

---

## YENİ KUŞAK SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICILARIN YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDEKİ İŞLEVLERİ

Mehmet Ali TAŞDEMİR  
İstanbul Teknik  
Üniversitesi,  
İnşaat Fakültesi  
İstanbul, Türkiye

Fikret BAYRAMOV  
İstanbul Teknik  
Üniversitesi,  
İnşaat Fakültesi  
İstanbul, Türkiye

Mehmet YERLİKAYA  
Beksa Çelik Kırık Sanayi  
ve Ticaret A.Ş.  
İzmit, Türkiye

### ÖZET

Son yirmi yıl içinde, yüksek çekme dayanımına, yüksek enerji yutma kapasitesine ve yüksek basınç dayanımına sahip Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler (YPLÇK) geliştirildi. Bu betonların üretiminde yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların ve ultra incelikteki mineral katkıların birlikte kullanılması etkili oldu. Böylece, su/çimento oranları çok düşük ve boşlukları azaltılmış, çelik liflerle sünekliği artırılmış olan yeni malzemeler elde edilmiştir. Çok düşük poroziteleri, bu tip betonlara önemli durabilite ve düşük zararlı iyon taşıma özellikleri sağlamakta ve bunları beton yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yeni bir teknik için potansiyel olarak uygun hale getirmektedir. Sunulan bu çalışma, yüksek dayanımlı/yüksek performanslı betonlar ile homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP), büyük kusurlardan arındırılmış (BKA) çimento, YPLÇK, Reaktif Pudra Betonları (RPB), yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON), kendiliğinden yerleşen beton (KYB) gibi bazı yeni çimento esaslı kompozitleri gözden geçirmektedir.

## 1. GİRİŞ

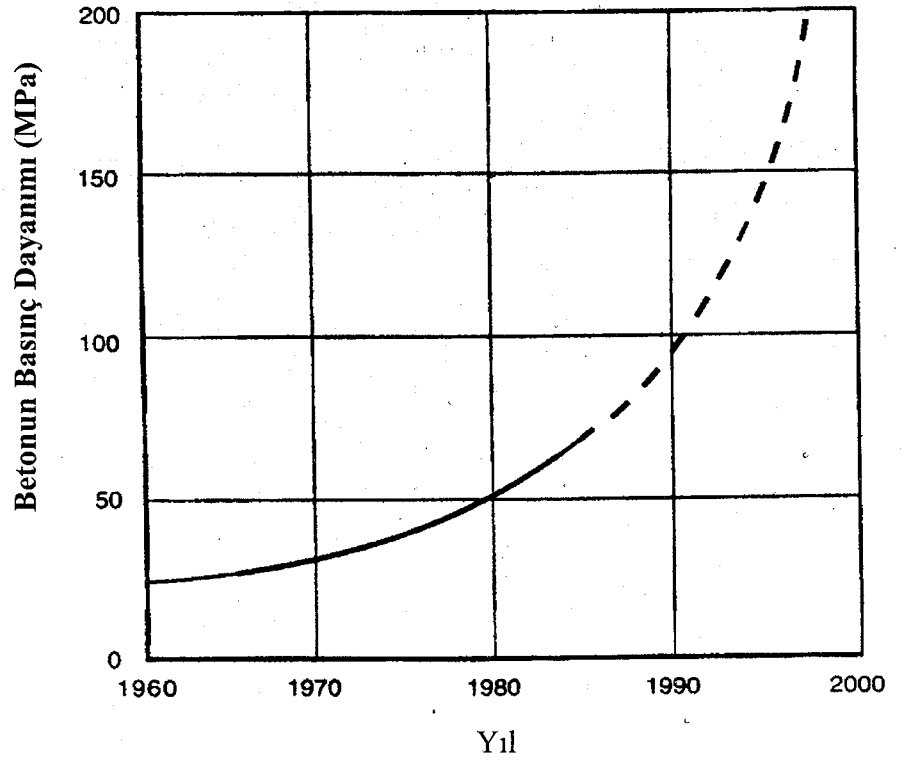
Son yıllarda, yüksek performanslı beton olarak tanımlanan evrime paralel olarak önemli gelişmeler kaydedildi. Bu betonlar, yüksek dayanımla birlikte üstün durabiliteye sahiptir. Ancak, bu malzemeler normal betona göre daha gevrek davranış gösterirler ve bu yüzden tokluğu arttırmak için çelik lifler eklenir. Bu betonların potansiyel kullanımları henüz oluşmaktadır ve özellikle uzun dönem özelliklerini değerlendirmek için daha fazla çalışma gerekmektedir. Böyle malzemelere, binaların güçlendirilmesine yönelik laboratuvar deneylerinde başarı sağlanmakta ve depremle ilgili potansiyel kullanımlarının araştırılması gerekmektedir. Son yıllarda, beton teknolojisinde inanılması güç gelişmeler kaydedildi. Sadece 30 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa idi [1]. Böyle bir beton, küp basınç dayanımları 200-800 MPa arasında, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık  $30000 \text{ J/m}^2$  olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, şu anda gerçekten oldukça düşük dayanımlı malzeme olarak kabul edilebilir [2]. Beton teknolojisinde söz konusu yüksek dayanımlı bu malzemeler Reaktif Pudra Betonları (RPB) olarak adlandırılırlar ve dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliğe sahiptirler. Süneklikleri normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazladır [3-7]. Düşük porozite değerleri bu betonlara önemli durabilite ve düşük geçirimsizlik özellikleri kazandırır. Bunlar, çeşitli iklim koşullarının etkisindeki bazı yapılar için potansiyel olarak uygun malzeme niteliği sağlarlar [6,7].

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, durabilite iyileştirilir ve dayanım yükseltilir. Silis dumanı veya diğer bir deyişle mikrosilika, silis ve ferrosilis endüstrilerinin bir yan ürünüdür; 1950'lerden beri betonun özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu tanelerin etkili olabilmesi için beton içinde iyi bir dağılım gereklidir ve bunu da yeni kuşak bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlamak olasıdır [8,9]. 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 süresiz olmalıdır. Ayrıca, çok yüksek dayanımlara erişmek için karışımdaki su miktarını azaltmak gerekmekte, sünekliği arttırmak için ise kısa kesilmiş çelik teller eklenmekte ve sıcaklık yükseltılarak basınç altında sertleştirme süreci uygulanmaktadır.

Burada sunulan çalışmanın esas amacı, yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların da bir uygulaması olarak yeni çimento esaslı malzemelerin deprem bölgelerinde hasarlı betonarme elemanların güçlendirilmesindeki olası kullanımını sergilemektir. Pratikte, bu malzemeler bazı stratejik yapılarda, beklenmedik yüklerin etkisindeki yapılarda ve sanayi atıklarının depolanması için inşa edilen yapılarda kullanılabilir.

## 2. BETONUN EVRİMİ

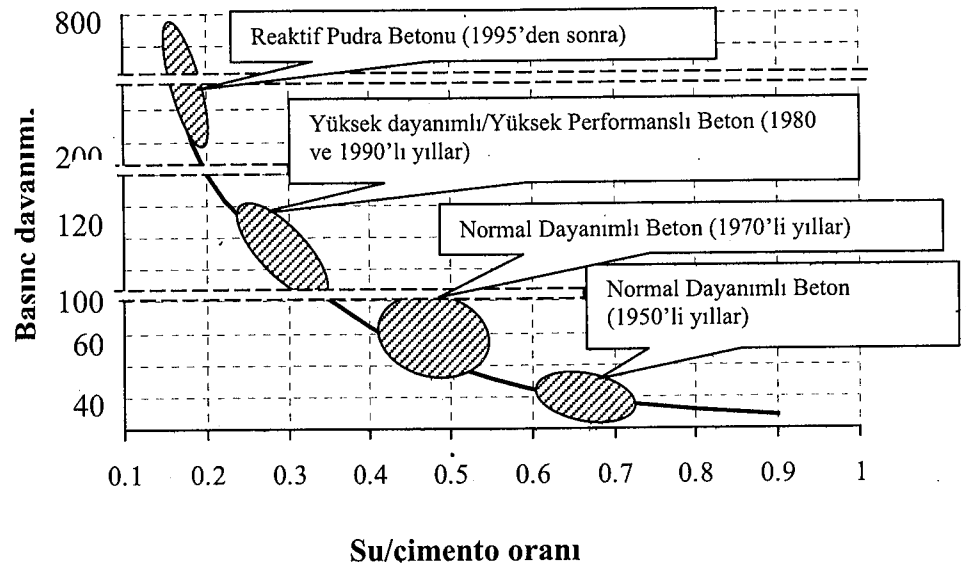
Şekil 1'de görüldüğü gibi 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 25 MPa, 1970'li yılların başında 40 MPa iken, yüksek yapıların yaygın hale gelmesi ve Kuzey Denizi'nde petrol aramalarının başlaması dolayısıyla hem dayanımın hem de dürabilitenin ön plana çıkmasıyla en yüksek beton basınç dayanımı 70 MPa'ı aşmıştır. Yine aynı şekilden görüldüğü gibi 200 MPa'ı aşan beton basınç dayanımı 2000 yılından önce Breen'in tahmin ettiği şekilde gerçekleşmiştir.



Şekil 1. Geçen yüzyılın sonuna doğru Breen tarafından tahmin edilen beton dayanımının yıllara göre değişimi [2].

Şekil 2’de görüldüğü gibi 1950’li yıllarda betonda su/çimento oranı 0.60-0.70 aralığında değişirken, 1970’li yıllarda akışkanlaştırıcıların devreye girmesiyle bu aralık 0.40-0.55’ye düşmüş, 1980 ve 1990’lı yıllarda ise süperakışkanlaştırıcılar sayesinde söz konusu su/çimento oranı 0.25-0.35 aralığına inmiştir.

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 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 2). Daha sonra su/çimento oranını 0,20’nin altına düşürerek, yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar, kısa kesilmiş yüksek dayanımlı çelik teller ve sıcak su kürü ve basınçlı su buharı kullanarak beton basınç dayanımları 200 MPa’ın üzerine çıkarılmıştır.



Şekil 2. Betonun evrimi kapsamında basınç dayanımı-su/çimento ilişkisi [10]

---

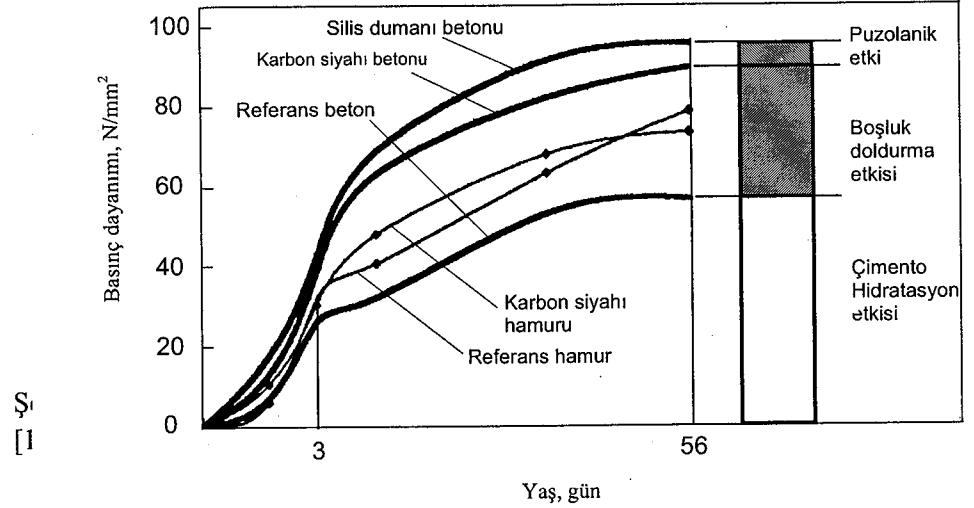
### 3. YD/YPB ÜRETİMİNDE İKİ ÖNEMLİ GELİŞME

Son yıllarda, Yüksek Dayanımlı/Yüksek Performanslı Beton (YD/YPB) üretiminde iki önemli gelişme oldu. Bunlardan biri betonun boşluklarını tıkamak için puzolanik özeliğe sahip ultra incelikteki mineral katkıların kullanılması, diğeri ise bu mineral katkıları beton içinde homojen biçimde dağıtmak için yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların yaygın hale gelmesidir.

#### 3.1. Betonda Boşlukları Doldurmanın Önemi

Silis dumanı (SD) içeren betonların özelliklerini gözönüne alarak SD'nın iki şekilde kullanıldığını akılda tutmak gerekir: a) betonda dürabilitenin yükseltilmesi ve hidratasyon hızının azaltılması gibi nedenlerde çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak, çimento ile yerdeğıştiren bir malzeme olarak kullanılması, b) hem taze ve hem de sertleşmiş halde beton özelliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır [11].

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 betonun dayanımı ve dürabilitesi artar. Ancak, SD'nın betonda kullanılmasındaki problem fiyatıdır; fiyatı, çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır ve her yerde bulunması güçtür. Diğeri taraftan, bazı stratejik yapılarda kullanılacak yüksek performanslı beton ve harçların uzun süreli performanslarında oluşan gelişme de hesaba katılmalıdır [12-15].



Şekil 3'de görüldüğü gibi, 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 [8,9,13-16].

Şekil 3'de görülen referans betonunun bileşimi Tablo 1'de verilmektedir. Karbon siyahı (veya silis dumanı) içeren veya içermeyen betonlar ile çimento hamurlarının basınç dayanımları Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Referans betonunun bileşimi [15]

19 mm'lik agrega	1106 kg/m <sup>3</sup>
5 mm'lik agrega	548 kg/m <sup>3</sup>
Bağlayıcı (çimento veya %18 filler içeren çimento)	560 kg/m <sup>3</sup>
Su	186 kg/m <sup>3</sup>
Superakışkanlaştırıcı	9 kg/m <sup>3</sup>

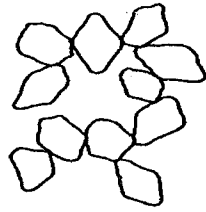
Tablo 2 Referans betonu ve bağlayıcı hamurların mekanik özellikleri [15]

	28 günlük basınç dayanımı, MPa		
	Referans	Karbon siyahı	Silis dumanı
Beton	70,0	81,8	91,1
Bağlayıcı hamur	86,4	67,8	86,8

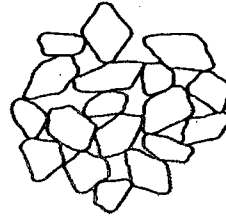
### 3.2. Homojen Dağılı Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP)

Çimentolu malzemelerin bu yeni sınıfı Danimarka'daki Aalborg Portland çimento fabrikası tarafından üretilmiştir [17,18]. DSP bağlayıcılar Şekil 4'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.

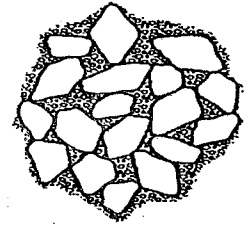
16 mm'lik kırılmış granit agregasına sahip normal DSP'nin basınç dayanımı yaklaşık 130 MPa'dır. Eğer kalsine olmuş boksit gibi dayanımı yüksek agregalar kullanılırsa basınç dayanımı 270 MPa'ya kadar ulaşabilir. DSP esaslı malzemeler ise çok gevrek olup normal Portland çimentosu hamurundan da gevreklerdir [17,18].



(a) Çimento hamuru



(b) Süperakışkanlaştırıcı



(c) DSP hamuru

Şekil 4. Topaklanmış Portland çimentosu parçacıkları (a) sadece süperakışkanlaştırıcı katkılarla dağıtılabılır (b). DSP hamurundaki silis dumanının boşlukları doldurmasıyla elde edilen yoğun bir diziliş (c) [17]

---

### 3.3. Yüksek Performanslı Betonların Sınıflandırılması

Yüksek Performanslı Beton (YPB) dürabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur [19]. ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programına (SHRP-C-205) göre [20] Yüksek Performanslı Beton aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- i) YPB aşağıdaki özelliklerden birine sahip olmalıdır:
  - 4 saatlik basınç dayanımı  $\geq 17,5$  MPa ise çok erken dayanımlı beton,
  - 24 saatlik basınç dayanımı  $\geq 35$  MPa ise çok yüksek erken dayanımlı beton,
  - 28 günlük basınç dayanımı  $\geq 70$  MPa ise çok yüksek dayanımlı beton,
- ii) YPB'nin dürabilite çarpanı %80'den büyük olmalıdır (donma-çözülmenin 300 tekrarından sonra),
- iii) YPB'nin su/bağlayıcı oranı 0,35'den küçük olmalıdır.

### 3.4. Reaktif Pudra Betonları (RPB)

RPB'ler üstün mekanik ve fiziksel özelliklere, mükemmel sünekliğe ve oldukça düşük geçirimsizliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir [2,21]. 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  $30000 \text{ J/m}^2$  ve birim ağırlıkları 2500-3000  $\text{kg/m}^3$  aralığında değişen yeni kuşak betonları temsil etmektedir [22]. Reaktif Pudra Betonunun iç yapısı daha sıkı tane dizilişine sahip olup, mikroyapısı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerin varlığıyla güçlendirilmektedir.

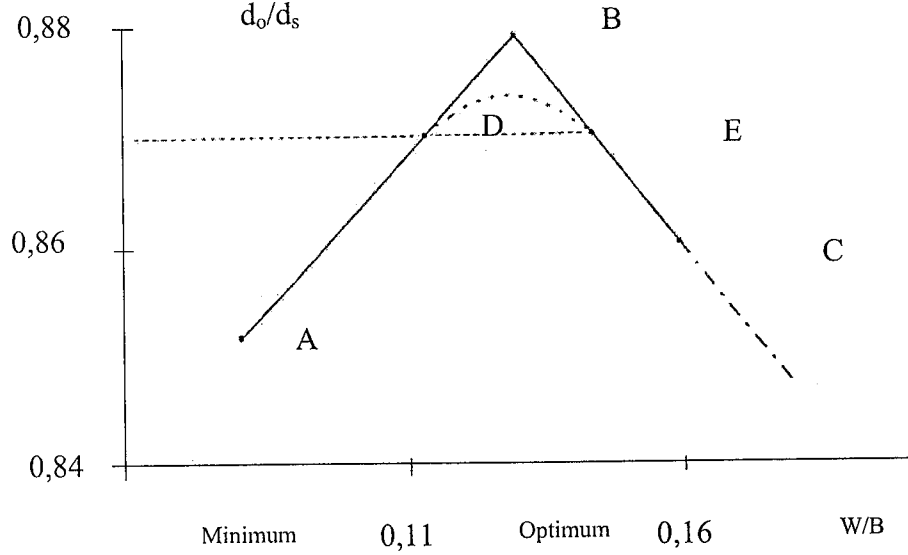
Bu dikkate değer performansa aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir:

- Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki bütün tanelerin dağılımının hassas biçimde ayarlanması,
- Betonun homojenliği için agrega tanelerinin en büyük boyutunun azaltılması,
- Betondaki su içeriğinin azaltılması,



- 
- Yüksek inceliğe sahip silis dumannın puzolanik özelliklerinden etkin biçimde yararlanılması,
  - Bütün bileşenlerin optimum bileşimi,
  - Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
  - Çok yüksek dayanımlara erişmek için basınç altında ve yükseltilmiş sıcaklık koşullarında sertleştirme [2,22].

Reaktif pudra betonlarında kullanılan agregaların boyutları çimentonunkine 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 mertebesindedir. İşlenebilme fazla miktarda kullanılan yeni kuşak bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlanmaktadır. Şekil 5'de görüldüğü gibi, gereken taneli karışımı karakterize eden bağıl yoğunluk parametresini ( $d_o/d_s$ ) kullanarak optimum su içeriği elde edilmiştir; burada  $d_o$  kalıp alınması aşamasındaki beton yoğunluğunu göstermektedir.  $d_s$  ise sıkıştırılmış olduğu varsayılan taneli karışımın katı yoğunluğunu ifade etmektedir. A noktasında, minimum su-bağlayıcı (S/B) oranında bağıl yoğunluk elde edilmektedir. S/B oranı arttıkça, hapsolmuş hava ilave suyla yer değiştirmektedir. B noktasında, karışımda hapsolmuş hava kalmamaktadır. S/B oranı tekrar artırıldığında  $d_o/d_s$  azalmaktadır (C noktası). İki optimum nokta bulunmaktadır; E noktasında, D noktasına kıyasla daha iyi bir mekanik performans elde edilmektedir; çünkü E noktasında, numune daha az hava, ancak hidrasyon sonrası kısmen katı fazla entegre olacak olan daha fazla su içermektedir [4].



Şekil 5. Bağıl yoğunluk - su/bağlayıcı (S/B) ilişkisi [4].

#### 4. YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT

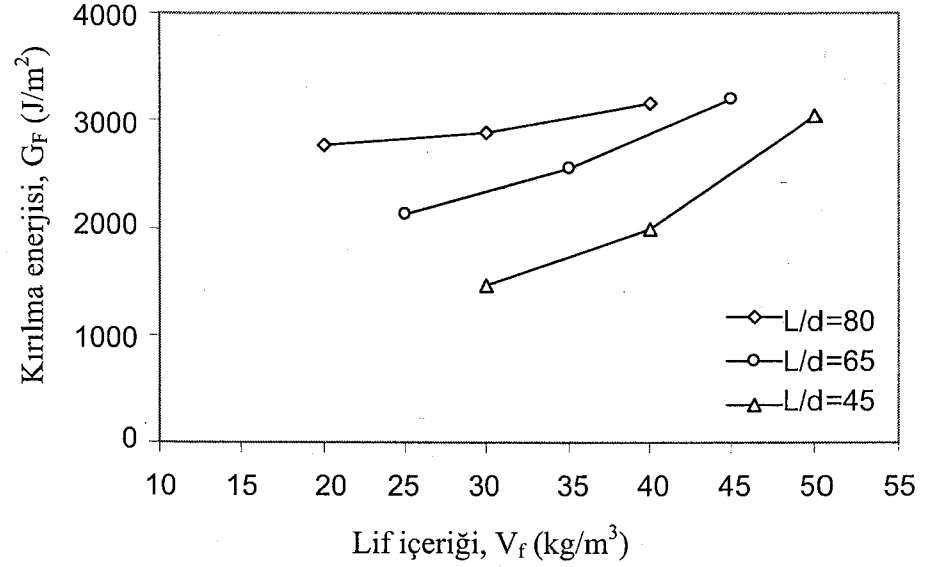
##### MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI

##### 4.1. Geleneksel ÇTDB'ların Mekanik Davranışı

Geleneksel ÇTDB'lar normal betonlara kıyasla, sünek davranışa neden olan yüksek çekme dayanımları ve yüksek enerji yutma kapasiteleri ile karakterize edilir. ÇTDB'ların çekme dayanımları ve tokluklarını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır: i) telin hacmi, narinliği, şekli ve dayanımı, ve ii) yalın betonun özellikleri. Lange-Kornbak ve Karihaloo [23] ÇTDB'ların kırılma enerjilerinin lif uzunluğunun karesi ile doğru orantılı, lif çapının kareköküyle de ters orantılı olduğunu göstermiştir.

Şekil 6 üç farklı narinlik için lif içeriğinin kırılma enerjisine etkisini göstermektedir. Uçları kancalı çelik tellerin belirli bir hacmi için, narinlik arttıkça kırılma enerjisi belirgin biçimde artmaktadır. Bu deneysel sonuçların normal dayanımlı matris ve çekme-kopma dayanımı  $1100 \text{ N/m}^2$  olan düşük karbonlu çelik

teller için geçerli olduğu göz önünde bulundurulmalıdır [24,25]. Şekil 6’da görüldüğü gibi, lif içeriği ve narinlik ana değişkenler olarak alınmıştır. Buradan, deneyi sonlama noktasının 5 mm. sehime karşılık gelen nokta olarak alınmasına karşın, kirişin enerjiyi yutma yeteneğinin yüksek olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 6. Geleneksel ÇTDB’lar için Lif içeriği-Kırılma enerjisi ilişkisi (Falkner ve diğ. [25]’nin deney sonuçları Bayramov ve diğ. [24] tarafından değerlendirilmiştir).

Kırılma enerjisi  $w \cdot (l/d)$  değişkeni kullanılarak gösterilebilir. Burada  $w = (\text{lif ağırlığı} \times 100) / (\text{beton ağırlığı})$  olup,  $l/d$  narinliktir. Kırılma enerjileri Falkner ve diğ. [25] tarafından yapılan ve üç deney serisine dayanan eğilme deneylerinden hesaplanmıştır. Bu değişken kırılma enerjisini temsil etmesi açısından oldukça kullanışlıdır;  $(G_F = 26.577 w \cdot (l/d) + 153)$  gibi bir lineer fonksiyon deneysel verilere uyarlanmış ve kırılma enerjisi  $153 \text{ J/m}^2$  ‘den (yalın beton)  $4371 \text{ J/m}^2$  ‘ye kadar bir aralık için yeterli bir korelasyon katsayısı olan  $0,74$  değeri elde edilmiştir.

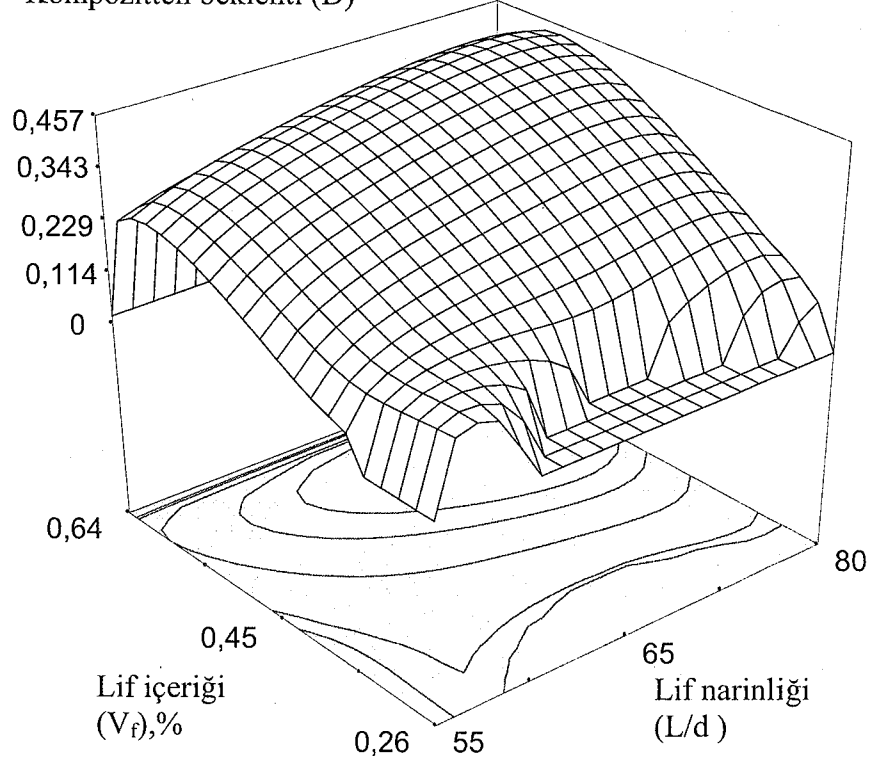
Kompozitlerde kullanılan çelik tellerin maliyeti uygulama açısından önemlidir. Bu yüzden, ekonomik bir karışım elde etmek için çelik lif hacmi minimize edilmelidir. Sayısal optimizasyon yöntemiyle bu gibi faktör veya tepkiler kombinasyonu optimize edilebilir. Bu amaçla, eğilmede çekme dayanımı ( $f_{st}$ ), karakteristik

uzunluk ( $l_{ch}$ ), eğilme dayanımı ( $f_{flex}$ ) ve çelik lif hacmi ( $V_f$ ) eşit önemde kabul edilerek aynı anda optimize edilmiştir. Burada  $f_{st}$ ,  $l_{ch}$  ve  $f_{flex}$  maksimize edilirken  $V_f$  minimize edildi. Gevrekliği gösteren malzemenin karakteristik boyu,  $l_{ch} = EG_F / f_{st}^2$  olarak ifade edilmektedir. Burada E betonun elastisite modülünü,  $G_F$  ise betonun kırılma enerjisini göstermektedir. Çok amaçlı optimizasyon çözümü Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu şekil, tasarım değişkenlerinin optimal değerlerinin  $V_f = \% 0,558$  ve  $L/d = 75,87$ , ( $L = 60$  mm,  $d = 0,791$  mm, ve  $V_f = \% 0,558$ ) olduğunu yansıtmaktadır. Tahmin edilen tepki değerleri ve ilgili belirsizlikler (% 95 güvenlik düzeyinde) Tablo 3'de verilmiştir [26].

Tablo 3. Tasarım değişkenlerinin optimal değerleri [26].

$V_f$ , %	L/d	$l_{ch}$ , mm	$f_{st}$ , MPa	$f_{flex}$ , MPa	$G_F$ , N/m	E, GPa	$f'_c$ , MPa
0,558	75,87	$3359 \pm 31$ 0	$6,8 \pm 0,1$	$9,4 \pm 0,5$	$3125 \pm 16$ 5	$48,6 \pm 0,3$	$65 \pm 3,8$

### Kompozitten beklenti (D)



Şekil 7.  $f_{st}$ ,  $l_{ch}$  ve  $f_{flex}$ 'nin maksimum, çelik lif hacminin ( $V_f$ ) ise aynı anda minimum yapılması halinde kompozitten beklentiye (D) ait tepki yüzeyi [26].

#### 4.2. SIFCON

SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete= Yüksek oranda kısa kesilmiş çelik lif içeren çimento harcı bulamacı), lif hacmi %5' ten %20' ye kadar değişen özel bir lif donatılı kompozittir. Ancak geleneksel lif donatılı kompozitlerde lif hacmi genellikle %2 ile sınırlıdır. Bu uygulamada matris, kaba agrega içermemektedir. Karışım; çimento, çimento-uçucu kül, çimento silis dumanı, çimento-kum-uçucu kül veya çimento-kum-silis dumanı içerebilir [27]. SIFCON'un çekme davranışı Fritz [28] tarafından incelenmiştir; değişkenler, i) %5-%13.5 aralığında lif hacmi, ii) 0,35-0,45 arasında su-çimento oranı'nı içermektedir. Çalışmada kanca uçlu teller kullanılmıştır. Tablo 4'de görüldüğü gibi betonun kırılma enerjisi SIFCON'unkine yakın olan  $100 \text{ J/m}^2$  değeri alınır, geleneksel betondan 1340 kat daha fazla enerji

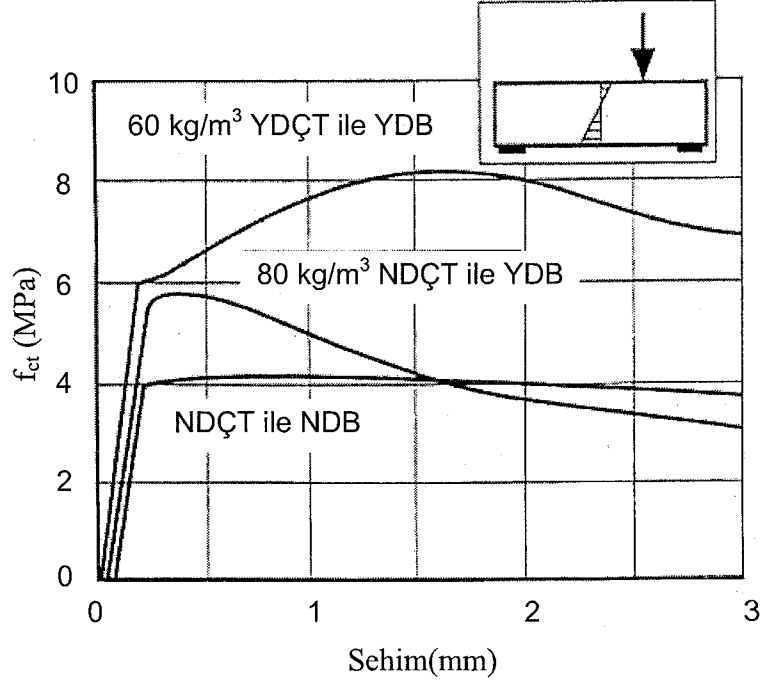
yuttuğu görülebilir. SIMCON (Slurry Infiltrated Mat Concrete=Yüksek oranda ađ şeklinde çelik tel içeren çimento harcı bulamacı) üretiminde ise, çelik lif yerine önceden kalıba yerleştirilmiş ađ şeklindeki çelik tel kullanılmaktadır.

Tablo 4. SIFCON'un mekanik özellikleri [28].

Su-çimento oranı (s/ç)	Lif hacmi (%)	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Şehim (mm)	Kırılma enerjisi (J/m <sup>2</sup> )
0,45	8,5	9,2	19,0	30500
0,35	8,5	12,5	14,1	57100
0,45	13,5	14,1	34,9	134100

#### 4.3. Yüksek Dayanımlı Betonun (YDB) Mekanik Davranışına Çelik Lif Dayanımının Etkisi

YDB'un Mekanik Davranışına Çelik Lif Dayanımının etkisi Şekil 8'de gösterilmiştir. Alttaki eğri normal dayanımlı çelik lif (çekme-kopma dayanımı 1200 MPa) ile üretilen Normal Dayanımlı Betonun (NDB) mekanik davranışını göstermektedir. Ortadaki eğri 80 kg/m<sup>3</sup> normal dayanımlı çelik lif içeren YDB kirişinin davranışını göstermektedir. Üstteki eğri ise 60 kg/m<sup>3</sup> yüksek dayanımlı lif (çekme-kopma dayanımı 2000 MPa) içeren YDB kirişinin davranışını göstermektedir. Buradan, yüksek dayanımlı çelik telli YDB kirişinin belirgin bir biçimde sünek davranış gösterdiği sonucuna varılabilir [2].

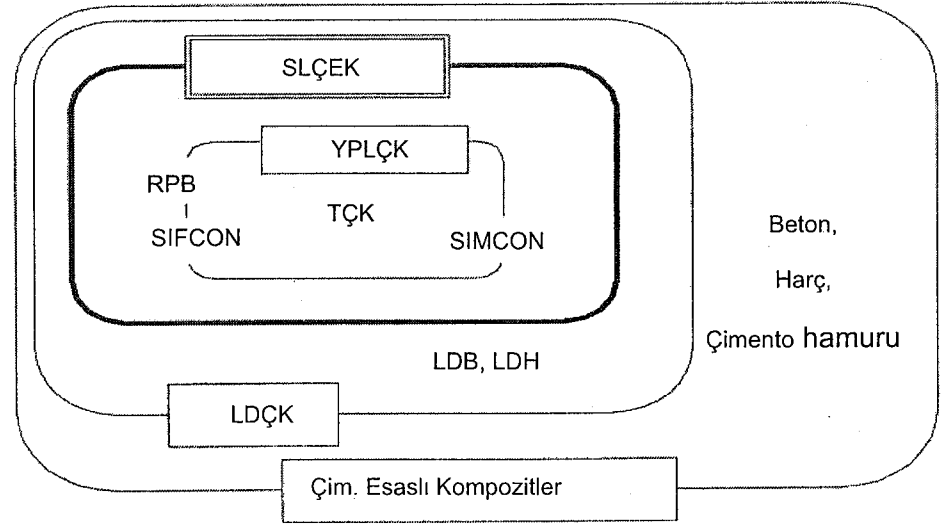


Şekil 8. Farklı tipteki çelik tellerle üretilmiş beton kirişlerin yük-sehim eğrileri [2]

#### 4.4. Sünek Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (SLÇEK)

SLÇEK çekme ve basınç altında belirgin sünekle birlikte sehim sertleşmesi ve eğilmede karmaşık çatlak yapısı gösterir. SLÇEK, Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitlerin (LDÇK) karmaşık çatlama gösteren bir alt sınıfıdır. Karmaşık çatlama süneklik, tokluk, kırılma enerjisi, şekil değiştirme kapasitesi ve çekme, basınç ve eğilme altındaki şekil değiştirme kapasitesi gibi özelliklerin gelişmesine yol açmaktadır.

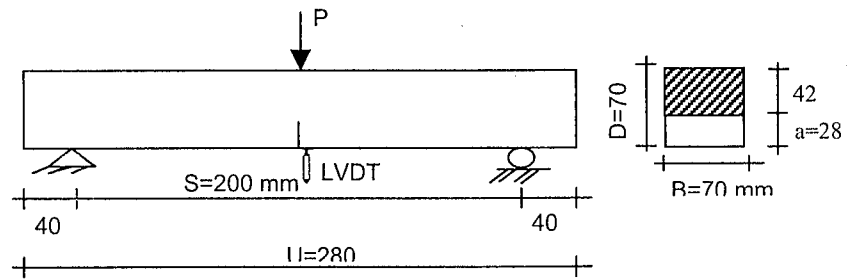
Şekil 9'da görüldüğü gibi, SLÇEK, YPLÇK sınıfının bir üst sınıfıdır. LDÇK alt sınıf olarak lif takviyeli beton (LDB) ve lif takviyeli harç (LDH) gibi tüm LDÇK sınıflarını kapsar. Mühendislik Özellikleri Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (TÇK), bileşimi mikromekanik esasına göre optimize edilmiş özel bir YPLÇK tipidir. TÇK tipik olarak % 3'den daha fazla bir çekme şekil değiştirme kapasitesine sahiptir. Mikroyapı optimizasyonu sonucunda TÇK'deki lif içeriği %2-3'den daha az olacak şekilde sınırlandırılmıştır [29].



Şekil 9. Çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması [29]

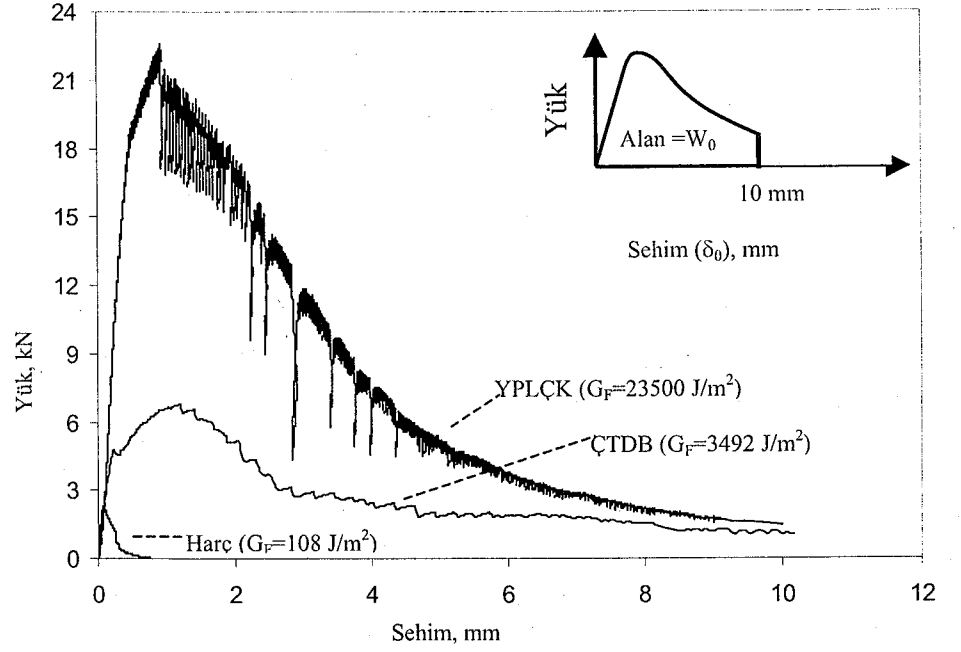
#### 4.5. Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler (YPLÇK),

Şekil 10'da YPLÇK'de kırılma enerjisi deney düzeni gösterilmektedir. Şekil 11'de ise Harç, Gelenksel ÇTDB ve YPLÇK'de yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu şekillerin incelenmesinden görüldüğü üzere YPLÇK'nin kırılma enerjisi harcının yaklaşık 220 ve gelenksel ÇTDB'ninkinin ise 7 katıdır. Böyle bir YPLÇK'nin elde edilmesinde yukarıda belirtildiği gibi ultra incelikteki mineral katkının, yeni kuşak süperakışkanlaştırıcının ve sıcak kürün etkisi önemlidir.



Şekil 10. YPLÇK'de kırılma enerjisi deney düzeninin şematik gösterimi [30].

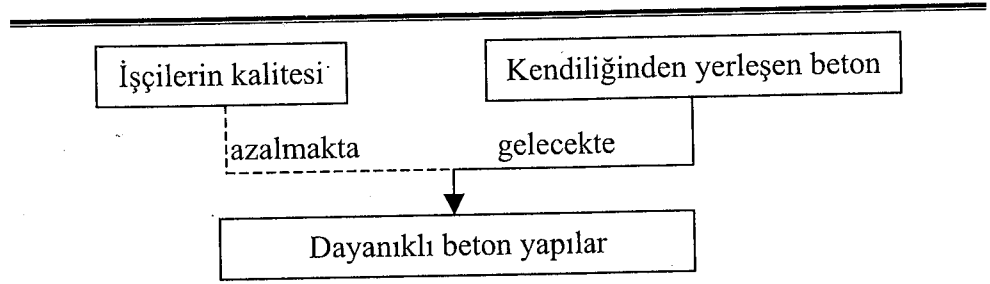




Şekil 11. Harç, Gelenksel ÇTDB ve YPLÇK'de yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması [30].

#### 4.6. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

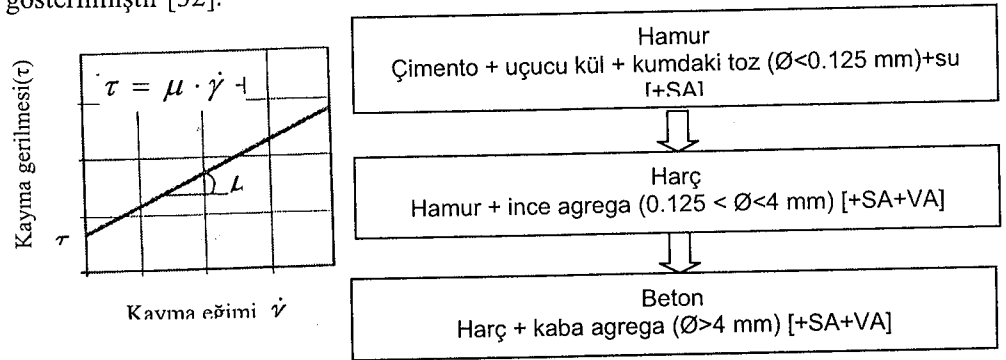
KYB taze haldeyken sıvı şeklinde davranış gösteren bir beton olarak düşünülebilir. KYB kullanılarak, vibrasyon nedeniyle oluşan gürültü ve betonun yerleştirme maliyeti azaltılabilir. Aynı zamanda inşaat hızını arttırması da büyük ölçüde tercih nedenidir. İnşaat sektöründeki kalifiye işçi sayısının yetersizliğinden dolayı, KYB kullanımı artmaktadır. KYB'nin vibrasyon gerektirmeden kalıbın her tarafına yerleşmesinden ötürü, taze betonun yerleştirilmesi sırasında yaşanan zorlukların üstesinden gelinebilir. KYB'nin gerekliliği 1986 yılında Okamura [31] tarafından önerilmiştir. KYB kullanımına yönelten etkenler şematik olarak Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. KYB kullanımına yönelten etkenler [31]

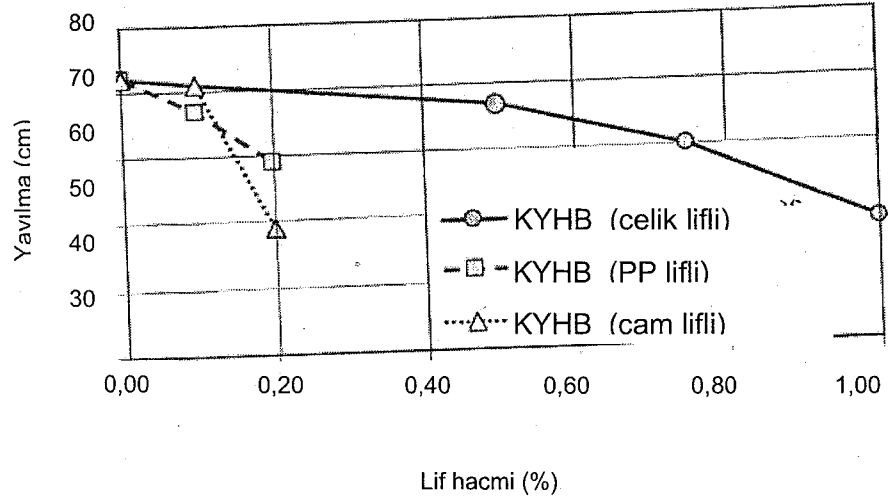
KYB üç taze beton özeliğinin kombinasyonunu sağlamalıdır: i) doldurma yeteneği, ii) ayrışmaya karşı direnç, ve iii) geçiş yeteneği.

Taze betonu tanımlamak için Bingham Modeli kullanılır. Model,  $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$  olarak ifade edilebilir. Burada  $\tau$  = kayma gerilmesi,  $\tau_0$  = akma limiti, ve  $\mu$ : viskozite katsayısıdır. KYB için hedeflenen reolojik özellikler uygun bir plastik viskoziteyle birlikte düşük akma limitidir. KYB'nin viskozitesi bu model bağlamında Şekil 13'de gösterilen doğrunun eğimiyle tanımlanabilir. Hamur hacminin artmasıyla birlikte akma limiti (kayma dayanımı) ve viskozitenin azaldığı gösterilmiştir [32].



Şekil 13. a) Bingham Modeli, ve b) KYHB (kendiliğinden yerleşen hafif beton) elde edilmesi için akış şeması, SA=süperakışkanlaştırıcı, and VA=Viskozite artırıcı katkı [32]

Şekil 14'de görüldüğü gibi, hacimce yaklaşık % 0.2 oranında PP (polipropilen) lif veya CL (cam lifi) kullanımı yayılma çapı değerinde yaklaşık % 34 azalmaya neden olmaktadır, ancak, çelik liflerin etkisinin daha az olduğu söylenebilir. PP lif ve CL'nin daha çok özgül yüzeye sahip olduğu unutulmamalıdır. Böylece, KYHB'un işlenebilirliğinin lif tipine çok sıkı bağlı olduğu sonucuna varılabilir [32].



Şekil 14. KYHB'un yayılma davranışına lif tipinin ve içeriğinin etkisi [32]

## SONUÇLAR

Günümüzde giderek daha yaygın uygulama alanı bulan geleneksel ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonların performansa göre tasarımlarının mühendislerce kabul görmeye başlaması gelecekte bu alanda önemli gelişmelerin olabileceğini göstermektedir. Bu malzemelerin üretimi özellikle Kendiliğinden yerleşen ÇTDB'ların gelecekte daha yaygın kullanılabilmesi beklenmektedir. Böylece, hem yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların hem de ultra incelikteki mineral katkıların işlevleri önem kazanacaktır. Beton yapıların güçlendirilmesi için de yeni bir teknik olarak kullanılan ve uygun bir potansiyele sahip YPLÇK'ler konusunda eldeki veriler ışığında aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

1. Yüksek performanslı betonlar, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı normal betonlardan daha dirençlidir. Birçok yapıda kullanılan betonun dayanımından çok dürabilitesi önemli olduğundan, tasarım dürabilite koşullarına uygun olarak yapılmalıdır.
2. Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), günümüzde kullanılan güçlendirme tekniklerine göre kaliteyi belirgin biçimde arttırabilirler. KYB'ların özellikleri, mevcut yapıların onarım ve güçlendirilmesi için uygun kalmaktadır.

- 
- 
3. Geleneksel ÇTDB'ların, kendiliğinden yerleşen ÇTDB'ların ve yüksek performanslı betonların uygulama alanlarının gelecekte sadece çeşitli prefabrike elemanlar, stratejik amaçlı koruyucu yapılar, endüstriyel atıkları depolamak için çeşitli yapılar ve mevcut yapıların onarım ve güçlendirilmesi gibi uygulama alanlarıyla sınırlı kalmayıp daha geniş uygulama alanlarına sahip olacakları beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Alexander, M.G., "From Nanometres to Gigapascals Cementing Future", A University of Cape Town Publication, Inaugural Lecture, March 17, 1993, 23p.
2. Walraven, J., "Structural Concrete", *Journal of fib*, Vol.P1, No.1, March 1999, pp.3-11.
3. Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., and Aitcin, P-C., "Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes", *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.4, July-August 1997, pp.286-290.
4. Richard, P., and Cheyrezy, M., "Composition of Reactive Powder Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.7, 1995, pp.1501-1511.
5. Dugat, J., Roux, N., and Bernier, G., "Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes", *Materials and Structures*, Vol.29, May 1996, pp.233-240.
6. Feylessoufi, A., Villieras, F., Michot, L.J., De Donato, P., Cases, J.M., and Richard, P., "Water Environment and Nanostructural Network in a Reactive Powder Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol.18, 1996, pp.23-29.
7. 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*, Vol.21, 1999, pp.1-9.
8. Taşdemir, M.A., Tasdemir, 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*, Vol.20, 1998, pp.301-318.
9. Tasdemir, C., Tasdemir, M.A., Mills, N., Barr, B.I.G., and Lydon, F.D., "Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Postpeak Response of Concrete in Bending", *ACI Materials Journal*, Vol.96, Jan.-Feb., 1999, pp.74-83
10. Taşdemir M.A. ve Bayramov F., "Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı", *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, Cilt 1, Sayı 2, 125-144, Ekim 2002.
11. "Condensed Silica Fume in Concrete", *FIP State of Art Report*, Thomas Telford, London, 1988, 37p.
12. Massazza, F., "Evaluation of Cements and Cementitious Systems: History and Prospects", *Cement and Concrete Technology in the 2000s, Second International Symposium*, 6-10 September 2000, TCMA, Istanbul, pp.3-28.
13. Goldman, A., and Bentur, A., "Effects of Pozzolanic and Nonreactive Microfillers on Transition Zone in High-Strength Concretes", *Interfaces in Cementitious Composites*, J.C. Maso, ed., *Proceedings, RILEM, E and FN Spon*, London, 1992.

14. Goldman, A., and Bentur, A., "Properties of Cementitious Systems Containing Silica Fume or Nonreactive Microfillers", *Advanced Cement-Based Materials*, Vol.1, 1994, pp.209-215.
15. Goldman, A., and Bentur, A., "The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength", *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, 1993, pp. 962-972.
16. Tasdemir, C., Tasdemir, 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*, Vol.26, 1996, pp.63-68.
17. Bache, H.H., "Densified Cement Ultra-fine Particle-based Materials", Report 40, Aalborg Portland, Denmark, 35p.
18. Karihaloo, B.L., "Fracture Mechanics and Structural Concrete", Addison, Wesley Longman, Essex, England, 1995.
19. Shah, S.P., and Ahmad, S.H. (Editors), "High Performance Concretes and Applications", Edward Arnold, London, 1994, 403pp.
20. SHRP-C/FR-91-103, "High Performance Concretes, a State of the Art Report", Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC, 1991.
21. Alaei, F.J., "Retrofitting of Concrete Structures using High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC)", Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff, 220 pp.
22. Richard, P., and Cheyrez, M.H., "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength", Bouygues, Internal Report, 1994. 15p.
23. Lange-Kornbak, D., and Karihaloo, B.L., "Design of Fibre-Reinforced DSP Mixes for Minimum Brittleness", *Advanced Cement Based Materials*, Vol.7, 1998, pp. 89-101.
24. Bayramov, F., Tasdemir, C., and Tasdemir, M.A., "Optimum Design of Cement-Based Composite Materials using Statistical Response Surface Method", 5th International Congress on Advances in Civil Engineering, 25-27 September 2002, Istanbul, Turkey, Vol.2, pp 725-734.
25. Falkner, H., Teutsch, N., and Klinkert, H., "Leistungsklassen von stablfaserbeton", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1999, 36 pp.
26. Bayramov, F., Tasdemir, C., and Tasdemir, M.A., "Optimisation of Steel Fibre Reinforced Concretes by Means of Statistical Response Surface Method", *Cement and Concrete Composites*, 26, 665-675, 2004
27. Balaguru, P.N., and Shah, S.P., "Fiber-Reinforced Cement Composites", McGraw-Hill, Inc., 1992, 530pp.
28. Fritz, C., "Tensile testing of SIFCON", In *First International Workshop on HPFRCCs*, 23-26 June 1991, Mainz, RILEM, Eds. H.W.Reinhardt and A.E. Naaman, pp. 518-528.
29. JCI-DFRCC Committee, "DFRCC Terminology and Application Concepts", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No.3, Nov. 2003, pp.335-340.
30. Güvensoy G., Bayramov F., İlki A., Şengül, C., Taşdemir M.A, Yerlikaya M. and Kocaturk, N. "Mechanical Behaviour of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concretes under Cyclic Loading Condition", *International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 13-15 September 2004, Kassel, Germany.
31. Okamura, H., and Ouchi, M., "Self-Compacting Concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Vol.1, No.1, April 2003, pp. 5-15.
32. Haist, M., Mechtcherine, V., and Müller, H.S., "High Performance Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete with and without Fiber Reinforcement", In *6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete*, Eds. G. König et al., June 2002, Leipzig, Vol. 2, pp. 1005-1016.

