

YENİ NESİL YÜKSEK PERFORMANSLI BETON: REAKTİF PUDRA BETONU

Doç. Dr. Halit YAZICI* ve Araş. Gör. (İnş. Yük. Müh.) Çağlar YALÇINKAYA*

*Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

1. Giriş

Yaygın kanının aksine beton teknolojisi sürekli gelişmekte olan bir alandır. Son yıllarda akışkanlaştırıcı katkıları üzerinde yapılan yoğun çalışmalar bu katkıların özelliklerinin geliştirilmesine yol açmış böylece çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip çimentolu kompozit malzemelerin üretimi hız kazanmıştır. Ayrıca geliştirilen yeni tasarım yöntemleri bu düşük su/bağlayıcı (S/B) oranlı ürünlerin daha hassas tasarımına imkan tanımaktadır. Reaktif pudra betonu, basınç dayanımı 200 MPa değerini aşan ve özel uygulamalar başta olmak üzere ileride kullanımının yaygınlaşması beklenen bir kompozit türüdür. Zira yüksek dayanımlı agregalar ve çelik lifler gibi kompozitin özelliklerini geliştiren malzemeler istenilen yüksek dayanıma ulaşılmasını sağlamaktadır. Bir başka deyişle, Reaktif Pudra Betonu (RPB) üstün dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip çimento esaslı bir kompozit malzemedir. Bu malzeme ilk olarak 1990'larda Fransa'da Bougues Laboratuvarı'nda geliştirilmiştir. Reaktif pudra betonları ile ilgili ilk çalışmalar Richard ve Cheyrezy tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda betonların tasarımı yapılmış ve üretimi ile mekanik özellikleri açıklanmıştır. Yapılan çalışmalarda RPC 200 ve RPC 800 olmak üzere esasta aynı fakat üretiminde ve ısı işlemlerinde bazı farklılıklar bulunan iki değişik malzeme üretilmiştir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

RPB'nin üretim amaçlarını ve avantajlarını aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür:

- 1) Yapısal olarak çelik malzemesiyle yarışabilecek güce sahiptir. Böylelikle narin prefabrik elemanların üretimine imkan tanımaktadır. Çok yüksek basınç, çekme ve kesme mukavemetleri sergiler. İnce kabukların ve plakların üretimine uygundur.
- 2) Çelik liflerle iyi aderansı sayesinde yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesine sahiptir. Böylelikle deprem etkileri altında yapıların performansını arttırmak için kullanılabilme potansiyeli mevcuttur.
- 3) Uzun yıllar hizmet verebilecek bir malzemedir. Çok düşük su/çimento oranı ($\approx 0,20$), ve çok düşük boşluk miktarı ile yapı elemanına su ve zararlı iyonlar içeren kimyasalların girişini kısıtlamaktadır. Böylelikle donma-çözülme, ıslanma-kuruma gibi olumsuz yıpratıcı etkilere karşı kalıcılığı yüksektir. Ayrıca RPB'ler nükleer atıkların depolandığı alanlarda da kullanıma uygundur.
- 4) Lif takviyesi ile sünek davranış sergilemektedir. Ana çekme gerilmeleri dışındaki gerilmelere karşı mukavimdir. Bu açıdan ikincil donatıların azaltılması mümkündür.

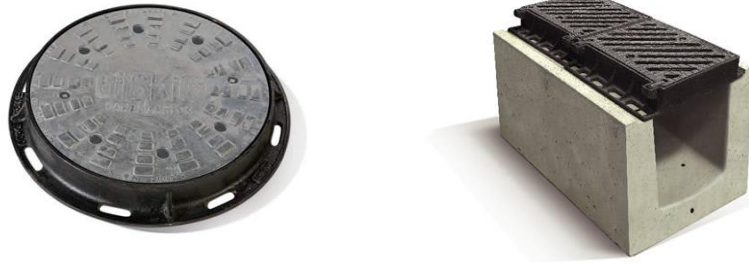
2. Üretimi

RPB, üstün mekanik ve kalıcılık özelliklerini sahip olduğu sıkı mikroyapıya borçludur. Bu sıkı mikroyapıyı kazandırmada üretimi sırasında geleneksel betondan farklı olarak birçok önlem alınmakta, farklı bir tasarım yaklaşımı sergilenmektedir. Bunları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

- 1) Matristeki homojenliği arttırmak için maksimum agrega çapı çok küçük mertebelerde tutulmaktadır (genel olarak < 1 mm).
- 2) Matrisin optimum sıklığa erişmesi için kullanılacak malzeme miktarlarının deneysel olarak araştırılması ve agrega tane dağılımının uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir.
- 3) Genellikle su/bağlayıcı oranı 0,10 – 0,22 aralığında tutulmaktadır.
- 4) Yüksek dozajlarda hiper akışlanlaştırıcı katkı kullanılmaktadır.
- 5) Hazırlanmasında yüksek devirde karıştırma yapabilen karıştırıcılar tercih edilmektedir.
- 6) Etkin bir vibrasyon kullanılmalıdır.
- 7) Kısa kesilmiş tellerle (oğunlukla elik) süneklik arttırılmaktadır.
- 8) Yüksek incelikli silis dumanı katkısıyla mekanik özellikler iyileştirilmektedir. Ayrıca imento dozajını düşürmek için puzolanik aktivitesi yüksek mineral katkılar kullanılmaktadır.
- 9) Mekanik performansı arttırmak için su kr dışında; buhar kr, otoklav kr (basınç altında buhar kr) uygulamaları yapılmaktadır.
- 10) Ayrıca retim aşamasında kalıptayken basınç altında tutulur ise mekanik özellikler daha da arttırılabilmektedir.

Temel olarak yeni nesil güçlü akışkanlaştırıcıların üretilmesiyle bu derece düşük su/imento oranına sahip çimentolu kompozitlerin retilimi de mümkün olmuştur. Ayrıca gelişen mikroskop ve mikroyapı araştırma teknolojileri sayesinde tasarımlar mikroyapı incelemeleriyle desteklenmektedir. Bu sayede kusurları oldukça azaltılmış RPB gibi güçlü kompozitler üretmek mümkün olmuştur.

Ülkemizde RPB zerine yapılan uygulamalı çalışmalardan biri, İstanbul Teknik Üniversitesi – İSTON firması ortak çalışması olan yağmur suyu ızgarası ve rögar kapaklarıdır (şekil 1). Bu seriden üretilen prefabrike elemanların İTÜ inşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'ndaki deney sonucu bulunan zımbalama yükü değerlerinin ortalaması 46 ton'dur. İstanbul'daki İSTON firmasında üretilen rögar kapağının zımbalama yükü ise ortalama 57,8 ton'dur. Taksim-Elmadağ'da deneme amaçlı olarak RPB'den yapılan yağmur suyu ızgara takımları yerleştirilmiştir (Taşdemir vd., 2005). Bu proje sayesinde elik kapak elemanların alınması sorununun önüne geçilebilmekte, kalıcı ve taşıt yüklerine mukavim elemanlar retilenmektedir.



Şekil 1. RPB'den üretilmiş rögar kapağı ve yağmur suyu ızgarası

Yurtdışındaki RPB uygulamalarından biri Kanada'daki Sherbrooke yaya köprüsüdür (Şekil-2). Köprü, RPB 200'den yapılmış uzay kafes şeklindedir. 60 metre açıklığın geçildiği köprüde alt ve üst başlıklarda RPB'den yapılmış elemanlar kullanılırken diyagonal ve örgü çubuklarında çelik kullanılmıştır (Blais ve Couture , 1999).



Şekil 2. Sherbrooke yaya köprüsü - Kanada

Diğer bir uygulama Fransada'ki Pont du Diable yaya köprüsüdür (Şekil 3). Mühendis Romain Ricciotti ve Mimar Rudy Riccioti tarafından tek açıklıklı olarak 70 m uzunluğunda ve 1,8 m genişliğinde tasarlanıp, Lafarge firmasının ticari markası Ductal® isimli RPB'den üretilmiştir. Kirişler arduermeli olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3. Pont du Diable Yaya Köprüsü – Fransa (<http://www.ductal-lafarge.com>)

RPB'ler aynı zamanda güçlendirme işlerinde kullanılabilir niteliktedir. Plaka veya köşebent şeklinde imal edilmiş RPB elemanlar, zayıf kirişlerin altına, kolon-kiriş birleşim bölgelerine tatbik edilerek betonarme çerçevelerin performansı iyileştirilebilmektedir. RPB'nin nükleer atık depolama tesislerinde kullanımına yönelik araştırma ve uygulamalar mevcuttur. İnce cidarlı yüksek basınç etkisinde kalacak borular, ince kabuk ve duvarlar, savunma amaçlı yapılar, sığınaklar, çok uzun ömür istenen yapı kısımları potansiyel kullanım alanlarını oluşturmaktadır.

Durabilite (kalıcılık), RPB'nin üstün performans sergilediği diğer bir alandır. Düşük porozite, çok düşük su/bağlayıcı oranı, bağlantısı az kapiler boşlukları sayesinde saldırgan iyonların ve suyun bünyeye girişine karşı yüksek direnç göstermektedirler. Yapılan birçok araştırma RPB'nin donma-çözülme, aşınma gibi olumsuz etkiler altında yüksek dayanımlı betondan dahi katbekat üstün olduğunu göstermektedir.

3. Deneysel Çalışmalar

Malzeme ve kimya sektöründeki gelişmelere paralel olarak beton teknolojisinde de çok büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Henüz 30 yıl önceye kadar betonarme yapılarda en çok 30 – 40 MPa dayanımlarında betonlar kullanılabiliyordu. RPB'ler ise basınç dayanımları 200 – 800 MPa (2000-8000 kg/cm²) arasında, çekme dayanımları 25 – 150 MPa mertebelerinde yüksek performanslı malzemeler olarak kullanımı artmaktadır.

RPB'nin bazı mekanik özellikleri (RPC200 ve RPC800 olarak) Tablo 1'de, normal ve yüksek dayanımlı beton ile RPB'nin kıyaslanması Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 1. RPB 200 ve RPB800'ün üretim ve mekanik özellikleri (Richard ve Cheyrez, 1995)

	RPB200	RPB800
Priz Sırasında Sıkıştırma	Yok	50 Mpa uygulanarak
Isıl İşlem	90°C	250 – 400 °C
Basınç Dayanımı (kuvars agregalı)	170-230 MPa	490-680 MPa
Basınç Dayanımı (çelik tozu agregalı)	-	650-810 MPa
Eğilme Dayanımı	30 – 60 MPa	45 – 141 MPa
Kırılma Enerjisi	20000-40000 J/m ²	1200-20000 J/m ²
Elastisite Modülü	50 – 60 GPa	65 – 75 GPa

Tablo 2. Normal dayanımlı beton (NDB), Yüksek dayanımlı beton (YDB) ve Reaktif Pudra Betonuna (RPB) ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması (Taşdemir, 2004)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç Dayanımı (MPa)	20 – 60	60 – 115	200 – 800
Elastisite Modülü (GPa)	20 – 30	35 – 40	60 – 75
Eğilme Dayanımı (MPa)	4 – 8	6 – 10	50 – 140
Kırılma Enerjisi (J/m ²)	100 – 120	100 – 130	1200 – 40000

Görülebileceği üzere RPB'lerin tüm mekanik özellikleri yüksek dayanımlı betonlardan dahi katbekat üstündür. Bu yüksek performansı sağlamadaki ana etken çok düşük su/bağlayıcı oranı dışında silis dumanı ve çelik lif kullanımıdır. Çimentodan daha ince olan silis dumanı

kullanımı hamur fazı içerisinde daha sıkı, boşluksuz bir yapı oluşturulmaktadır. Silis dumani ayrıca bağlayıcı hamur – agrega ve lif ara yüzeylerini de güçlendirerek malzeme içerisinde gerilme aktarımlarını desteklemektedir.

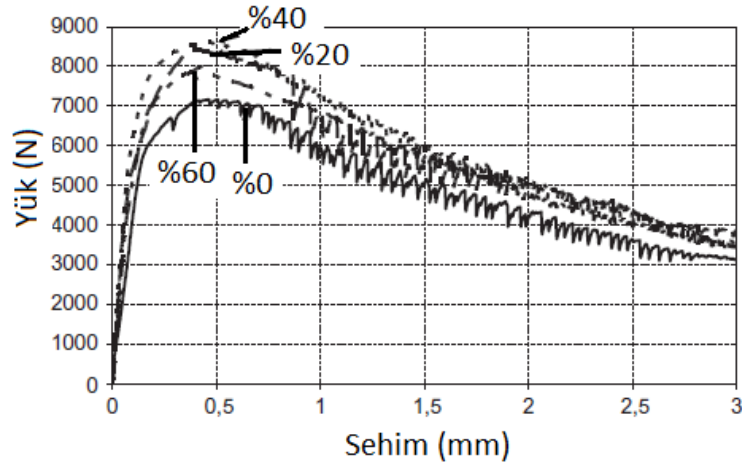
Beton mukavemeti arttıkça gevreklik, kırılma artmaktadır. Bu sorunun çözümü çelik liflerle mümkündür. Çelik lifler ile RPB'nin yüksek dayanıma sahip kırılma matrisi duktal hale gelmektedir. Çelik lifler (teller) eğilme, basınç, çekme gibi etkiler altında çatlak oluşumunu kısıtlamakta ve geciktirmekte, çatlak kesitten çatlama kesite yükleri aktarmaktadır. Çok düşük su/çimento oranıyla birlikte güçlü bir aderansla hamura bağlanan çelik teller, reaktif pudra betonunu yüksek dayanımlı ve geleneksel betonlardan çok daha performanslı hale getirmektedir. RPB içerisinde genellikle kısa kesilmiş çelik teller kullanılmaktadır. RPB içerisinde %1 ila %3 arasında kullanılabilen çelik teller ile yüksek dayanımlı lifsiz betonların 5 – 10 katı eğilme dayanımı, 10 – 300 katı kırılma enerjisi elde edilebilmektedir.

Reaktif pudra betonlarına uygulanan ısı işlem çok önemlidir. Su küre dışında buhar küre ve otoklav (basınç altında buhar küre) uygulaması oldukça elverişlidir. Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) İnşaat Mühendisliği Bölümü – Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılan çalışmalarda küre yöntemlerinin mekanik performans etkisi araştırılmıştır. Yazıcı vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 0,18 S/Ç oranlı hacimce %3 çelik lif içeren RPB'lerin değişik küreler altında mekanik özellikleri incelenmiştir. Araştırmada, 2 günlük su küre ile basınç dayanımı 163 MPa (1630 kgf/cm²), 28 günlük su küre ile 202 MPa, 3 gün 100 °C buhar küre ile 255 MPa, 8 saat 2 MPa basınç altında otoklav küre ile (sıcaklık 210 °C) 273 MPa bulunmuştur. Ayrıca 40 MPa'a ulaşan eğilme dayanımları elde edilmiştir. Çalışmadan çıkan sonuçlara göre buhar ve otoklav küre sadece dayanım kazanma hızını arttırmakla kalmamış, basınç dayanımlarını sadece birkaç gün içerisinde 28 günlük su küre ile elde edilenin yukarısına taşımıştır. Bunun sebebi su küreinde hidrasyona katılmayan, agrega olarak kullanılan kuvars tozlarının ısı işlem ile hidrasyonu desteklemesi olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada üretilen prizmatik RPB numunesi Şekil 4'te sunulmaktadır. Kısa kesilmiş çelik tellerin numuneye homojen dağılmış olduğu ve boşluksuz bir kalıp yüzeyinin elde edildiği görülmektedir.

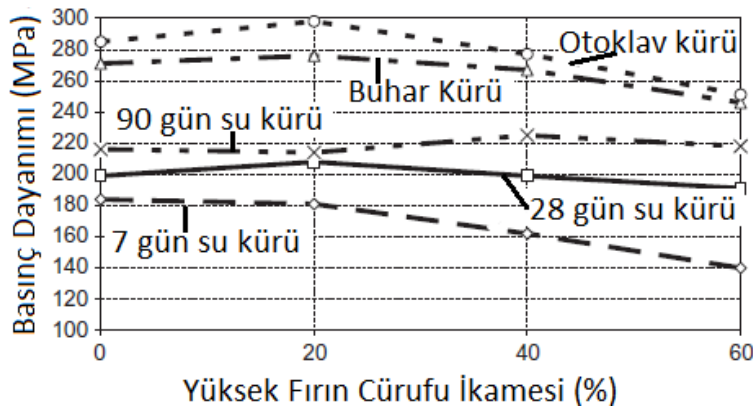


Şekil 4. Reaktif Pudra Betonundan İmal Edilmiş Örnek

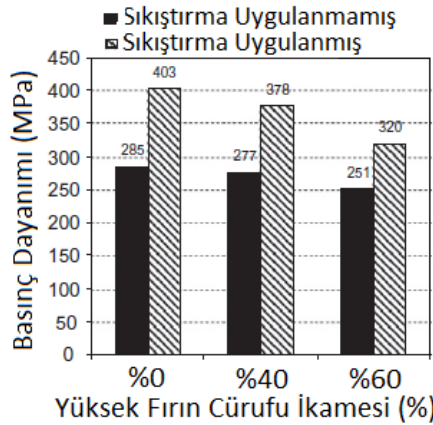
RPB üretiminde genellikle 1 m^3 'te 800 – 1000 kg çimento kullanılmaktadır. Bu yüksek çimento dozajının maliyetleri arttırdığı, çimento üretiminin doğaya verdiği zararlar göz önüne alındığında çevreci olmadığı ve hidratasyon ısısını oldukça yükselterek büzülmeyi arttırdığı söylenebilir. Bu açıdan atık malzemelerin bu kompozit içerisinde değerlendirilmesi geleneksel betondan daha çok ihtiyaç duyulan ve daha yüksek potansiyele sahip olan bir seçenektir. DEÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bir TÜBİTAK projesi (Türkel vd., 2007) kapsamında yapılan çalışmalarda RPB'nin yüksek oranda atık mineral katkıları ile üretilmesi böylece çimento miktarının azaltılması araştırılmış ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu projede (Yazıcı vd., 2010) boksit agregası kullanılan 964 kg/m^3 çimento dozajlı, hacimce %3 çelik lif içeren sıradan bir reaktif pudra betonu karışımına çimento yerine ağırlıkça %20, 40 ve 60 oranlarında yüksek fırın cürufu (YFC) katılmıştır. RPB karışımlarının eğilme dayanımları 20 – 30 MPa aralığında elde edilmiştir. Üç noktalı eğilme deneyinde yük – sehim eğrisinden elde edilen kırılma enerjileri ise 4000 – 7000 N/m gibi yüksek değerler ulaşmaktadır (Şekil 5). Eğilme yükleri altında deformasyon sertleşmesi görülmüş olup, otoklavda kür edilmiş kiriş numunelerin 3 mm orta nokta sehim mertebesinde maksimum yükün yaklaşık yarısının hala taşınabildiği saptanmıştır. Kür yöntemlerinin basınç dayanımına etkisi incelendiğinde buhar ve otoklav kürünün 90 günlük standart su küründen oldukça yüksek dayanımlar kazandırdığı görülmüştür (Şekil 6). Çalışmada 200 – 300 MPa arasında bulunan basınç dayanımları elde edilmiştir. Aynı karışımlar kalıpta basınç altında 8 saat tutulduğunda karışımların basınç dayanımları 300 – 400 MPa mertebelerine ulaşmaktadır. (Şekil 7). Mineral katkı kullanılarak çimento miktarı 964 kg/m^3 'ten 376 kg/m^3 değerine düşürülmüş –ki bu değer geleneksel beton çimento içeriğine inildiği anlamına gelmektedir– 200 MPa ve üzeri basınç dayanımlarının elde edilmiştir.



Şekil 5. YFC ikamesinin üç noktalı eğilme deneyinde yük – sehim grafiklerine etkisi (otoklav kürü)



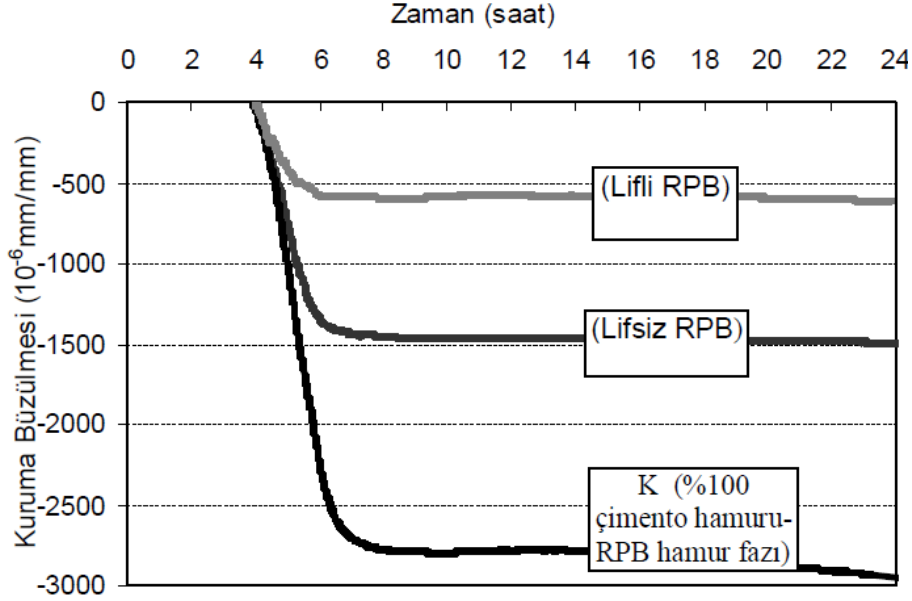
Şekil 6. YFC ikamesinin ve kür yönteminin basınç dayanımına etkisi



Şekil 7. Priz öncesi ve süresince uygulanan sıkıştırma işleminin YFC ikame oranıyla birlikte basınç dayanımına etkisi

DEÜ Yapı Malzemesi Lab.'da Yalçınkaya (2009) tarafından RPB'nin büzülme özelliklerinin araştırıldığı doktora tezi çalışmaları sürmektedir. Bu çalışmada mineral katkı, çelik lif, agrega miktarı ve özelliklerinin RPB'nin erken ve uzun dönem büzülme davranışına etkileri incelenmektedir. RPB'nin yüksek bağlayıcı oranının önemli mertebede büzülme yol açtığı, kullanılan mineral katkıların erken ve uzun dönemli büzülme farklı etkiler yaptığı, mineral katkıların elverişsiz koşullarda (düşük nem, yüksek sıcaklık) kuruma etkisi altında büzülme

arttırabileceği, bünyesel büzülmenin ise mineral katkı kullanımıyla azaltılabileceği belirlenmiştir. Şekil 8’de kalıba yerleştirme ve takip eden 24 saat içerisinde oluşan ve temassız ölçüm sistemi (lazer sensörler) ile belirlenen kuruma büzülmesi miktarları (bekleme koşulu 35 °C, %40 bağıl nem) verilmektedir. Şekil 8’den su+akışkanlaştırıcı+çimento/silis dumanı ile teşkil edilen hamur fazına hacimce %50 kuvars agregası ilavesi ile büzülme değerinin yarı yarıya azaldığı, %2 çelik lif takviyesi ile de 1/6 mertebesine indiği görülmektedir. Çalışma göstermektedir ki RPB oldukça yüksek büzülme mertebelerine sahip, çatlama riski yüksek bir kompozittir. Bu sebeple bileşenlerin seçimi ve RPB tasarımı sadece mekanik özellikler göz önüne alınarak değil, boyutsal kararlılık da dikkate alınarak yapılmalıdır.



Şekil 8. 35°C, %40 bağıl nemli ortamda hamur fazının erken dönem kuruma büzülmesine lif ve agregaya ilavesinin etkisi

4. Sonuçlar ve Öneriler

Reaktif pudra betonu (RPB) alınan bazı önlemlerle mikroyapısı geliştirilen böylece basınç dayanımı 200 MPa (2000 kgf/cm²) değerini aşan yüksek dayanımlı özel bir beton türüdür. Geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerini bir adım ileriye taşıyan yeni nesil çimento esaslı bu kompozit malzeme üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra, lif (çelik tel) takviyesi ile sünek davranış gösteren bir malzemedir. RPB’lerin ileride kullanımının yaygınlaşması, böylece daha narin elemanlarla daha büyük açıklıkların geçilmesi, betonarme taşıyıcı sistemli yüksek yapıların daha küçük elemanlarla inşa edilmesi beklenmektedir. RPB halen, estetik kaygıların ön plana çıktığı, kalıcılığın ve geçirimsizliği son derece önemli olduğu, çok uzun ömür ve yüksek mukavemet istenen (nükleer atık depoları, askeri mühimmat depoları, patlamaya karşı korunmuş askeri yapılar vb.) yapıların inşaatında yurtdışında kullanılmaktadır. Ancak, henüz bu malzeme ile ilgili standartların bulunmaması, maliyetinin klasik betona kıyasla oldukça yüksek oluşu, üretiminin ayrıntılı bir laboratuvar

çalışmasıyla desteklenmesinin gerekliliği, vb. faktörler dikkate alındığında ülkemizde yaygın olarak kullanımının zaman alacağı görülmektedir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi kuruluşu İSTON firmasının RPB ile ürettiği rögar kapağı ve yağmur suyu ızgarası, çalınma riski olmayan, dayanıklı ve yüksek mukavemetli malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu durum RPB kullanımının ülkemizde yaygınlaşması için önemli bir başlangıç olarak değerlendirilebilir.

5. Referanslar

Blais, P.Y. & Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge - world's first reactive powder concrete structure, PCI journal New technology, septemberoctober 99, 61-70.

Richard, P. & Cheyrez M. (1995). "Composition of Reactive Powder Concretes". Cement and Concrete Research, Volume 25, 17.

Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Yerlikaya, M. (2005). "Yeni Kuşak Süperakışkanlaştırıcıların Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerdeki İşlevleri.", Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu Bildiriler, ss. 201-221, Ankara.

Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk, N., Yerlikaya, M.,(2004). "Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler", Beton 2004 Kongresi Bildiriler, ss. 24-57, İstanbul.

Türkel, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H., Aydın, S., Yardımcı, M.Y. (2007). "Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı reaktif pudra betonu geliştirilmesi" başlıklı TÜBİTAK projesi (104I085).

Yalçınkaya, Ç. (2009). "Yüksek Performanslı Çimentolu Kompozitlerin Erken Ve İlerlemiş Yaşlarda Boyutsal Stabilesinin Araştırılması." Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalı Doktora Tez Önerisi Ön Çalışma Raporu.

Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Aydın, S., Karabulut, A.Ş. (2009). "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes". Construction and Building Materials 23 (2009) 1223-1231.

Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Yiğiter, H., Aydın, S., Turkel, S. (2010). "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag". Cement & Concrete Composites 32 (2010) 639-648.