

REAKTİF PUDRA BETONLARINDAKİ GELİŞMELER

İlker Bekir TOPÇU¹, Elif SARIKAYA^{2*}, Erdi AKKAN³

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik, 26480 Odunpazarı/Eskişehir, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-2075-6361>

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik, 26480 Odunpazarı/Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-1324-3613>

³ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik, 26480 Odunpazarı/Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-3716-4319>

Anahtar Kelimeler	Özet
Reaktif pudra betonu Ultra yüksek performanslı beton Dayanım İşlenebilirlik	Son yıllarda hem ülkemizde hem de dünyada dayanımı yüksek betonlara ihtiyacın arttığı bilinmektedir. Artan ihtiyaçlar doğrultusunda, yıllar geçtikçe betondan talep edilen dayanım ve dayanıklılık beklentisi artmaktadır. Yeni gelişmeler ışığında betonun davranışının daha iyi anlamlandırılacağı, içinde bulunduğumuz 21. yüzyılda mühendislik yapılarının projelendirilmesinde daha gerçekçi ilkelerin ve daha gelişmiş yöntemlerin kullanılacağı beklentisi oluşmaktadır. Reaktif pudra beton (RPB) terimi, sıradan agrega yerine çok ince agregaların varlığı ile karakterize, çok düşük su-çimento oranına sahip, lif takviyeli, silis dumanı-çimento karışımını tanımlamak için kullanılmıştır. RPB, 200 ile 800 MPa arasında basınç dayanımına sahiptir. Kompozit malzemenin kırılma özelliklerini arttırmak için RPB'ye lifler ilave edilmiştir. RPB, ultra yüksek dayanım ve mükemmel dayanıklılığın bir kombinasyonunu sağlayan üstün özellikli çimento bağlayıcı malzeme olarak kabul edilir. Bu çalışmada RPB üretim teknikleri ve özellikleri ile ilgili bir literatür taraması yapılmıştır.

ADVANCES ON REACTIVE POWDER CONCRETES

Keywords	Abstract		
Reactive powder concrete Ultra high performance concrete Strength Workability	Recently, the need for high strength concrete is increasing both in the world and in Turkey. In line with the increasing needs, the strength and durability demand expected from concrete increases over the years. In the light of new developments, it is expected that concrete behavior will be better understood, and more realistic principles and more advanced methods will be used in the projecting of engineering structures in the 21 st century. The term reactive powder concrete (RPC) has been used to describe a fiber-reinforced silica fume-cement mixture with a very low w-c ratio, characterized by the presence of very fine aggregates instead of ordinary aggregates. It has a compressive strength between 200 and 800 MPa. Fibers have been added to the RPC to increase the breaking properties of the composite material. RPC is considered a premium cementitious binder material that provides a combination of ultra-high strength and excellent durability. In this study a literature review has been made on the production techniques and properties of RPC.		
Derleme Makalesi	Review Article		
Başvuru Tarihi	: 02.06.2021	Submission Date	: 02.06.2021
Kabul Tarihi	: 28.08.2021	Accepted Date	: 28.08.2021

* Sorumlu yazar; e-posta : eliffarikayaa2@gmail.com



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Reaktif pudra betonu (RPB), ultra yüksek performanslı beton (UYPB) ailesine aittir. Bu tip betonlara reaktif pudra betonu denmesi, pudra kelimesi, RPB üretiminde kullanılan malzemelerin pudra tane boyutunda olmasından, reaktif kelimesi, puzolanik aktivitenin sıcak kür işlemi ile yeniden tekrarlanması ve beton kelimesi ise diğer betonlar gibi çimento matrisinden oluşmasından dolayıdır. RPB'nin basınç ve eğilme dayanımı çok yüksek olduğu için normal dayanımlı betonlara (NDB) göre daha iyi performans sağlar. Malzemeleri çimento ve silis dumanı (SD) olup, süper akışkanlaştırıcılar (SA) ile karıştırılarak oluşturulan yüksek dayanımlı betonlara (YDB) örneklerdir.

Günümüzde inşa edilen yapılarda beton basınç dayanımının eskiye göre giderek arttığı görülmektedir. Bunun başlıca nedenlerinden biri zamanla gelişen teknolojiyle beraber artan çok katlı yapılardır. Betonun basınç dayanımının artmasıyla beraber yüksek performanslı betonlar (YPB) ortaya çıkmıştır. 1960'lı yıllarda 15-25 MPa basınç dayanımına sahip betonlar 1970'lerde yerini 40-50 MPa basınç dayanımlı betonlara bırakmıştır. Basınç dayanımının artması ile zamanla su/çimento (s/ç) oranında da değişimler meydana gelmiştir. 1950'li yıllarda 0,60-0,70 olan s/ç oranı, betona akışkanlaştırıcıların ilavesi ile 1970'li yıllarda 0,40-0,55 civarlarına, 1980'li yıllarda ise ortaya SA'ların çıkması ile betondaki s/ç oranı 0,25'e kadar düşürülmüştür (Topçu ve Karakurt, 2005a).

1980'li yıllardan sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanan silis dumanı ile hem ekonomik açıdan kazanç sağlanmış hem de s/ç oranı 0,20'nin altına düşürülmüştür. Bununla birlikte beton basınç dayanımı 200 MPa'nın üzerine çıkmıştır. Bu da atıkların geri kazanımı ile günümüzde en çok önem verilen sürdürülebilirlik için önemli bir gelişme sağlamıştır.

2. Reaktif Pudra Betonu

Son yıllarda yüksek dayanıma erişmek ile ilgili birçok çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu araştırma makalesi, yapılan çalışmaları irdelemektedir. Ayrıca, bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Freyssinet, 1930'lu yıllarda priz sırasında taze betona uygulanan basınç kuvvetinin, betonun basınç dayanımını artırdığını belirtmiş, Richard ve Cheyrezy (1995), 1990'lı yıllarda yüksek sıcaklığın etkisiyle artan basınç küre ile betonun basınç dayanımını 650 MPa'a kadar çıkarmışlardır. Bu malzemeye ise yine aynı yıllarda Paris'te Bougues'in laboratuvarlarında rastlanmıştır.

RPB standart küp basınç dayanımları 200 ile 800 MPa aralığında, çekme dayanımları 25 ile 150 MPa, kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m² ve birim ağırlıkları 2500-3000 kg/m³ aralığında değişmekte olan yeni nesil ultra

yüksek performanslı betonlardır. RPB patlama, darbe ve sismik yüklemeler altında geleneksel betondan çok daha iyi sonuçlar vermektedir. RPB'nin içyapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikro yapısı çimentoya bağlayıcılık özelliği sağlayan hidrasyon ürünlerinin kaliteli şekilde kullanılmasıyla güçlendirilmektedir.

RPB kompozit malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek için liflerle güçlendirilmiş, çok düşük s/ç oranında, lif takviyeli, çimento ve SD karışımının SA ile güçlendirilerek ince öğütülmüş kuvars tozu karışımı sonucu elde edilen ultra yüksek dayanımlı kompozit bir malzeme olarak tanımlanabilir. Karışımdaki ince agregalar malzemedeki boşlukların en aza indirgenmesini sağlayarak betonun eğilme ve basınç dayanımını artırmaktadır.

NDB'lerde kullanılan agregatanelerinin birbirine teması sonucu oluşan boşlukları tane çapının azaltılması ile ortadan kaldırmak mümkündür. Karışımdaki bu değişiklik ile betonun boşluk oranı azalmakla beraber çevresel etkilere karşı direnci artmaktadır. RPB'yi NDB'lerden ayıran en belirgin özelliği düşük boşluk oranına sahip olması ve homojen bir yapıda olmasıdır.

RPB'de kullanılan SD sayesinde dayanım artmaktadır (Dallaire ve Aitcin 1998; Dallaire, Aitcin ve Lachemi 1998). RPB, YDB'lere göre daha fazla dayanıma sahiptir. RPB düşük boşluk oranı, sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikleri ile ultra yüksek dayanımlı kompozit bir yapı malzemesidir (Dallaire ve Aitcin, 1998).

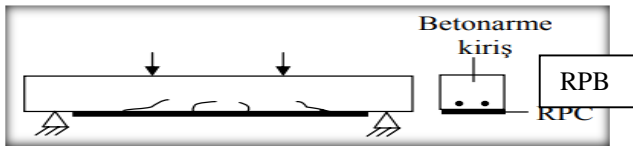
Büyük agregatanelerinin beton karışımından çıkartılması, karışımdaki s/ç oranında azalmaya gidilmesi, CaO-SiO₂ oranının silis içerikli malzemeler ile azaltılması ve karışıma çelik liflerin karıştırılması RPB'nin yüksek performanslı bir malzeme olmasını sağlamaktadır. Çelik lif donatı RPB'nin eğilme dayanımını arttırmada oldukça etkili olmaktadır. Kompozit karışım içerisindeki çelik lif dağılımı ne kadar homojen yapılırsa, eğilme dayanımının da o oranda arttığı görülmüştür (Yerlikaya, 2005).

Lif eklenmesi, betonda hem küp hem de silindir basınç dayanımını azaltır. Lif katılmasıyla RPB'nin hem yarma çekme hem de eğilme çekme dayanımı büyük ölçüde artar. RPB'nin kayma dayanımı, RPB'ye lif eklenmesiyle artmıştır. RPB uygulanması kolay bir malzeme olduğundan farklı şekil ve boyutlarda kalıplanabilmektedir. Ayrıca, RPB'ler çivilenebilir, vidalanabilir ve kesilebilir de olduğundan bu malzeme yapısal kullanımlara ek olarak ahşap için alternatif bir malzeme olarak da kullanılabilir (Selveraj ve Priyanka, 2015).

2.1. RPB ile Onarım ve Güçlendirme

Betonarme yapıların onarımı inşaat sektörü için önemli bir zorluktur. Beton yapıların dayanımını azaltan çok sayıda faktöre bağlı olarak yapılarda hasarlar meydana

gelmektedir. Salim, Al-Baghdadi ve Muteb (2019), yaptıkları çalışmada çelik, cam ve polipropilen olarak 3 farklı tip lifli RPB'yi normal dayanımlı betonla karşılaştırmışlar, yapılan deneysel sonuçlardan cam lifli RPB'nin dayanımını daha yüksek bulmuşlardır (Salim ve diğ., 2019). Eğilme etkisine maruz kalarak çatlatılmış bir BA kirişin çekme bölgesi Şekil 1'de görüldüğü gibi çelik plaka yerine RPB'den yapılmış bir levha ile güçlendirilmiştir. Kullanılmış olan RPB'de hacmen %6'ya ulaşabilen oranda kısa kesilmiş 0,15 mm çaplı 6 mm ve 13 mm boyunda çelik teller kullanılmıştır. Levhalar çatlatılmış kirişe yapıştırılıp kirişe tekrar yüklemeye yapıldığında yüksek dayanımlara ulaşmıştır. Bu tür güçlendirmeler kayma bölgelerinde de yapılabilmektedir.

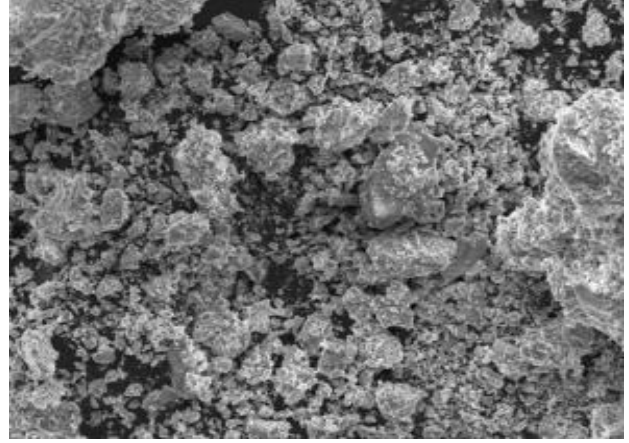


Şekil 1. Çatlamış BA Kirişin RPB ile Güçlendirilmesi (İpek, 2009).

2.2. Yüksek Sıcaklık Altında RPB

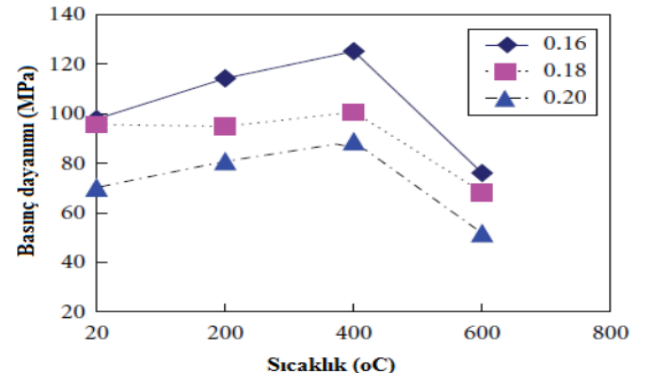
Genellikle, betonarme yapılar yangınlardan oldukça fazla etkilenip hasar görürler. RPB'nin yüksek sıcaklıktaki davranışı NDB ile karşılaştırıldığında, RPB elemanların dayanım kaybına ve beton dökümüne daha duyarlı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni RPB matrisinin yoğun paketlenmiş mikro yapısıdır. Bununla birlikte hem çelik hem de polipropilen (PP) liflerin RPB matrisine eklenmesinin beton dökümünü zorlaştıracığı ve RPB matrisinin spesifik ısı kapasitesini azaltacağı fark edilmiştir. Bu, çelik liflerin yüksek ısı iletkenliği ve yüksek dayanımıyla ilgilidir. Ek olarak, PP liflerin sıcaklık artarken eridiği ve RPB matrisinde çok miktarda küçük gözenekler oluşturduğu görülmüştür. Mikro gözeneklerin ısı dağılımını artırdığı ve bu nedenle dökümdeki olumsuz etkiyi azaltmada yararlı olduğu düşünülmektedir (Mishra ve Mistry, 2020).

RPB'nin SEM analizi Erosemiah, Sathieswaran ve Viji, (2019), SEM ile yüksek sıcaklıkta dökülmeden önce ve sonra RPB'lerin mikro yapısını incelemiş ve RPB'lerin özellikleri ile bileşimlerini araştırmak için kullanmışlardır (Şekil 2). RPB'nin 400 °C'de kontrol karışımında C-S-H jeli oluşumuna ve 800 °C'de ise betonun yüzeyinde küçük çatlaklar oluşmasına neden olduğunu, böylece betonun bozulduğunu göstermişlerdir (Erosemiah ve diğ., 2019).



Şekil 2. RPB'nin SEM analizi Erosemiah ve diğ., (2019)

Şekil 3'de görüldüğü üzere RPB yüksek sıcaklık altında diğer betonlarla benzer özellik göstermektedir. Betonlardaki basınç dayanımı 400 °C'ye kadar artmakta, 400 °C'den 600 °C'ye kadar ise azalmalar görülmektedir. RPB'nin, 600 °C'deki dayanım kaybının diğer betonlardan daha az olması RPB'nin yüksek sıcaklığa dayanıklılığının daha fazla olduğunu göstermektedir. Bununla beraber RPB'nin deformasyon davranışı yüksek dayanımlı betonlar gibi parçalanarak oluşmaktadır (Topçu ve Karakurt, 2005a).



Şekil 3. Yüksek Sıcaklıkta RPB'nin Basınç Dayanımı (Topçu ve Karakurt, 2005a).

Şekil 4'de lifle güçlendirilmiş RPB kirişlerinin soğuduktan sonraki görünüşleri verilmiştir. Lif hacmi sırasıyla %25,75 ve 1,25'dir. Bir başka çalışmada RPB'de yangın deneyi yapılmıştır. SEM kullanılarak yüksek sıcaklıklara tutulan RPB'de mikro yapı görüntüleri analiz edilmiştir. RPB mikro yapısının yüksek sıcaklıkta kontrol numunesinden daha yoğun olduğu görülmüştür. RPB'de PP varlığı, yüksek sıcaklıklara tutulduğunda PP erime süreci nedeniyle farklı kanalların oluşmasına yol açmıştır (Al-Attar, Abdulrahman, Hamada, ve Tayeh, 2020).



Şekil 4. Yangın Deneyinden Sonra RPB Kirişleri (Al-Attar ve diğ., 2020).

2.3. RPB’de Kullanılan Üretim Teknikleri

RPB genel kavram olarak yapı mühendisliğinde mikro yaklaşımla elde edilmiş bir malzemedir. İçeriği normal çimento olan kompozitler ile karşılaştırıldığında, RPB’deki farklılıklar içerisinde, homojen tane dağılımı, boşluk oranı ve mikro yapı da bulunmaktadır. Yüksek ve çok YDB’lar sektörde uzun süredir kullanılan malzemelerdir. Bu yüksek dayanım değerine betonda s/ç oranının azaltılması ve karışıma SD ile SA katkıların katılmasıyla ulaşılmaktadır. Çimento harcındaki boşluk oranının azaltılması ile betondaki dayanıklılığın artırılması amaçlanmaktadır (Reda, Shrive ve Gillottve, 1994; Richard ve Cheyrezy, 1994).

RPB’nin üretilmesi için altı ana uygulama aşağıda belirtilmiştir;

- Malzeme homojenliğinin sağlanması için karışımdaki iri agregaların çıkarılması,
- Agregaların tane çapının düzenlenmesi ve boşluksuz beton elde etmek için iyi sıkıştırma yapılması,
- Sıcaklık kürü ile mikro yapının geliştirilmesi,
- Çelik liflerle malzemenin sünekliğinin artırılması,
- SD gibi güçlü puzolanik özelliklere sahip mineral katkıların kullanılması,
- Daha yüksek dayanım elde etmek için buhar kürü işlemi yapılması,

Kısaca, bir UYPB’nin amaçlanan dayanımını elde etmek için, iyi seçilmiş ham maddeler ile çok gelişmiş teknik işlemler gereklidir. RPB, yüksek süneklik ve dayanım gibi üstün teknik özelliklere sahiptir. Bu yenilikçi ve benzersiz özellik, tasarımcıların daha hafif, zarif ve geometrik formda daha ince ve uzun açıklıklar oluşturabilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda korozyon, aşınma ve darbeye karşı gelişmiş dayanıklılık ve geçirimsizlik sağlamaktadır. Malzeme teknolojisi, pasif güçlendirme (donatı) olmadan kullanılmasına izin verip, kalıp, işçilik ve bakım maliyetindeki azalmalar ekonomiye katkıda bulunmaktadır. Donatının ortadan kaldırılması güvenliği artırır, ağırlıkların azaltılmasını sağlar ve dayanıklılık bakımı azaltır, kullanım ömrünü uzatır (Sarika ve John, 2015). 1-500 µm arasındaki tane

boyutuna sahip agrega ile RPB’nin boşluk oranı düşük olmaktadır. Agregalar genelde kırılmış kuvars kumu kullanılmaktadır. RPB’de kullanılan agrega boyutlarının çimentodakilere yakın olması, hidrate olmamış çimento tanelerinin de karışıma uygun olması ve malzeme dayanımına katkı sağlaması anlamına gelmektedir. Bu betonlarda s/ç oranı 0,15 gibi çok düşük bir seviyededir. Betonun işlenebilmesi miktarı artırılan SA ile sağlanmaktadır. Tüm bunların yanında betonda istenilen dayanıma sahip olmak için kullanılan malzeme özelliklerini ve bunların mikserde hangi sıra ve süreyle karıştırılması gerektiğine dikkat edilmelidir. Bağlayıcı olarak ise ASTM Tip II ya da Tip V cinsi çimento ve SD kullanılır. SD ile mikro boşlukların azaltılması hedeflenmektedir (Dugat, Roux ve Bernier, 1996).

Silis dumanı RPB’de işlenebilme özelliğini artırır. Silis dumanı, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamurunun agrega ile arasındaki aderansın artmasını da sağlar. Sonuç olarak betonun dayanımı artmış olur. Ancak SD’nin yüksek maliyetli oluşu ve bulunmasının güç olması betonda kullanılmayı zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte bazı stratejik yapılarda kullanılacak YPB ve harçların uzun süreli performansları henüz tam olarak bilinmemektedir.

RPB’de kullanılan çelik lifler ile eğilme momenti etkisi altında malzeme çelik donatı ile donatılandırılmış bir kiriş davranışı ortaya koymaktadır. RPB’nin sünekliğini artırmak için karışımda 0,15-0,3 mm çapında ve 13 mm’lik çelik lifler kullanılmaktadır. Çelik liflerin çekme dayanımları ortalama 2600 MPa’dır. Kullanılan çelik lif miktarı toplam beton hacminin %2’si civarındadır. Bu liflerle eğilme dayanımı ve toklukta artış sağlanmıştır. RPB karışımında uygulanan karıştırma tekniği ve vibrasyon işlemi normal betondaki ile aynıdır. Ancak karışıma su eklenmesinde dikkatli davranılmalıdır.

Tablo 1’de Kanada Quebec’de 200 MPa basınç dayanımlı RPB ile yapılan köprünün malzemeleri ve miktarları verilmiştir (Roux, Andrade ve Sanjuan, 1996).

Tablo 1.

RPB İçin Tipik Malzemeler ve Miktarları (Roux ve diğ., 1996)

Kullanılan Malzeme	Miktar, kg/m ³
Çimento	705
Silis Dumanı	230
Kırılmış Kuvars Kumu	210
Kum	1.010
Süperakışkanlaştırıcı	17
Çelik Lif	190
Su	195

RPB’ye 90 °C’deki düşük buhar basıncı kürü uygulamasıyla priz sonrası SD’nin puzolanik etkisi hızlandırılarak güçlü hidrat yapının oluşması sağlanır.

RPB'lerde priz sonrası sıcaklık kürü uygulamasıyla beton dayanımı %60-70 daha fazla olmaktadır. Günümüzde 200 MPa dayanımlı betonların kolay elde edilmesine karşılık laboratuvarında 400 °C sıcaklık ve 50 MPa'lık basınç kürü ile RPB'de 800 MPa basınç dayanımı değerine ulaşılmıştır.

2.4. RPB'nin Mekanik Özellikleri

UYDB, normal betona göre 150 MPa veya çok daha fazla basınç dayanımına sahiptir. Lifli veya lifsiz UYDB'nin basınç yükü altında çok farklı bir davranışa sahip olduğu görülür. Liflerin basınç dayanımında bir etkisi olmamasına rağmen, lifler betona sünek bir yapı kazandırır. 2006 yılında Graybeal kürlenme koşullarının etkisini araştırmış ve buharla kürlenme altında basınç dayanımının önemli ölçüde arttığı sonucuna varmıştır (Mishra ve Mistry, 2020).

Mekanik özellikler açısından RPB'de oluşan C-S-H yapısının kuvvetlenmesiyle kompozitin matris yapısı basınç dayanımını en üst düzeye taşımaktadır. Yüksek dayanıma sahip olması nedeniyle RPB'ler çelik donatı olmadan tek başlarına yapılarda kullanılabilir. Tablo 2'de görüldüğü üzere kırılma enerjisi RPB'de diğer betonlara oranla fazladır. Kırılma enerjisinin fazla olması deprem etkileri altında enerji yutma kapasitesi düşük olan gevrek yapıları betonun tokluğunun artmasına yol açmaktadır. NDB, YDB ve RPB'lere ait bir dayanım karşılaştırması Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2.

Normal, YDB ve RPB'lerin Karşılaştırılması (Topçu ve Karakurt, 2005b)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
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	10000-40000
E-Modülü GPa	20-30	35-40	60-75

Tablo 2'den görüldüğü gibi çelik liflerin eklenmesiyle RPB'de eğilme dayanımı diğer betonlara oranla daha fazla olmaktadır. RPB'lerin kırılma enerjileri ise 10000-40000 J/m² arasında değer almaktadır. Bu değişimlerin nedeni de karışıma eklenen çelik liflerdir.

Bae, Choi, Lee ve Bang, (2016) RPB dayanımı ile ilgili çalışma yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda çelik lifin beton basınç dayanımı, en yüksek gerilme ve E- modül üzerindeki etkilerinin, karışımın basınç dayanımından bağımsız olarak doğrusal eğilimler sergilediğini göstermişlerdir. Basınç dayanımı

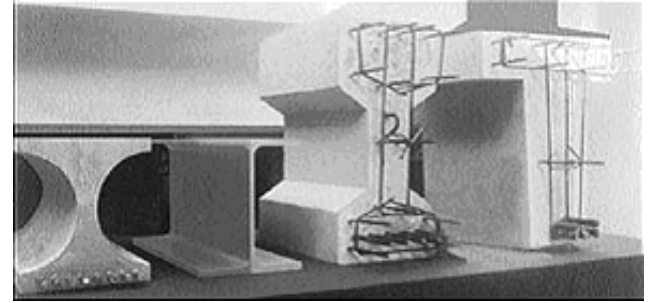
ve E-modülünün, karışımdaki lif miktarından önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür. Beton karışımının belirli bir dayanım seviyesindeki ilgili mekanik özelliklerinin lif takviyesi ile orantılı olarak iyileşeceğini doğrulamışlardır.

Tablo 3.

RPB ile YDB Dayanıklılığının Karşılaştırılması (Topçu ve Karakurt, 2005b)

Dayanıklılık	RPB & YDB
Toplam Boşluk Oranı	4-6 kat daha düşük
Mikro-Porozite	10-50 kat daha düşük
Geçirimsizlik	50 kat daha düşük
Klorür İyonu Geçiş	25 kat daha düşük

Tablo 3'te ise RPB ile YDB dayanıklılık açısından karşılaştırılmıştır. RPB'nin boşluksuz yapısı iyi bir kimyasal direnç göstermesini sağlamakta, RPB YDB'lere göre daha yüksek dayanıklılık göstermektedir.



Şekil 5. Aynı taşıma gücüne sahip kiriş kesitleri (İpek, 2009).

Şekil 5'te moment taşıma kapasiteleri aynı, soldan başlayarak birincisi RPB, ikincisi çelik, üçüncüsü öngerilmeli BA ve sonuncusu da geleneksel BA olarak imal edilmiş 4 farklı malzemeyle üretilmiş kiriş kesitleri görülmektedir.

Tablo 4'te bu kirişlerin fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere öngerilmeli ve geleneksel betonarmenin daha ağır ve daha büyük taşıyıcı elemanlar olmaktadır. Ancak RPB'nin çelikle karşılaştırılabildiği görülmektedir. Böylelikle yapıların sabit ölü yükleri azalmaktadır.

Tablo 4.

Farklı Elemanların Karşılaştırılması (Topçu ve Karakurt, 2005b)

Kesit Özelliği	RPB (X) Kesitli (1)	Çelik (I) Profili (2)	Öngerilmeli Betonarme (3)	Geleneksel Betonarme (4)
Yükseklik cm	36	36	70	70
Ağırlık kg/m	130	110	470	530

2.5. Atık Mermer Bulamacının RPB'ye Etkisi

Günümüzde çevresel sorunlarla beraber atıkların kullanımı da önem kazanmaya başlamıştır. Her ne kadar toplumda bilinçlenme başlasa da hala yeteri kadar çalışma söz konusu değildir. Atıkların yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini öne çıkarmak için çalışmalar yapılmıştır. Çimento ve beton üretiminde genellikle, atık olarak SD, uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) çok sık kullanılmaktadır. RPB'de de atık malzeme olarak SD kullanımı yanısıra UK kullanımı ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır. İnce malzemelerden oluşan RPB için yine ince atıkların kullanılması daha uygun olmaktadır.

RPB ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmasına rağmen yaygın olarak kullanımı söz konusu değildir. Bunun başlıca nedeni ham maddelerinin pahalı olmasıdır. RPB kullanımının yaygınlaşması için ya elde olan ham maddenin daha uygun olması ya da farklı alternatifler geliştirilmelidir. İpek, İyiliksever ve Yılmaz (2014), mermer atıklarının RPB'de kuvars pudrası yerine kullanılabilirliğini çalışmışlardır çalışmalarında kullandıkları mermer bulamacını, Kocaeli'nin Başiskele ilçesindeki orta ölçekli bir mermer tesisinin doğal koşullarda depolanan stok alanından temin etmişlerdir. Mermer bulamacı, tesis çevresinde belirlenen alanda atmosfere açık bir şekilde stoklanmaktadır. Deney için alınacak numunenin homojen olmasına özen gösterilmiştir. Şekil 6 mermer bulamacının RPB'de kullanımını göstermektedir.

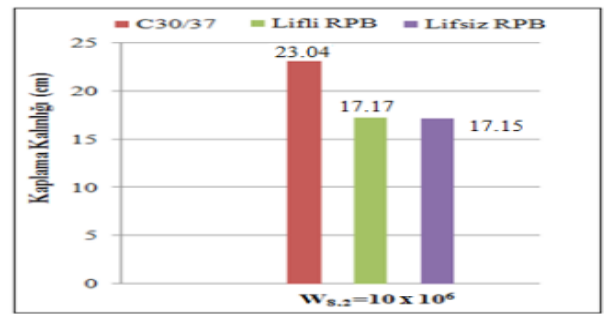


Şekil 6. Karışımda kullanılan Mermer Bulamacı (İpek ve diğ., 2014).

İpek, ve diğ. (2014), çalışmalarının maliyet analizleri ile atık olarak mermer bulamacı kullanılması ile hem ekonomik bir kazanç hem de çevre için zararlı bir atığın yok edilebildiğini göstermişlerdir.

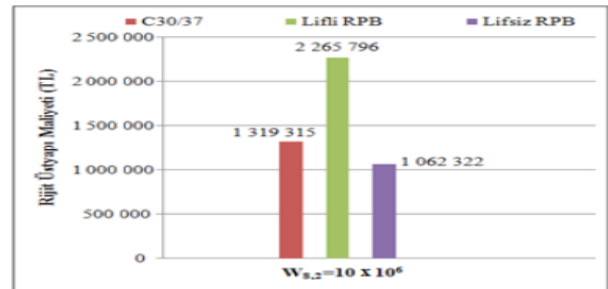
2.6. RPB'li Rijit Yol Kaplamasının Maliyeti

RPB kaplamalar, yüksek dayanıma sahip olduklarından düşük kalınlıkta inşa edilebilirler. Bu da daha az malzeme gerektireceğinden ekonomik kazanç sağlamaktadır. Bakış, Hattatoğlu ve Bayrak (2017), nin yaptığı çalışmanın amacı rijit yol kaplama maliyetinin düşürülmesidir. Çalışmada kullanılmak üzere C30/37 betonu, lifli RPB ve lifsiz RPB olmak üzere 3 çeşit beton seçilmiştir. Önce deneysel olarak kaplama kalınlıkları tüm beton tipleri için bulunmuş daha sonra da maliyet hesabı yapılmıştır.



Şekil 7. Üstyapı Kaplama Kalınlık Karşılaştırması (Bakış ve diğ., 2017).

Seçilen 3 farklı beton tipi için kaplama kalınlıkları Şekil 7'de gösterilmiştir. RPB ile yapılan kaplamaların basınç ve eğilme dayanımları yüksek olduğu için havaalanı pistlerinde, terminallerin yükleme ve boşaltma alanlarında, otoparklarda, şehir içi ve şehir dışı tüm karayolu ulaşımında kullanılabilir. RPB kaplamaların daha ekonomik olması için üretiminde yerel malzeme kullanımı tercih edilmektedir (Bakış ve diğ., 2017).



Şekil 8. Rijit Üstyapı Maliyet Karşılaştırması (Bakış ve diğ., 2017).

Şekil 8 incelendiğinde en düşük maliyetli lifsiz RPB, sonra C30/37 betonu, en maliyetli olan ise lifli RPB olarak görülmektedir. İçerisinde bulunan çelik lifler lifli

RPB maliyetini yükseltmiştir. Çalışma sonucunda en ekonomik kaplamanın lifsiz RPB olduğu görülmüştür.

2.7. Atık Çelik Lif Takviyeli RPB Rijit Kaplama

Bakış (2018), yaptığı çalışmada normal çelik lifler yerini atık çelik lifleri kullanmıştır. Oluşturulan betona, atık çelik lifle güçlendirilmiş pomza agregalı RPB (P-RPB) ismi verilmiştir. Atık çelik lifler bu karışıma betonun ani kırılmasını önlemek amacıyla katılmıştır. Pomzadan üretilen P-RPB kalıba kendiliğinden yerleşebilmektedir. Karışımda beton agregası olarak pomza kullanılmıştır. Çalışmada 0,15-0,6 mm dane çaplı pomza kumu ile düşük boşluk oluşturmak amacıyla 0-0,045 mm dane çaplı pomza tozu kullanılmıştır. Şekil 9'da pomza kumu ile pomza tozu gösterilmektedir.



Şekil 9. Pomzanın Pudra Halindeki Görünümü (Bakış, 2018).

Şekil 10'da atık çelik lifle güçlendirilmiş olan P-RPB üretimindeki atık çelik teller gösterilmiştir. Bakış'ın çalışmasında kullandığı çelik teller 0-1 mm çapında, uzunluğu ise 0-10 mm'dir. Ortalama lif çapını 0,5 mm alırken ortalama lif uzunluğunu 5 mm almıştır.



Şekil 10. P-RPB'de Kullanılan Atık Çelik Teller (Bakış, 2018).

Pomza agregası boşluklu bir yapıya sahip olduğu için basınç ve eğilme dayanımları oldukça düşüktür. Çalışmada pomza agregası boşluk oranını azaltmak için RPB tekniklerine göre öğütülmüştür. Ülkemizde pomza malzemesi çok olmasına karşın özellikleri açısından

inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bakış, yaptığı bu çalışmada pomzanın inşaat sektöründe kullanılabilirliğini göstermektedir (Bakış, 2018).

Betonda kullanılan lifler yapılarda stabilite, süneklik gibi özellikleri etkilemekte, aynı zamanda betonda çatlak oluşumunu azaltmaktadır. Betonlarda yaygın olarak kullanılan lifler, PP, karbon ve diğer malzemelerdir. Yapılan çalışmada P-RPB kullanılmasının en büyük nedeni atık çelik liflerin beton dayanımını artırmasıyla beraber çatlak oluşumunu engellemesi gelmektedir. Aynı zamanda beton üretiminde maliyeti önemli ölçüde düşürmektedir (Bakış, 2018).

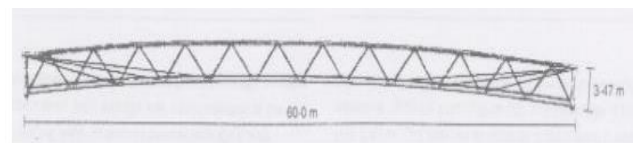
2.4. RPB'nin Kullanım Alanları

RPB içinde çelik donatı olmaması nedeniyle mimari açıdan geniş yelpazeye sahiptir. Günümüzde hala kullanılan RPB ile yapılan ilk köprü Kanada'da inşa edilen Şekil 10'da gösterilen Sherbrooke köprüsüdür.



Şekil 11. RPB ile Üretilen Sherbrooke Köprüsü (Gilliland, 1996).

Sherbrooke Köprüsü'ndeki 200 MPa'lık basınç dayanımına, 40 MPa'lık eğilme dayanımına ve çelik donatı kullanılmadan 50 GPa'lık E-modülüne ulaşılmıştır. Köprü 60 m uzunluğunda iken 3,3 m genişliğe sahiptir. Köprü'nün taşıyıcı sistemi uzay kafes sistemiyle tasarlanmış ve her birinin boyu 10 m olan 6 adet prefabrik elemanın imalatı ve montajı yöntemiyle inşa edilmiştir. Uzay kafes sistemine sahip olan bu köprü'nün şeması Şekil 11'de verilmiştir. Diyagonal elemanların yük aktardığı alt kirişin boyutları 32x38 cm ve bu kirişin iç kısmından öngerilme donatıları geçmektedir. Köprü'nün maliyeti ise 922.000 \$ civarındadır (Gilliland, 1996).



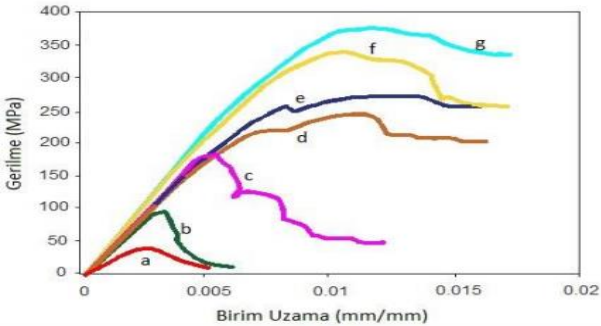
Şekil 12. Sherbrook Köprüsü Uzay Kafes Yapısı (Gilliland, 1996).

RPB'nin yüksek dayanıklılığı, ekonomik olması gibi özelliklerinden dolayı yaygınlaşmaya başlamıştır. RPB ile yapılan ilk üst geçit köprüsü Yeni Zelanda'da yapılmıştır. Köprü 10 adet ayağa, toplam 120 m uzunluğa ve en büyük 20 m açıklığa sahiptir (Şekil 13).



Şekil 13. Papatoetoe ve Penrose RPB Kullanılarak Yapılan Üst Geçit Köprüsü Kirişleri (Gilliland, 1996).

Sherbrooke köprüsünde kullanılan farklı tipteki RPB betonları üzerinde yapılan deneylerin sonucu olarak gerilme-birim uzama eğrileri Şekil 14'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi diğer RPB'lere göre daha sünek davranış gösteren lifli ve boru ile sargılanmış RPB'dir. Bununla birlikte basınç dayanımı da yüksektir (Yadollahi ve Varolüneş, 2020).



Şekil 14. Betonların σ - ϵ davranışları a) NDB b) YPB c) Lifli RPB d) Lifsiz ama boru ile sargılanmış RPB e) Lifli ve boru ile sargılanmış RPB f) Lifsiz boru ile sargılanmış basınç altında olan RPB g) Lifli boru ile sargılanmış basınç altında olan RPB (Yadollahi ve Varolüneş, 2020).

Nükleer atıkların depolanmasında çelik ya da beton tankların kullanılmasının araştırılması amacıyla Fransız Bouygues firması ve Amerikan Nükleer Santral Komisyonu nükleer atıkların depolanmasında RPB kullanımı üzerine ortak çalışmalar yapmaktadır. RPB'nin sahip olduğu özellikler sayesinde atıkların daha küçük hacimlerde saklanabileceği öngörülmektedir.

RPB'nin diğer kullanım alanı olarak bankalar ve sığınaklar örnek verilebilir. Böyle yapılarda NB tabakalarının kalın olmasına bağlı olarak ağır olması bununla beraber maliyeti yükseltmesi RPB kullanımına olanak sağlamaktadır. RPB hem yangına hem de dış etkilere karşı daha dayanıklı olmakla beraber maliyeti de düşürmektedir (Dauriac, 1997; Düzgün, 2004; Sadrekarimi, 2004; Topçu ve Karakurt, 2005a, 2005b; Topçu, Uygunoğlu ve Mumyalmaz, 2014; Yerlikaya, 2005).

RPB'yi diğer betonlardan ayıran mekanik özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

- RPB yüksek dayanımı sayesinde çelikle yarış edebilecek bir yapı malzemesidir.
- RPB'nin ultra yüksek basınç dayanımının yanında eğilme kapasitesinin yüksek olması nedeniyle, yapıdaki ölü yüklerin önemli derecede azaltılması ve yapısal eleman kesitlerinin kısıtlamasız olarak projelendirilebilmesi mümkündür.
- RPB'nin sünek kırılma davranışı ile yapıya ek olarak betonarme donatısının kullanımı gerekmez.
- RPB'nin sıvı/gaz ve radyoaktif elemanlara karşı geçirimsizliği, boşluk oranının düşük olması nedeniyle neredeyse yoktur denilebilir. Betondan sezyum geçişi olmamakla birlikte trityum geçirgenliği ise NDB'e oranla 45 kat daha düşüktür.
- RPB karışımında kullanılan malzemeler normal betonda kullanılan malzemelerden daha pahalıdır. Ayrıca karışıma eklenen lifler ile RPB YPB'lara göre daha masraflıdır.

3. Sonuç ve Öneriler

- RPB'de kullanılacak mermer bulamacı sayesinde ekonomik kazanç sağlanabilir.
- RPB ile yapılacak rijit yol kaplamalarında yerel malzemeler ile de ekonomik kazanç sağlanabildiği görülmüştür.
- RPB'nin sıvı/gaz ve radyoaktif elemanlara karşı geçirimsizliği, boşluk oranının düşük olması nedeniyle neredeyse yoktur denilebilir.
- RPB' de kullanılan malzemeler normal betonlardaki malzemelerden daha maliyetlidir.
- RPB'de kullanılmakta olan ince kum normal betondaki kaba agreganın, PÇ ince agreganın ve SD da çimentonun rolünü üstlenmektedir.
- RPB yüksek dayanımın gerektirdiği ve daha hafif istediğimiz yapılarda tercih edilmelidir.
- RPB geleneksel ve YDB'ların mekanik özelliklerini bir adım ileriye taşıyan yeni nesil çimento esaslı bu kompozit malzeme üstün mekanik özellikleri

göstermekle birlikte, lif kullanımı ile sünek davranış gösterebilmektedir.

- RPB'nin tüm bu mekanik özelliklerine rağmen maliyetinin oldukça yüksek olmasından kaynaklı ülkemizde çok tercih edilememektedir.
- RPB'nin kesme dayanımı da lif eklenmesiyle artmıştır.

Gelecekteki RPB Araştırmaları İçin Öneriler

- RPB çevre dostu değildir. Bu nedenle, yüksek çimento oranını değiştirmek için çalışmalar gereklidir.
- Nano malzemelerin RPB'ye eklenmesi iyi mekanik davranış gösterir, bu nedenle nanomalzemeler içeren RPB'nin gelişimi daha ekonomik ve mevcut nanomalzemeler kullanılarak test edilmelidir.
- Nano partiküllerin RPB değil, sıradan beton üzerindeki etkisi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Nano kil içeren RPB'nin davranışı hakkında yeterli bilgi yoktur.
- Kuvars tozunun farklı granit oranlarıyla değiştirilmesinde RPB'nin davranışı üzerinde yeterli çalışma yoktur.
- Farklı kuvars tozunu kuvars kumu ile karıştırmayı ve mikro yapısını inceleyerek RPB basınç dayanımı üzerindeki etkisini netleştirmek için doğrulamalara ve daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.
- UYPB ve RPB'nin tokluğunu ölçmek için standart bir yöntem geliştirilmemiştir.
- Çatlama ve RPB için değerlendirme yöntemi hakkında verilerde eksiklik vardır (Yazıcı, 2017).

Araştırmacıların Katkısı

Araştırmada; İlker Bekir TOPÇU, tasarımın yapılması, analizlerin yapılması, verilerin değerlendirilmesi, makalenin genel kontrolünün yapılması; Elif SARIKAYA, bilimsel yayın araştırması, saha çalışması, makalenin oluşturulması, grafiklerin hazırlanması; Erdi AKKAN, makalenin kontrolünün yapılması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Al-Attar, A. A., Abdulrahman, M. B., Hamada, H. M., & Tayeh, B. A. (2020). Investigating the behaviour of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete beams after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials Research and*

Technology, 9(2), 1966-1977. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.029>

Bae, B. I., Choi, H. K., Lee, B. S., & Bang, C. H. (2016). Compressive behavior and mechanical characteristics and their application to stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(6), 1-11. Doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6465218>

Bakış, A. (2018). Atık Çelik Lif Takviyeli Pomza İçeren Reaktif Pudra Betonun Rijit Kaplama İmalatında Kullanımı, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 63-71. doi: <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.414948>

Bakış, A., Hattatoğlu, F. ve Bayrak, O.Ü. (2017). Reaktif Pudra Beton ile İnşa Edilecek Rijit Yol Kaplamasının Maliyet Hesaplaması, *Iğdır Üniversitesi FBE Dergisi*, 7(1), 183-194. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jist/issue/34624/389692>

Dallaire, E., ve Aitcin, P.C. (1998). Reactive Powder Concrete in Use, *ASCE Journal of Civil Engineering*, 68(1), 4-48.

Dallaire, E., Aitcin, P.C., ve Lachemi, M. (1998). High-Performance Powder, *Civil Engineering*, 68(1), 48-51. Retrieved from <https://www.proquest.com/scholarly-journals/high-performance-powder/docview/228498898/se-2?accountid=201395>

Dauriac, C. (1997). Special concrete may give steel stiff competition. *The Seattle Daily Journal of Commerce*, 9, 15-17.

Dugat, J., Roux, N., & Bernier, G. (1996). Mechanical properties of reactive powder concretes. *Materials and structures*, 29(4), 233-240. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02485945>

Düzgün, E. (2004). *Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Performanslarının İncelenmesi* (Bitirme projesi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Erosemiah, D., Sakthieswaran, N., ve Viji, R. (2019). Microstructural Analysis of A Reactive Powder Concrete at Elevated Temperature 7(2), 1-8. Retrieved from [Microstructural Analysis of A Reactive Powder Concrete at Elevated Temperature - IJERT](https://www.ijert.org/Microstructural-Analysis-of-A-Reactive-Powder-Concrete-at-Elevated-Temperature-IJERT)

Gilliland, S. K. (1996, June). Reactive powder concrete (RPC), a new material for prestressed concrete bridge girders. In *Building an International Community of Structural Engineers* 1, 125-132. Retrieved from <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0098664>

- İpek, M. (2009). *Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Davranışına Katılma Süresince Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Etkileri* (Doktora tezi) Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- İpek, M., İyiliksever, R., ve Yılmaz, K. (2014). Atık Mermer Bulamacının Reaktif Pudra Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, *SAÜ FBE Dergisi*, 18(3), 183-192. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/287532450_Atik_mermer_bulamacinin_reaktif_pudra_betonun_mekanik_ozelliklerine_etkisi
- Mishra, S., ve Mistry, R. (2020). Reviewing Some Properties of Ultra High Performance Concrete *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(6), 108-121. Doi: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV9IS060156>
- Reda, M.M., Shrive, N.G., ve Gillott, J.E. (1999). Microstructural Investigation of Innovative UHPC, *Cement and Concrete Research*, 29(3), 323-329. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00225-7)
- Richard, P., ve Cheyrezy, M. (1995). Composition of Reactive Powder Concretes, *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511, Doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- Richard, P., ve Cheyrezy, M. (1994). Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, *Concrete Technology: Past, Present and Future*, Proc. of V. M. Malhotra Symp., 144, 507-518. Retrieved from <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/4536>
- Roux, N., Andrade, C., ve Sanjuan, M.A. (1996). Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(1) 1-6. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1996\)8:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:1(1))
- Salim, L., Gh., Al-Baghdadi, H., M., ve Muteb, H., H. (2019). Reactive Powder Concrete with Steel, Glass and Polypropylene Fibers as a Repair Material, *Civil Engineering Journal*, 5(11), 2441-2449. Doi: <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091422>
- Sadrekarimi, A. (2004). Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), 409-417. Doi: <https://doi.org/10.3151/jact.2.409>
- Sarika, S. ve John, E. (2015). A Study on Properties of Reactive Powder Concrete *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(11), 110-113. Doi: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS110170>
- Selveraj, R. and Priyanka, R. (2015). Reactive Powder Concrete with and without Fibers, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(9), 884-890. Doi: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS090436>
- Topçu, İ.B., ve Karakurt, C. (2005). 'Reaktif Pudra Betonları', *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 437(3) 25-30. Erişim adresi: <https://izmir.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/94.pdf>
- Topçu, İ.B., ve Karakurt, C. (2005). Kentsel Altyapılarda Reaktif Pudra Betonlarının Kullanımı, 4. Kentsel Altyapı Ulusal Sempozyumu, Eskişehir. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/277957046_Kentsel_Altyapılarda_Reaktif_Pudra_Betonların_in_Kullanımı
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., ve Mumyalmaz, Y.A. (2014). Reaktif Pudra Betonun Teknik Özellikleri Üzerine Bir İnceleme, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(1), 29-47. Erişim adresi: <https://avesis.ogu.edu.tr/yayin/e9a123c8-93ce-40e3-b24a-ff0a50d97b58/reaktif-pudra-betonunun-teknik-ozelikleri-uzerine-bir-inceleme>
- Yadollahi, M.M., ve Varolüneş, S. (2020). Farklı Kür Koşullarının Reaktif Pudra Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11(1), 353-361. Doi: <https://doi.org/10.24012/dumf.537454>
- Yazıcı, H. (2017). Onarım ve Güçlendirmede Malzeme, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir. Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/3919573-Onarim-ve-guclendirmede-malzeme-ii-bolum-doc-dr-halit-yazici.html>
- Yerlikaya, M. (2005). Çelik tel donatılı betonların deprem etkisi altında davranışları, *Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 302-304, Kocaeli.