü gibi tepe noktasına kadar yüksek dayanıma sahip betonun eğriliği hemen hemen lineerdir.

Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Şekil 1 elastisite modülündeki bağıl artışın basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğunu da göstermektedir. Yüksek dayanımlı betonlar için, en yüksek gerilmeye kadar yutulan bağıl enerji daha düşük dayanımlı betonlarınkinden düşüktür. Bu durum aşağıda açıklanmaktadır (Taşdemir v. diğ., 1998).

Basınç altında enerji yutma kapasitesi, gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanın tepe noktasına kadar kısmının hesaplanmasıyla belirlenir. Bu eğrinin yükselen kısmında hem gerilme hem de şekil değiştirme normalize edilir. Bunun için Şekil 2'deki küçük şekilde görüldüğü



Şekil 1. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Jansen v. diğ., 1995).

gibi ordinattaki gerilme değerleri basınç dayanımı (f_c') ile, apsisteki şekil değiştirme değerleri ise tepe noktasına karşı gelen şekil değiştirme (ϵ_u) ile bölünür. Böylece normalize edilmiş eğriye dayanarak, yutulan bağıl enerji (U_r) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

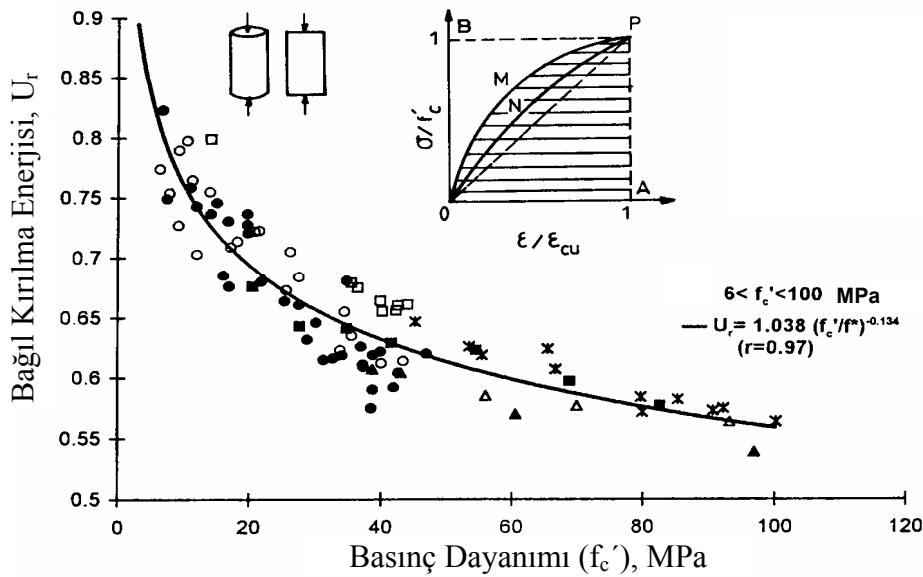
$$U_r = \frac{\int_0^{\epsilon_u} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{f_c' \cdot \epsilon_u} \quad (1)$$

Bu şeklin incelenmesinden görüldüğü gibi, OP doğrusu OAPB karesinin köşegenidir. Eğer eğri OP'yi izlerse malzeme lineer elastik ve gevrek, OBP yolunu izlerse mükemmel plastik olacaktır. Böylece, yutulan bağıl enerji, U_r , 0.5 ve 1 arasında olur. Eğer eğri OMP yerine ONP'yi izlerse, bu betonun daha gevrek davranışa sahip olduğunu gösterir. Şekil 2'de, basınç dayanımı arttıkça tepe noktasına kadar yutulan bağıl enerji belirgin biçimde azalmaktadır. Böylece, tepe noktasına kadar yutulan bağıl enerji (U_r) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$U_r = 1.038(f_c' / f^*)^{-0.134} \quad (2)$$

burada $f^* = 1$ MPa'dır. Denklem (2) ile gösterilen bağıntıda, korelasyon katsayısı çok yüksektir (0.97) ve denklem basınç dayanımlarının 6 MPa'dan 100 MPa'a kadar olan bir aralığı için geçerlidir. Yutulan bağıl enerjinin değerlendirilmesi için literatürden alınan ve tek eksenli basınç yüklemesi altındaki sonuçları içeren 85 farklı beton deney verisi kullanılmıştır. Bütün deney sonuçları silindirler veya prizmalar üzerinde kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney koşullarına dayanmaktadır (Taşdemir v. diğ., 1998).

Farklı yükleme koşullarında, dayanım arttıkça tepe noktasındaki şekil değiştirme artmaktadır (Smeplass, 1992). Betonun çekme şekil değiştirme kapasitesi için bir örnek burada verilmektedir. Bu, çatlak kontrolü ve çatlama riskinin belirlenmesi için gereklidir (Taşdemir v. diğ., 1996a).



Şekil 2. Bağıl kırılma enerjisi-basınç dayanımı ilişkisi (Taşdemir v. diğ., 1998).

Çekme-şekil değiştirme kapasitesi, bir malzemenin çatlamaksızın deformasyon yapabilme yeteneği olarak tanımlanmış olup servis yükleri altında çatlama riskini azaltmak için esas teşkil eder. Çekme şekil değiştirme kapasitesi verilerini değerlendirmek için, betonların çok geniş bir aralığında daraltılmış veya daraltılmamış kesitli çentiksiz numuneler kullanan Taşdemir v. diğ., (1998) literatürde verilen deney sonuçlarının 90 adedine dayanan verilerin değerlendirilmesini Şekil 3'teki gibi göstermişlerdir. Diğer gerilme hallerine ait şekil değiştirme kapasiteleri Tablo 1'de verilmektedir.

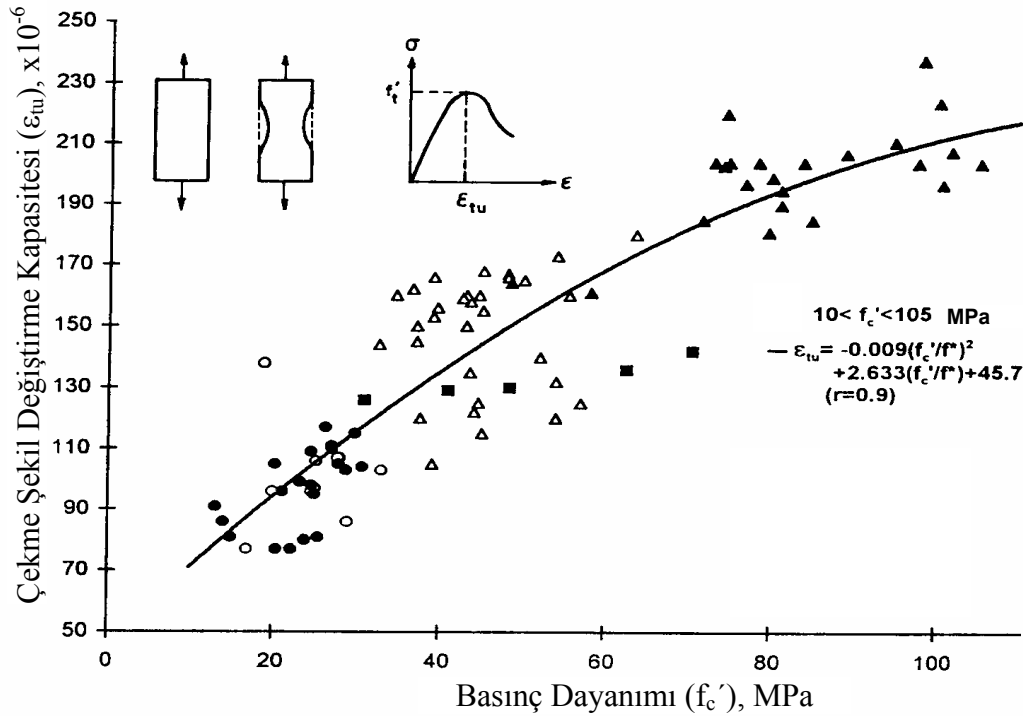
Silis dumanı içeren betonlar üzerine ilk deneyler 1950'li yılların başlarında Norveç Teknoloji Enstitüsü'nde yapılmıştır. Bir ilk uygulama olarak, silis dumanının betonda kullanımı 1971'de yine Norveç'te gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, betonda silis dumanının pratik kullanımında ve araştırmalarda giderek artış görülmüştür. Silis dumanı içeren bir çimento hamurunda Şekil 4'te görüldüğü gibi sıkı bir diziliş elde edilir. 1980 li yıllardan itibaren betonda süperakışkanlaştırıcıların ve silis dumanı gibi ultra incelikteki mineral katkıların birlikte kullanılması dayanımlarda çok yüksek artışlar sağlamıştır (Şekil 5).

Son 15 yıl boyunca, yüksek dayanımlı beton üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar, şartnamelerin kapsamının genişlemesine ve basınç dayanım sınıfları C100'ü aşan betonarme yapıların tasarımına neden olmuştur (Walraven, 1999).

Silis dumanı (SD) içeren betonların özelliklerini gözönüne alarak SD'nın iki şekilde kullanıldığını akılda tutmak gerekir:

- Dürabilitenin yükseltilmesi ve hidrasyon hızının azaltılması gibi nedenlerde çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak, çimento ile yerdeğıştiren bir malzeme olarak kullanılması,
- Hem taze ve hem de sertleşmiş halde beton özelliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır (FIP, 1988).

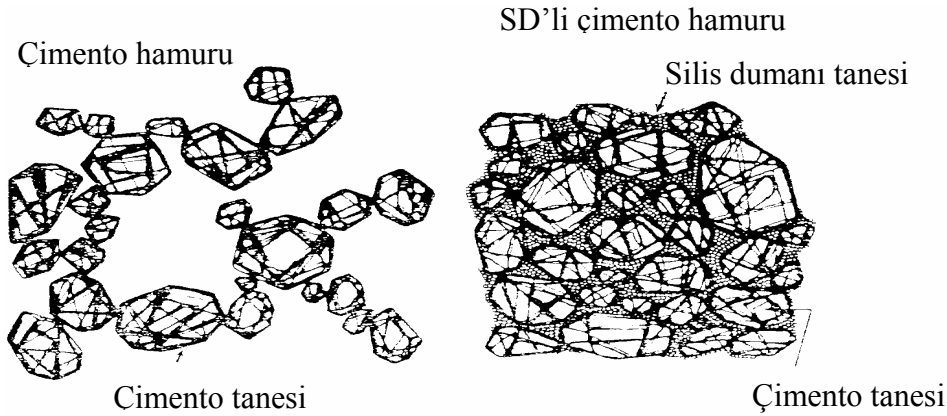
Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşeni olup işlenebilmeyi artırır, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı artırır, sonuçta da betonun dayanımı ve dürabilitesi artar. Ancak, SD'nın betonda kullanılması



Şekil 3. Çekme şekil değıştirme kapasitesi-basınç dayanımı ilişkisi (Taşdemir v. diğ., 1998).

Tablo 1. Tek eksenli basınç, tek eksenli çekme, eğilme ve burulma hallerinde basınç dayanımına yüksek gerilmedeki şekil değiştirme ilişkisi

Yükleme durumu	Şekil değiştirme kapasitesi (10^{-6}) - basınç dayanımı (MPa) ilişkisi	Basınç dayanımı aralığı (MPa)	Korelasyon katsayısı
Tek eksenli basınç	$\varepsilon_{cu} = -0,009(f'_c / f^*)^2 + 2,633(f'_c / f^*) + 45,7$	6-110	0,75
Tek eksenli çekme	$\varepsilon_{tu} = -0,067(f'_c / f^*)^2 + 29,9(f'_c / f^*) + 1053$	10-105	0,90
Eğilme	$\varepsilon_{fu} = -0,0007(f'_c / f^*)^2 + 1,825(f'_c / f^*) + 67,7$	5-85	0,84
Burulma	$f_{su} = -0,0005(f'_c / f^*)^2 + 1,05(f'_c / f^*) + 245,6$	37-110	0,97



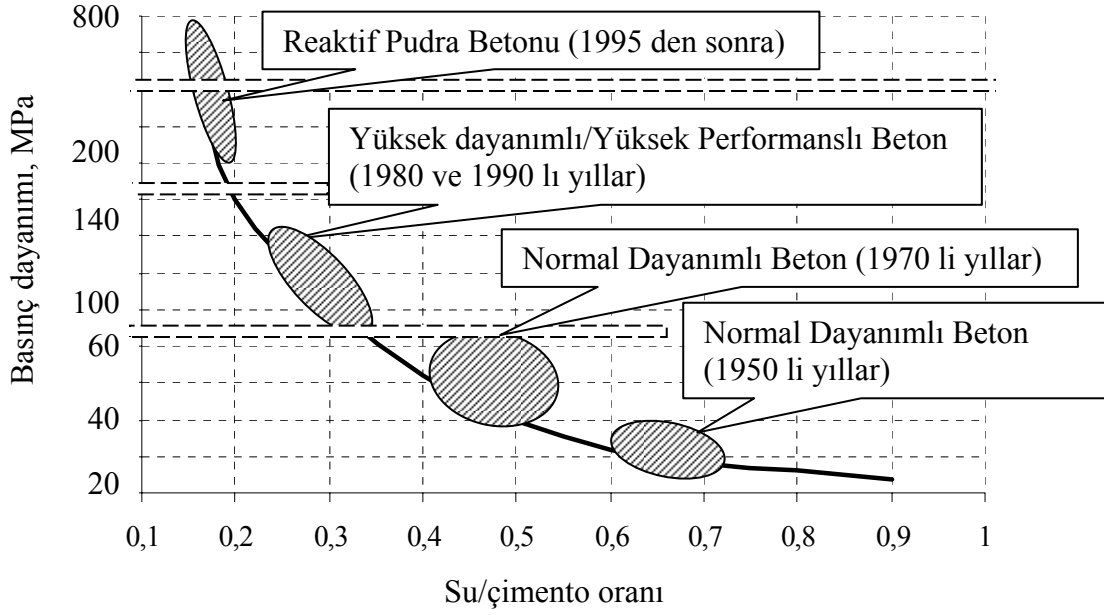
Şekil 4. Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi (Hijorth, 1983).

sındaki problem fiyatıdır; fiyatı, çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır ve her yerde bulunması güçtür. Diğer taraftan, bazı stratejik yapılarda kullanılacak yüksek performanslı beton ve harçların uzun süreli performanslarında oluşan gelişme de hesaba katılmalıdır (Massaza, 2000; Goldman ve Bentur, 1992).

Yakın zamandaki gelişmelere dayanarak mineral katkıların boşlukları doldurma etkisinin puzolanik etki kadar önemli olduğu veya bazı araştırmacılara göre boşlukları doldurma etkisinin puzolanik etkiden daha önemli olduğu sonucuna varılabilir (Goldman ve Bentur, 1994; Taşdemir, 1996b). Bazı stratejik yapılarda olası kullanım için yeni çimento esaslı daha sünek malzemelere de gereksinim vardır.

Yeni çimento esaslı kompozitler

Yaklaşık yirmi yıl önce, homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP) ve büyük boşluklarından arındırılmış (MDF) çimento gibi yeni malzemeler geliştirildi. İlki (DSP) sıkıştırılmış taneli yapıya sahip matris içeren beton olup çimento, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve kalsine olmuş boksit veya granit gibi ultra sert agregalar kullanılarak üretilir. İkincisi (MDF çimento) ise 150 MPa'lık veya daha yüksek çekme dayanımına sahip alüminli çimentolarla üretilmiş olan bir polimer hamurudur (Bache, 1981). Yüksek dayanımlı betonlarda olduğu gibi bu malzemelerin sünekliği düşük olduğundan, sünekliklerini arttırmak



Şekil 5. Betonun evrimi kapsamında basınç dayanımı-su/çimento ilişkisi

için çelik teller kullanılmaktadır. SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) gibi ürünler ise çelik tellerle kalıbın doldurulması ve bir akıcı harç bulamacının enjeksiyonu ile üretilirler.

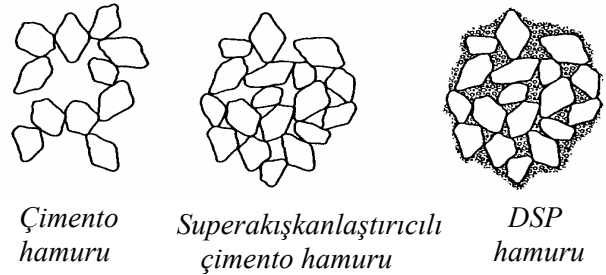
Reaktif pudra betonları Fransa'da yaklaşık yedi yıl önce geliştirildi. Bu ultra yüksek dayanımlı sünek betonların basınç dayanımları 200 MPa'dan 800 MPa'ya kadar değişmekte ve kırılma enerjileri 40000 J/m^2 'ye varmaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1995).

Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP)

Çimentolu malzemelerin bu yeni sınıfı Danimarka'daki Aalborg Portland çimento fabrikası tarafından üretilmiştir (Bache, 1981; Karhaloo, 1995). DSP bağlayıcılar Şekil 6'da gösterildiği gibi çimento taneleri arasında kalan boşluklarda homojen olarak dağıtılan ultra incelikteki silis dumanını içerirler. Mümkün olan en yoğun dizilişi elde etmek için, karıştırma ve döküm sırasında çimento ve silis dumanının topaklanmasını önlemek için süperakışkanlaştırıcılar kullanılır. Bu DSP esaslı kompozitler Densit adı altında söz konusu firma tarafından uygulayıcılara sunulmaktadır.

16 mm'lik kırılmış granit agregasına sahip normal DSP'nin basınç dayanımı yaklaşık 130 Mpa'dır. Eğer kalsine olmuş boksit gibi dayanımı

yüksek agregalar kullanılırsa basınç dayanımı 270 MPa'ya kadar ulaşabilir. DSP esaslı malzemeler ise çok gevrek olup normal Portland çimentosu hamurundan da gevreklerdir (Bache, 1981; Karhaloo, 1995).



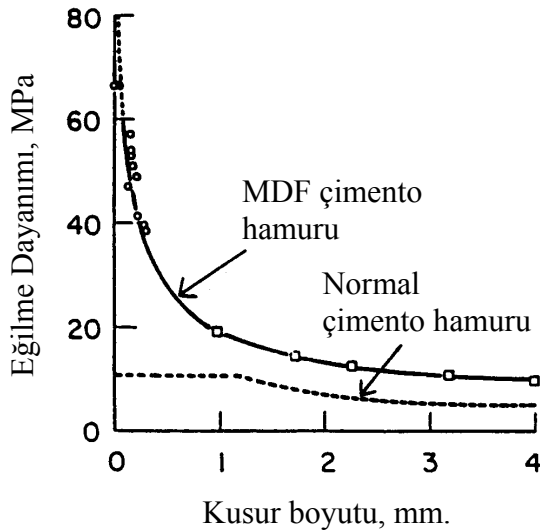
Şekil 6. Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP) (Bache, 1981).

Büyük kusurlarından arındırılmış (MDF) çimento

MDF çimentolu malzemeler Portland veya Yüksek Alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Polimer, çimento tanelerinin topaklanmasını önler, düşük su/katı oranındaki karışımın viskozitesi artar.

Yıllar önce Birchall v. diğ., (1981) Griffith yaklaşımını kullanarak "büyük kusurlardan arınmış (MDF)" çimentolarını geliştirdiler. Bu araştır-

macılara göre, normal çimentolarda, yaklaşık 1mm'lik kusur boyutuna kadar Griffith eğrisiyle iyi bir uyum sağlandı. Bu kusur boyutunun altında dayanımlar aynı kaldı. Daha sonra, büyük boşlukları yoketmek için özel bir proses tekniğini kullanarak çimentolar hazırlandılar. Bu çimentolarda çok yüksek eğilme dayanımlarına erişildi ve gözlenen en büyük boşlukların çapı yaklaşık 90 µm oluncaya dek Griffith eğrisi uygulandı. Sonuçlar Şekil 7'de gösterilmektedir (Alexander, 1993; Birchall v. diğ., 1981).



Şekil 7. MDF ve normal çimento hamurunun eğilme dayanımı (Alexander, 1993; Birchall v. diğ., 1981).

Yüksek performanslı lifli betonlar

Yüksek performanslı lifli betonlar da en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme sertleşmesi sergilemektedir. (Naaman ve Reinhardt, 1995). Bunlara tipik örnek olarak reaktif pudra betonu (RPC) verilebilir.

RPC ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliğe ve aşırı derecede düşük geçirimsizliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir (Walraven, 1999; Matte ve Moranville, 1999). Bu malzemeler, ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirildi. Reaktif Pudra Betonları küp basınç dayanımları 200 ve 800 MPa arasın-

da, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m² ve birim ağırlıkları 2500-3000 kg/m³ aralığında değişen yeni kuşak betonları temsil etmektedir (Richard ve Cheyrezy, 1994). Reaktif Pudra Betonunun iç yapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikroyapısı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerin varlığıyla güçlendirilmektedir.

Bu dikkate değer özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir:

- Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki bütün tanelerin dağılımının hassas biçimde ayarlanması,
- Betonun homojenliği için agrega tanelerinin en büyük boyutunun azaltılması,
- Betondaki su miktarının azaltılması,
- Yüksek inceliğe sahip silis dumanının puzolanik özelliklerinin yoğun biçimde kullanımı,
- Bütün bileşenlerin optimum bileşimi,
- Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
- Çok yüksek dayanımlara erişmek için basınç altında ve yükseltilmiş sıcaklık koşullarında sertleştirme (Walraven, 1999; Richard ve Cheyrezy, 1994).

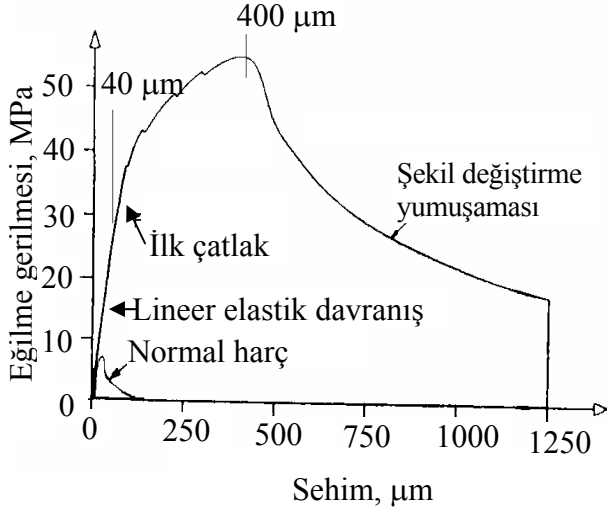
Reaktif pudra betonlarında kullanılan agregaların boyutları çimentonunkilere yakındır. Bu, hidrate olmamış çimento tanelerinin de tane iskeletine uygun olması ve malzemenin dayanımına katkıda bulunması demektir. Bu betonlarda su/çimento oranı çok düşük olup 0.15 mertebindedir. İşlenebilme fazla miktarda kullanılan bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlanmaktadır. İstenilen dayanımlara erişmek için, hem bileşen malzemelerin özellikleri hem de bunları mikserde karıştırma sırasının önemli olduğunu akılda tutmak gerekir. Normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonlarına ait bir karşılaştırma Tablo 2'de yapılmaktadır.

Bu tabloda görüldüğü gibi çelik tellerin eklenmesiyle eğilme dayanımlarında 50-140 MPa arasında değişen değerler elde edilmektedir. Bu betonların kırılma enerjileri ise 10000 J/m²'den 40000 J/m²'ye kadar değişmektedir. Eğilme

Tablo 2. Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve RPC'lerin karşılaştırılması

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPC
Basınç dayanımı (MPa)	20-60	60-115	200-800
Eğilme dayanımı (MPa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma enerjisi (J/m ²)	100-120	100-130	10 000-40 000
Elastisite Modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75

dayanımlarında ve kırılma enerjilerindeki değişim eklenen çelik tellerin yüzdeleriyle orantılıdır (Richard ve Cheyrezy, 1994). Deneylerde çentikli kiriş numuneleri kullanılmış olup, Şekil 8 normal bir harcın ve RPC 200'ün basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Reaktif pudra betonunun büyük bir şekil değiştirme sertleşmesi sergilediği görülmektedir. Eğilme dayanımı ilk çatlamadaki gerilmenin iki katı kadar yüksektir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha büyüktür (Richard ve Cheyrezy, 1994).



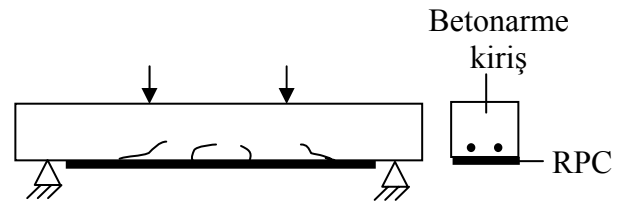
Şekil 8. Normal harç ve lif donatılı RPC 200'ün eğilme davranışı (Richard ve Cheyrezy, 1994).

Kırılma enerjisi “gerilme-açıklığın ortasındaki şehim” eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Ölçülen kırılma enerjisi RPC için 30000 J/m² ve normal harç için 110 J/m²'dir (Richard ve Cheyrezy, 1994). Böylece, reaktif pudra betonunun kırılma enerjisinin normal

harcınınin yaklaşık 300 katı kadar olduğu sonucuna varılabilir.

Reaktif Pudra Betonu kullanılarak yapılan onarım ve güçlendirme

Şekil 9'da görüldüğü gibi eğilme etkisinde çatlatılmış bir betonarme kirişin çekme bölgesi klasik çelik plaka yerine Reaktif Pudra betonundan yapılmış bir levha ile güçlendirilmiştir. Kullanılan reaktif pudra betonunun hacmen %6'ya varan oranda kısa kesilmiş 0.15 mm çapında 6 mm ve 13 mm boyunda çelik teller kullanılmıştır. Levhalar çatlamış kirişe adezivlerle yapıştırılmaktadır. Kiriş tekrar yüklendiğinde çok yüksek dayanımlara erişilmiştir (Karihaloo, 2000; Alae v. diğ., 2001). Bu tür güçlendirme kayma bölgesinde de yapılmaktadır (Alae, 2002).



Şekil 9. Çatlamış betonarme kirişin Reaktif Pudra Betonuyla güçlendirilmesi (Karihaloo, 2000; Alae v. diğ., 2001).

Diğer bazı çelik tel donatılı yüksek performanslı betonlar

Özyurt ve diğ., (2002)'nin yüksek performanslı çelik tel donatılı betonlar üzerinde elde ettikleri sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kullanılan çimento PÇ 42.5 olup 7 ve 28 günlük norm basınç dayanımları sırasıyla 40.3 MPa ve 54.6 MPa'dır. Silis dumanı % 85 oranında SiO₂

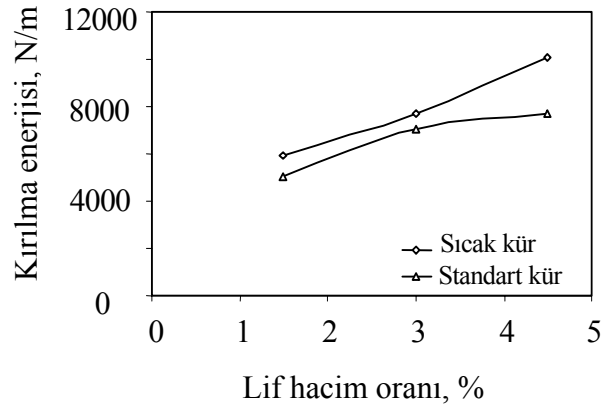
içermektedir. Agregada olarak; kum (0-1mm) ve iki ayrı silis unu kullanıldı. Silis unlarının birisinde en büyük tane boyutu 500µm değerinde ise 150µm dir. Kullanılan çelik tel kısa kesilmiş ve Beksa'dan sağlanmış olup çapı 0.15mm, boyu ise 6mm dir. Silis dumanı çimento ağırlığının % 25'i oranında kullanıldı. Bu çalışmada 3 karışım çelik lif içermekte, bir karışım ise donatısız yalın harç şeklindedir. Bütün bileşimlerde nominal çimento dozajı 950kg/m³, su/çimento oranı 0.29 ve su/bağlayıcı oranı 0.23'te sabit tutuldu. Yalın harcın bileşimi çimento: silis dumanı : su : kum (0-1mm) : silis unu 1 (0-0.5mm) : silis unu 2 (0-0.15mm) = 1 : 0.25 : 0.29 : 0.254 : 0.296 : 0,296'dır. Lif içeriği ise beton hacminin %1.5, %3.0 ve %4.5'ini oluşturacak biçimde değiştirildi. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi % 1.0-%1.5 oranında kullanılarak yaklaşık aynı işlenebilirlik sağlandı. Kırılma enerjisi deneyi için 100mm x 100mm x 500 mm'lik prizmatik numuneler kullanıldı.

Üretilen numuneler iki bölüme ayrıldı ve ilk bölümde yer alan numuneler 28 gün boyunca sürekli olarak 20 °C ± 2 °C'de kirece doymun su içerisinde tutuldu. Isıl işlem uygulanan numuneler ise ilk 7 günlük sürede 20 °C ± 2 °C'de kirece doymun su içerisinde saklandı ve ardından 2 gün 90 °C ± 2 °C sıcaklıkta kirece doymun su içerisinde bekletildi. Son olarak tekrar yaklaşık 20 °C'de kirece doymun su içine alınarak burada 13 gün daha bırakıldı. 90 °C sıcaklığa 6 saatlik bir süre-

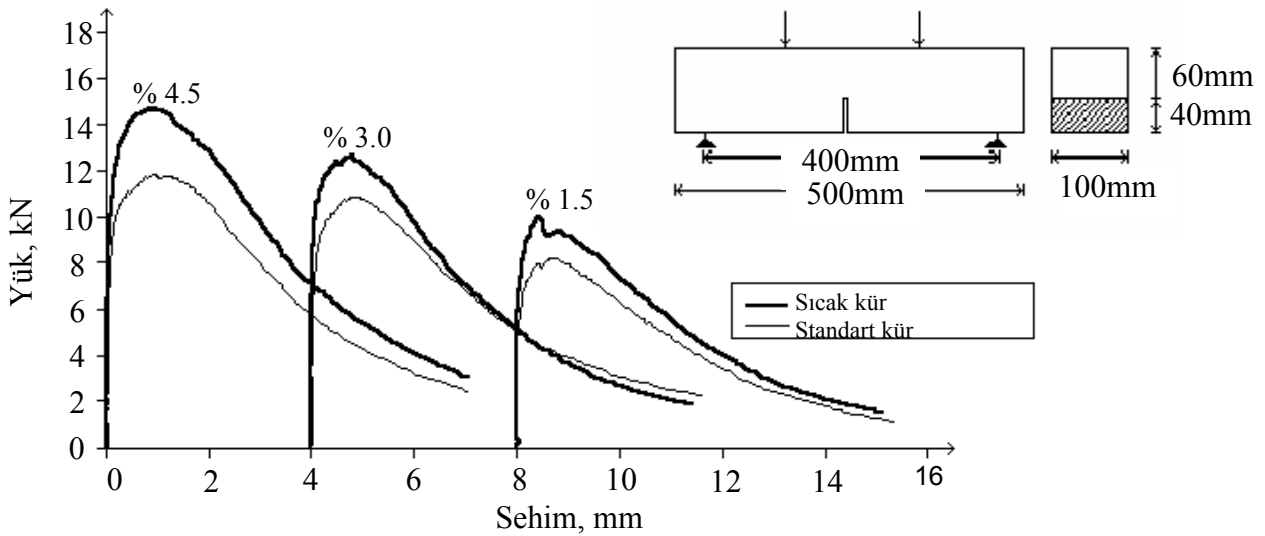
de ulaşıldı. Numuneler 2 gün süreyle bu sıcaklıkta tutulduktan sonra yine belirlenen bir düşüş hızıyla soğutularak yaklaşık 6 saatlik bir sürede 20 °C'lik sıcaklığa inildi.

Bu program oluşturulurken, her iki kür ortamında saklanan numunelerin olgunluk derecelerinin aynı olması sağlanmıştır. Böylece farklı kür uygulamaları sonucunda olgunluk dereceleri aynı olan numunelerde lif içeriğinin ve ısıl işlemin etkileri araştırılmıştır.

Şekil 10 ve 11'de görüldüğü gibi tel içeriğinin artmasıyla kırılma enerjilerinde ve eğilme dayanımlarında önemli artışlar kaydedilmiştir. Aynı bir olgunluk derecesinin gözönüne alınmasına



Şekil 10. Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerinde kırılma enerjisi çelik lif hacim oranı ilişkisi.



Şekil 11. Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerinde yük sehim eğrisi

karşın sıcak su kürünün mekanik özelliklere etkisi standart kürün etkisinden daha belirgin olmuştur. Böyle bir artışın nedeni şöyle açıklanabilir: 20°C de silisli malzemelerin çoğu reaktif olmayan davranış sergilerken, yüksek sıcaklıklarda portlandit ile reaksiyona girmekte ve zayıf kalsiyum hidroksit kristalleri yerine ince ve kuvvetli kalsiyum silikat hidratları oluşmaktadır. Sonuçta, mekanik özelliklerde belirgin artışlar kaydedilmektedir.

Yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON)

SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete); çimento, su, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir bulamacın sertleşmesiyle oluşan bir matris içinde hacmen % 20'ye varan oranda çelik tel içeren sünek bir betondur.

Çelik tel donatılı betonlarda çelik tel içeriğinin %2 - %3 olduğu düşünülürse yaklaşık 10 kat fazla donatılan malzeme sünekliğinin mertebesi daha iyi anlaşılmaktadır.

Fritz tarafından kancalı uçlu çelik tel (çap=0.5 mm, uzunluk= 30 mm) kullanılarak üretilen SIFCON üzerinde tek eksenli çekme altında elde edilen deney sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Bu tablonun incelenmesinden görüldüğü üzere SIFCON'un kırılma enerjisi su/çimento oranına bağlı olarak değişmekte olup normal betonun kırılma enerjisinin yaklaşık 1340 katına varan değerler elde edilebilmektedir.

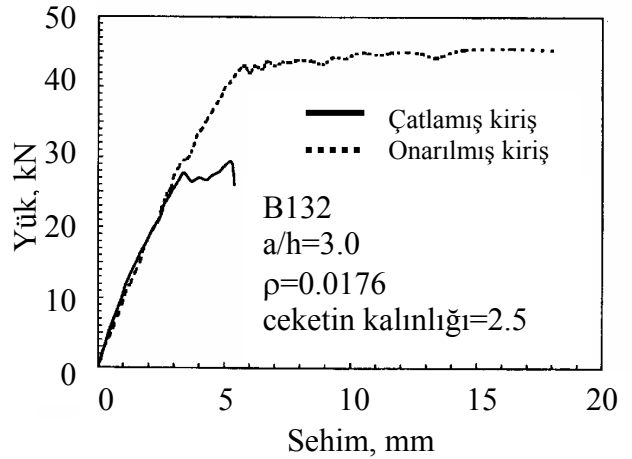
Şengül'ün (2002), SIFCON kiriş numuneler üzerinde yük-sehim davranışını incelediği çalışmada elde ettiği kırılma enerjisi normal betona göre yaklaşık 650 kat daha yüksektir.

Tablo 3. Tek eksenli çekme halinde SIFCON üzerinde elde edilen değerler

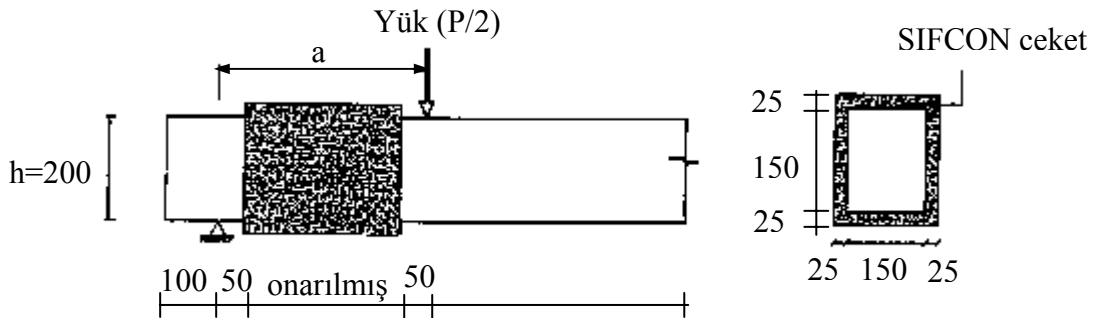
Su/çim. oranı w/c	Lif içeriği [%]	Çekme dayanımı [N/mm ²]	Ölçülen sehim [mm]	Kırılma enerjisi [J/m ²]
0,45	8,5	9,2	19,0	30 500
0,35	8,5	12,5	14,1	57 100
0,45	13,5	14,1	34,9	134 100

SIFCON ile onarım ve güçlendirme

Shannag v. diğ., (2001) tarafından SIFCON kullanılarak yapılan bir çalışmada a/h oranı 1.2-3.0 ve esas çelik çubuk donatısı ise $\rho = 0.0129-0.0228$ arasında değiştirilmiş olup güçlendirme ile kayma kapasitesinde %25-%55 arasında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Şekil 12'de kayma bölgesinde yapılan güçlendirmenin yük-sehim davranışındaki etkisi belirgindir. Hacmen %8 kancalı uçlu çelik tel (çap: 0.50 mm, boy: 30 mm)



Şekil 12. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kirişlerin tipik yük-sehim eğrisi (Shannag v. diğ., 2001).



Şekil 13. Kirişin kayma kapasitesinin artırılması için SIFCON ceket uygulanması (boyutlar: mm), (Shannag v. diğ., 2001).

içeren ve 1:3:2.6:0.55 (çimento: kırmtaş: kırma kum: su) karışımına sahip SIFCON ile kayma kapasitesinin güçlendirilmesine ait bir örnek Şekil 13'te gösterilmektedir.

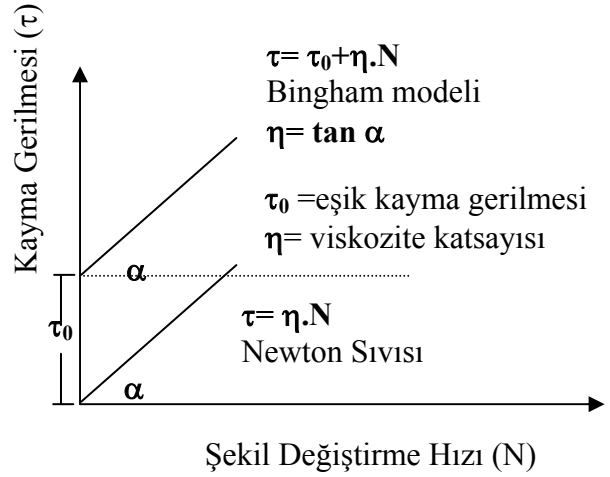
Kendiliğinden yerleşen betonlar

Kendiliğinden yerleşen betonların üretiminde en büyük agrega boyutu normal betona göre biraz düşürülmekte ve ince malzeme miktarı arttırılmaktadır.

Bu betonlarda, Şekil 14'te görüldüğü gibi eşik kayma gerilmesi (τ_0) küçültülerek Bingham Modeli'nden Newton Sıvı'sına doğru bir davranış sergilenir.

Yüksek akışkanlık sağlayan, terlemeyi azaltan ve böylece betonun ayrışmadan stabilitesini düzenleyen katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu betonlar ayrışmadan kendiliğinden kalıbına yerleşir, işçilikte azalma ve inşaat hızında artış sağlanır. 28. gündeki dayanımları 60 MPa'yı aşacak biçimde tasarlanabilirler. Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri Şekil 15'teki gibi gösterilebilir.

Kendiliğinden yerleşen betonlar depreme karşı güçlendirme projelerinde kullanıldığı gibi sık donatılı yerlerde, şehir merkezlerinde, gece beton dökümlerinde, vibratör kullanımının mümkün olmadığı durumlarda, zor ve ulaşılmaz kalıplarda ve estetik gerektiren yapı elemanlarının üretiminde de kullanılmaktadır (Skarendahl ve Petersson, 2000).

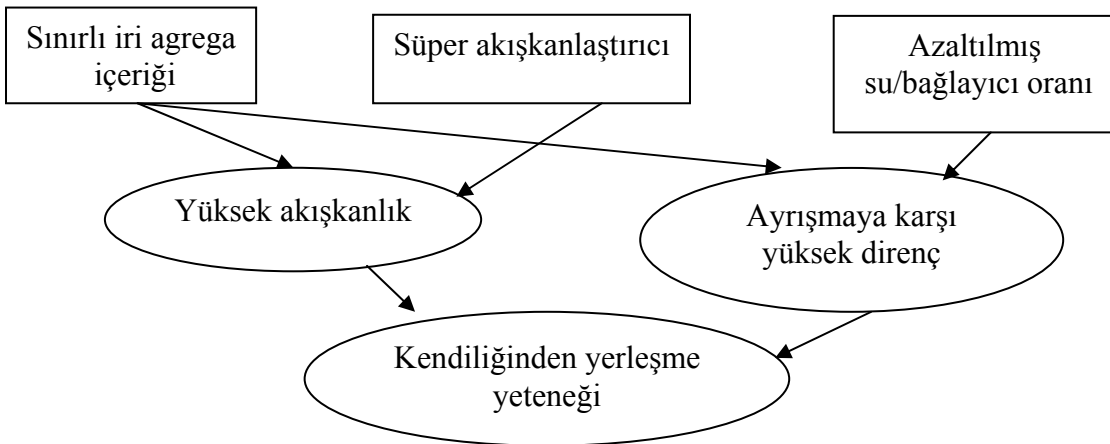


Şekil 14. Bingham Modeli ile Newton Sıvı'sının davranışları (Skarendahl ve Petersson, 2000).

Geleneksel çelik tel donatılı betonlar (ÇTDB)

Çelik telleri betonda kullanmanın başlıca beş yararı vardır: a) Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton, b) Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, c) Etkin çatlak kontrolü, d) Dayanıklılık, ve e) Donatı işçiliğinde belirgin azalma.

Çelik teller beton içinde yüzey ve kenarlar da dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında, hidrasyon süreci malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik teller karşı koyar; rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir.



Şekil 15. Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri (Skarendahl ve Petersson, 2000).

Bayramov v. diğ., (2002) tarafından İstatistiksel Tepki Yüzey Modellemesi kullanarak yapılan bir çalışmada geleneksel Çelik Tel Donatılı Betonların kırılma parametrelerine çelik telin narinliğinin (uzunluk/çap=L/d) ve tel içeriğinin (V_f) aşağıda verilen sınırlardaki etkisi incelenmiştir.

$$\begin{aligned} 55 \leq L/d \leq 80 \\ 20 \leq V_f \leq 50 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (3)$$

Bu araştırmacılar Hillerborg v. diğ., (1976) tarafından önerilen Fiktif Çatlak Modeline göre sünekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boyu (l_{ch}) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$l_{ch} = \frac{G_F E}{f_t'^2} \quad (4)$$

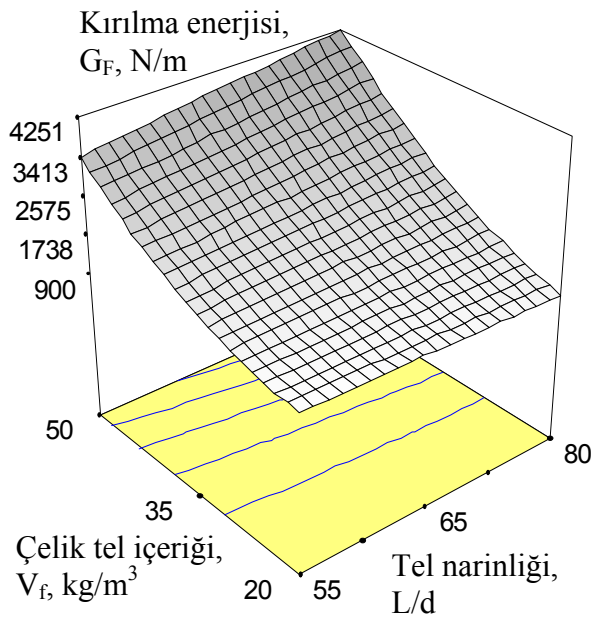
Burada, f_t' , E, ve G_F sırasıyla, yarma çekme dayanımı, elastisite modülü ve kırılma enerjisidir. Şekil 16 ve 17'de görüldüğü gibi çelik tel içeriğinin ve narinliğinin artmasıyla kırılma kadar yutulan enerjinin arttığı ve malzemenin daha sünek davranış sergilediği sonucuna varılmıştır. Çelik telin narinliğinin (L/d) 80 ve tel içeriğinin (V_f) 50 kg/m^3 değerlerinde optimum (minimum gevrekliğin) çözümün elde edildiği

görülmüştür. Sonuçta betonun işlenebilirliğinin de optimizasyonda gözönüne alınması gerektiği anlaşılmıştır.

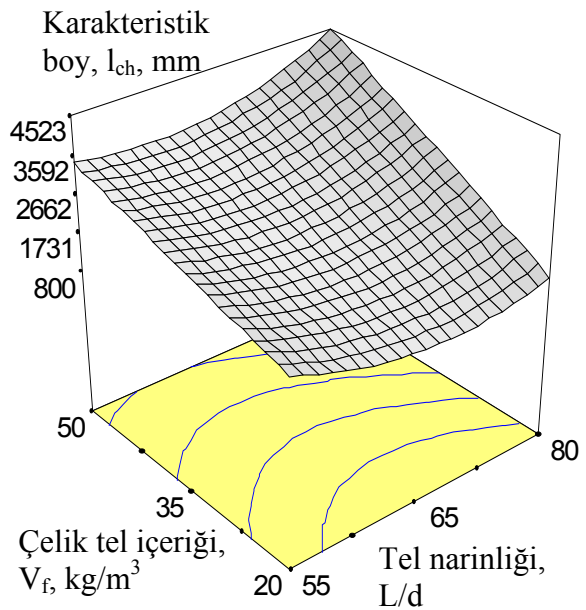
Geleneksel çelik teller endüstriyel zemin betonları ve tünel uygulamalarında kullanıldığı gibi aşağıda belirtilen prefabrike elemanların üretiminde de yaygın biçimde kullanılmaktadır: Muayene bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları, monoblok garajlar, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngerilmeli çatı olukları, otobüs durakları, yiyecek kilerleri, tren tünellerindeki saklanma yerleri, baca elemanları, birleştirilmiş kanallar ve bakım yolu, demiryolu traversleri, demiryolu taban döşemesi, refrakter prekast elemanlar, istinat duvar elemanları, temel blokları, prekast banka kasaları ve kanaletler.

Karma lifli betonlar

Betonda tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine birden fazla tip ve boyutta lif kullanılarak üretilen yeni çimento esaslı kompozit malzemedir.



Şekil 16. Kırılma enerjisinin (G_F) lif narinliği (L/d) ve içeriği (V_f) ile değişimi.

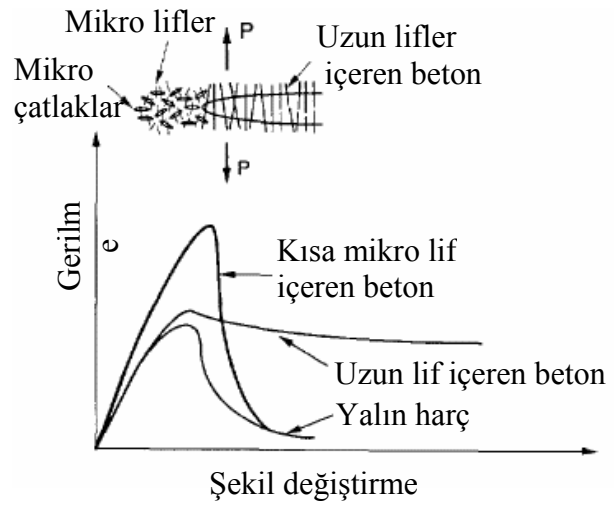


Şekil 17. Karakteristik boyun (l_{ch}) lif narinliği (L/d) ve içeriği (V_f) ile değişimi.

Karma lifli beton üretiminde amaç yük altında oluşan çatlakların mikro düzeyden başlayarak kontrol edilebilmesidir. Bu amaç doğrultusunda mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlakların kontrolü için yine mikro, mezo ve makro düzeyde lifler kullanılmaktadır. Mikro çatlak, uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olan çatlak, makro çatlak ise uzunluğu bir numune veya yapının boyutlarına göre fazla küçük olmayan çatlaktır (Rossi, 2000). Yüksek dayanımlı makro lifler (çelik), büyük çatlakları, zayıf mikro lifler (polipropilen vb.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol eder (Qian v. diğ., 2000).

Mikro lifler; i) Boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluştururlar, ii) Çatlakları makro düzeye gelmeden durdururlar, iii) Elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler. Makro lifler; i) Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını artırırlar, ii) Makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler, iii) Maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler.

Matristeki çatlaklar mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamazlar. Büyük boyutlu lifler ancak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olur (Betterman v. diğ., 1995). Buna karşın, mikro lifler çatlakları mikro düzeyde iken arada köprü vazifesi görerek çatlakları durdururlar. Mikro lifler matrisin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük oldukları için makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilirler. Uzunluğu 10mm ve çapı 80 μm 'den küçük mikro lifler kullanılarak 100 μm 'den küçük aralıkla bir lif dağılımı sağlanabildiği gösterilmiştir (Banthia v. diğ., 2000). Betterman v. diğ., (1995), polivinilalkol (pva) lifler kullanarak yaptıkları çalışmada çekme gerilmesi altında lifler arası uzaklığın azalmasıyla ilk tepe yükünün arttığını göstermişlerdir. Mikro lifler mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar (Mobasher ve Yu Li, 1996). Şekil 18'de mikro ve makro düzeydeki liflerin yine mikro ve makro düzeydeki çatlaklar arasında köprü oluşturması gösterilmektedir (Betterman v. diğ., 1995).

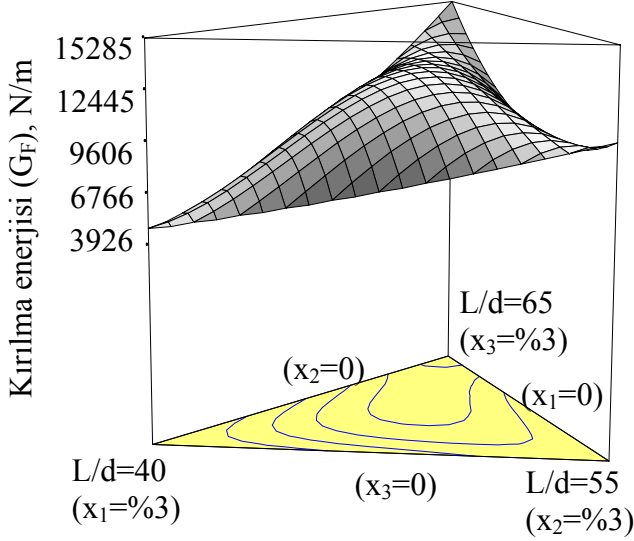


Şekil 18. Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi (Betterman v. diğ., 1995). Şekil 18'dekine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir. Bundan dolayı betonda kırılma enerjisinin artırılmasında uzun çelik tellerin narinliğinin de önemli katkısı vardır.

Son yıllarda akma dayanımı 2000 MPa ve elastisite modülü 210 GPa olan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilmektedir. Yüksek dayanımlı bu liflerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir: Betonun dayanımı arttıkça, lif ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma ayrılması oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı betonda, yüksek dayanımlı lifler kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir (Vandewalle, 1996).

Karma lifli betonlara ait bazı uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir: i) Hasarlı binaların güçlendirilmesinde, ii) Kesiti küçük taşıyıcı elemanların yapımında, iii) Zımbalamaya karşı kolon başlarının güçlendirilmesinde, iv) Zararlı radyoaktif ve endüstriyel atıkların çatlaksız ve durabilitesi yüksek elemanlarda saklanmasında, v) Sünek davranış gerektiren yapı taşıyıcı elemanları bileşim bölgelerinde, vi) Prekast çatı kaplama elemanı yapımında, vii) Çarpma ve aşınmaya karşı dayanım gerektiren bölgelerde (Mobasher ve Yu Li, 1996; Kützing, 1997; 1998; Kim v. diğ., 1999).

Ekincioglu (2002) tarafından hacmen % 0.05 polipropilen lif, ve yine hacimsel toplamı %3 olan üç farklı narinlikte çelik tel donatılı çentikli beton kırımlarda elde edilen kırılma enerjisi değerleri Şekil 19'da gösterilmektedir. Sonuçta en yüksek süneklik, tamamı %3'lük ve narinliği 65 olan çelik tel donatılı betonlarda elde edilmiştir.



Şekil 19. Karma çelik tel donatılı betonda çelik tel narinliğinin(L/d) ve içeriğinin (x_i) kırılma enerjisine (G_F) etkisi.

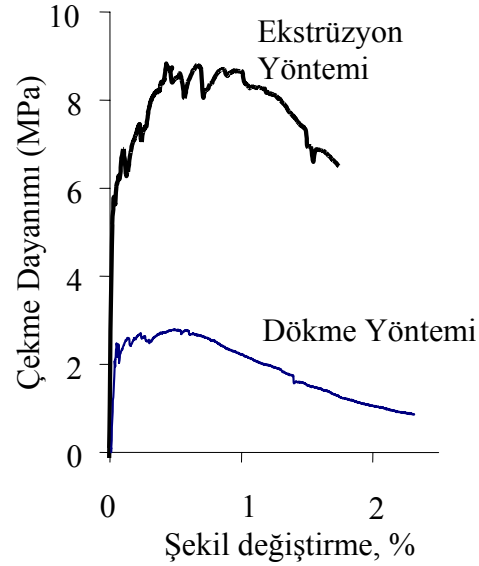
Sentetik lifli yüksek performanslı betonlar

Akkaya (2000); Akkaya v. diğ., (2000); Akkaya ve Shah (2001) yaptıkları çalışmalarda, lif katkılı betonlarda yüksek performans sağlamak için kullanılan malzeme ve üretim tekniği seçiminin önemini ortaya koymuşlardır. Liflerin etkili bir biçimde dağıtıldığı, kuvvet uygulanan yöne doğru yönlendirildiği ve ekstrüzyon gibi özel üretim teknikleri ile lif-çimento hamuru arayüzeyinin güçlendirildiği durumlarda yüksek performans elde edilmekte ve çok çatlaklı kırılmalar gözlenmektedir. Yapılan incelemeler sonucu, liflerin çimento hamuru içinde dağılmadığı bölgelerin büyüklüğü arttıkça, ilk çatlak gerilmesinin azaldığı görülmüştür. Bunun yanında, lif topraklanması arttıkça şekil değiştirme sertleşmesinin azaldığı ve tokluğun düştüğü anlaşılmıştır.

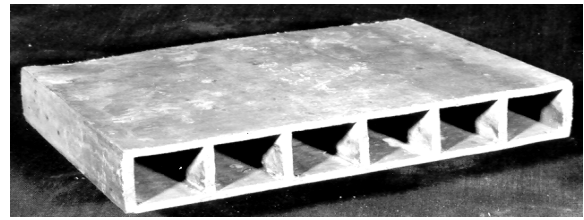
Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemi ile üretilen malzeme ile dökme yöntemi ile üretilen malzemenin gerilme şekil

değiştirme davranışları Şekil 20'de karşılaştırılmaktadır (Akkaya v. diğ., 2000).

Şekil 20'de görüldüğü gibi ekstrüzyon yöntemi ile üretimde çekme dayanımı dökme yöntemine göre yaklaşık 2.5 kat artmaktadır. Bu yöntemle üretilen bir eleman Şekil 21'de görülmektedir.



Şekil 20. Yüksek performanslı sentetik lif katkılı betonda üretim yönteminin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi (Akkaya v. diğ., 2000).

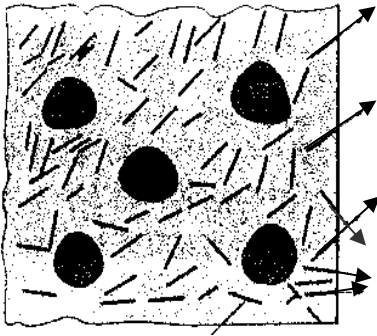


Şekil 21. Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemi ile üretilen bir eleman (Akkaya v. diğ., 2000).

Yangına karşı polipropilen lif donatılı yüksek dayanımlı beton

Yüksek dayanımlı betonların çok az boşluklu, diğer bir deyişle fazla yoğun bir yapıda olması yangına karşı direnci düşürür. Yüksek sıcaklıklarda serbest su ve çimento hamurundaki kimyasal olarak bağlanmış su buharlaşır. Ancak bu su malzemenin yoğun yapısından dolayı uzaklaşmaz. Sonuç olarak beton yüzeyinde dökülmeler

olur, donatı çeliğini yüksek sıcaklıktan koruyamaz hale gelir ve sonuçta betonarme elemanların taşıma kapasiteleri azalır. Frankfurt'ta yeni inşaa edilen bir yapıda bu problemi çözmek için polipropilen lif donatılı bir beton kullanılmıştır. Bunun için betona 1 m³ başına 2 kg polipropilen lif katılmıştır. Yangında olduğu gibi yüksek sıcaklıkta bu lifler eriyerek su buharının sınır bölgelerden çıkabileceği kanallar oluşturmaktadır (Şekil 22). Böylece, yüzeylerdeki dökülmeler engellenebilmiştir.



Şekil 22 . Yüksek sıcaklıklarda eriyen polipropilen lifler buharın boşluklar yardımıyla dışarı çıkmasını sağlar (Walraven, 1999)

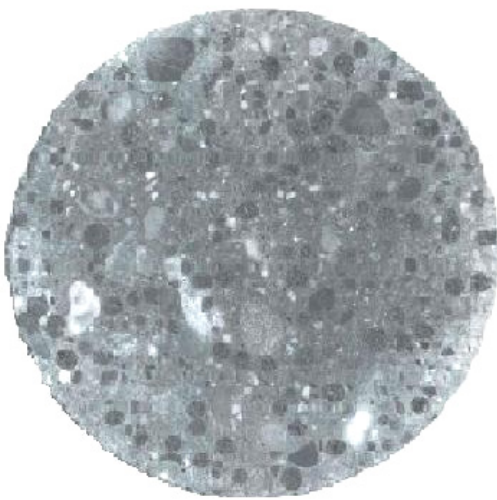
Erken rötreye karşı yarı hafif betonlar

Yüksek dayanımlı betonlar, düşük su/çimento oranı, yüksek çimento dozajı kullanarak ve silis dumanı gibi ultra incelikte yüksek reaktiviteye

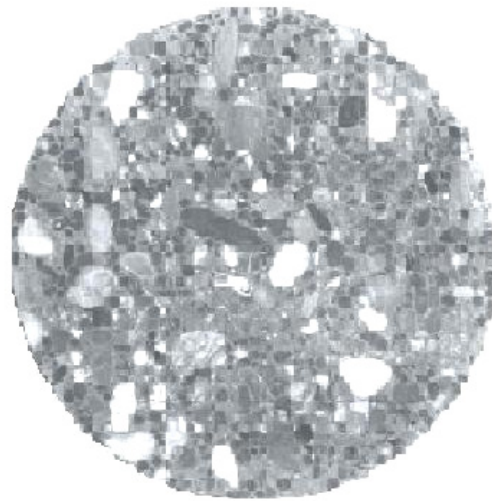
sahip puzolanların eklenmesiyle üretilebilir. Sertleştikten sonra malzeme oldukça yoğun bir hale gelir. Ancak bağlayıcı maddelerin hidrasyonunun tamamlanması için gereken su yetersiz kalır. Çünkü beton elemanın dış bölgesinden iç bölgesine yeteri kadar su girişi olmamaktadır. Bundan dolayı yüksek dayanımlı betonlarda ilk sertleşme sürecinde önemli ölçüde erken rötreye oluşur.

Agrega hacminin yaklaşık %25'inin önceden nemlendirilmiş hafif agrega ile yer değiştirmesi betonun içinde sürekli su kürü sağlayan bir kaynak oluşturur. Önceden ıslatılmış agreganın katılması sonucunda daha az otojen rötreye yapan bir beton elde edilebilir. Şekil 23'te Taşdemir v. diğ., (2002) tarafından incelenen yarı hafif betonlarda siyah yuvarlak taneler bu amaç için de kullanılan Liapor hafif agregalarını göstermektedir.

Taşdemir v. diğ., (2002) tarafından yapılan bu çalışmanın diğer bir amacı ise sürekli bir granülometriye sahip betonda agrega fraksiyonunun betonun kırılma parametrelerine olan etkisini araştırmaktır. Bunun için A16 ve B16 granülometrilere sahip betonlarda en büyük agrega boyutu, su/çimento oranı, çimento içeriği ve mineral katkı olarak silis dumanı miktarı aynı tutulmuştur. Böylece, granülometri eğrisi A16'ya uygun A grubu betonlarda normal agreganın 2-4mm



(a) 4-8 mm arası hafif agrega

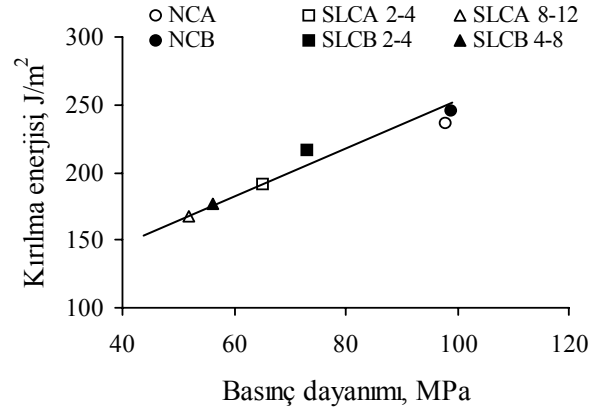


(b) 2-4 mm arası hafif agrega

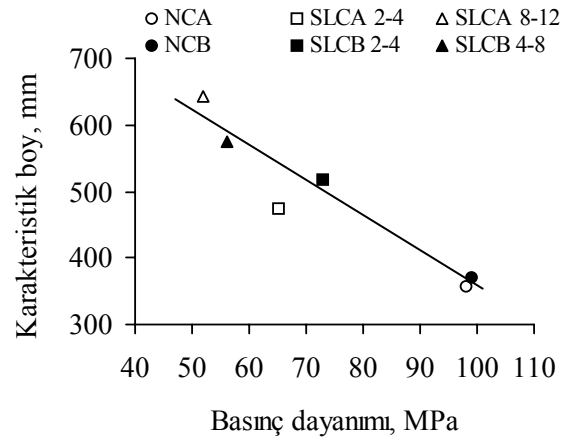
Şekil 23. Yüksek dayanımlı yarı hafif betonların kesitleri (Taşdemir v. diğ., 2002).

veya 8-12 mm arası Liapor hafif agregası ile değiştirilmiştir. Tablo 4'te gösterildiği gibi normal beton NCA ile, hafif agregalı betonlar ise SLCA 2-4 ve SLCA 8-12 ile gösterilmiştir. Granülometri eğrisi B16'ya uygun B grubu betonlarında ise normal agreganın 2-4 ve 2-8 mm'lik bölümleri aynı Liapor hafif agregası ile değiştirilmiştir. Benzer biçimde normal beton için NCB, yarı hafif betonlar için SLCB 2-4 ve SLCB 4-8 kodları kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada silindirik numunelerde tek eksenli basınç altında, çentikli kırış numunelerde ise eğilmede kırılma davranışı incelenmiştir. Elde edilen kırılma parametreleri Tablo 4'te gösterilmektedir.

Şekil 24'te kırılma enerjisi-basınç dayanımı, Şekil 25'te ise karakteristik boy-basınç dayanımı ilişkisi verilmektedir. Tablo 4'te görüldüğü üzere normal agrega ile yer değiştiren hafif agreganın ortalama tane boyutu arttıkça hem basınç dayanımı hem de basınç dayanımındaki şekil değiştirme azalmaktadır. Tablo 4, Şekil 24 ve Şekil 25'te görüldüğü gibi normal agrega ile yer değiştiren hafif agreganın ortalama boyutu arttıkça kırılma enerjisi azalmış, buna karşılık karakteristik boy artmış, eğilme dayanımı azalmış, çatlak ağzı açılma ve sehimin son değerleri de azalmıştır. Ayrıca tüm betonlar için basınç dayanımı arttıkça kırılma enerjisinin arttığı (Şekil 24), karakteristik boyun ise basınç dayanımındaki artma ile azaldığı görülmüştür. (Şekil 25).



Şekil 24. Basınç dayanımının kırılma enerjisine etkisi (Taşdemir v. diğ., 2002).



Şekil 25. Basınç dayanımının karakteristik boyuna etkisi (Taşdemir v. diğ., 2002).

Tablo 4. Sertleşmiş betonların kırılma ve dayanım özellikleri (Taşdemir v. diğ., 2002).

Karışım kodu	NCA	SLCA 2-4	SLCA 8-12	NCB	SLCB 2-4	SLCB 4-8
Küp basınç dayanımı (f'_c), MPa	109.0	78.5	63.2	115.2	88.0	66.2
Silindirik basınç dayanımı (f_c), MPa	98.0	65.0	52.0	99.0	73.0	56.2
Yarma çekme dayanımı (f_t), MPa	5.78	3.7	2.94	5.7	4.14	3.51
Elastisite modülü (E), GPa	50.3	34.0	33.3	49.0	41.0	40.0
Kırılma enerjisi (G_F), J/m ²	237	191	167	246	217	177
Karakteristik boy (l_{ch}), mm	357	474	643	371	519	575
Net eğilme dayanımı (f_{net}), MPa	6.40	4.68	4.35	6.85	5.09	4.58
Son sehim (δ), mm	0.994	0.974	0.794	0.887	0.965	0.948
Son çatlak ağzı açılma deplasmanı (ÇAAD), mm	0.969	0.933	0.811	0.897	0.971	0.904
Basınç dayanımına karşı gelen şekil değiştirme (ϵ_{cu}), $\times 10^{-6}$	2135	2086	1841	2682	2118	1822
Birim ağırlık (Δ), kg/m ³	2415	2168	2074	2404	2195	2131

Sonuçlar

Mevcut veriler değerlendirildiğinde, yeni çimento esaslı kompozit malzemeler ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

Normal ve yüksek dayanımlı yalın betonların büyük bir bölümü için, tek eksenli basınç, tek eksenli çekme, eğilme ve burulma hallerinde, basınç dayanımı arttıkça en büyük gerilmedeki şekil değiştirme kapasitesi artmaktadır. Yüksek dayanımlı yalın betonlar tipik olarak gevrek davranış sergilemektedir.

Yüksek performanslı lif donatılı betonlar hem fiziksel hem de kimyasal etkilere karşı normal betonlara kıyasla daha iyi bir dayanıklılığa sahiptir. Bir çok uygulamada kullanılan yüksek performanslı lif donatılı betonların sünekliği ve dış etkilere dayanıklılığı mekanik dayanımdan daha önemli olduğu için tasarımda bu unsurlar öncelik taşıyabilir.

Reaktif Pudra Betonu veya SIFCON gibi yeni çimento esaslı kompozitler stratejik yapılar ve onarım-güçlendirme için kullanılabilir.

Çelik teller, beton gibi yarı gevrek bir malzeme de sünekliği arttırmak için giderek daha fazla kabul görmektedir. Yüksek dayanımlı beton normal betondan daha gevrek olduğundan, bu malzemelerin kırılma enerjilerinin artırılması gelecekte önemle ele alınmalıdır. Bu tür betonlar, hidrolik yapılar başta olmak üzere bir çok yapının onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Yüksek performanslı lif donatılı betonlar üzerine yapılmış birçok araştırmaya karşın uygulamaları sınırlıdır. Laboratuvar deney sonuçları mühendislik uygulamasına doğrudan transfer edilememiştir, çünkü mevcut teknoloji tüm uygulamalar için yeterli değildir. Gelecekte hem doğrudan eleman üretiminde hem de onarım ve güçlendirmede bu durumun değişeceği beklenmektedir.

Teşekkür

Bu makalede sunulan bazı araştırma sonuçları TÜBİTAK (Proje: İÇTAG 1665), DPT (Devlet

Planlama Teşkilatı, Proje: 2002K120340), The British Council (İ.T.Ü.-Cardiff Üniversitesi arasındaki "Britain-Turkey Partnership Programme") ve BEKSA tarafından sağlanan desteklerle elde edilmiştir. Ayrıca, Akçansa Çim. San. -Betonsa Teknoloji Merkezinin yapılan araştırmalara verdiği desteği ve ikinci yazara TÜBİTAK-BAYG'nin verdiği bursu da anmak gerekir.

Kaynaklar

- Akkaya, Y. (2000). Microstructural Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, PhD. Thesis, Northwestern University.
- Akkaya, Y., Peled, A. ve Shah, S. P. (2000). Parameters Related to Fiber Length and Processing in Cementitious Composites, RILEM, *Materials and Structures*, **33**, 515-524.
- Akkaya, Y. ve Shah, S. P. (2001). Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **127**, (4), 311-316.
- Alaee, F. J., Benson, S. D. P. ve Karihaloo, B. L. (2001). High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites For Retrofitting, *Proceedings 3rd Int. Conference on Technology Convergence in Composites Application*, 1-10, Sydney.
- Alaee, F. J. (2002). Retrofitting of Concrete Structures Using High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite, *PhD Thesis*, Department of Civil Engineering, Cardiff University.
- Alexander, M. G. (1993). From Nanometres to Gigapascals Cementing Future", A University of Cape Town Publication, *Inaugural Lecture*, 23p.
- Bache, H. H. (1981). Densified Cement Ultra-fine Particle-Based materials", Report 40, 35p, Aalborg Portland, Denmark.
- Banthia, N., Yan, N. ve Bindiganalive, V. (2000). Development and Application of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France.
- Bayramov, F., Taşdemir, C. ve Taşdemir, M.A. (2002). Optimum Design of Cement-Based Composite Materials using Statistical Response Surface Method, *Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering*, 725-734, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.
- Bentur, A. (1991). Microstructure of High Strength Concrete, *Darmstadter Massivbau-Seminar*, THD, Darmstadt, **6**, 1-16.

- Betterman, L. R., Ouyang, C. ve Shah, S. P. (1995). Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, **2**, 53-61.
- Birchall, J. D., Howard, A. J. ve Kendall, K. (1981). Flexural Strength and Porosity of Cements, *Nature*, **289**, 388-390.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. ve Aitcin, P-C. (1997). Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, *ACI Materials Journal*, **94**, 4, 286-290.
- Brooks, J. J., Bennett, E. W. ve Owens, P. L. (1987). Influence of Lightweight Aggregates on Thermal Strain Capacity of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, **39**, 60-72.
- De Nicola, B., Pani, L. ve Pozzo, E. (1994). Strain of Concrete at Peak Compressive Stress for a Wide Range of Strengths, *Materials and Structures*, **27**, 206-210.
- Dugat, J., Roux, N. ve Bernier, G. (1996). Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Materials and Structures*, **29**, 233-240.
- Ekincioglu, Ö. (2002). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ F.B.E.
- Feylessoufi, A., Villieras, F., Michot, L. J., De Donato, P., Cases, J. M. ve Richard, P. (1996). Water Environment and Nanostructural Network in a Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Composites*, **18**, 23-29.
- FIP. (1988). Condensed Silica Fume in Concrete, State of Art Report, 37p, Thomas Telford, London.
- Fritz, C. Tensile Testing of SIFCON, (unpublished work)
- Giovambattista, A., Violini, D. ve Zerbino, R. (1992). Extensibility of High-Strength Concretes, *Materials and Structures*, **25**, 552-557.
- Goldman, A. ve Bentur, A. (1992). Effects of Pozzolanic and Nonreactive Microfillers on Transition Zone in High-Strength Concretes. *Proceedings, Interfaces in Cementitious Composites*, J.C. Maso, ed., RILEM, E and FN Spon, London.
- Goldman, A. ve Bentur, A. (1994). Properties of Cementitious Systems Containing Silica Fume or Nonreactive Microfillers, *Advances in Cement-Based Materials*, **1**, 209-215.
- Hijorth, L. (1983). *Development and Application of High-Density Cement-Based Materials*, Phil. Trans. Roy. Soc., A310, 167-173, London.
- Hillerborg, A., Modeer, M. ve Peterson, P. E. (1976). Analysis of Crack Formation and Crack Growths in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, *Cement and Concrete Research*, **6**, 773-782.
- Hsu, T. T. C., Slate, F. O., Sturman, G. M. ve Winter, G. (1963). Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve, *ACI Journal*, **60**, 209-224.
- Jansen, D. C., Shah, S. P. ve Rossow, E. (1995). Stress-Strain Results of Concrete From Circumferential Strain Feedback Control Testing, *ACI Materials Journal*, **92**, 419-428.
- Karihaloo, B. L. (1995). *Fracture Mechanics and Structural Concrete*, Longman Group Ltd., Essex, England.
- Karihaloo, B. L. (2000). Retrofitting Damaged RC Beams With High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, *Proceedings Concrete Communications Conference*, 153-164, British Cement Association.
- Kim, N. W., Saeki, N. ve Horiguchi, T. (1999). Crack and Strength Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Early Ages, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 21.
- Kützing, L. (1997). Use of Fiber Cocktails to Increase Ductility of High Performance Concrete, Annual Civil Eng. Report (LACER), LACER No. 2, 125-133, Leipzig.
- Kützing, L. (1998). Influence of Fibers on the Improving of Ductility of High Performance Concrete, Some Aspects of Designing High Performance Concrete with Fibre Cocktails, Annual Civil Eng. Report (LACER), LACER No. 3, 143-152, Leipzig.
- Massazza, F. (2000). Evaluation of Cements and Cementitious Systems: History and Prospects, *Cement and Concrete Technology in the 2000s*, Second International Symposium, 3-28, TCMA, İstanbul.
- Matte, V. ve Moranville, M. (1999). Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes, *Cement and Concrete Composites*, **21**, 1-9.
- Mobasher, B. ve Yu Li, C. (1996). Mechanical Properties of Hybrid Cement-Based Composites, *ACI Materials Journal*, 284-292.
- Naaman, A. E. ve Reinhardt, H. W. (1995). Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites-HPFRCC, *Pre-Proceedings: 2nd International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-95)*, **2**, 1-23. Michigan.
- Oladapo, I. O. (1964). Cracking and Failure in Plain Concrete Beams, *Magazine of Concrete Research*, **16**, 103-110.

- Özyurt, N., İlki, A., Taşdemir, C., Taşdemir M. A. ve Yerlikaya, M. (2002). Mechanical Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concretes with Various Steel Fiber Contents, *Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering*, 885-894, ITU, Istanbul, Turkey.
- Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D. H. ve Moczko, A. (2000). Fracture Properties and Acoustic Emission Response of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete. *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, 491-500, Lyon, France.
- Richard, P. ve Cheyrezy, M.H. (1994). Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, Internal Report, 15p., Bouygues.
- Richard, P. ve Cheyrezy, M. (1995). Composition of Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**, 7, 1501-1511.
- Rossi, P. (2000). Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC): An Overview, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes(FRC)*, 87-100, Lyon, France.
- Sarkar, S. L. (1994). The Importance of Microstructure in Evaluating Concrete, *In Advances in Concrete Technology*, ed. V. M. Malhotra, Second Edition, 125-160, CANMENT, Ottawa.
- Şengül, C. (2002). Yüksek Oranda Çelik Tel İçeren Çimento Bulamacının (SIFCON) Mekanik Davranışı, *Bitirme Çalışması*, İTÜ İnşaat Fakültesi.
- Shah, S. P. ve Taşdemir, M. A. (1994). Role of Fracture Mechanics in Concrete Technology, *Advances in Concrete Technology*, Ed. V. M. Malhotra, Second Edition, 161-202, CANMENT.
- Shannag, M. J., Barakat, S. ve Jaber, F. (2001). Structural Repair of Shear-Deficient Reinforced Concrete Beams Using SIFCON, *Magazine of Concrete Research*, **53**, 6, 391-403.
- SHRP-C/FR-91-103, (1991). High Performance Concretes, a State of the Art Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.
- Skalny, J. P., ed. (1989). *Materials Science of Concrete*, I., The American Ceramic Society, Westerville, OH.
- Skarendahl, A. ve Petersson, O., eds. (2000). Self-Compacting Concrete, *State-of-the Art report of RILEM TC 174-SCC*, RILEM Publications, Report 23, 154p, Cachan Cedex.
- Smeplass, S. (1992). High Strength Concrete: Mechanical Properties – Normal Density Concretes, SP-4 – Materials Design, Report 4.4, SINTEF, Trondheim.
- Swamy, N. (1971). Aggregate-Matrix Interaction in Concrete Systems, *Proceedings of Civil Engineering Materials Conference*, Part I, 301-315, Southampton, John Wiley Interscience, London.
- Taşdemir, M. A., Lydon, F. D. ve Barr, B. I. G. (1996a). The Tensile Strain Capacity of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, **48**, 211-218.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Lydon, F. D. ve Barr, B. I. G. (1996b). Effects of Silica Fume and Aggregate Size on the Brittleness of Concrete, *Cement and Concrete Research*, **26**, 63-68.
- Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A. D., Lydon, F. D. ve Barr, B. I. G. (1998). Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-Phase Composite Model Approach, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 301-318.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Mills, N., Barr, B. I. G. ve Lydon, F. D. (1999). Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Post Peak Response of Concrete in Bending, *ACI Materials Journal*, **96**, 74-83.
- Tasdemir, M. A., Tasdemir, C., Grimm, R. ve König, G. (2002). Role of Aggregate Fraction in the Fracture of Semi-Lightweight High Strength Concrete, *Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, 1453-1466, Leipzig, Germany.
- Vandewalle, L. (1996). Influence of the Yield Strength of Steel Fibres on the Toughness of Fibre Reinforced High Strength Concrete. *Proceedings, the CCMS Symposium, Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry*, 496-505, Chicago.
- Walraven, J. (1999). The Evolution of Concrete, *Structural Concrete*, Journal of fib, **P1**, 1, 3-11.
- Welch, G. B. (1966). Tensile Strains in Unreinforced Concrete Beams, *Magazine of Concrete Research*, **18**, 9-18.
- Wittmann, F. H., ed. (1983). Structure of Concrete with Respect to Crack Formation, *Fracture Mechanics of Concrete*, 43-74, Elsevier Applied Science, Amsterdam.