

GELENEKSEL VE YÜKSEK PERFORMANSLI ÇELİK DONATILI BETONLAR

Mehmet Ali TAŞDEMİR(*), Fikret BAYRAMOV(**), Mehmet YERLİKAYA(***)

ÖZET

Sunulan çalışma yüksek dayanımlı betonlar (YDB) ile homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemleri (DSP), büyük kusurlardan arındırılmış (MDF) çimento, 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) gözden geçirmektedir.

1. GİRİŞ

Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı yalın betonlarda yutulan bağıl enerji düşük olduğundan bu malzemelere kısa kesilmiş çelik teller eklenerek sünek davranış elde edilmektedir. Son yıllarda normal dayanımlı beton teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, basınç dayanımları yüksek çelik tel donatılı yeni çimento esaslı sünek kompozitler de geliştirildi. Bu yeni kuşak çimento esaslı malzemeler düşük geçirimsizlik, geliştirilmiş dürabilite, sınırlı röt ve korozyon dayanımının artırılması gibi diğer yüksek performans özelliklerini de sağlar. Sunulan 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 ve SIFCON, gibi yeni çimento esaslı kompozitlerin davranışı üzerine genel bir değerlendirme yapılmaktadır.

2. YÜKSEK DAYANIMLI / YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR (YDB-YPB)

Bu yüksek dayanım ve yüksek performans gerektiren bazı özel zeminler için önemli kullanım potansiyeline sahip betonların mekanik davranışları

(*) Prof. Dr., (**) İnş. Y. Müh.

İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul

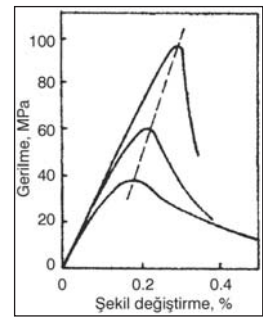
(***) İnş. Müh. Beksa Çelik Kord Sanayi, Kocaeli

üzerinde durulmaktadır. Bu betonların çatlamaya karşı riski normal dayanımlı betonlardan daha azdır. Bu nedenle özellikle ilk yaşlardaki erken rötreye karşı önlem alınması halinde gelecekte bazı zemin uygulamalarında kullanılmaları söz konusudur.

Yüksek Performanslı beton (YPB) dürabilite koşulu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Bununla birlikte değişik tanımlar da yapılmaktadır. ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programı'na (SHRP) göre Yüksek Performanslı Beton, dayanımı, dürabilitesi ve su/bağlayıcı oranı bakımından aşağıdaki gibi tanımlanabilir [1]:

- Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı $\geq 17,5$ MPa; çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa; çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa,
- Dürabilite çarpanı ≥ 80 (donma-çözülmenin 300 tekrarından sonra),
- Su/bağlayıcı oranı $\leq 0,35$.

Şekil 1'de görüldüğü gibi tepe noktasına kadar yüksek dayanıma sahip yalın betonun eğriliği hemen hemen lineerdir. Yüksek dayanımlı yalın 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 [2, 3].



Şekil 1 - Tek Eksenli Basınç Altında Normal ve Yüksek Dayanımlı Yalın Betonlarda Gerilme - Şekil Değiştirme Eğrisi [2].

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 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:

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

Şekil 2'nin 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:

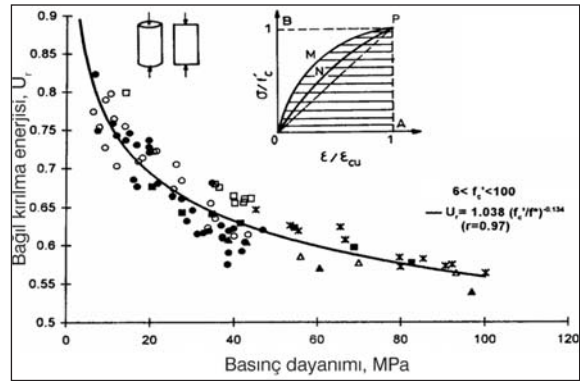
$$U_r = 1.038 \left(f'_c / f^* \right)^{-0.134} \quad (2)$$

burada $f^* = 1$ MPa'dır.

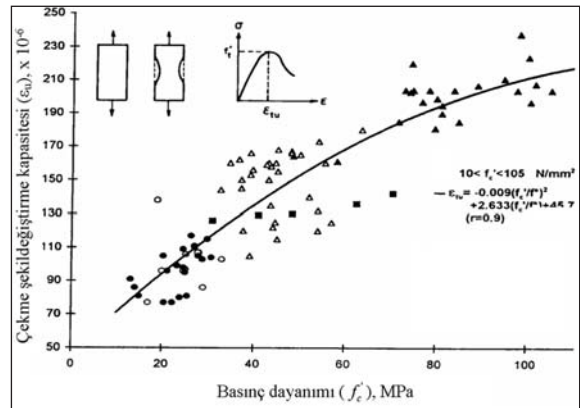
Denklem (2) ile gösterilen bağıntıda, korelasyon katsayısı çok yüksektir (0,97) ve denklem basınç dayanımlarının 6 MPa'dan 100 MPa'a kadar olan bir aralığı için geçerlidir. Yutulan bağıl enerjinin değerlendirilmesi için literatürden alınan ve tek eksenli basınç yüklemesi altındaki sonuçları içeren 85 farklı beton deney verisi kullanılmıştır. Bütün deney sonuçları silindirler veya prizmalar üzerinde kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney koşullarına dayanmaktadır [3].

Farklı yükleme koşullarında, dayanım arttıkça tepe noktasındaki şekil değiştirme artmaktadır [4]. Betonun çekme şekil değiştirme kapasitesi için bir örnek burada verilmektedir. Bu, çatlak kontrolü ve çatlama riskinin belirlenmesi için gereklidir [5].

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 daraltıl-



Şekil 2 - Bağıl Kırılma Enerjisi-Basınç Dayanımı İlişkisi [3].



Şekil 3 - Çekme Şekil Değiştirme Kapasitesi-Basınç Dayanımı İlişkisi [3].

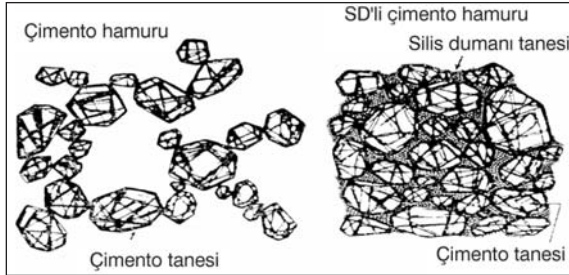
mamış kesitli çentiksiz numuneler kullanan Taşdemir ve diğ. [3] literatürde verilen deney sonuçlarının 90 adedine dayanan verileri Şekil 3'teki gibi göstermişlerdir. Diğer gerilme hallerine ait şekil değiştirme kapasiteleri Tablo 1'de verilmektedir.

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

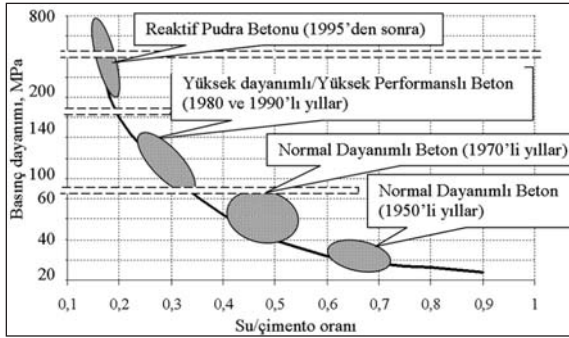
Tablo 1 - Tek Eksenli Basınç, Tek Eksenli Çekme, Eğilme ve Burulma Hallerinde Basınç Dayanımın En Yüksek Gerilmedeki Şekildeğiştirme İlişkisi [3]

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

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).



Şekil 4 - Silis Dumanının Çimento Hamurundaki Boşlukları Doldurma Etkisi [6].



Şekil 5 - Betonun Evrimi Kapsamında Basınç Dayanımı-Su/Çimento İlişkisi.

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 [7].

Silis dumanı (SD) içeren betonların özelliklerini gözönüne alarak SD'nin 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 [8].

Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli 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'nin betonda kullanılmasındaki 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 [9, 10].

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 [11, 12]. Bazı stratejik yapılarda olası kullanım için yeni çimento esaslı daha sünek malzemelere de gereksinim vardır

3. YENİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER

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 [13]. Yüksek dayanımlı betonlarda olduğu gibi bu malzemelerin sünekliği düşük olduğundan, sünekliklerini arttırmak 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/m²'ye varmaktadır [14].

3.1. Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP)

Çimentolu malzemelerin bu yeni sınıfı Danimarka'daki Aalborg Portland Çimento Fabrikası tarafından üretilmiştir [13, 15]. DSP bağlayıcılar Şekil 6'da gösterildiği gibi çimento taneleri arasında kalan boşluklarda homojen olarak dağıtılan ultra incelikteki silis dumanını içerirler. Mümkün olan en yoğun



Şekil 6 - Homojen Dağılı Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP) [13]

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 gevrektr [13, 15].

3.2. 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, Griffith yaklaşımını kullanarak "büyük kusurlardan arınmış (MDF)" çimentolarını geliştirdiler. Bu araştırmacılara 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 yok etmek için özel bir proses tekniğini kullanarak çimentolar hazırladılar. Bu çimentolarda çok yüksek eğilme dayanımlarına erişildi ve gözlenen en büyük boşlukların çapı yaklaşık 90 m oluncaya dek Griffith eğrisi uygulandı. Sonuçlar Şekil 7'de gösterilmektedir [16, 17].

3.3. 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 [18]. Bunlara tipik örnek olarak reaktif pudra betonu (RPC) verilebilir.

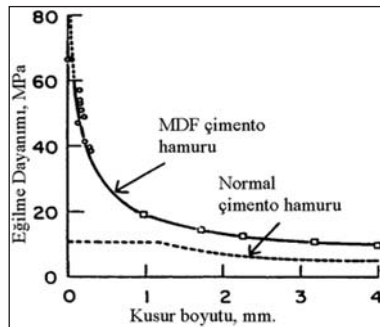
RPC ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliğe ve aşırı derecede

düşük geçirimsiliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir [19]. 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 arasında, 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 [20]. Reaktif pudra betonunun iç yapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikroyapısı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerle güçlendirilmektedir.

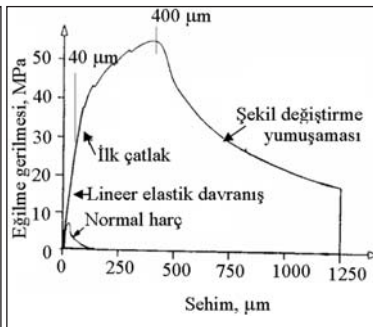
Bu dikkate değer özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir:

- Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımındaki 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 [7], [20].

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 mertebesinde. İşlenebilirlik 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.



Şekil 7 - MDF ve Normal Çimento Hamurunun Eğilme Dayanımı [16, 17].



Şekil 8 - Normal Harç ve Lif Donatılı RPC 200'ün Eğilme Davranışı [20].

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 dayanımlarında ve kırılma enerjilerindeki değişim eklenen çelik tellerin yüzdeleriyle orantılıdır [20]. Deneylerde çentikli kırış numuneleri kullanılmış olup, Şekil 8 normal bir harcın ve RPC 200'ün basit kırış halindeki

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

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 [20].

Kırılma enerjisi "gerilme-açıklığın ortasındaki sehim" eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Ölçülen kırılma enerjisi RPC için 30000 J/m² ve normal harç için 110 J/m²'dir [20]. Böylece, reaktif pudra betonunun kırılma enerjisinin normal harcınının yaklaşık 300 katı kadar olduğu sonucuna varılabilir.

Çok ağır trafiğin olduğu, çarpma etkilerinin bulunduğu, çatlaksız, enerji yutma yeteneği yüksek ve üstün süneklığe sahip olan özel zemin betonları için bu betonlar da önemli bir potansiyele sahiptir.

3.4. Diğer bazı çelik tel donatılı yüksek performanslı betonlar

Özyurt ve diğerlerinin [21] yüksek performanslı çelik tel donatılı betonlar üzerinde elde ettikleri sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

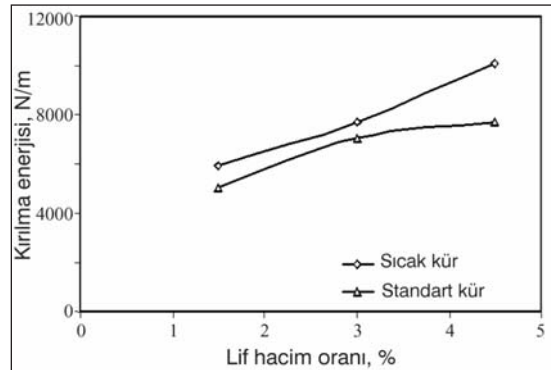
Kullanılan çimento PÇ 42,5 olup 7 ve 28 günlük norm basınç dayanımları sırasıyla 40,3 MPa ve 54,6 MPa'dır. Silis dumanı %85 oranında SiO₂ içermektedir. Agrega olarak; kum (0-1mm) ve iki ayrı silis unu kullanılmıştır. Silis unlarının birisinde en büyük tane boyutu 500 µm diğeri ise 150 µm dir. Kullanılan çelik tel ve Beksa'dan sağlanan OL teller olup çapı 0,15 mm, boyu ise 6 mm 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 950 kg/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 100 mm x 100 mm x 500 mm'lik prizmatik numuneler kullanıldı.

Üretilen numuneler iki bölüme ayrıldı ve ilk bölümde yer alan numuneler 28 gün boyunca sürekli olarak

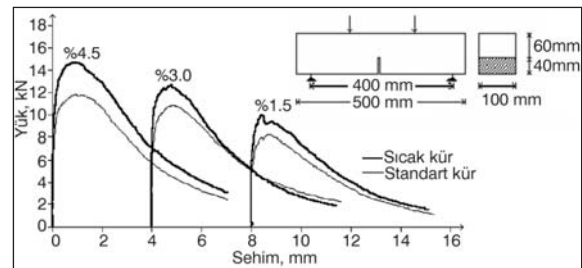
20 °C ± 2 °C'de kirece doymun su içerisinde tutuldu. Isıl işlem uygulanan numuneler ise ilk 7 günlük sürede 20 °C ± 2 °C'de kirece doymun su içerisinde tutuldu ve ardından 2 gün 90 °C ± 2 °C sıcaklıkta kirece doymun su içerisinde bekletildi. Son olarak tekrar yaklaşık 20 °C'de kirece doymun su içine alınarak burada 13 gün daha bırakıldı. 90 °C sıcaklığa 6 saatlik bir sürede ulaşıldı. Numuneler 2 gün süreyle bu sıcaklıkta tutulduktan sonra yine belirlenen bir düşüş hızıyla soğutulmuş yaklaşık 6 saatlik bir sürede 20 °C'lik sıcaklığa inildi. Bu program oluşturulurken, her iki kür ortamında tutulan numunelerin olgunluk derecelerinin aynı olması sağlandı. Böylece farklı kür uygulamaları sonucunda olgunluk dereceleri aynı olan numunelerde lif içeriğinin ve ısıl işlemin etkileri araştırıldı.

Şekil 9 ve 10'da görüldüğü gibi tel içeriğinin artmasıyla kırılma enerjilerinde ve eğilme dayanımlarında önemli artışlar kaydedilmiştir.

Aynı bir olgunluk derecesinin gözönüne alınmasına karşın sıcak su kürünün mekanik özelliklere etkisi standart kürün etkisinden daha belirgin oldu. 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.



Şekil 9 - Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Çentikli Kiriş Numunelerinde Kırılma Enerjisi Çelik Lif Hacim Oranı İlişkisi.



Şekil 10 - Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Çentikli Kiriş Numunelerinde Yük-Sehim Eğrisi.

3.5. 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 [22] 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 ve normal betonun kırılma enerjisinin yaklaşık 1340 katına varan değerler elde edilebilmektedir. Şengül'ün [23] 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 [22]

Su/çim. oranı w/c	Lif içeriği [%]	Çekme dayanımı [N/mm ²]	Ölçülen uzama [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

3.6. 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.

Bayramov ve diğerleri [24] tarafın-

dan 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.

$$55 \leq L/d \leq 80 \quad (3)$$

$$20 \leq V_f \leq 50 \text{ kg/m}^3$$

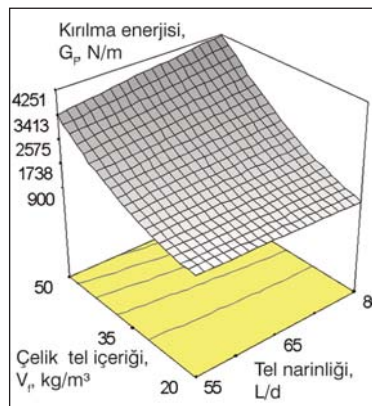
Bu araştırmacılar Hillerborg ve diğerleri [25] tarafından önerilen "Fiktif Çatlak Modeli"ne göre sünekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boyu (l_{ch}) aşağıdaki gibi tanımlamışlardır:

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

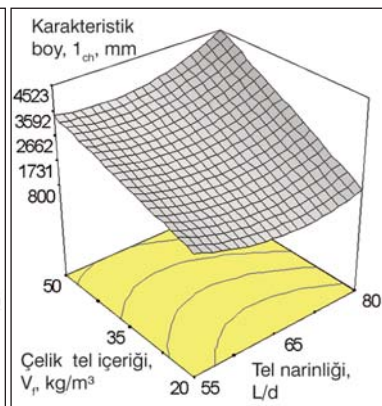
Burada, f_t' , E, ve G_F sırasıyla, yarma çekme dayanımı, elastisite modülü ve kırılma enerjisidir. Şekil 11 ve 12'de görüldüğü gibi çelik tel içeriğinin ve narinliğinin artmasıyla kırılma kadar yutulan enerjinin arttığı ve malzemenin daha sünek davranış sergilediği sonucuna varılmıştır.

Yarma-çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve karakteristik boy gibi mekanik özellikler göz önüne alındığında optimum değerlerin çelik tel hacim oranının (V_f) 0,64 ve narinliğin (L/d) 76,44 değerinde gerçekleştiği görülmüştür. Buna karşın aynı, mekanik özellikler ile çelik tel fiyatı birlikte optimize edildiğinde optimum değerlerin $V_f = \%0,558$ ve L/d=75,87 olduğu belirlenmiştir [26]. 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 bacakları, yağ ayırıcıları, transformator kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları, monoblok garajlar,



Şekil 11 - Kırılma Enerjisinin (G_F) Lif Narinliği (L/d) ve İçeriği (V_f) ile Değişimi [24].



Şekil 12 - Karakteristik Boyun (l_{ch}) Lif Narinliği (L/d) ve İçeriği (V_f) ile Değişimi [24].

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.

3.7. Karma lifli betonlar

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

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 [27]. Yüksek dayanımlı makro lifler (çelik), büyük çatlakları, zayıf mikro lifler (polipropilen vb.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol eder [28].

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 [28]. Buna karşın, mikro lifler çatlaklar 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. Betterman ve diğerleri [29] ve Banthia ve

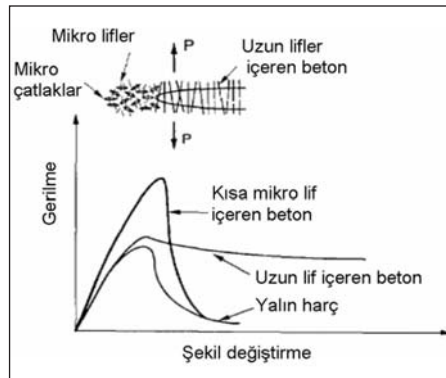
diğerleri [30] polivinilalkol (PVA) lifler kullanarak yaptıkları çalışmada çekme gerilmesi altında lifler arası uzaklığın azalmasıyla tepe yükünün arttığını göstermişlerdir. Mikro lifler mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar [31]. Şekil 13'de mikro ve makro düzeydeki liflerin yine mikro ve makro düzeydeki çatlaklar arasında köprü oluşturması gösterilmektedir [29].

Şekil 13'dekine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirilmektedir. Bundan dolayı betonda kırılma enerjisinin artırılmasında uzun çelik tellerin narinliğinin de önemli katkısı vardır.

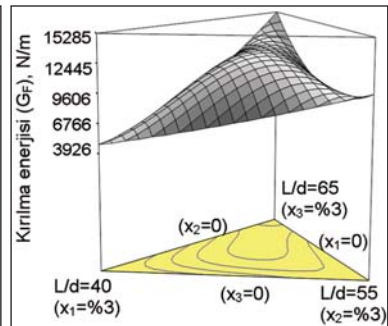
Son yıllarda akma dayanımı 2000 MPa ve elastisite modülü 210 GPa olan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilmektedir. Yüksek dayanımlı bu liflerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir: Betonun dayanımı arttıkça, lif ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda liflerin 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 [31-35].

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 saklanması, v) sünek davranış gerektiren taşıyıcı yapı elemanları bileşim bölgelerinde, vi) Prekast çatı kaplama elemanı yapımında, vii) çarpma ve aşınmaya karşı dayanım gerektiren bölgelerde [31-34].

Ekincioglu [34] tarafından hacmen %0,05 polipropilen lif ve yine hacimsal toplamı %3 olan üç farklı narinlikte çelik tel donatılı çentikli beton kırış-



Şekil 13 - Çatlak Köprülenmesine Farklı Lif Boyutlarının Etkisi [28].



Şekil 14 - Karma Çelik Tel Donatılı Betonda Çelik Tel Narinliğinin (L/d) ve İçeriğinin (xi) Kırılma Enerjisine (GF) Etkisi [35].

lerde elde edilen kırılma enerjisi değerleri Şekil 14'de gösterilmektedir. Sonuçta en yüksek süneklik, tamamı %3'lük ve narınlığı 65 olan çelik tel donatılı betonlarda elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Mevcut veriler değerlendirildiğinde, yeni çimento esaslı kompozit malzemeler ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlara varılabilir [36]:

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 olduğundan geleneksel çelik tel donatılı zemin betonlarına kıyasla daha yüksek performans gerektiren bazı özel zemin betonlarının tasarımında bu unsurlar öncelik taşıyabilir.

Çelik teller, beton gibi yarı gevrek bir malzemede sünekliği arttırmak için giderek daha fazla kabul görmektedir. Yüksek dayanımlı beton normal betonlardan daha gevrek olduğundan, bu malzemelerin kırılma enerjilerinin artırılması gelecekte önemle ele alınmalıdır. Bu tür betonlar, zemin betonları başta olmak üzere bir çok yapının onarım ve güçlendirilmesinde de 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 [36].

KAYNAKLAR

1. SHRP-C/FR-91-103, *High Performance Concretes, a State of the Art Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC., 1991.*
2. Jansen, D. C., Shah, S. P. and Rossow, E., *Stress-Strain Results of Concrete from Circumferential Strain Feedback Control Testing, ACI Materials Journal, 92, 1995, 419-428.*
3. Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson,

- A. D., Lydon, F. D. and Barr, B. I. G., *Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-Phase Composite Model Approach, Cement and Concrete Composites, 20, 1998, pp.301-318.*
4. Smeplass, S., *High Strength Concrete: Mechanical Properties - Normal Density Concretes, SP-4 - Materials Design, Report 4.4, SINTEF, Trondheim, 1992.*
5. Taşdemir, M. A., Lydon, F. D. and Barr, B. I. G. *The Tensile Strain Capacity of Concrete, Magazine of Concrete Research, 48, 1996, pp. 211-218.*
6. Hijorth, L., *Development and Application of High-Density Cement-Based Materials, Phil. Trans. Roy. Soc., A310, London, 1983, pp. 167-173.*
7. Walraven, J. *The Evolution of Concrete, Structural Concrete, Journal of fib, P1, 1, pp. 3-11, 1999.*
8. FIP, *Condensed Silica Fume in Concrete, State of Art Report, 37p, Thomas Telford, London, 1988.*
9. Massazza, F., *Evaluation of Cements and Cementitious Systems: History and Prospects, Cement and Concrete Technology in the 2000s, Second International Symposium, TCMA, İstanbul, 2000, pp 3-28.*
10. Goldman, A. and Bentur, A., *Effects of Pozzolan 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, 1992, pp. 53-62.*
11. Goldman, A. and Bentur, A., *Properties of Cementitious Systems Containing Silica Fume or Nonreactive Microfillers, Advances in Cement-Based Materials, 1, 1994, pp. 209-215.*
12. Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Lydon, F. D. and Barr, B. I. G., *Effects of Silica Fume and Aggregate Size on the Brittleness of Concrete, Cement and Concrete Research, 26, 1996, 63-68.*
13. Bache, H. H., *Densified Cement Ultra-fine Particle-Based materials", Report 40, Aalborg Portland, Denmark, 1981, 35p.*
14. Richard, P. and Cheyrezy, M., *Composition of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, 25, 7, 1995, pp. 1501-1511.*
15. Karihaloo, B. L., *Fracture Mechanics and Structural Concrete, Longman Group Ltd., Essex, England, 1995.*
16. Birchall, J. D., Howard, A. J. and Kendall, K., *Flexural Strength and Porosity of Cements, Nature, 289, 1981, pp. 388-390.*
17. Alexander, M. G., *From Nanometers to Gigapascals Cementing Future", A University of Cape Town Publication, Inaugural Lecture, 1993, 23p.*
18. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W., *Characterization of High Performance Fiber*

- Reinforced Cement Composites-HPFRCC, Pre-Proceedings: 2nd International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-95), 2, Michigan, 1995, pp. 1-23.*
19. Matte, V. and Moranville, M., *Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes, Cement and Concrete Composites*, 21, 1999, pp. 1-9.
 20. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., *Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, Internal Report, Bouygues*, 1994, 15p.
 21. Özyurt, N., İlki, A., Taşdemir, C., Taşdemir M. A. and Yerlikaya, M., *Mechanical Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concretes with Various Steel Fiber Contents, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, ITU, Istanbul, Turkey, 2002, pp. 885-894.*
 22. Fritz, C. *Tensile strength of SIFCON (unpublished work)*
 23. Şengül, C., *Yüksek Oranda Çelik Tel İçeren Çimento Bulamacının (SIFCON) Mekanik Davranışı, Bitirme Çalışması, İTÜ İnşaat Fakültesi, 2002.*
 24. Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A., *Optimum Design of Cement-Based Composite Materials using Statistical Response Surface Method, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 2002, pp. 725-734.*
 25. Hillerborg, A., Modeer, M. and Peterson, P. E., *Analysis of Crack Formation and Crack Growths in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research*, 6, 1976, pp. 773-782.
 26. Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A., *Optimisation of Steel Fibre Reinforced Concretes by Means of Statistical Response Surface Method, Cement and Concrete Composites*, 2004, 11p. (in press).
 27. Rossi, P., *Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC): An Overview, Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, 2000, pp. 87-100.*
 28. Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D. H. and Moczko, A., *Fracture Properties and Acoustic Emission Response of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, 2000, pp. 491-500.*
 29. Betterman, L. R., Ouyang, C. ve Shah, S. P., *Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, Advanced Cement Based Materials*, 2, 1995, pp. 53-61.
 30. Banthia, N., Yan, N. ve Bindiganalive, V., *Development and Application of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, 2000.*
 31. Mobasher, B. and Yu Li, C., *Mechanical Properties of Hybrid Cement-Based Composites, ACI Materials Journal*, 1996, pp. 284-292.
 32. Vandewalle, L., *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, Chicago, 1996, pp. 496-505.*
 33. Kützing, L., *Use of Fiber Cocktails to Increase Ductility of High Performance Concrete, Annual Civil Eng. Report (LACER), LACER No. 2, Leipzig, 1997, pp. 125-133.*
 34. Kim, N. W., Saeki, N. ve Horiguchi, T., *Crack and Strength Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Early Ages, Transactions of the Japan Concrete Institute*, 21, 1999.
 35. Ekincioğlu, Ö., *Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ FBE, 2002.*
 36. Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F., *Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, İTÜ Dergisi, Cilt 1, Sayı 2, 2002, s. 125-144.*