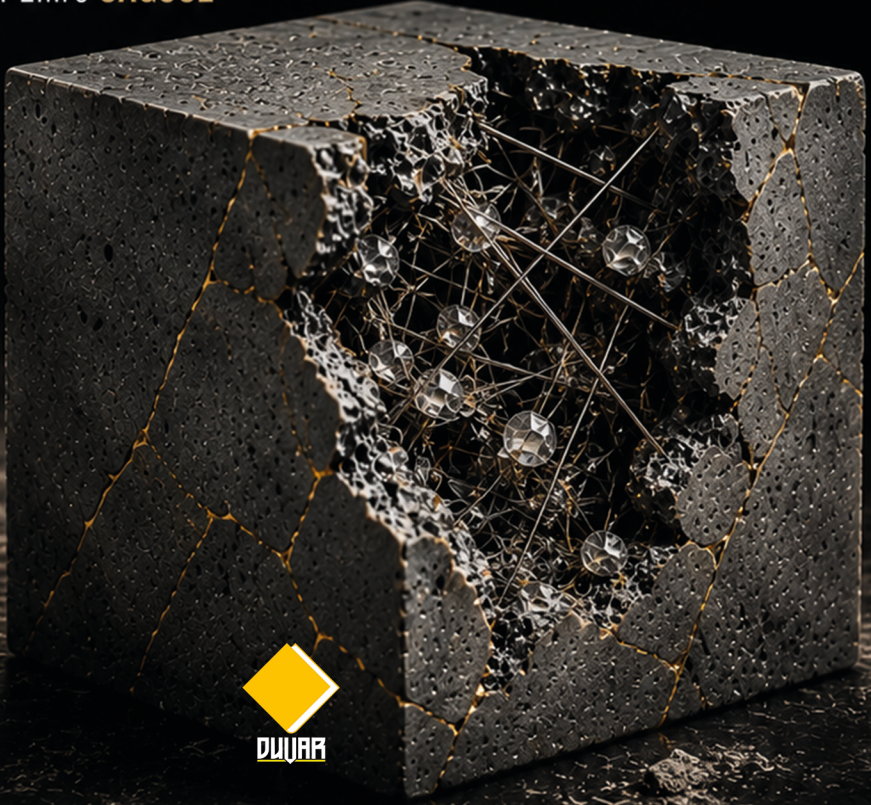


REAKTİF PUDRA BETONLARININ

TARİHİ, BİLEŞİMİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİ
VE KULLANIM ALANLARI

Dr. Öğr. Üyesi Yakup Murat **ÇEBİ**
Dr. Öğr. Üyesi Arif Emre **SAĞSÖZ**



REAKTİF PUDRA BETONLARININ TARİHİ, BİLEŞİMİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI*

Dr. Öğr. Üyesi Yakup Murat ÇEBİ*

Dr. Öğr. Üyesi Arif Emre SAĞSÖZ*

* Bu kitap, Yakup Murat ÇEBİ'ye ait Dr. Öğr. Üyesi Arif Emre SAĞSÖZ danışmanlığında hazırlanan “*Yüksek Sıcaklığın Nano ve Mikro Partiküllü Reaktif Pudra Betonların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi*” isimli doktora tezinden türetilmiştir.

* Bitlis Eren Üniversitesi

* Atatürk Üniversitesi



***Reaktif Pudra Betonlarının Tarihi, Bileşimi,
Mekanik Özellikleri ve Kullanım Alanları***
Dr. Öğr. Üyesi Yakup Murat ÇEBİ
Dr. Öğr. Üyesi Arif Emre SAĞSÖZ

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN
Basım Tarihi: Haziran 2026
Yayıncı Sertifika No: 49837
E-ISBN: 978-625-8936-02-5

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

ÖNSÖZ

Bu kitap, ultra yüksek dayanımlı beton ailesi içinde önemli bir yeri olan reaktif pudra betonlarının (RPB) gelişimi, bileşimi, mekanik özellikleri ve uygulama alanlarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. RPB'lerin özellikle yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren özel yapılarda kullanım potansiyeli incelenmiştir. Bu çalışmanın, RPB alanında çalışacak araştırmacılara ve mühendislere faydalı bir referans kaynağı olması hedeflenmiştir.

.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	III
ÖZET.....	VI
TABLolar DİZİNİ.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
GİRİŞ.....	1
Reaktif Pudra Betonu Alanında Yapılan Çalışmalar	3
KURAMSAL TEMELLER	15
Reaktif Pudra Betonu Karışımında Kullanılan Yapı Malzemeleri	19
Reaktif Pudra Betonunun Mekanik Özellikleri.....	24
Reaktif Pudra Betonunun Özelliklerine Bileşenlerin Etkisi	26
RPB'ye çimentonun etkisi	26
Karışım suyunun etkisi	27
RPB için agregası seçimi.....	28
Reaktif pudra betonlarında mineral katkıının etkisi.....	29
Kür yöntemleri.....	30
Standart su kürü	31
Isıl işlem kürleri	31
Betonun yerleştirilmeden önce ısıtılması.....	31
Betonun yerleştirilmesinden sonra ısıtılması	32
İçten ısıtma (elektrikle ısıtma)	32
Atmosfer basıncında buhar kürü.....	32
Sıcak su kürü.....	32
Yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav).....	33
Reaktif pudra betonlarının uygulama alanları.....	35
Reaktif pudra betonlarının avantajları	36
Reaktif pudra betonlarının sınırlı yönleri.....	37
Nano Malzemeler.....	37
Nano teknoloji.....	37
Nano çimento	41
Mikro silika.....	43
Nano silika	44
Nano alümina	45
Betonda yüksek sıcaklık	47
Yüksek sıcaklığın betona etkileri.....	47

Agreganın yüksek sıcaklıktaki davranışı	48
Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkileri	49
Basınç dayanımı.....	49
Çekme dayanımı	50
SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR.....	52

ÖZET

Reaktif pudra betonu 1995'ten sonra geliştirilerek günümüze kadar gelen basınç dayanımı 200 MPa'ı aşan ultra yüksek dayanımlı betondur. Normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre reaktif pudra betonları daha yoğun kompasiteye sahiptir. Bu, tane boyutları birbirine yaklaştırılarak sağlanmaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan iri agrega yani çakılın yerini reaktif pudra betonlarında silis kumu almaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan ince agrega yani kumun yerini ise reaktif pudra betonlarında silis pudrası veya silis unu almaktadır. Ayrıca silis dumanı kullanılarak betonun kompasitesi iyice arttırılmaktadır. Reaktif pudra betonlarında, normal dayanımlı betona göre yaklaşık 3 kat daha fazla çimento kullanılmaktadır. Bu betonlarda su/bağlayıcı oranı genellikle 0,14-0,25 aralığındadır. Betondaki bu az su/bağlayıcı oranından dolayı, betonda oluşacak işlenebilme problemini çözmek için betona hiper-süperakışkanlaştırıcı katılmaktadır. Bu betonlar yoğun kompasiteye sahip olduklarından dolayı poroziteleri dolayısıyla geçirimlilikleri düşüktür. Geçirimlilikleri düşük olduğundan dolayı da dayanıklılıkları yüksektir. Reaktif pudra betonlarına kısa kesilmiş çelik lifler katılarak bu betonların çekme dayanımları da arttırılmaktadır. Böyle bir beton, küp basınç dayanımı 200-800 MPa arasında, çekme dayanımı 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjisi yaklaşık 30000 J/m²'lik bir betondur. Birim ağırlığı 2500-3000 kg/m³ civarındadır. Bu betonlar, daha az sünme göstermektedir. Rezilyans değerleri ve süneklikleri dolayısıyla toklukları normal betona göre fazladır. Süneklikleri normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazladır. Reaktif pudra betonları tünel, savunma amaçlı yapılar ve ağır atık depolama tesislerinde de rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca rögar kapağı ve yağmur suyu ızgarası yapımında da kullanılmaktadır. Bütün bu üstün mekanik özelliklerinden dolayı reaktif pudra betonları, betonların geleceği olmaya en kuvvetli aday betonlardır.

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Farklı beton türlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	25
Tablo 2. Yüksek dayanımlı betonların ve reaktif pudra betonlarının karşılaştırılması	25
Tablo 3. Aynı taşıma gücüne sahip elemanların RPB ile karşılaştırılması.....	26

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Betonun gelişiminde basınç dayanımı ile su/çimento arasındaki ilişki (Taşdemir ve Bayramov 2002).	16
Şekil 2. Farklı malzemelerden üretilmiş kiriş elemanları (moment taşıma kapasiteleri aynı) (Dauriac 1997).	26
Şekil 3. RPB’de s/b grafiği (Karabulut 2006)	28
Şekil 4. Reaktif pudra betonlarının dayanımına agrega tipinin etkisi	29
Şekil 5. Farklı betonlardaki boşluk çapı dağılımları (Fehling vd. 2005).	30
Şekil 6. a) Tibet demiryolu; b) Pedestrian Köprüsü (Yazıcı 2007)	36
Şekil 7. Reaktif pudra betonu ile üretilmiş prefabrik elemanlar (www.iston.com.tr)	36
Şekil 8. Beton bileşenlerinin tane boyutu ve özgül yüzey alanı	39
Şekil 9. Saf çimento hamurunun (A), nano silika ihtiva eden çimento hamurunun (B) ve sentetik CSH ihtiva eden çimento hamurunun (C) şematik hidrasyon gelişimi (Land ve Stephan 2012).	40
Şekil 10. Nano partiküllerin beton içindeki durumlarının şematik gösterimi ...	42
Şekil 11. Harçta sıcaklık (600°C) etkisi öncesi ve sonrası görüntüsü	48

GİRİŞ

Nüfus artışına bağlı olarak artan ihtiyaçlar ve gelişen teknolojiye bağlı olarak ülkemizde ve tüm dünyada yüksek dayanımlı betonlara ve özel betonlara ihtiyaç giderek artmaktadır. Gökdelenler, nükleer reaktörler, askeri amaçlı yapılar, özel sığınaklar, yeraltı ve deniz yapıları gibi birçok yapıda istenilen yüksek dayanımlar için reaktif pudra betonları (RPB) en çok tercih edilen beton türü olmuştur. Özellikle 1990'lı yıllardan sonra RPB'ler birçok uygulamada yüksek durabilite ve basınç dayanımı özellikleri sebebiyle güvenle kullanılmıştır. RPB'ler ile 100-800 MPa aralığında basınç dayanımları elde edilebilmektedir. Bu betonlarda kaba agregası yerine kırılmış kuvars kumu ve ince agregası yerine kuvars pudrası kullanılmasından dolayı pudra betonu olarak isimlendirilmektedir. RPB'lerin mekanik özellikleri (eğilme ve basınç dayanımı gibi) normal dayanımlı betonlara kıyasla daha yüksektir (Richard ve Cheyrezy 1995).

RPB ilk olarak Richard ve Cheyrezy (1995) tarafından yapılan bir çalışmada Fransa'da Bougues Laboratuvarı'nda geliştirilmiştir. İlerleyen yıllarda da birçok araştırmacı tarafından RPB ve özellikleri konusunda araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar dikkate alındığında RPB'lerin yüksek basınç dayanımlarının yanında geçirimsiz ve sünek davranış gösterdikleri söylenebilir. RPB'lerin üretiminde çimentonun yanında silis dumanı, öğütülmüş mineral katkıları ve çelik lifler kullanılmaktadır. RPB'lerde yüksek dayanım ve durabilitenin elde edilebilmesi için beton üretiminde iri agregası kullanılmamalı, kum yerine kuvars pudrası kullanılmalı, su/çimento oranı 0.15-0.30 gibi çok düşük olmalı ve özel kür yöntemleriyle kür edilmelidir.

Gelişen teknoloji ile birlikte nano boyutlu malzemelerin her alanda olduğu gibi yapı malzemesi alanında da kullanımı her geçen gün artmaktadır. Özel betonların üretiminde amaca uygun hangi nano malzemenin kullanılacağına belirlenmesi ve etkilerinin araştırılması önem taşımaktadır. Malzeme olarak nano malzemelerin kullanımının yanında nano teknolojinin imkânlarından yararlanılarak betonun içyapısı incelenebilmektedir. Bu tür çalışmalarda SEM görüntülerinin elde edilmesi ön plana çıkmaktadır. Betonun içyapısı incelenirken nano boyutlu hidratasyon jellerinin oluşum ve gelişimi araştırılmalıdır. Tüm çimento esaslı yapı malzemeleri ve özellikle betonun mekanik özelliklerine (basınç dayanımı gibi) en önemli etkiyi, nano ölçekli hidratasyon ürünleri sağlamaktadır. Bu hidratasyon ürünü jellerden etrenjit, CH (kalsiyum hidroksit) ve CSH (kalsiyum silikat hidrat) ön plana çıkmaktadır (Monteiro vd. 2009; Lim ve Mondal 2014; Norhasri vd. 2017).

Yapıya/malzemeye zarar veren ve hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynaklarına örnek olarak; yangınlar, özel üretimlerden dolayı endüstri fırın

bacalarında görülen sıcaklıklar, hava alanı pistlerinde sürtünmenin sebep olduğu ısınmalar ve nükleer reaktörler verilebilir (Aköz ve Yüzer 1994; Aköz vd. 1999; Sakr ve El-Hakim 2005).

Gelişen teknoloji, sanayileşme ve nüfusun giderek çoğalmasına paralel olarak toplu yerleşim bölgelerin fazlalaşması yangın riskinin ve buna bağlı olarak yangının maddi ve manevi zararlarını artırmaktadır. Yüksek sıcaklıklar, yapılarda dayanıklılık problemlerine yol açan en önemli fiziksel etkilerdendir ve bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının kullanım dışı kalmasına neden olabilmektedir. Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme elemanlarda betonun ve çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişikliklerin sonucu olarak betonda çatlama ve parçalanma gözlenirken aderansta da önemli kayıplar oluşabilmektedir (Bingöl 2008).

Binalardaki yangınlarda 1200°C'ye kadar çıkan sıcaklıklar ölçülebilmektedir. Yapı malzemeleri bu sıcaklığa kadar ısıtıldığında ahşabın yandığı, çeliğin yumuşayıp mukavemet kaybettiği, beton veya taşların ise parçalanıp döküldüğü görülmektedir. Önemli yapı malzemelerinin hiç biri bu yüksek sıcaklıklara dayanmamaktadır. Bu malzemelerden betonun diğerlerine kıyasla biraz daha dayanıklı olduğu ve daha uzun sürede parçalandığı rapor edilmiştir (Kocataşkın 2000).

Bazı endüstri fırın bacalarında sıcaklık 1250-1300°C'ye kadar ulaşabilmektedir. Günümüzde bacalardaki artık ısı enerjisinin geri kazanımı için ısı eşanjörleri, ısı reküperatörleri, döner tip ısıtıcılar, ısı boruları ve ısı pompaları gibi araçlar kullanılarak bu sıcaklıklar 200°C'ye kadar düşürülebilmektedir (Avcı 1984).

Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından 260 km/saat hızla çıkan 196°C'deki egzoz gazları, hava alanı pistlerindeki sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. İniş ve kalkışlardaki tekrarlı ısınma ve soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda yük alma kapasitelerini muhafaza etseler de hava alanının işlevleri kısıtlanmaktadır (Ramakrishnan vd. 1991).

Jet uçaklarının kullanımına bağlı olarak beton uçak pistlerinde ve park sahalarında ciddi şekilde bozulmalar oluşmaktadır. Özellikle F/A-18 uçağının destek kuvvet ünitesinin egzoz gazı üst beton tabakasının parçalanmasına neden olabilmekte ve bu durumda hasarlı kısımların belli aralıklarla değiştirilmesi gerekmektedir. Benzer bir sorun da jet motor test hücrelerindeki beton kaplamalarda görülmektedir (Malvar ve Hironaka, 1991).

Nükleer reaktörlerde sistemin sıcak parçalarından transfer olan ısı ile nötron ve gama ışınlarının baskısına bağlı olarak oluşan sıcaklıklardan dolayı, reaktörü

koruyan beton yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Radyasyon, koruyucu betona önemli zarar vermez, ancak sıcaklık nedeniyle beton daha zayıf hale gelir ve nötron baskısına karşı direnci azalır. Hızlı nötron ve gama ışınları yavaşlatılırken reaktör çekirdeğinden açığa çıkan enerji koruyucu malzemede tutulur ve ısı şeklinde gönderilir. Bu ısı özellikle reaktör çekirdeğine yakın bölgeleri etkilemektedir. Sodyum yakma havuzlarının etkisi ile tipik bir sodyum-beton reaksiyonu 400°C’de başladığı ve yarım saat içinde daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığı rapor edilmiştir (Sakr ve El-Hakim 2005).

Yüksek sıcaklığın etkisi betonarme yapıların hizmet ömürleri boyunca maruz kalabilecekleri en ciddi risklerden biridir. Beton 500-600°C sıcaklık değerlerinde büyük hasarlar almakta ve yapısal problemler ortaya çıkmaktadır. Yapı malzemesi olan betonun yangına ve/veya yüksek sıcaklığa maruz kaldığında davranışını belirleyen özellikler; betonun içerisindeki agrega ve çimentonun özellikleri, betonun boşluk miktarı (hava yüzdesi), nem miktarı ve maruz kalınan yüksek sıcaklık miktarıdır. Yüksek dayanımlı betonlar, düşük dayanımlı betonlara göre yüksek sıcaklık etkilerine daha az dayanıklıdır. Bunun en önemli nedeni olarak düşük su/çimento oranları gösterilmektedir. Yangın sırasında düşük su/çimento oranı nedeniyle, dökülme ve kabuk atma davranışı RPB’lerde daha fazladır. Tüm çimento esaslı yapı malzemeleri ve özellikle betonun mekanik özelliklerine (basınç dayanımı gibi) en önemli etkiyi, nano ölçekli hidrasyon ürünleri sağlamaktadır. Bu hidrasyon ürünü jellerden ön plana çıkanlar ise etrenjit, CH (kalsiyum hidroksit) ve CSH (kalsiyum silikat hidrat)’tır (Monteiro vd. 2009; Lim ve Mondal 2014; Norhasri vd. 2017).

Yüksek sıcaklığın beton ve betonarme yapılara olan olumsuz etkilerinin yanında, yangın söndürme çalışmalarında kullanılan ekipman ve yöntemlerde betonarme yapılarda görülen yangın sonrası davranışı için önemlidir. Özellikle RPB’ler özel amaçlar için kullanıldıkları için yangınlarda RPB’lerin davranışlarının araştırılması yüksek dayanımlı/performanslı betonların üretilmesi açısından önemlidir (Tanaçan vd. 2009).

Reaktif Pudra Betonu Alanında Yapılan Çalışmalar

Bir yapı malzemesi olan beton ile ilgili geçmişten günümüze birçok çalışma yapılmış, özellikle de 2000’li yıllarda özel yapılarda yüksek dayanım gereksinimlerinin karşılanabilmesi için RPB’ler üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmalarda ağırlıklı olarak RPB’lerin hangi malzemeler kullanılarak üretilbileceği ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmaların geneli dikkate alındığında, kuvars kumu ve pudrasına ek olarak kullanılacak malzemelerin yanında uygulanan küründe betonun mekanik özellikleri ve durabilitesi üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır.

Collepardi vd. (1997)'nin yaptıkları bir çalışmada, öğütülmüş/kırılmış kuvars kumu (0,15-0,40 mm) yerine maksimum boyutu 8 mm olan doğal agreganın (iyi derecelenmiş) kullanıldığı RPB'lerin basınç dayanımları araştırılmıştır. Agregada değişimi sebebiyle su/çimento oranı değiştirilmemiş ve basınç dayanımlarında belirgin bir değişim elde edilmediği bildirilmiştir. Tane boyutu daha küçük olan öğütülmüş kuvars kumu, çimento ve silis dumanı ile tane boyutu daha büyük olan iyi dereceli doğal agregada ile yer değiştirildiğinde, aynı işlenebilirlik seviyesinde, su/çimneto oranında artışa sebep olduğu ifade edilmiştir. Su/çimento oranında meydana gelen artışın basınç dayanımlarında azalmaya sebep olduğu ve eğilme dayanımlarının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar çalışmada kullanılan buhar kürü ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarının oda sıcaklığında kür edilen numunelere göre daha yüksek olarak elde edildiğini, büzülme ve sünme özelliklerinde daha olumlu sonuçlar alındığını ve beton özelliklerinde elde edilen bu iyileşmelerin betonun mikro yapısında oluşan değişimlerden kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Monosi vd. (2000) yapay agregaların kullanılması durumunda RPB'lerin özelliklerini inceledikleri çalışmada, eşit boyutlardaki yapay agregalar ile üretilen RPB'lerin basınç dayanımlarında meydana gelen yükselişin temel nedeninin agrega-çimento arayüzeyinde oluşan daha kuvvetli bağdan kaynaklandığını ifade etmişlerdir. SEM ile yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda da bu hipotezin doğru olduğunu ve doğal agregada ile çimento hamuru ara yüzünün RPB'lerin zayıf noktası olduğunu belirtmişlerdir.

Yang (2000) Yeni Zelanda da öğütülmüş silika tozu ve silika dumanı kullanarak yaptığı bir çalışmada dört farklı kür tipinin etkinliğini araştırmış ve tüm numunelerde 130 MPa üzerinde basınç dayanımlarının tespit edildiğini bildirmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinden, çalışmadaki yüksek dayanımların sebebinin homojen ve boşluk miktarının azaldığı bir beton içyapısından kaynaklandığını belirtmiştir.

İpek (2009) lifli ve lifsiz olarak üretilen betonlarda %54 lif katkısının en iyi sonucu verdiğini, en iyi kür tipinin 3 gün süreli 90°C'deki buhar kürü ve 12 saat süreli 300°C'deki etüv kürü olduğunu ve en yüksek basınç dayanımına 100 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerde ulaşıldığını bildirmiştir.

Yazıcı vd. (2009) buhar ve otoklav kürünün betonun çok hızlı dayanım kazanmasına bağlı olarak daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, standart su küründe hidratasyona katkısı olmayan kuvars tozlarının buhar ve otoklav küründe sıcaklık etkisiyle hidratasyona katkı sağlayarak betonun mekanik özelliklerinde iyileşme sağladığını ifade etmişlerdir.

Şahinoğlu (2010) silis dumanı ve çelik lifi ile dane boyutları 0.6 mm ve 8.00 mm olan kuvars ve diyorit agregalar kullanarak yaptığı çalışmada, yüksek

dayanımların elde edilebilmesi için mutlaka çelik lif katkısının kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

Yalçinkaya ve Yazıcı (2011) agrega hacminin RPB'lerin harç fazının işlenebilirlik, mekanik ve büzülme özellikleri üzerine etkisini araştırdıkları çalışmada, agrega hacminin artışıyla işlenebilirliğin ve büzölmelerin azaldığını belirtmişler ve en iyi performansın%48 agrega hacmine sahip numune karışımlarında tespit edildiğini bildirmişlerdir.

İpek vd. (2014) atık mermer bulamaçlarının RPB'lerde kullanılabilirliğini inceledikleri araştırmada, atık mermer bulamacı katkısı basınç dayanımında %6'lık bir azalma olmasına rağmen eğilme dayanımlarında önemli bir değişiklik olmadığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar, bu atığın kullanılmasıyla hem ekonomiye hem de çevreye olumlu etki sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Al-Hity (2019) çimento yerine uçucu kül ve doğal ince agrega yerine de öğütölmüş pomza ikame edilmiş RPB'lerin mekanik performansı üzerine silis dumanının etkisini inceledikleri çalışmada, en düşük basınç dayanımının 97.88 MPa olarak su kürü uygulanan %0 pomza tozu ve %50 uçucu kül ikameli harçlarda, en yüksek basınç dayanımının ise 123MPa olarak sıcak su kürü uygulanan %10 pomza tozu ve %30 uçucu kül ikameli harçlarda elde edildiğini bildirmiştir.

Kushartomo ve Octavivia (2019) RPB'lerindurabilitesi üzerine yaptıkları bir çalışmada tip II olarak adlandırılan çimentoda yüksek konsantrasyonlu sülfat etkisinde %30'dan daha az basınç dayanımı kaybı ve %1'den daha az ağırlık kaybı göröldüğünü bildirmişlerdir.

Yadollahi ve Varolgüneş (2019) manyetize edilmiş suyla üretilen lifli ve lifsiz RPB'lerin basınç dayanımlarını incelediği çalışmada, normal suyla üretilen lifli ve lifsiz RPB'lerin basınç dayanımlarının sırasıyla 153.48 MPa ve 134.01 MPa, 1 Tesla şiddetindeki manyetik alanla manyetize edilmiş suyla üretilen lifli ve lifsiz RPB'lerin basınç dayanımlarının ise sırasıyla 163.56 MPa ve 144.19 MPa olarak belirlendiğini bildirmişlerdir. Araştırmacılar manyetik suyla üretilen lifli ve lifsiz RPB'lerin, normal suyla üretilenlerden daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Issa (2020) mineral katkılarının RPB'ler üzerine etkisini incelediği çalışmada, %10 silis dumanı ve %20 pomza tozu ikameli numunenin 90 günlük basınç dayanımının 129.0 MPa, %10 silis dumanı, %40 yüksek fırın cürufu ve %20 pomza tozu ikameli numunenin ise 90 günlük basınç dayanımının 133.4 MPa olarak belirlendiğini belirtmiştir. Ayrıca, %60-70 ikame oranı karışımlarla yüksek performanslı beton üretiminin mümkün olabileceğini ifade etmiştir.

Mayhoub vd. (2021) kür tipinin kullanılan katkıların etkinliğinde önemli bir rol oynadığını ve otoklav kürü ile düşük çimento dozajı kullanılarak yüksek

basınç dayanımlarının elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, hacimsel değişikliklerin RPB’lerde en önemli sorunu oluşturduğunu ve bu sorunun geniş amaçlı kullanımları engellediğinin ifade etmişlerdir.

Du vd. (2022) yaptıkları çalışmada uçucu kül katkısının RPB’lerde olumlu etkiler gösterdiğini, ancak %25 uçucu kül katkısının basınç dayanımında azalmalara sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Velichko ve Vatin (2022) yaptıkları çalışmada, standart su kürü uygulanan 650 kg/m^3 , 700 kg/m^3 ve 750 kg/m^3 dozajlar için numunelerde 28 günlük basınç dayanımlarının sırasıyla 128, 137 ve 163 MPa olarak belirlendiğini ve mikro silika katkısının önemli bir katkı sağlamadığını bildirmişlerdir.

Zoldners ve Wilson (1973)’un yaptıkları hafif beton çalışmasında, farklı sıcaklık etkilerinde tam hafif betonların yarı hafif betonlara göre daha iyi dayanım gösterdiği, yüksek fırın cürufu kullanılmasının yangın etkilerinde bir avantaj sağlamayıp aksine betonun eğilme mukavemetini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir.

Saad vd. (1996) yaptıkları çalışmada, %10 silis dumanı içeren beton numunelerinin bütün sıcaklıklarda daha düşük porozite ve en yüksek basınç mukavemeti değerlerine sahip olduğunu, 600°C ’ye kadar ısıtılan betonda basınç mukavemetlerinin normal betona göre %64.6 daha fazla olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte %20-30 arasında silis dumanı içeren betonların 600°C ’ye kadar ısıtıldığında normal Portland çimentosu ile yapılan betonlara göre mukavemetlerindeki artışın sadece %28 olduğunu ifade etmişlerdir.

Karaca vd. (1997) yangın etkisinde hafif betonların davranışlarını inceledikleri çalışmada, yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımında düşüslere neden olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, 600°C ’ye maruz bırakılan numunelerden suda soğutulanlar dağıldığını, ancak havada soğutulanların dağılmadığını ve dayanımlarının önemli derecede azaldığını belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda, betonların yangın dayanımının sadece agrega ve petrografik yapı sebebiyle değil, yangın söndürme yönteminden de önemli bir şekilde etkilendiği ifade edilmiştir.

Phan ve Carino (1998) yüksek performanslı betonların yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özelliklerinin değişimini inceledikleri çalışmada, özellikle 25°C ile 400°C aralığındaki yüksek sıcaklıklıklara maruz kalan yüksek performanslı betonların, normal betonlara göre davranış farklılığı gösterdikleri bildirilmiştir. Ayrıca yüksek performanslı betonların, normal betonlara kıyasla daha hızlı dayanım kayıpları gösterirken hafif betonların daha iyi sonuçlar verdiği, 300°C üzerindeki sıcaklıklarda bütün betonlar numunelerinde hızlı dayanım kayıplarının gözlemlendiği belirtilmiştir.

Chan vd. (1999) normal ve yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıktan sonraki basınç ve çekme dayanımlarını inceledikleri

çalışmada, yüksek dayanımlı betonların normal betonlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, normal betonların ve yüksek dayanımlı betonların her ikisinde de çekme mukavemeti değerlerinin basınç mukavemeti değerlerine göre daha yüksek düşüşler gösterdiği ifade edilmiştir.

Chan vd. (2000) normal ve yüksek dayanımlı betonlarda soğutma yönteminin etkinliğini inceledikleri çalışmada, yüksek dayanımlı betonların normal dayanımlı betonlara kıyasla daha fazla basınç dayanımı kaybı gösterdiklerini ve ani soğutmanın betonun parçalanmasına ek bir katkı sağlamadığını bildirmişlerdir.

Kalifa vd. (2000) yaptıkları çalışmada yüksek performanslı betonların mekanik ve termal etkiler altında parçalandığını, parçalanmanın termo-mekanik bir süreçle oluşabileceği gibi, boşluklarda oluşan gaz basıncı sebebiyle de meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir.

Lawson vd. (2000) basınç dayanımları 40-100 MPa arasında değişen dört farklı beton gurubu kullanarak yaptıkları çalışmada, silis dumanı içeren yüksek dayanımlı beton numunelerinin 240-280°C arasındaki sıcaklıklarda patlayarak dağıldığını, ancak silis dumanı içermeyen karışımda patlama olayına rastlanmadığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar, patlayarak parçalanma olayının doğrudan sudaki kimyasal bağların açılması anında meydana gelen iç basıncın etkisiyle olduğu ifade etmişlerdir.

Poon vd. (2001) yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı betonların 600°C'nin altındaki sıcaklıklardaki basınç dayanımlarının normal beton numunelerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Bingöl ve Gül (2004) yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan hafif betonların basınç dayanımındaki kaybın, pomza katkı oranının artmasıyla azaldığını bildirmişlerdir ve maruz kalınan sıcaklık etkisinin mukavemet kayıplarındaki en önemli faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Chen ve Liu (2004) yüksek dayanımlı beton numunelerinde patlayarak parçalanmalar olduğunu, karbon ve çelik lif katkısında patlama zamanının geciktüğünü, polipropilen lif katkısında ise patlamanın olduğunu ancak dağılma olayının gerçekleşmediğini bildirmişlerdir. Araştırmacılar, karbon veya çelik lifler ile polipropilen liflerin karıştırılarak kullanılmasının yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonlarda en iyi sonucu verdiğini ifade etmişlerdir.

Li vd. (2004) yüksek sıcaklık etkisine tabi tutulan C40, C60 ve C70 betonlarının basınç, eğilme ve çekme dayanımlarını inceledikleri çalışmada, C70 betonunun en iyi sonuçları verdiğini ve 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda başlangıç beton özelliklerinin önemli bir etkisinin olmadığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca numune boyutunun artmasıyla dayanımın azaldığını ifade etmişlerdir.

Savva vd. (2005) kireçtaşı ve silis agrega katkıları ile üretilen betonların yüksek sıcaklık etkisi sonucunda mekanik özelliklerinin değişimini tahribatsız yöntemler ile belirlemişlerdir. Yüksek sıcaklık seviyeleri olarak; 100°C, 300°C, 600°C ve 750°C sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre puzolanik katkıların, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonların kalıcı dayanım özelliklerinde önemli etkiye sahip oldukları ifade edilmiştir. 300°C'nin bu etkilerde sınır sıcaklık değeri olduğunu ifade eden yazarlar, 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kireçtaşı ve silis agregası ile üretilen betonların normal betonlardan daha iyi sonuç verdiğini ama bu sıcaklıktan sonra ise normal betonlara göre daha kötü sonuçlar verdiklerini ifade etmişlerdir. 100°C-300°C arasında bütün karışımlarda başlangıç mukavemetine göre bir miktar artış olduğu ve bu artışın silis agregalı betonlarda daha fazla olduğu, 300°C-750°C aralığının ise betonda mukavemet kaybı için kritik değerler olduğu bildirilmiştir. Her sıcaklıkdeğerinde belirlenen elastisite modülü değerlerinde azalmalar elde edilmiş ve bu azalmanın kireçtaşı agregaları ile üretilen betonlarda daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

Sakr ve El-Hakim (2005) yaptıkları çalışmada ağır betonların yüksek sıcaklık etkisindeki fiziksel ve mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu kapsamda, beton numuneleri 1, 2 ve 3 saat olmak üzere üç farklı bekleme süresinde, 250°C, 500°C, 750°C ve 950°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmışlardır. Üç farklı tür beton üzerinde yapılan çalışmada, ilmenit, barit ve çakıl betonları incelenmiştir. En yüksek yoğunluk, elastisite modülü ve en düşük absorpsiyon yüzdeleri ilmenit betonlarında elde edilmiştir. Bunun yanında mukavemet özellikleri açısından ilmenit betonları diğer betonlara göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bütün beton türleri için ısıtma süresinin mekanik özellikler ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda su ile yangın söndürmenin büyük hasarlara sebep olacağı ifade edilerek hava ve/veya köpük ile yangın söndürme ve soğutma çalışmalarının yapılması tavsiye edilmiştir.

Hüsem (2006) tarafından yapılan çalışmada normal ve yüksek dayanımlı mikro betonların yüksek sıcaklıklar etkisinde basınç ve eğilme mukavemetleri deneysel olarak araştırılmıştır. Mikro beton numuneleri 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklık etkilerine bir saat süreyle maruz bırakılmışlardır. Daha sonra numunelerin bir kısmı havada bir kısmı ise suda soğutulmuştur. Çalışma kapsamında prizmatik numuneler üzerinde eğilme deneyleri yapılmış ve eğilme deneyinde kırılan numunelerde kırılan parçalar üzerinde de basınç deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda yüksek sıcaklık etkisinin her iki beton türünde de dayanım azalmalarına sebep olduğu ve suda soğutmanın bu azalma etkisini arttırdığı tespit edilmiştir. Normal betonlarda yüksek sıcaklığın

artmasıyla orantılı olarak dayanım azalmaları elde edilirken, yüksek dayanımlı beton numunelerde 200°C ve 400°C sıcaklık etkisinde ve havada soğutulan numunelerde sırasıyla %13 ve %5 dayanım artışları elde edilmiştir. Bunun yanında yüksek dayanımlı betonlarda 400°C üzerindeki sıcaklıklarda numuneler patlayarak parçalanmışlardır.

Chang vd. (2006) tarafından yapılan deneysel çalışmada farklı yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılan betonların sıcaklık etkisi sonrasında gerilme-deformasyonilişkisi araştırılmıştır. Silis agregası ile üretilen betonların sıcaklık etkisi öncesi basınç dayanımları 27 MPa ve 40 MPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre betonların sıcaklık etkisi öncesindeki basınç dayanımlarının yüksek olmasının, sıcaklık etkisi sonrasındaki mekanik özelliklerine olumlu bir etkisi tespit edilememiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde mekanik özellikler açısından sıcaklık etkisi ile en fazla kayıplar sırasıyla elastisite modülü, çekme mukavemeti ve basınç mukavemetinde tespit edilmiştir.

Lau ve Anson (2006) yaptıkları çalışmada çelik lifli yüksek dayanımlı betonların farklı sıcaklık etkilerinde davranışını araştırmışlardır. %1 oranında çelik lif içeren betonların 105°C-1200°C arasında değişen yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra basınç, eğilme mukavemetleri, elastisite modülleri ve porozitelerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda 400°C'ye kadar olan yüksek sıcaklık etkilerinde basınç dayanımlarında önemli kayıplar elde edilmezken, 400°C üzerindeki sıcaklık etkilerinde basınç dayanımlarında kayda değer azalmalar elde edilmiştir. Ayrıca 600°C'den itibaren ise yüksek dayanımlı betonlarda normal betonlara kıyasla daha fazla dayanım kayıpları elde edilmiştir. Lif kullanımı ise mekanik özelliklere olumlu katkı sağlamıştır. Bu olumlu etki 1200°C sıcaklık etkisinde de görülmüştür.

Ariöz (2007) yaptığı çalışmada dere agregası, kırılmış kalker agregası ve normal portland çimentosu kullanılarak üretilen betonların yüksek sıcaklık etkisinde davranışını araştırmıştır. 200°C-1200°C aralığındaki yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılan beton numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi araştırılırken, betonlar 20°C/dakika artış hızıyla hedef sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Numuneler soğutulurken normal oda sıcaklığında soğumaya bırakılmışlardır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası için ağırlık kayıpları ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Sıcaklık 600°C'ye erişene kadar numunelerde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. 600°C üzerindeki sıcaklıklarda çatlaklar oluşmuş ve sıcaklık artışına orantılı olarak çatlak miktar ve boyları artmıştır. 1200°C'de ise beton numuneler tamamen dağılmışlardır. Betonların ağırlıklarının, sıcaklığın artmasıyla 800°C'ye kadar kademeli olarak azaldığı bu sıcaklıktan itibaren ise çok keskin düşüşler gösterdiği belirtilmiştir. Yazarlar, yüksek sıcaklık etkisinin

dere agregası ile üretilen betonlarda daha belirgin olduğunu ve bunun sebebinin ise silis içeriği olabileceğini ifade etmişlerdir.

Aydın ve Baradan (2007) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül ve pomza kullanılarak üretilen çimento harçlarının mekanik özellikleri yüksek sıcaklık etkisinde incelenmiştir. Çalışma kapsamında üç saat süreyle 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılan dört farklı karışımın mekanik özellikleri araştırılmıştır. Pomzanın kullanıldığı numuneler 600°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda dağılmadan iyi sonuçlar vermiştir. Pomzalı beton numuneler, 600°C sıcaklıkta ise eğilme ve basınç dayanımlarının sırasıyla %32 ve %4'ünü kaybetmişlerdir. Uçucu kül ile yapılan karışımlardan ise %60 oranında uçucu külün kullanıldığı numuneler en iyi sonuçları vermiştir. 900°C sıcaklık etkisinde tüm numunelerde belirgin mukavemet kayıpları tespit edilmiştir. Soğutma tekniği açısından ise havada soğutmanın suda soğutmadan daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Lee vd. (2008) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve soğutulmuş betonların özelliklerini araştırmışlardır. Yazarlar yüksek sıcaklık etkisindeki betonlar üzerinde yapılan önceki çalışmalarda, yüksek sıcaklığın betonun özelliklerini bozduğunun, mekanik özelliklerde azalışa sebep olduğunun ifade edildiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma kapsamında ise, betonda 300°C'ye kadar olan yüksek sıcaklık etkilerinde, basınç dayanımı artışları elde edildiğini göstermişlerdir. Dayanım artışının ise silis esaslı agrega ile üretilen betonlarda daha fazla olduğunu ve bunun nedeni olarak da çimento ile agrega arasındaki aderansın silisli agregalarda daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Peng vd. (2008) lifli betonların soğumasını temel alan bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Soğuma esnasında meydana gelen termal şok beton numunelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiler göstermektedir. Bu sebeple 200°C-800°C arasında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış lif katkılı beton numuneler çalışma kapsamında incelenmiştir. Doğal soğutma, 5 ile 60 dakika arasında değişen sürelerde su püskürtme ve su içinde tutma gibi farklı soğutma şekilleri denenmiştir. Su içinde tutma ve 30 dakikadan fazla sürelerde su püskürtme gibi hızlı soğutma tekniklerinin termal şoka sebep olduğu tespit edilmiştir. Hızlı soğutma yöntemlerinin daha fazla hasara sebebiyet verdiği ve betonun basınç mukavemeti, çekme mukavemeti ve kırılma enerjisi özelliklerinde, doğal soğutmaya kıyasla daha fazla kayıplara yol açtığı belirtilmiştir. 30 dakika ve üzerinde su püskürtmenin suda bekletme ile bir birine yakın hasara yol açtığı, ayrıca çelik ve polipropilen lif kullanımının hem mukavemet hem de kırılma enerjisi özelliklerine olumlu etki yaptığı ifade edilmiştir.

Aydın vd. (2008) tarafından iki farklı kür (su ve otoklav kürü) ile üretilen yüksek dayanımlı betonlar ile normal betonların yüksek sıcaklık (900°C'ye

kadar) etkisi araştırılmıştır. Basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, elastisite modülü ve ağırlık kaybı gibi mekanik özellikler belirlenmiştir. Puzolanik katkıların yüksek oranda kullanıldığı ve 28 günlük normal kür şartlarında üretilen betonlarda elde edilen mekanik özelliklerin daha kısa sürede otaklav kürü ile elde edilebildiği tespit edilmiştir. 300°C yüksek sıcaklık etkisinde bütün beton numunelerinde dayanım artışları belirlenmiştir. 900°C’de ise literatürdeki birçok çalışmada elde edilen sonuçların aksine normal dayanımlı betonlar, yüksek dayanımlı betonlara kıyasla daha kötü sonuçlar vermiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan beton numunelerin eğilme dayanımları, basınç dayanımlarından daha belirgin bir şekilde kötü etkilenmiştir. Bunun yanında çelik lif katkısı yüksek sıcaklık etkisinde beton numunelere olumlu katkılar sağlamıştır.

Peng vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada reaktif pudra betonlarının yüksek sıcaklık etkisinde davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. 200°C ile 600°C aralığında yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerin parçalanma mekanizması ve kalıcı mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, numunelerin basınç dayanımları ve eğilme dayanımları sıcaklık etkisi öncesi ve sonrasında belirlenmiştir. Sıcaklığın 400°C’ye kadar artmasıyla beton numunelerin basınç dayanımında yükselmeler tespit edilmiştir. 400°C üzerindeki sıcaklıklarda ise hem normal betonlarda hem de yüksek dayanımlı betonlarda ani mukavemet kayıpları tespit edilmiştir. Çalışmada reaktif pudra betonlarının, normal ve yüksek dayanımlı betonlara kıyasla yüksek sıcaklık etkisinde daha olumsuz sonuçlar vermiştir. Özellikle 600°C sıcaklık etkisinde davranış, belirgin olarak gözlemlenmiştir. Hem yüksek dayanımlı betonlarda hemde reaktif pudra betonlarında kırılma mekanizması parçalanarak meydana gelmiştir. Reaktif pudra betonlarının basınç dayanımları 200°C’den sonra azalmaya başlamıştır. 600°C’de ise dayanım azalışları artmış ve %47 oranında dayanım kayıpları elde edilmiştir. Yine de %47’lik dayanım kayıpları elde edilmesine rağmen normal betonlara göre daha yüksek basınç dayanımları çalışmada belirlenmiştir.

Canbaz (2014) yaptığı çalışmada reaktif pudra betonlarına yüksek sıcaklığın etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında, kuvars kumu, kuvars tozu, silis dumanı, çelik lif, polipropilen lif ve CEM I 52.5 R çimento kullanılarak üretilen reaktif pudra betonlarında lif oranının yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı araştırılmıştır. Çalışmada 20, 100, 400, 700 ve 900°C sıcaklıklar numunelere 3 saat boyunca etki ettirilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra yavaş yavaş soğutulan numunelerin basınç dayanımı, birim ağırlıkları ve ultrases hızları belirlenmiştir. Yazar, 400°C sıcaklık etkisinde en yüksek basınç dayanımlarının elde edildiğini belirtmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalınacak uygulamalarda polipropilen liflerle üretilmiş reaktif pudra betonlarının prefabrik ürünler olarak üretilip rahatlıkla kullanılabilecekleri önerilmiştir.

Abid vd. (2017) yılında yaptıkları derleme çalışmada reaktif pudra betonlarının yüksek sıcaklık ve kalıcı özellikleri üzerine yapılmış çalışmaları incelemişlerdir. Yazarlar inceledikleri çalışmalar neticesinde şu sonuçlara varmışlardır: Reaktif pudra betonlarında, sıkı mikro yapıları sebebiyle yüksek sıcaklık etkisinde önemli hasarlar ve parçalanmalar/patlamalar gerçekleşmektedir. Çalışma kapsamında ayrıca parçalanma kritik sıcaklığı ile basınç dayanımı arasında ilişki geliştirilmiştir. Bunun yanında reaktif pudra betonunda kullanılan çelik lif miktarı ile parçalanma dayanımı arasındaki ilişkide araştırılmıştır. Literatürden elde edilen yangın dayanıklılığı verilerinin, mevcut yönetmelik hükümleriyle karşılaştırması yapılmıştır.

Sultan ve Alyaseri (2020) yaptıkları çalışmada reaktif pudra betonlarının mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklık etkisindeki değişimlerini araştırmışlardır. Çalışmada, su/çimento oranı 0.25'ten daha düşük ve silika ile kuvars yüksek oranlarda kullanılmıştır. Reaktif pudra betonları beş farklı lif katkısında hazırlanmıştır. Bunlar; lifsiz, çam lifi, çelik lif, polipropilen lif ve çelik ile polipropilen lif karışımıdır. 800°C'ye kadar yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve dolaylı çekme dayanımları belirlenmiştir. Bunların yanında renk değişimleri, parçalanma, kütle kayıpları ve ıslates hızları da tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda; çelik lif ve çelik-polipropilen liflerin kullanıldığı karışımlarda 200°C'ye kadar mekanik özelliklerde iyileşme tespit edilmişken, 200°C'den yüksek sıcaklıklarda sıcaklığın artmasıyla dayanımlar düşmüştür. Yüksek dayanım kayıpları elde edilmesine rağmen, 800°C yüksek sıcaklık etkisinde en iyi sonuçları çelik lif-polipropilen lif karışımı numuneler vermiştir.

Arfa vd. (2022) yaptıkları çalışmada nükleer ve mekanik özellikler açısından optimum beton kalkanlamasının belirlenmesine dayanarak, sıradan beton ile farklı çelik lif içeriklerine (çimento ağırlıkça %0, 1, 2 ve 3) sahip yeni nesil reaktif pudra beton arasındaki performans farkını incelemişlerdir. İncelenen numunelerin özelliklerini belirlemek için yoğunluk, basınç ve çekme dayanımı, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve diferansiyel termal analiz (DTA) kullanmışlardır. Beton numuneleri için gama ışınlarının kütle zayıflama katsayılarını (σ , cm²/g) belirlemek için 1407 keV'a kadar dokuz farklı gama ışını enerji hattından yararlanmışlardır. Hazırlanan betonlar için makroskobik nötron kesitlerini (Σ , cm⁻¹) belirlemek için üç tip nötron enerjisinden (yavaş nötron, toplam yavaş nötron ve 10 keV'tan büyük enerjili nötron) faydalanmışlardır. Çalışma, nükleer reaktörlerin işletme ve kaza durumlarındaki simülasyonları için farklı beş sıcaklıkta (25, 100, 350, 500 ve 700°C) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, çelik lif içeriğinin RPB'nin mekanik ve nükleer özelliklerine bir miktar olumlu etki ettiğini göstermiştir. Ayrıca, sonuçlar,

oda sıcaklığında RPB'nin gama radyasyonu için mekanik özellikler ve nükleer zayıflama özelliklerinde üstünlük sağladığını, ancak nötronlar için sıradan betonun daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Her iki beton türünün de yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından sonra, RPB'nin nükleer ve mekanik özellikleri, sıradan betona kıyasla iyileşmiştir.

Abbas vd.'nin (2023) gerçekleştirdiği deneysel laboratuvar araştırmasının temel amacı, atık yıkım malzemeleri kullanılarak, çimento içeriği azaltılarak, reaktif pudra betonunun yüksek ağırlığının düşürülebilmesi ve böylece çevre dostu, sürdürülebilir RPB üretilmesidir. Kil tuğla, pencere camı ve mozaik karo atıklarının toplanması, ezilmesi ve yüksek incelikte toz haline getirilmesi, atık depolama alanına ihtiyaç duymadan bertaraf etmenin en iyi yolunu oluşturmuştur. Kontrol karışımına ek olarak, çimento ağırlığının %5, %10 ve %15'i oranında kısmi ikame içeren dokuz RPB karışımı hazırlanarak dayanım araştırılmıştır. %5 oranında çok ince toz kil içeren RPB'nin, çimento ağırlığının yerine %4,9, %4,2, %4,5 oranında tuğla, %2, %1,8, %1,6 oranında cam ve %1,5, %0,5, %0,8 oranında karo kullanılarak (basınç, eğilme ve çekme) dayanımında 28 gün sonra kontrol karışımına kıyasla hafif bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. %10'luk oran hala kabul edilebilir dayanım sonuçları verirken, %15'lik oran (basınç, eğilme ve çekme) dayanımında azalmanın başlangıcını göstermiştir.

Ni vd.'nin (2024) çalışması, otoklavda kürlleme koşullarında ultra yüksek çelik lif içeriğine sahip reaktif pudra betonunun mekanik özelliklerine lif, agrega ve çimento esaslı malzemelerin etkilerini araştırmaktadır. Sonuçlar, %9 doğranmış çelik lif içeren numunenin basınç dayanımının 303,4 MPa'ya ulaştığını ve bunun çelik lif içermeyen numuneye göre %184,7 daha yüksek olduğunu göstermiştir. %9 uzun çelik lif içeren karışımlarda, çelik lif içermeyen karışıma kıyasla basınç dayanımında %233,1'lik bir artış gözlemlenmiş ve maksimum 355,0 MPa değerine ulaşılmıştır. Kısa çelik lif dozunun artırılması basınç dayanımını iyileştirirken, uzun çelik lif dozunun artırılması eğilme dayanımını arttırmıştır. Agrega olarak kuvars kumunun, ince seramik mikro kürelerle değiştirilmesinin RPB'nin basınç dayanımını arttırdığı, ancak eğilme dayanımında azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Öte yandan, SEM görüntüsü, daha küçük parçacık boyutuna sahip kuvars pudrasının, çimentolu malzeme olarak eklenmesinin RPB'yi daha yoğun hale getireceğini ve eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırabileceğini göstermektedir. Araştırma sonuçları, ultra yüksek oranda çelik lif içeren RPB'nin basınç ve eğilme dayanımının sonraki optimizasyonu için değerli referanslar sağlayabilir.

Albakry ve Abbas'ın (2025) çalışması, çeşitli kürlleme yöntemleri altında reaktif pudra betonunun dayanım gelişimini incelemektedir. RPB karışımı, yüksek kaliteli sıradan çimento, silika dumanı ve ince kumun ağırlıkça

1:0,25:1,11 oranında karıştırılması ve beton hacminin %2'si oranında mikro çelik lifler eklenmesiyle hazırlanmıştır. Kontrol yaklaşımı olarak kullanılan Normal Kürleme yöntemine ek olarak, üç alternatif kürleme yöntemi değerlendirilmiştir: Otogenik+Normal Kürleme, Buhar+Normal Kürleme ve Su bazlı sıvı kürleme bileşiği ile kaplamadır. Sonuçlar, kürleme süresi 1 günden 3 güne çıktıkça Buhar+Normal Kürleme yönteminin RPB'nin basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. 7, 28 ve 90. günlerdeki dayanım artışları, 1 günlük Buhar+Normal Kürleme yöntemi için sırasıyla %13,99, %15,97 ve %16,47 olarak ölçülmüştür; 2 gün için %15,42, %17,44 ve %18,48; 3 gün için ise %17,52, %18,49 ve %20,04 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Bu yöntem, çimento matrisi içindeki kimyasal reaksiyonları hızlandırarak daha güçlü bağlar ve daha yüksek erken yaş dayanımı sağlamış ve dayanım artışını en üst düzeye çıkarmak için en etkili teknik olmuştur. 2 gün boyunca Otogenik+Normal Kürleme uygulaması ve ardından 26 gün boyunca suya daldırma işlemi de faydalı olmuş ve 7, 28 ve 90. günlerde sırasıyla %10,85, %11,05 ve %12,2 oranında basınç dayanımı artışı sağlamıştır. Bu yöntem, nemi etkili bir şekilde koruyarak optimum kimyasal reaksiyonları ve istikrarlı dayanım gelişimini kolaylaştırmıştır. Benzer şekilde, su bazlı sıvı kürleme bileşiği ile kaplama yöntemi de buharlaşmayı en aza indirerek ve iç nemi koruyarak basınç dayanımını %12,55, %12,71 ve %13,82 oranında arttırmıştır. Ayrıca, tüm kürleme yöntemlerinde basınç dayanımındaki iyileşmelere, eğilme ve yarma çekme dayanımlarındaki orantılı artışlar eşlik etmiştir.

Voo vd. (2026) yaptıkları çalışmada şunlardan bahsetmişlerdir:

Reaktif Pudra Betonu, yüksek çimento ve silika dumanı içeriği, çelik lifler, düşük su-bağlayıcı oranları ve yeni nesil süper akışkanlaştırıcı içeren, ultra yüksek mukavemetli, düşük gözenekli bir malzemedir. 150 MPa'nın üzerinde basınç dayanımı ve 20 MPa'yı aşan çekme dayanımı ile RPB, betonun kesme ve patlama kuvvetleri nedeniyle önemli çekme gerilimlerini taşıması gereken durumlar da dahil olmak üzere çok çeşitli yapısal uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilir. Çalışmada, RPB ile dökülmüş eğilme yapmayan elemanlar üzerinde yapılan pilot ölçekli testlerin sonuçları sunulmaktadır. Test değişkenleri, sınır koşulunun türü ve lif miktarıdır. Numunelerin çatlak desenlerinin karşılaştırılması, beton karışımındaki lif miktarının çatlama yükünü önemli ölçüde etkilemediğini, ancak çatlak büyüme hızı ve çatlak genişlikleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

KURAMSAL TEMELLER

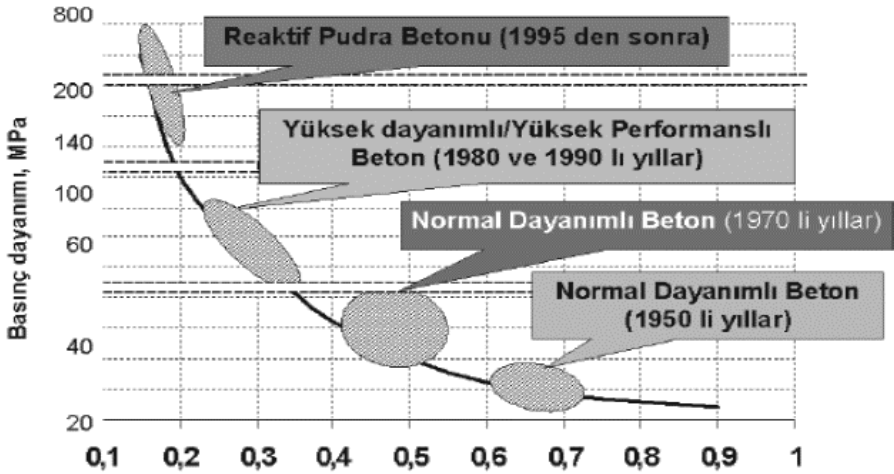
Nüfus artışına bağlı olarak beton teknolojisinde ortaya çıkan gereksinimlerde değişmektedir. Özel yapılara olan ihtiyacın artması, bu yapılarda kullanılacak beton ve/veya betonarme yapı elemanlarının mekanik özelliklerinde gelişmesini gerekli kılmaktadır. 20. yüzyılın özellikle ikinci yarısından sonra beton teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak üretilen betonların maksimum basınç dayanımlarında da artışlar sağlanmıştır. 1960 yılından önce 25 MPa üzerinde betonlar üretilemezken, 1960 yılına gelindiğinde 40 MPa değerlerine ulaşılabilmiştir. 1970’li yıllara gelindiğinde ise yüksek yapıların sayısının artması ve petrol arama faaliyetlerinde kullanılan yapılarda kullanılan betonların, yüksek basınç dayanımlarına ve durabilite özelliklerine sahip olması gerekliliğinden dolayı 70 MPa’yı aşan basınç dayanımlarına sahip betonlar üretilmeye başlanmıştır. 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 süper akışkanlaştırıcılar vasıtasıyla söz konusu su/çimento oranı 0.25-0.35 değer aralığına inmiştir (Bakış 2015).

Yüksek basınç dayanımlarının elde edilebilmesi için yapılan çalışmalarda silis dumanının kullanımı ön plana çıkmıştır. Norveç Teknoloji Enstitüsü ilk olarak 1950’li yıllarda silis dumanının beton içinde kullanımı üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar neticesinde ilk uygulamada 1971 yılında Norveç’te yapılmıştır. Bu yılları takip eden yıllarda dünya genelinde silis dumanının beton içinde kullanımı ile ilgili olarak yoğun çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Silis dumanı beton içindeki boşlukları doldurması sebebiyle daha sıkı bir yapı oluşturmaktadır. 1980’li yıllarda ise yapı kimyasallarında ortaya çıkan gelişmelerle süper akışkanlaştırıcılar ve çok ince mineral katkıların beton üretiminde kullanımı ile yüksek dayanımlı betonlar üretilmeye başlanmıştır (Şekil 1). İlerleyen yıllarda ise süper akışkanlaştırıcılar ile su/çimento oranı 0.20’nin altına düşürülebilmüş ve sıcak su kürü ile basınçlı buhar kürü uygulamalarının kullanılması ile beton basınç dayanımları 200 MPa’nın üzerine çıkarılmıştır (Karabulut 2006).

Yıllar içinde beton teknolojisinde elde edilen bu gelişmeler akabinde daha ince öğütülmüş puzolanik katkılarında kullanılması ile Reaktif Pudra Betonları (RPB) olarak adlandırılan yeni nesil betonlar üretilmeye başlanmıştır. Bu betonlar çok yüksek basınç ve eğilme dayanımları ile yüksek sünekliğe sahiptirler. Öyleki normal betonlarla kıyaslandığında 300 kata kadar daha fazla süneklik değerleri elde edilebilmiştir (Bonneau vd 1997). Beton içyapısında

meydana gelen boşluk oranlarının (porozitenin) azalması reaktif pudra betonlarının dayanım özelliklerini arttırmış ve geçirimsizlik katsayılarında kayda değer oranlarda azaltmıştır. Bu betonlar özel betonların kullanılacağı birçok iklim koşulları ve ortamda geniş kullanım alanı bulmuştur (Feylessoufi vd 1996; Matte ve Moranville 1999).

Reaktif pudra betonu; ince daneli malzemelerden oluşan, yüksek dozajda çimento ve düşük su/çimento oranına sahip yeni nesil ultra yüksek performanslı betonlardır. Bu betonların üretiminde kullanılan pudra dane boyutunda malzemelerden (pudra) ve puzolanik aktivitenin sıcak kür işlemi ile yeniden tekrarlanması (reaktif) dolayı reaktif pudra betonu ismi kullanılmaktadır (Karabulut 2006; Bakış 2015).



Şekil 1. Betonun gelişiminde basınç dayanımı ile su/çimento arasındaki ilişki (Taşdemir ve Bayramov 2002).

Reaktif pudra betonlarının üretiminde kullanılan mineral katkıları, süper akışkanlaştırıcılar ve çelik lifler dayanım özelliklerini geliştirmektedir. Bu sebeple bu malzemelerin kullanımı ve üretim aşamasında diğer betonlardan daha titiz bir şekilde kalite kontrol yapılmalıdır. Bu gereksinimler sebebiyle reaktif pudra betonları sahada (yerinde) imalatından daha çok prefabrik tesisler ve laboratuvar ortamında kontrollü olarak üretimi yapılan bir yapı malzemesidir (Karabulut 2006).

Reaktif pudra betonun üretiminde ana ilkeler şu şekildedir:

- Beton içinde iri agreganın kullanılmaması ile homojenliğin artırılması,
- Tane çapının optimize edilmesi ve kalıba yerleştirme sırasında iyi bir sıkıştırma uygulanması,

- Priz sonrasında ısıt ışılem uygulayarak mikroyapının glendirilmesi,
- Karışımda kısa elik lifler kullanılarak dtilitenin arttırılması,
- Silis dumanı gibi gl puzolanik özelliklere sahip mineral katkıların kullanılmasıdır.

Reaktif pudra betonları 1990'lı yılların sonlarında Fransa'da geliştirilmiştir. Richard ve Cheyrezy (1995)'nin yapmış oldukları bir seri çalışma, üstün mukavemet ve dayanıklılığa sahip yeni bir beton türünün yani reaktif pudra betonlarının elde edilmesine sebep olmuştur. Yapılan bu çalışmalar kapsamında reaktif pudra betonlarının tasarım esasları geliştirilmiştir. Bu tasarımlara göre geliştirilen betonların mekanik davranışları geniş bir şekilde irdelenmiştir. Richard ve Cheyrezy (1995) alışmalarında 200 MPa (RPB 200) ve 800 MPa (RPB 800) basınç dayanımlarına sahip iki tür reaktif pudra betonu üretmişlerdir. Reaktif pudra betonlarının avantajları ve üretim amaçları aşağıdaki şekilde maddeler halinde özetlenebilir:

- Çelikle yapısal olarak yarışabilecek güce sahiptir. Böylece narin prefabrik elemanların üretimi yapılabilir. Çok yüksek basınç, çekme ve kesme dayanımlarına sahiptir. İnce kabuk ve plakların üretimine olanak vermektedir.
- Yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesine, elik liflerle iyi aderansı sayesinde ulaşır. Böylece deprem etkileri altında yapıların performansını arttırmak için kullanılabilir potansiyeli vardır.
- Uzun yıllar kullanılabilir bir malzemedir. Son derece düşük su/imento oranı (≈ 0.20) ve son derece düşük boşluk hacmi nedeniyle, su ve zararlı iyonlar içeren kimyasalların yapı elemanlarına girişini sınırlar. Böylece donma-çözülme, ıslanma-kuruma gibi olumsuz yıpratıcı etkilere karşı dayanıklılığı yüksektir. Ek olarak RPB'ler, nükleer atıkların depolandığı alanlar için de kullanılabilir.
- Lif takviyesiyle sünek davranış göstermektedir. Ana ekme gerilmeleri dışındaki gerilmelere karşı mukavimdir. Böylelikle ikincil donatıların azaltılmasını sağlar. Yani yapının ağırlılığının azaltılmasını sağlar. Böylece yapıya gelecek deprem yükü de azaltılmış olur.
- RPB, kompakt mikro yapısı sayesinde üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Reaktif pudra betonlarındaki bu sıkı/kompakt mikroyapının elde edilebilmesi için normal betonlardan çok farklı üretim süreçleri takip edilmiş ve gerekli tedbirler alınmıştır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Su/bağlayıcı oranı çok düşük seviyelerde ve genellikle 0.10-0.22 aralığında olmalıdır.
- Beton matrisinin homojenliğinin artırılabilmesi için kullanılacak maksimum agrega çapı 1 mm'den daha küçük olmalıdır.
- Beton matrisinin en sıkı duruma getirilebilmesi için beton üretimi için kullanılacak malzemelerin miktarları deneysel olarak araştırılmalı ve kullanılmalıdır.
- Hiper akışkanlaştırıcılar yüksek oranlarda kullanılmalıdır.
- Beton harçlarının hazırlanmasında yüksek devirli karıştırıcılar kullanılmalıdır.
- Betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasında etkili bir vibrasyon işlemi yapılmalıdır.
- Betonun sünekliği lifler ile özellikle çelik ve polipropilen liflerle artırılmalıdır.
- Silis dumanının mikro yapısı ve puzolanik aktivitesi sebebiyle üretimde mutlaka kullanılmalıdır.
- Su kürüne alternatif olarak buhar kürü ve basınçlı buhar kürü (otoklav) uygulanmalıdır. Bu sayede mekanik özellikler önemli miktarda gelişecektir.
- Bunlara ek olarak beton üretiminde harç kalıp içerisinde basınç altında tutulur ise mekanik özellikler daha da yükseltilebilir.

Reaktif pudra betonlarının sünekliğinin artırılabilmesi için genellikle kısa kesilmiş lifler kullanılmaktadır. Bu liflerden en çok tercih edileni çelik liflerdir. RPB içerisinde genellikle kısa kesilmiş çelik teller kullanılmaktadır. Çelik liflerin %1-3 oranında reaktif pudra betonlarının üretiminde kullanılması ile eğilme dayanımları normal betonlara göre 5-10 kata kadar artırılabilir (Yazıcı ve Yalçinkaya 2011). Reaktif pudra betonlarında kaba agrega kullanılmamaktadır. Bunun yerine en büyük boyutlu kullanılan malzeme silis kumudur. Betonun porozitesinin düşürülebilmesi, boşluk oranını azaltılabilmesi için beton karışımında silis kumunun yanında daha ince olan silis pudrası da kullanılmaktadır. Bununla birlikte silis pudrasının katılmasıyla küçülen boşluklarında doldurulabilmesi için silis dumanı en iyi katkı olarak karşımıza çıkmaktadır. Silis kumu, pudrası ve silis dumanı puzolanik özellikleri sebebiyle de reaktif pudra betonlarına katkı sağlamaktadır. Boşlukların doldurulması için yapılan bu karışım hesabında normal betonlara kıyasla yaklaşık üç kat çimento kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Topçu vd 2014).

Yüksek basınç dayanımları ile birlikte reaktif pudra betonlarında gevreklik problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problemin çözümü için en uygun yöntem liflerin özellikle çelik liflerin kullanılmasıdır. Liflerin kullanılması normal betonlarda da karşımıza çıkmaktadır. Normal betonlarda liflerin kullanılması ile birçok mekanik özellik (aşınma direnci, çekme mukavemeti, darbe direnci, çatlama direnci ve tokluk gibi) gelişmektedir. Reaktif pudra betonlarında mikro ve makro boyut olmak üzere iki farklı boyutta lif kullanılmaktadır. Kullanılan bu liflerin her ikisinin de işlevi farklıdır. Makro lifler eğilme ve çekme dayanımını artırırken, mikro lifler betonda oluşacak rötre çatlaklarını azaltır (Karabulut 2006).

1970'li yılların başlarında üretilen betonların maksimum basınç dayanımları 40 MPa civarındadır. 1997 yılına gelindiğinde reaktif pudra betonlarının üretilmesi ile basınç dayanımları 200 MPa üzerine çıkarılabilmektedir. İlerleyen yıllarda yapılan bazı çalışmalarda 800 MPa gibi olağanüstü basınç dayanımı değerleri elde edilebilen reaktif pudra betonlarının üretimi gerçekleştirilebilmiştir. Bu betonların çekme dayanımları ise 25-150 MPa arasında elde edilmiştir (Richard ve Cheyrezy 1995; Bonneau vd 1997; Talebinejad vd. 2004; Karabulut 2006; Voo ve Foster 2010; Yalçinkaya ve Yazıcı 2011).

Dayanıklılık, süneklik ve mukavemet özellikleri dikkate alındığında reaktif pudra betonları çok üstün özelliklere sahiplerdir. Sadece normal betonlara kıyasla değil yüksek dayanımlı betonlarla kıyaslandığında da reaktif pudra betonları ön plana çıkmaktadır. Hatta öyleki çelik malzemeler ile bile yarışabilecek özelliklere sahiptir. Aynı yük altında aynı performansı göstermelerine rağmen, reaktif pudra betonları çok daha ince kesitlerden oluşturulmaktadır. Bu kesitlerde dahi çok yüksek çekme gerilmelerini karşılayabilir ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğundan, beton teknolojisine yenilik getirmiştir. Günümüzde reaktif pudra betonları daha çok prefabrik yapı elemanlarının seri üretiminde kullanılmaktadır. Normal yapılarda kullanılabilmeleri ekonomik açıdan mümkün değildir. Ekonomik problemlerin çözülmesi sonucunda birçok özel yapılarda da reaktif pudra betonları rahatlıkla kullanılabilecektir (Topçu vd. 2014).

Reaktif Pudra Betonu Karışımında Kullanılan Yapı Malzemeleri

Reaktif pudra betonlarının üretiminde kullanılan malzemeler genellikle çimentonun yanında yüksek dayanıma sahip kırılmış kuvars kumu, kuvars pudrası (unu), silis dumanı ve süper-hiper akışkanlaştırıcıdır.

Çimento: Reaktif Pudra Betonlarının üretiminde genellikle TS EN 197-1 standartlarında, CEM I 52.5-42.5R türü çimentolar kullanılmaktadır. Maliyeti

düşürebilmek açısından silis dumanı kullanımında ön plana çıkmaktadır (Topçu ve Kaval 2001). Çimento 80-100 µm boyutunda bir yapı malzemesidir.

Silis dumanı: Silis dumanı hem küçük tane boyutu hemde üstün puzolanik özellikleri sebebiyle reaktif pudra betonlarının vazgeçilmez katkılarıdır. Silis dumanı; çimento ve agrega arasındaki boşlukları küçük tane yapısı sebebiyle doldurarak daha sıkı ve homojen bir içyapı oluşmasına sebep olmaktadır. Daha sıkı ve daha az boşluklu bir beton iç yapısında betonun mekanik performansını önemli derecede arttırmaktadır.

Silis dumanı 1 µm'den daha küçük camsı silis parçacıklarından oluşan yüksek puzolanik aktiviteye sahip bir malzemedir. Demirli silisyum (ferrosilisyum) üretimi sırasında oluşan şekilsiz şeffaf atıklardır. Atık olmasına rağmen içeriğinde %85-98 oranında SiO₂ tanelerinden oluşmaktadır. Diğer bir ifadeyle, silisyum alaşımı üretiminde yan ürün olarak elde edilmektedir. Silikonlu metal alaşımların oluşturulması sırasında meydana gelen gazın hızlı bir şekilde soğutulup yoğunlaştırılması neticesinde üretilen ve %85-98 arasında silis barındıran, amorf yapıya çok ince katı parçacıklardan meydana gelen malzemeye çok ince olması sebebiyle silis dumanı adı verilmiştir (Tohumcu ve Bingöl 2013). Ultra ince bir malzeme olan silis dumanının, karışımında ince taneli agrega ile beraber kullanılması, agrega ve çimento arasındaki temas alanını arttırarak mekanik özelliklerin iyileşmesine imkân sağlamaktadır (Dallaire vd. 1998). Betonların basınç ve eğilme dayanımı açısından en zayıf oldukları noktalar çimento ile agrega ara yüzeyidir. Temas yüzeyinin sağlamlaştırılması betonun dayanım özelliklerinin artmasına sebep olmaktadır. Bu ara yüzey silis dumanı katkısı ile daha sıkı ve ayrılması daha zor bir yapıya dönüşmektedir.

Beton yoğunluğunun ve dolayısıyla dayanımının artırılması için beton içi boşlukların azaltılması gerekmektedir. Bunun içinde boşlukları dolduracak boyutlara sahip çimentodan daha ince bir malzemeye ihtiyaç vardır. Silis dumanı işte bu boşlukları doldurabilecek inceliğe ve boyutlara sahiptir. Bu özelliğinin yanında çimentonun hidrasyonu sırasında puzolanik reaksiyonlar sebebiyle betonun mukavemet özelliklerinin artmasına sebep olmaktadır. Çimento ile silis dumanının meydana getirdiği hidrasyon reaksiyonları ayrıca beton matrisini güçlendirmektedir (Taşdemir vd 2005; Karabulut 2006). Birçok araştırmacı silis dumanının en önemli katkısının mikro boşlukların azaltılması olduğunu ifade etmişlerdir (Roux vd. 1996).

Reaktif pudra betonlarında silis dumanı, silika pudrası gibi silisli malzemelerin kullanılması CS miktarının azaltılması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple de reaktif pudra betonları yüksek performanslı bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır (Taşdemir vd 2004). Silis dumanı; agrega ile çimento hamuru arasındaki

ara yüzeyin aderansını arttırmaktadır. Ara yüzeydeki aderansın artmasıyla mukavemet ve kalıcılığın daha yüksek seviyelere ulaştığı bir beton içyapısı oluşmaktadır. Silis dumanı bu üstün özelliği sayesinde yüksek dayanımların arandığı uygulamalar için kullanılacak betonların üretiminde aranan bir malzeme olmuştur ve bu özelliği sayesinde atık vasfından kurtularak ekonomik değeri olan bir malzemeye dönüşmüştür (Richard ve Cheyrezy 1994).

Silis dumanı küresel ve 0.5 μm 'nin altında ortalama tane büyüklüğüne sahip olmasına rağmen 0.1 μm boyutunda malzemelerde içermektedir. Silis dumanı ayrıca, 90°C'de uygulanan düşük buhar basıncı kürü ile priz sonrası pozolanik etkisi hızlanarak reaktif pudra betonunda hidrat yapının güçlenmesine yardımcı olmaktadır (Richard ve Cheyrezy 1994). Yapılan çalışmalar sonucunda en uygun silis dumanı/çimento oranının 0.25 olduğu tespit edilmiştir (Talebinejad vd 2004). Bu oran ile beton içindeki boşluk oranı en düşük seviyeye indirilebilmektedir. Ayrıca, çimento hidratasyonu sonucu oluşan kirecin tamamen tüketilmesi için gerekli olan dozaja da çok yakındır (Richard ve Cheyrezy 1994; Richard ve Cheyrezy 1995; Chan ve Chu 2004; İpek 2009). Reaktif pudra betonlarında belirli bir yüzdeye kadar silis dumanı kullanımı dayanım özelliklerini artırmaktadır. Fakat genellikle %30 ve üzeri oranlarda boşlukların dolması sonrası hacim artışlarına sebep olmalarından dolayı dayanım azaltıcı bir etki göstermektedir (Khoury 1992). Beton içinde kullanıldığında elde edilecek olumlu etkiler sebebiyle aranan bir malzeme olan silis dumanı beton içerisinde kullanıldığında mutlaka etkin bir davranış gösterebilmesi için süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmalıdır (Güneşli 2008).

Kuvars kumu: Reaktif Pudra Betonlu üretiminde çakıl boyutunda kaba agregalar kullanılmamaktadır. Agregalar olarak sadece kuvars kumu kullanılmaktadır. Kuvars kumuna alternatif olarak yüksek basınç dayanımına sahip bazı agregalarda kullanılabilir. Basınç dayanımı düşük agregaların doğal halde veya kırma-öğütme suretiyle uygun boyutlarda oluşturulmasıyla (0.1-1 mm) ile reaktif pudra betonlarında kullanılabilir. Buna benzer olarak volkanik kökenli kayalarda uygun boyutlara getirilerek/öğütülerek reaktif pudra betonlarında kullanılabilirler. Kuvars kumunun reaktif pudra betonlarında tercih edilmesinde kuvarsın sert bir mineral olması ile aktif silis içermesi ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında ise agregalar ve çimento ara yüzeylerinin fazla olması ve temin kolaylığı da tercih sebebi olmaktadır. Reaktif pudra betonlu üretiminde çimento ile daha kompakt bir yapının oluşturulabilmesi için 200 μm ile 600 μm aralığında agregalar kullanılmalıdır. İri agregalar kesinlikle kullanılmamalı sadece kum boyutunda agregalar ile üretim yapılmalıdır (Richard ve Cheyrezy 1995).

Reaktif pudra betonlu üretiminde kaba agreganın kullanılmaması ve bu agregalar yerine kum (ince agreganın) kullanılması beton içyapısındaki mikro boşlukların

azalmasına sebep olmakta ve neticede mekanik özelliklerde (basınç dayanımı ve eğilme dayanımı) iyileşmeler ortaya çıkmaktadır. Normal betonlarda, beton matrisi içinde meydana gelen boşluklar agregâ çapının küçülmesi ile dolmaktadır. Bu sayede betonun boşluk hacmi azalmakta ve durabilite özelliklerinde (donma-çözülme gibi) iyileşmeler elde edilmektedir (Dallaire vd. 1998). Büyük agregâ tanelerinin beton karışımından çıkarılması, reaktif pudra betonlarının performansının artmasına sebep olmaktadır (Taşdemir vd. 2004).

Reaktif pudra betonlarının sıkı/kompakt bir yapıya sahip olmalarının temel sebebi küçük tane boyutlarına sahip agregâ ve katkı malzemelerinin kullanılmasıdır. Bir reaktif pudra betonunda malzemelerin çapları 1-500 µm arasında değişmektedir. Bu boyutta agreganın teminindeki zorluk sebebiyle genellikle kuvars kumu kullanılmaktadır. Reaktif pudra betonu üretiminde kullanılan agregâ tane çapları çimento tane çapına yakındır. Bu şekilde, hidrasyondan etkilenmemiş çimento taneleri malzemenin dayanımına katkıda bulunur (Dugat vd 1996). Kırılmış kuvars kumunun boyutu ise genel olarak 150-600 µm aralığındadır.

Reaktif pudra betonlarında kullanılan agregalar yüksek dayanımlı olmalıdır. Saflığı yüksek ve sağlam minerolojik yapıya sahip malzemeler (yüksek dayanımlı kuvars, silis ve bazalt) kullanılmalıdır. Bu malzemeler reaktif pudra betonu gibi yüksek dayanımların hedeflendiği betonlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemelerin doğal olanları, betonun su ihtiyacı açısından yararlı etkilere sahip olduğu için tercih edilirken, kırma taş olanlar ise, bağlayıcı pasta ile çok iyi bir ara yüz oluşturduğu için tercih edilmektedir. Sonuçta her iki tip de reaktif pudra betonlarında kullanılabilmektedir (İpek 2009). Geleneksel betonlarda (normal dayanımlı betonlarda) kullanılan agregaların basınç dayanımı ortalama 100 MPa iken, kuvars agregasının basınç dayanımı 180 MPa'a kadar çıkmaktadır. Kuvars agregası çok sert bir agregâ olduğundan dolayı aşınma direnci yüksektir (Tunç 2007; Macit 2009).

Kuvars pudrası (unu): Reaktif pudra betonuna ismini veren ana malzemelerden biriside kuvars pudrasıdır. Pudra malzeme 0-100 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsarken kum ise 100-2000 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsamaktadır (İpek 2009). Reaktif pudra betonu yapımında kullanılan kuvars pudrasının boyutu genellikle 4 µm'dir.

Reaktif pudra betonlarının üretiminde kullanılan diğer yapı malzemesi ise kuvars pudrasıdır. Kuvars pudrası kuvars kumları arasındaki boşlukları doldurmakta ve kum ile lifler arasında yüksek kohezyonu sağlamak için reaktif pudra betonlarının üretiminde kullanılmaktadır. Sadece kuvars pudrası değil ayrıca yüksek dayanımlı agregaların öğütülmesiyle elde edilen pudralar da kullanılabilir. Yüksek basınç dayanımına sahip diğer agregaların pudraları da reaktif pudra betonu karışımlarında

kullanılabilir. Basınç dayanımı düşük agregaların doğal halde veya kırma-öğütme suretiyle uygun boyutlarda oluşturulmasıyla RPB üretiminde pudra olarak kullanılması mümkün olabilir. Ayrıca volkanik kayaç tozlarının da uygun boyutlarda elde edilerek RPB üretimde kullanılabilmesi mümkündür.

Hiper-süper akışkanlaştırıcı: Düşük su/çimento oranları daha yüksek basınç dayanımları olarak karşımıza çıkmaktadır. Su/çimento oranı çok düşük seviyelerde olan reaktif pudra betonlarının üretilmesi ve işlenebilirliğinin sağlanması için süper-hiper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır. Sabit kıvamda beton karışım suyunun yüksek oranda azaltılmasını sağlayan, betonun işlenebilirliğini kolaylaştıran katkı maddelerine akışkanlaştırıcı adı verilmektedir. Akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcı hatta hiper akışkanlaştırıcılar özelliklerine göre beton üretiminde işlenebilirliği arttırmak için daha çok yüksek dayanımlı betonlarda ve reaktif pudra betonlarında kullanılmaktadırlar. Betondan istenen basınç dayanımını arttırmak için su/bağlayıcı oranı düşürülmekte ve düşürülen su/bağlayıcı oranına bağlı olarak işlenebilirliği arttırmak içinse süper-hiper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır (Karabulut 2006).

Süper akışkanlaştırıcılar yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklere sahip betonların üretiminde önemli bir role sahiptirler. Beton üretiminde daha iyi sonuçlar elde edilebilmesi için; çimento dozajı artırılır, kaba agregaya yerine daha ince agregalar ve kırmataş kumlar kullanılır ve puzolanik ile boşluk doldurma yeteneklerinden yararlanmak için silis dumanı gibi katkı maddeleri karışıma katılır. Beton karışımının bu şekilde değiştirilmesi beton içindeki malzemelerin özgül yüzeylerinin katbe kat artmasına sebep olmaktadır. Özgül yüzeyi artan beton karışımının su ihtiyacı da orantılı olarak artmaktadır. Artan su ihtiyacını karşılayabilmek ve aynı zamanda dayanım özelliklerinden taviz vermemenin tek yolu süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanmaktır. Reaktif pudra betonlarında da hedeflenen özelliklere erişilebilmesi için su/bağlayıcı oranı yaklaşık 0.15 gibi çok düşük oranlarda tutulmaktadır. Bu oranda üretilen bir beton içinde en iyi performans gösteren akışkanlaştırıcıların kullanılması zorunluluktur (Karabulut 2006).

Akışkanlaştırıcılar organik ve/veya inorganik bileşenlerden oluşabilir. İçerisinde kullanılan katkı malzemelerinin özellikleri etkinliklerini değiştirmektedir. Normal dozajlarda üretilen betonlarda akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile betonun karışım suyu sırasıyla %5-11 ve %12 ve üzerinde azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranının azalmasıyla moleküler ağırlığı az olan katkılar daha fazla akışkanlık sağlamaktadır (Kim 2000). Reaktif pudra betonlarının işlenebilirliği karışımında kullanılan süper akışkanlaştırıcı ile sağlanmaktadır (Roux vd. 1996).

Reaktif pudra betonunun su/çimento oranının düşük olabilmesi için kimyasal katkıları yani süper akışkanlaştırıcı kullanılması zorunludur. Yüksek miktarda silis dumanı, çimento ve kuvars pudrası kullanılması işlenebilirliğin azalmasına ve su ihtiyacının artmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak reaktif pudra betonlarının üretiminde süper akışkanlaştırıcı kullanılması gerekmektedir. Silis dumanı ayrıca yüzey alanının yüksek olması sebebiyle taze beton içerisindeki serbest suyun önemli ölçüde bağlanmasına ve bu suyun beton yüzeyine çıkmasının yavaşlamasına sebep olmaktadır. Bunun neticesinde silis dumanı vb. puzolanik katkıların kullanıldığı betonlarda plastik büzülme/rötre sebebiyle çatlama riski artmaktadır. Bu riski azaltmak ve yok etmek için süper akışkanlaştırıcıların kullanılması şarttır (Richard ve Cheyrezy 1994).

Yüksek basınç dayanımları ve performans için düşük su/çimento oranları bunun neticesinde de süper akışkanlaştırıcı kullanımı gerekmektedir. Reaktif pudra betonlarında kullanılan karışım oranına bağlı olarak %1.5-3 aralığında süper akışkanlaştırıcı kullanılmaktadır. Kullanılacak süper akışkanlaştırıcı tipi ve miktarına en önemli etkiyi çimento tipi ve dozajı yapmaktadır. Reaktif pudra betonlarında kullanılan kuvars kumu ve pudrasında süper akışkanlaştırıcı katkı miktarını arttırmaktadır. Buna karşın doğal agrega ve kum kullanımı bu oranı azaltmaktadır (İpek 2009).

Reaktif pudra betonunda kullanılan süper akışkanlaştırıcı, özelliği sebebiyle çimento taneleri tarafından çekilir ve karıştırma esnasında çimento etrafına sarılmaktadırlar. Bu oluşum çimento parçacıklarının yüzeydeki negatif yüklerini artırır ve elektrostatik itmeye sebep olur. Bunun sonucu olarak çimento daneleri dağılmaktadır ve su içeriğinin az olmasına rağmen betonun işlenebilirliği önemli ölçüde artmaktadır (Duyar 2006).

Su:Çimento ve diğer puzolanik malzemelerin hidrasyonu için su gereklidir. Hidrasyon için gerekli suyun az ya da fazla olması betonların mekanik özellikleri açısından önem arz etmektedir. Su/çimento oranının düşürülmesi betonun basınç dayanımı ve diğer mekanik özelliklerini artırmada en etkili yollardan birisidir. Reaktif pudra betonlarında elde edilmesi istenilen yüksek dayanımlar içinde su/çimento oranının çok düşük seviyelerde olması gerekmektedir (Taşdemir vd. 2004). Ortalama olarak su /çimento oranı reaktif pudra betonlarında 0.15 civarındadır (Roux vd. 1996). Kullanılan suyun içilebilir olması beton hidrasyonu açısından önemlidir.

Reaktif Pudra Betonunun Mekanik Özellikleri

Mekanik özellikler açısından reaktif pudra betonlarında oluşan CSH jel yapısının güçlendirilmesi ile kompozitin yoğun matris yapısı, basınç mukavemetinin yüksek

değere ulaştırmaktadır. Bu kadar yüksek mukavemet, RPB'nin yapılarda çelik donatı kullanılmadan uygulanmasına imkan vermektedir. Kırılma enerjisi yönünden ise RPB'nin normal harç numunelerinden 240 kat daha fazla enerjiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple gevrek olan beton malzemenin tokluğu artmış olmaktadır (Topçu vd. 2018). Tokluğu artan beton ise enerji yutma kapasitesinin artması sebebiyle deprem etkilerine ve/veya dinamik etkilere karşı daha güvenli bir yapı malzemesi olmaktadır. Diğer bir ifadeyle reaktif pudra betonlarının kullanıldığı yapılar sünekliğin artması sebebiyle depreme karşı daha güvenli olmaktadır.

Reaktif pudra betonları ile normal ve yüksek dayanımlı betonların bazı mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde görüleceği gibi reaktif pudra betonlarının kırılma enerjisi diğer betonlara kıyasla 100-300 kat daha fazladır. Yüksek kırılma enerjisi ise reaktif pudra betonlarına daha sünek ve dinamik etkilere karşı daha dayanıklı bir yapı kazandırmaktadır. Tabloda görüleceği gibi RPB'nin çelik teller ilave edildikten sonra eğilme dayanımları 50-140 MPa arasında değişen değerler almaktadır. Reaktif pudra betonlarının kırılma enerjileri 10000-40000 J/m²'ye kadar değişmektedir. Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımındaki yüksek değerler çelik lifler katkısıyla reaktif pudra betonlarının kazandığı özelliklerdir. Bunun yanında reaktif pudra betonlarının sıkı/kompakt yapıları sebebiyle durabiliteleri, çevresel etkilere karşı dayanıklılıkları normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre çok daha iyidir. Tablo 2'de durabilite açısından yüksek dayanımlı betonlar ile reaktif pudra betonları karşılaştırılmaktadır.

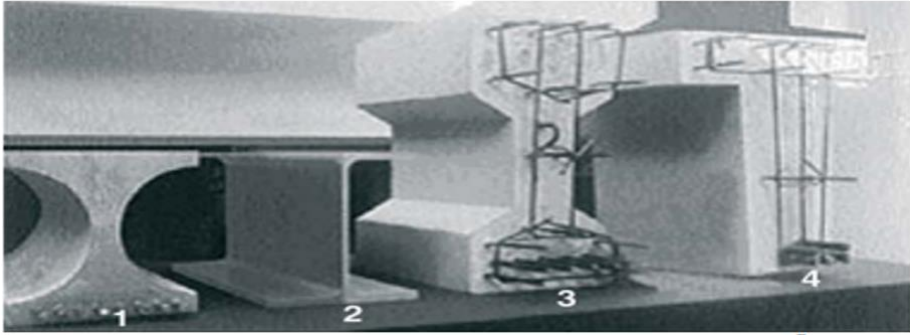
Tablo 1. Farklı beton türlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Taşdemir vd. 2004)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç dayanımı, MPa	20-60	60-115	200-970
Eğilme dayanımı, MPa	4-8	6-10	50-140
Kırılma enerjisi, J/m ²	100-120	100-130	10000-40000
Elastisite modülü, GPa	20-30	35-40	60-75

Tablo 2. Yüksek dayanımlı betonların ve reaktif pudra betonlarının karşılaştırılması (Dallaire vd 1998)

Dayanıklılık Özelliği	RPB ve YDB
Toplam porozite	4-6 kat daha düşük
Mikro porozite	10-50 kat daha düşük
Permeabilite	50 kat daha düşük
Su emme	7 kat daha düşük
Klorür iyonu geçişi	25 kat daha düşük

Şekil 2’de aynı moment taşıma kapasitesine sahip 4 farklı kiriş örneği görülmektedir. Bunlardan (1) numaralı örnek RPB, (2) numaralı örnek çelik, (3) numaralı örnek öngerilmeli betonarme ve (4) numaralı örnek ise betonarmeden imal edilmiştir. Bu örneklerin fiziksel özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Buradan, betonarme ve öngerilmeli betonarmeden üretilen örneklerin hem daha büyük hemde daha ağır taşıyıcı elemanlar olduğu görülmektedir. Halbuki RPB, çelikle aynı ebat ve birim ağırlıkta üretilebilmektedir. Böylece yapıların kendi ağırlıkları azaltılmaktadır (Dauriac 1997).



Şekil 2. Farklı malzemelerden üretilmiş kiriş elemanları (moment taşıma kapasiteleri aynı) (Dauriac 1997).

Tablo 3. Aynı taşıma gücüne sahip elemanların RPB ile karşılaştırılması

Kesit Özelliği	RPB Kesit (1)	Çelik Profil (2)	Öngerilmeli Betonarme (3)	Betonarme (4)
Yükseklik, cm	36	36	70	70
Ağırlık, kg/m	130	110	470	530

Reaktif Pudra Betonunun Özelliklerine Bileşenlerin Etkisi

RPB’ye çimentonun etkisi

Reaktif pudra betonlarının üretiminde çimento dozajı yüksek olmakta ve genellikle 800-1000 kg/m³ dozajında çimento kullanılmaktadır. Reaktif pudra betonlarının çimento dozajının yüksek olması, yüksek oranda silis dumanı içermesi ve su/çimento oranının 0.14-0.25 gibi çok düşük oranlarda olması sebebiyle bünyesel büzülme, kuruma büzülmesi kadar bir risk oluşturmaktadır (Yalçinkaya ve Yazıcı 2011). Bununla birlikte çimentonun fazla kullanılmasının çevresel ve maliyet açısından olumsuz olduğu aşıkardır. Bu olumsuz etkilerin bertaraf edilebilmesi için çimentonun bir kısmı yerine mineral katkıları

kullanılabilir. Bu şekilde hem ekonomik hemde çevre dostu bir beton üretimi yapılabilir. Mineral katkıların çimento yerine kullanılması çimentonun hidratasyon ısını azaltma açısından olumlu etkiler göstermektedir. Atık malzemelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi) reaktif pudra betonu içinde kullanılması normal betonlara kıyasla daha gerekli bir durumdur (Yalçinkaya ve Yazıcı 2011). Bunlara ek olarak çimento içeriğindeki C_2S ve C_3S 'nin inceliği ana kontrol etkenlerdir. Çimentonun erken ve son dayanımlarına yön veren etkenler ise çimento inceliği, karma oksit bileşimi ve hidratasyon ısıdır. İnceliğin artması su ihtiyacının artmasına sebep olmaktadır. Daha ince çimento kullanılması su/bağlayıcı oranını arttıracığından iyi sonuçlar vermeyebilir. Düşük C_3A içerikli çimento, mukavemet değerlerinde daha iyi sonuçlara sahiptir (Richard ve Cheyrezy 1995). Ayrıca, bağlayıcıların yüksek miktarda kullanımı nedeniyle çimentonun hidratasyonu sırasında büyük miktarda $Ca(OH)_2$ açığa çıkmaktadır. Mineral katkı maddeleri kullanılarak bu yapılar kalsiyum silika hidrata dönüştürülüp mukavemetin artmasına yardımcı olunabilir.

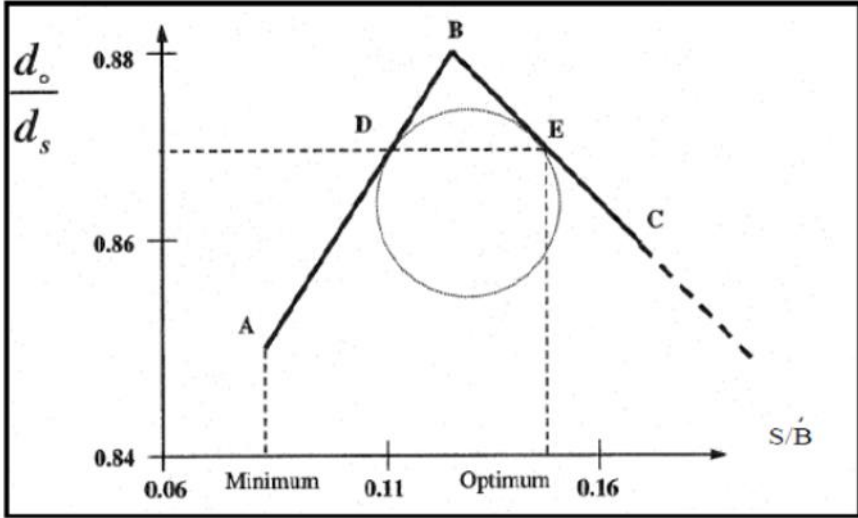
Karışım suyunun etkisi

Reaktif pudra betonlarında suyun en önemli rolü, işlenebilirlik ve betonda oluşan kılcal boşluklar olarak açıklanabilir. Temel amaç, su/çimento oranını düşürüp işlenebilirliğin azalmamasını sağlamaktır. Bağlayıcı olarak çimentonun yanında mineral veya puzolanik katkıların da kullanıldığı RPB'de su/çimento oranı yerine genellikle su/bağlayıcı (s/b) oranını vermek daha uygundur. Şekil 3'de bağl yoğunluğun, su/bağlayıcı ile değişimini göstermektedir (Richard ve Cheyrezy 1995). Şekil 3'teki d_o , prizini almamış betonun yoğunluğunu ve d_s de betonu oluşturan matristeki su ve hava dışındaki katı malzemelerin yoğunluğunu göstermektedir.

Şekil 3'teki A noktası en düşük su/bağlayıcı oranını göstermektedir. Reaktif pudra betonları karışımlarında en düşük su/bağlayıcı oranı 0.08 olarak verilmiştir. Karışım suyunun arttırılması ile sıkışmış hava boşlukları azalmakta ve bunun sonucunda yoğunluk da artmaktadır. Bu artışlar sebebiyle de su/bağlayıcı oranında artmaktadır. Bu durumda kütle artmakta ama aynı anda betonun hacmi sabit kalmaktadır. Böylece d_o artarken d_o/d_s oranı da artmaktadır. Şekil 3'teki B noktasına ulaşıldığında karışımda sıkışmış ve sürüklenmiş hava boşluğu kalmamıştır (Richard ve Cheyrezy 1995; Karabulut 2006).

Su miktarı arttırıldıkça, s/b oranı ve karışım hacmi artmakta ancak bağl yoğunluk azalmakta ve C noktasına ulaşılmaktadır. Bu noktadan itibaren ortamdaki fazla su nedeniyle istenilen sıkışma değeri elde edilememekte ve

bunun sonucunda gözenekliliğin artması nedeniyle tekrar yoğunluk değeri azalmaya başlamaktadır (Richard ve Cheyrezy 1995; Karabulut 2006).



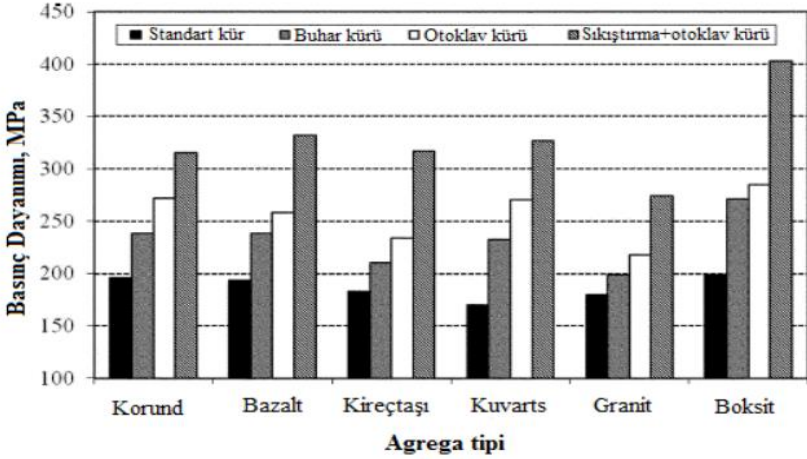
Şekil 3. RPB'de s/b grafiği (Karabulut 2006)

RPB için agrega seçimi

Farklı çaplara sahip agregalar kullanılarak en yüksek düzeyde yoğun ve homojen karışım elde edilir. En büyük tane boyutu RPB için 600 μ olarak önerilmiştir. Bununla birlikte, Cwirzen ve Penttala (2006) agrega tane boyutunun RPB'nin mekanik özelliklerine etkisi üzerine yaptıkları çalışma sonucunda; agrega tane boyutunun 10 mm'ye kadar artırılmasıyla mekanik özelliklerde önemli bir değişimin yaşanmadığını, geleneksel RPB'ye göre karıştırma süresinin daha kısa olduğunu, agregalar arasında filler malzemenin daha iyi dağıldığını ve daha az hava boşluğu kaldığını belirtmişlerdir. Diğer betonlarla karşılaştırıldığında RPB çok düşük su/çimento oranına sahiptir ve katkı maddeleri RPB'nin işlenebilirliğini sağlamaktadır. Hava ve sudan oluşan boşluklar minimumda tutulur ve bu boşluklar fillerle doldurulur. Ayrıca sistemde seçilen agreganın sert, temiz ve sağlam olması çok önemlidir.

Yüksek mukavemetli agregalarla yapılan betonlar yüksek performans sergilemektedir. Şekil 4'te farklı kökenlere sahip agregalar ile yapılmış RPB'lerin basınç mukavemetleri görülmektedir. Korund, bazalt, kireçtaşı, kuvarits, granit ve boksit agregalar ile üretilen RPB'ler ayrıca farklı koşullarda kürlenmişlerdir. Tüm kür şekilleri içerisinde en yüksek basınç mukavemeti boksit agregası ile üretilen RPB'lerde elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında en düşük

mukavemetdeğerleri dekireçtaşı ve granit agregalı RPB’lerde gözlenlenmiştir. Agregada olarak, pürüzlü ve sert malzemeler kullanılarak daha yüksek mukavemetli RPB’ler üretilebilir. Ucuz ve kolay elde edilebildiği için kuvars da birçok RPB üretiminde kullanılabilir (Aydın vd 2010).



Şekil 4. Reaktif pudra betonlarının dayanımına agrega tipinin etkisi (Aydın vd. 2010)

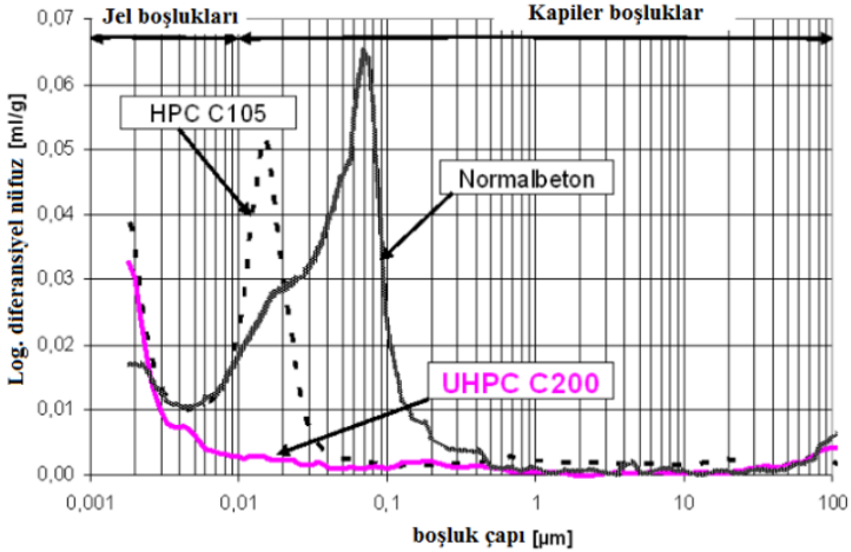
Reaktif pudra betonlarında mineral katkının etkisi

RPB’de mineral katkıların kullanılmasındaki temel amaç, ince agregalar arasındaki mikro boşlukları doldurmaktır (Topçu vd. 2014). Bu nedenle RPB’deki boşluklarda mineral katkı maddelerinin dolgu etkisi, betondaki puzolanik etkiden daha önemlidir (Coppola vd. 1996). Mineral katkılarda mukavemet kazanma hızı, erken yaşlarda yavaştır. Ancak ilerleyen yaşlarda oldukça fazladır. Çok ince tane boyutuna sahip olan silis dumanı (SD), RPB üretiminde mikro boşlukları doldururken en çok tercih edilen mineral katkı maddesidir. SD hızlı tepki verir, ancak karışımın su ihtiyacını artırır. Fakat kimyasal katkı maddesi kullanımıyla bu sorun giderilebilmektedir. Puzolanik özelliğinden dolayı SD, CH’larla birleşerek yeni CSH jelleri oluşturmaktadır. Bunun sonucunda çimento hamuru ile agrega arasındaki zayıf olan bölge silis dumanı sayesinde güçlenmektedir (Rougeau ve Borys 2004). Silis dumanı pahalı ve piyasada zor bulunan bir malzeme olmasına rağmen, uygun süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile mukavemet ve işlenebilirlikte artış sağlamaktadır.

Uçucu kül (UK) kendi başına bağlayıcı özelliğe sahip olmayan başka bir mineral katkı maddesidir. Bununla birlikte, uygun ortam, sıcaklık ve nem altında kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek yeni kalsiyum-silikat-hidrat

(CSH) jeli oluştururlar. UK'lar betonda, su ihtiyaını ve hacim değişikliğini etkilerler. Yüksek fırın cürufu (YFC) ise, bir miktar bağlayıcıyla reaksiyona girerse, önemli ölçüde bağlama özelliği kazanır. RPB'de süper akışkanlaştırıcı kullanılması da betonun işlenebilirliğini arttırır. Mikro boyuttaki yapıyı kuvvetlendirir ve mineral katkı maddesi kullanılmasından kaynaklanan olumsuz etkileri ortadan kaldırır (Fehling vd 2005; Beşling 2022).

Reaktif pudra betonları diğer beton türlerine kıyasla en düşük boşluk oranına sahip betonlardır. Bunun temel sebebi ise farklı çaplarda ve küçük boyutlarda malzemelerin kullanılmasıdır. Beton içinde bulunan boşlukların çoğunluğu ise mikro boşluklardır. Bu boşlukların büyük kısmı da jel boşlukları mertebesinde. Reaktif pudra betonları (ultra yüksek dayanımlı betonlar-UHPC), yüksek dayanımlı betonlara (HPC) kıyasla daha az ve daha küçük boyutlu boşluklara sahiptir(şekil 5) (Fehling vd 2005; Beşling 2022).



şekil 5. Farklı betonlardaki boşluk çapı dağılımları (Fehling vd. 2005)

Kr yöntemleri

Beton retimindeki en önemli adımlardan biri beton kürleme işlemidir. Kr; betonun iyi bir dayanım ve mukavemet kazanması amacıyla çimentonun hidratasyonunu desteklemek için yapılan işleme ve uygulamaya verilen isimdir. Teknik olarak kürleme işlemi, taze imento hamurunun su dolu boşluklarının, en yüksek derecede imento hidratasyonundan kaynaklanan ürünle doldurulmasıdır. Modern teknolojiye zamandan ve işçilikten tasarruf etmek için betonarme elemanlar, prefabrikasyon adı verilen bir imalat yöntemi kullanılarak seri üretilir.

Gerçekleşen seri üretim, betonun kürlenmesi prensibine dayanmaktadır. Kullanılan farklı kürlenme yöntemleri nedeniyle betonun nihai dayanımının bir kısmı çok çabuk elde edilir (Uğurlu 1994).

Standart su kürü

Üretilen numunelerin $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip kür havuzlarında 3,7,14 ve 28 gün boyunca bekletilmesiyle kür edilme işlemi standart su kürü olarak bilinmektedir (Özalp vd. 2015).

Isıl işlem kürleri

Kürlenmiş beton, standart su kürü dışındaki çeşitli kürlenme yöntemleriyle hızla dayanım kazanabilir. Isıl işlem, betonun mukavemetini kısa sürede arttıran sertleştirme işlemidir. 1927’de Freycinet, Fransa’da elektrik direkleri ve büyük boruların üretiminde $80-100^{\circ}\text{C}$ ısııl işlem uygulamıştır. İlk olarak 1931 yılında İsveç’te uygulanan elektrik yönteminin yaygınlaştığı ve kısa bir süre içerisinde sürekli kullanıldığı görülmüştür. Isıl işlem teknolojisinde, elektrik indüksiyon sistemleri 1948 yılında kullanılmaya başlanırken, kızılötesi 1940 yılında kullanılmaya başlanmıştı (Alabaş 2002). Isıl işlemin bugüne kadarki gelişimi ve çeşitliliği, finişer üretiminden 2 boyutlu plakaların ve 3 boyutlu hacim elemanlarının üretimine kadar uzanmaktadır. Küçük, hafif ağırlıklı kiriş ve hafif kolon elemanlarının üretiminden, büyük kesitli kutu köprü elemanlarına kadar tüm yapı elemanlarında beton, betonarme ve öngermeli betonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztekin 1980).

Basınçlı buhar kürü dışındaki tüm ısııl işlemler 100°C sıcaklığın altında gerçekleştirilir. Basınçlı buhar kürü, sıcaklığı 140°C ile 220°C arasında, betonarme elemanı istenilen dayanıma getirebilir. Bu işlemten sonra ortaya çıkan hidratasyon ürünleri, sıcaklığın 100°C ’nin altında olduğu ısııl işlem kürlerinden meydana gelen hidratasyon ürünlerinden farklıdır (Öztekin 1980).

Betonun yerleştirilmeden önce ısıtılması

Döküm öncesi ısııl işlem genellikle, beton malzemelerin karışımından önce ısıtılmasıyla oluşur. İlk ısııl işleme tabi tutulan malzeme sudur. Beton karışımının içerisinde kullanılan suyun sıcaklığı $50-60^{\circ}\text{C}$ arasında olmalıdır. Su sıcaklığı 50°C ’den düşükse betonun sıcaklığı 10°C ’den düşmektedir. İstenildiği takdirde agrega ısıtılabilir fakat çimentonun ısıtılmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü çimentoyu ısıtmak, hidratasyon ısıısının artmasıyla sıcaklık hızla yükselir ve bu durum betonun çatlamasına neden olur. Ayrıca taze betonun ısıtılması (mikserlerde,

taşıma sonunda özel kaplarda) uygulamada bulunan bir yöntemdir (Postacıoğlu 1986).

Betonun yerleştirilmesinden sonra ısıtılması

Bu yöntem; içten ısıtma ve dıştan ısıtma olmak üzere ikiye ayrılır. İçten ısıtma işleminde, elektrikli ısıtma metodu en yaygın kullanılan ısıtma yöntemidir. Dıştan ısıtma yapılırken en sık kullanılan yöntemler basınç altında buhar kürü ve atmosferik basınçta buhar kürüdür (Postacıoğlu 1986).

İçten ısıtma (elektrikle ısıtma)

İçten ısıtmanın en yaygın yöntemi elektrikli ısıtma yöntemidir. Bu işlem, elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle yapılır. Bu sayede ısıtma sonunda, soğuk iklimlerde 2.5-4 gün içinde güvenilir bir şekilde kürlenir. İçten ısıtma teknolojisinde bazı yöntemler uygulanmaktadır. Elektriği iletmek için betona bir demir çubuk veya levha yerleştirilir. Bu plakalar veya çubuklar, tekdüze bir sıcaklık elde edilecek şekilde düzenlenir. İlk sıcaklık artışı sabit olarak saatte 5°C olmalıdır. 24 saat sonra sıcaklık 50°C'ye ulaştığında sıcaklık artışı ilk döngünün iki katı olacaktır. Bu şekilde beton sıcaklığı yaklaşık 71°C'lik bir sıcaklığa ulaştıktan hemen sonra, işlem bu sıcaklık ile bir süre boyunca devam ettirilir. İşlem süresinin sonunda ışıklar kapatılır ve beton soğumaya bırakılır (Postacıoğlu 1986).

Atmosfer basıncında buhar kürü

Betonun mukavemetinin artması, artan sıcaklığa ek olarak ortamın yeterli neme doymasını gerektirmektedir. Buhar kürü kullanılarak ortamın sertleşmesi için gereken ısı ortamda sağlanabilir. Bu işlem 100°C ve atmosferik basıncın altında gerçekleşirse, özel bir nem kürü durumu olarak kabul edilebilir (Neville 1997).

Atmosferik buhar kürü 100°C veya daha düşük sıcaklıkta, atmosferik basınç altında ve doymuş buhar ortamında gerçekleştirilen kür türüdür. Betonun atmosferik basınçta buharla kürlenmesi, betonun ortam koşullarının neme göre doyuma yakın olması bakımından diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. Isıl işlem sırasında betondan suyun buharlaşması minimum seviyededir (Neville 1997).

Sıcak su kürü

Kürleme ve sertleştirme işlemleri, sıcaklık ve nem olmak üzere iki bileşen ile oluşmaktadır. Çimento esaslı kompozit malzemelerde gerekli çimento

reaksiyonlarının oluşması için uygun sıcaklığı belli bir seviyede tutmak gerekir (ASTM C192 2002).

Standart sıcaklıklarda ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$) ve nemli koşullarda, betonun gerekli dayanımı kazanmasına kadar beton yüzeyinde bulunan suyun muhafaza edilmesi gereklidir. Bazen de aşağıda belirtilen avantajlar için sıcak su kürüne ihtiyaç duyulur (Lamond ve Pielert 2006).

- Daha hızlı beton basınç dayanımının sağlanması
- Azaltılmış sünme etkileri ve gecikmiş büzülmenin gerçekleştirilmesi
- Geliştirilmiş sürdürülebilirlik ve dayanıklılık

Sıcak su kürü uygulandığında, silis ve kalsiyum hidroksitin birbirleriyle reaksiyona girip CSH fazlarını yükseltmesinden dolayı dayanım artmaktadır (Ramroom 2020).

Yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav)

Uygulamada, bu işlem atmosferik basınçta buharla kürlemeden daha farklıdır. Atmosferik basınç altında buhar kürü kullanıldığında, artan sıcaklıkla birlikte istenen beton dayanımı azalır. Dayanım azalmasının üstesinden gelebilmek için buharın betona belli bir basınçta verilmesi gerekir. Beton üzerinde yapılan bu işlemler “yüksek basınçlı buharla kür” şeklinde, genellikle otoklav olarak adlandırılan basınçlı bir buhar motoru kullanan işlem ise “otoklavlama” olarak ifade edilmektedir (Hanson 1963).

100°C veya daha yüksek sıcaklıkta doymuş buhar basıncına sahip elemanın yüzeyine uygulanarak mukavemet artışını hızlandıran bir işlemdir. 160°C ile 210°C arasında kürleme sıcaklığı aralığına sahiptir ve gerekli basınçta uygulanabilir. Bu koşullar altında, değişen hidratasyon reaksiyonları sonucu ile oluşan ürünler, 100°C 'nin altındaki buhar ile kürleme uygulamalarından farklıdır (Mindess ve Young 1991).

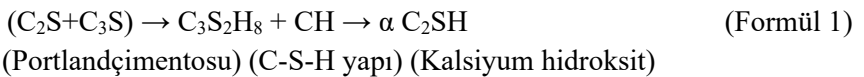
Yüksek sıcaklıkta çimento hidratasyonu sonucunda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumu gerçekleşen ana reaksiyondur. Ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ince silika parçacıklarıyla (agregalarda) reaksiyona girer ve betonda güçlü ve kararlı bir yapı oluşturur. Ortamdaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin azalması “çiçeklenme” olayını en aza indirmektedir. Bu sıcaklıklarda kalsiyum silikat ve trikalsiyum alüminatın reaksiyonu sonucunda da sülfata daha dayanıklı bir yapı oluşmaktadır (Hanson 1963).

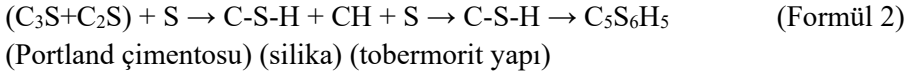
Otoklav kürü (basınçlı buhar kürü) uygulanan betonlarda meydana gelen değişimler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- **Çok erken kazanılan dayanım:** Standart kür ile 28 günde ulaşılabacak dayanıma, yüksek basınçlı buhar kürü ile 24 saatte erişilebilir.
- **Yüksek dayanıklılık:** Yine yüksek basınçlı buhar kürü sülfatlara ve diğer kimyasal zararlı etkilere karşı betonun dayanıklılığını artırır. Ayrıca donma çözülme ve aşınmaya karşı betonu dirençli kılar. Çiçeklenme olayı elemine edilmiş olur.

Yüksek basınç altındaki buhar küründe (otoklav kürü) kür sıcaklıkları 160-210°C aralığında ve genellikle 6-20 atm basınç altında uygulanmaktadır. 100°C üzerinde uygulanan sıcaklık ve basınç altında çimentonun hidratasyonu büyük oranda değişmektedir ve hidratasyon ürünleri betonun performansını artırıcı şekilde oluşmaktadır (Mindess vd 1991). Özellikle 80-100°C sıcaklıklarında otoklav kürü ile nem çıkışı engellendiği için, normal kür şartlarında oluşmayan hidrotermal birçok reaksiyon ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen bu yeni reaksiyonlar sebebiyle hidratasyon ürünleri değişmektedir ve çimento matrisinin mikro yapısı önemli bir şekilde olumlu yönde değişime uğramaktadır. Diğer tüm değişimlerde olduğu gibi sıcaklık değeri, basınç seviyesi ve CaO/SiO₂ oranına bağlı olarak faz beton içyapısında faz değişimleri meydana gelmektedir.

Çimentonun hidratasyonu sonucunda yüksek sıcaklıklarda birincil reaksiyon olarak Ca(OH)₂ meydana gelmektedir. Mikro silika parçacıkları ise oluşan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek daha sağlam bir yapı oluşturmaktadır. Normal betonlarda, hidratasyonu tamamlanmış çimento matrisinde CaO/SiO₂ oranı 1-3 arasında değişmektedir. Genellikle bu oran 1.5 değerine yakın olmaktadır. 1.5 CaO/SiO₂ oranına sahip çimento hamurlarının ısıtılması sonucunda αC₂S hidrat bileşeni oluşmaktadır (Formül 1). Bu bileşenin özgül yüzey alanı düşüktür ve gözenekli bir yapıdadır. Özgül yüzey alanının düşüklüğü sebebiyle düşük Van der Waals kuvvetlerine sahiptirler. CaO/SiO₂ oranının daha düşük olduğu (CaO/SiO₂=1) çimento hamurlarında nem çıkışının önlenmesi ve sıcaklık etkisiyle birçok mineral ve CSH jeli oluşmaktadır. CSH jeli nem çıkışının önlenmesi ve 150°C üzerindeki sıcaklık ortamlarında meydana gelmektedir (Formül 2). Bu reaksiyon ve ürünler dikkate alındığında çimento hamuru eğer sıcaklık etkisine maruz bırakılacaksa (yüksek sıcaklık ile kür edilecekse) CaO/SiO₂ oranı düşük olmalı ve genellikle bire eşit olarak kullanılmalıdır. Çimento hamurunda bu oranın ayarlanabilmesi için karışım içerisine silis dumanında olduğu gibi reaktif formda SiO₂ eklenmelidir (Khouri 1992).



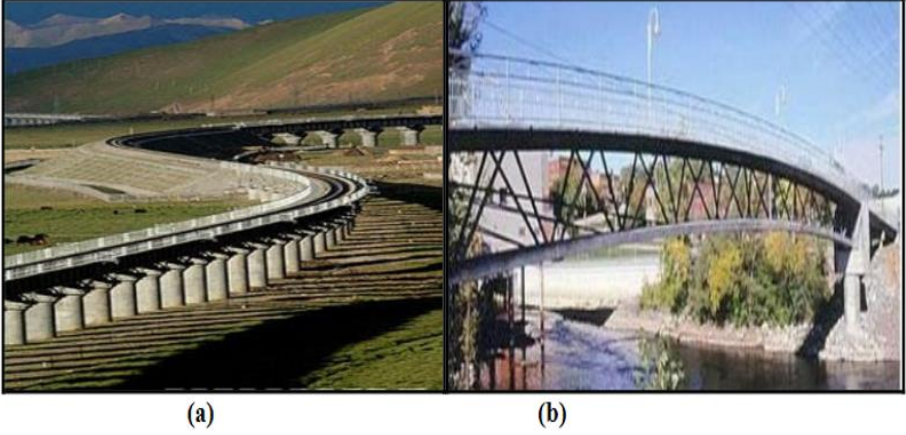


Yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav) uygulamalarında 200°C civarında CSH (tobermorrit) jelleri meydana gelmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise CaO/SiO₂ oranına bağlı olarak Truscottite, Gyrolite, Xonotlite, Hillebrandite yapıları meydana gelmektedir (Richard ve Cheyrezy 1994). Aşağıda oluşan yapıların kimyasal formülleri sunulmuştur. Otoklav kürü esnasında çimento hamuru içerisinde bulunan Ca(OH)₂ kullanılmakta ve CSH jelleri oluşmaktadır. Bu mekanizmanın yapısına ve miktarına bağlı olarak çiçeklenme olayı da en düşük seviyelere indirilmektedir. Tüm bu oluşumların etkisiyle beton içyapısı, durabilitesi daha yüksek bir forma dönüşmektedir. Özellikle sülfata dayanıklılık açısından, otoklav küründe kullanılan sıcaklıklar sebebiyle kalsiyum silikatlar ve trikalsiyum alüminatın reaksiyonu önemli katkı sağlamaktadır (Hanson 1963).

Tobermorit yapı	: Ca ₅ S ₆ O ₁₆ (OH) ₂ .8H ₂ O
Truscottite	: Ca ₁₄ Si ₂₄ O ₅₈ (OH) ₈ .2H ₂ O
Gyrolite	: Na Ca ₁₆ (AlSi ₂₃ O ₆₀)(OH) ₈ .14H ₂ O
Xonotlite	: Ca ₆ Si ₆ O ₁₇ (OH) ₂
Hillebrandite	: Ca ₆ (Si ₃ O ₉)(OH) ₆

Reaktif pudra betonlarının uygulama alanları

Reaktif pudra betonu mükemmel içyapıya ve yüksek dayanıma sahiptir. Bundan dolayı reaktif pudra betonları, rögar kapaklarında, ızgaralarda, önemli açıklıkların geçildiği köprülerde ve nükleer atıkların depolandığı tesislerde ve benzeri özel betonların arandığı birçok alanda kullanılabilir. Reaktif pudra betonlarının ilk kullanıldığı yapılardan olan Kanada'daki Pedestrian köprüsü ve Tibet demiryolu şekil 6'da verilmiştir. Şekil 7'de ise reaktif pudra betonlarından yapılmış rögar kapakları ve yağmur suyu olukları gibi bazı prefabrik elemanlar gösterilmiştir. Özellikle üretim maliyetlerinin düşürülmesi ile reaktif pudra betonlarının kullanımı yaygınlaşacaktır (Topçu ve Karakurt 2005; Yazıcı 2007).



Şekil 6. a) Tibet demiryolu; b) Pedestrian Köprüsü (Yazıcı 2007)



Şekil 7. Reaktif pudra betonu ile üretilmiş prefabrik elemanlar
(www.iston.com.tr)

Reaktif pudra betonları yüksek mekanik özellikleri sebebiyle çelik ile yarışabilir bir yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Beton bariyer gibi prefabrik üretimi yapılan ve yüksek basınç dayanımları ile esnekliğe sahip yapı elemanlarının imalatında reaktif pudra betonlarının kullanımı da araştırılmaktadır. Maliyet problemlerinin çözülmesi ile reaktif pudra betonları daha farklı birçok alanda kullanım imkanı bulacaktır (Topçu ve Karakurt 2005; Yazıcı 2007).

Reaktif pudra betonlarının avantajları

Yüksek dayanımlı ve normal dayanımlı betonlara kıyasla mekanik özellikleri çok üstün olan reaktif pudra betonlarının en büyük avantajlarından bir tanesi aynı yüklere karşı çok daha ince kesitlerle kullanılabilmesidir. Yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olmaları sebebiyle süneklik ve eğilme dayanımının önemli

olduğu yapı elamanlarında rahatlıkla kullanılabilirler. Yüksek enerji yutma kapasiteleri sayesinde, geniş açıklıkların geçilmesi için kullanılan çeliklere, alternatif bir malzemedirler. Bu sebeple yapıların ölü yükleri de azalmaktadır. Çok küçük ve birbirinden bağımsız boşluk içerdiklerinden dolayı, çevresel faktörlere karşı mükemmel derecede sayılabilecek kadar dayanıklıdır. Ek olarak radyoaktif ışınların geçişlerine karşı da mukavim olduklarından dolayı nükleer tesislerde çok daha ince kesitler halinde kullanılabilirler (Topçu ve Karakurt 2005; Yazıcı vd. 2009; Yazıcı vd. 2010).

Reaktif pudra betonlarının sınırlı yönleri

Reaktif pudra betonlarının en büyük dezavantajı maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Beton karışımında kullanılan malzemelerin maliyetli olması ve kür şeklinin maliyetli olması bu betonları ekonomik olmaktan uzaklaşmaktadır. Hedeflenen basınç dayanımlarına erişebilmek için basınçlı buhar kürü (otoklav) kürüne tabi tutulmaları sebebiyle saha betonu olarak yerinde dökülmeleri çok zordur ve sadece prefabrik olarak üretilmektedirler. Yine üretim tekniklerinin dikkat ve hassasiyet gerektirmesi sebebiyle nitelikli elemanların gözetiminde üretimlerinin yapılması gerekmektedir (Topçu vd. 2014).

Nano Malzemeler

Nano teknoloji

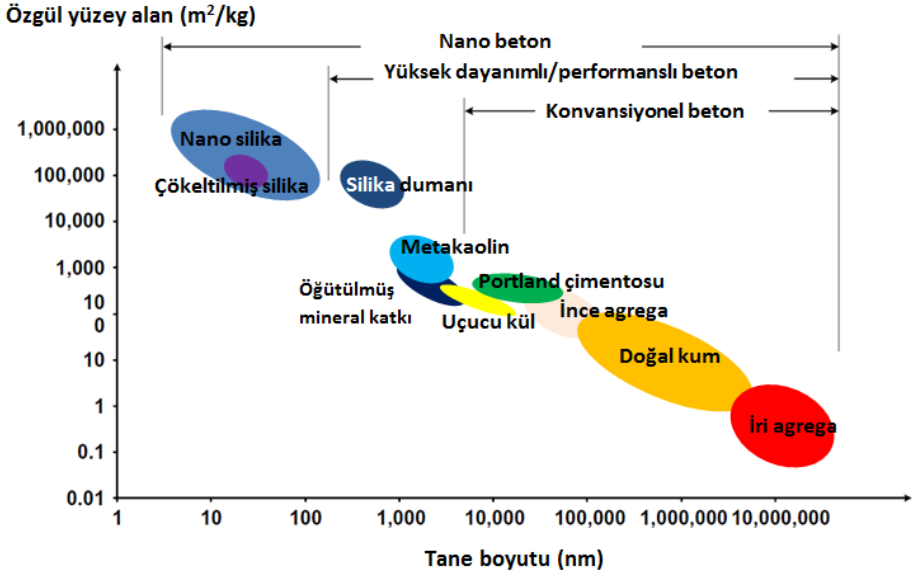
Nano teknoloji gün geçtikçe hayatımızın her alanında geniş bir yer bulmaktadır. İnşaat ve yapı malzemesi sektörü de diğer alanlarda olduğu gibi nano teknolojiadaki gelişmelerden etkilenmekte ve yeni uygulama alanları ortaya çıkmaktadır. Nano teknolojiadaki ilerlemeler yapı malzemeleri açısından iki farklı şekilde katkı sağlamaktadır. Bunlardan birincisi nano boyutlu yapı malzemelerin kullanılması ile elde edilen üstün özellikteki malzemelerin üretimi ve kullanımıdır. Nano malzemelerin ikinci katkısı ise yapı malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde ve tespitinde yeni nano ölçekli tekniklerin ve aletlerin kullanılmasıdır. Nano malzemeler sadece geleneksel mukavemet özellikleri açısından avantajlar sağlamamakta aynı zamanda malzemelerin basınç algılama, fotokatalitik gibi yeni işlevler kazanmasına da imkan vermektedir (Lachoff vd. 2003; Hui vd. 2004; Jayapalan vd. 2012).

Avrupa Birliği kapsamında veya Amerika, Kanada, Japonya ve Çin'den nano teknoloji ve kullanımıyla alakalı ilerlemelere destek olmak amacıyla birçok ulusal ve uluslararası projeler devreye sokulmuştur. Farklı uluslararası profesyonel örgütler tarafından çalışma komiteleri, komisyonları ve grupları

oluşturulmuştur. RILEM tarafından kurulan TC 197-NCM bu komitelerden birine örnek olarak gösterilebilir (Falikman ve Petushkov 2012).

Son yıllarda beton teknolojisi ile ilgili nano teknolojinin farklı uygulamalarının araştırıldığı çalışmalarda kayda değer artışlar sağlanmıştır. Nano teknoloji sayesinde beton içyapısı tam manasıyla anlaşılabilmiştir. Bunun sonucunda, yapı malzemelerinin üretim maliyetlerinin düşürülmesi mümkün hale gelmiştir. Beton üretiminde nano malzemelerin kullanımı ise, özellikleri bilinen nano malzemeler ile kontrollü olarak değiştirilebilmek ve daha iyi performanslı malzemelerin üretimi için gerçekleştirilebilmektedir. Çimento tanelerine, çimento fazlarına, agregalara veya katkılara (nano boyuta sahip olanlar da dahil olmak üzere) nano boyutta yapılan değişiklikler kapsamında, molekül aşlaması söz konusu olabilir. Malzemelerin makro boyuttaki özellik ve performanslarının kontrol edilebilir duruma gelmesi, çimento esaslı malzemeler için büyük ehemmiyete sahip olan çimentonun hidratasyon ürünlerinden ve kendisi CSH jeli ve benzeri hidratasyon ürünlerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin iyi anlaşılmasıyla mümkün olabilir (Kawashima vd. 2012).

Beton birçok fazdan oluşan kompozit bir malzemedir. Beton amorf bir faz yapısına sahiptir ve nano ile mikro ölçekte birçok hidratasyon ürünlerine sahiptir (Birgisson vd. 2012). Şekil 8’de farklı beton türlerinin üretiminde kullanılan beton karışım malzemelerinin tane boyutları ve özgül yüzey alanları verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde normal betonların nano malzemeler içermediği sonucu ortaya çıksada, CSH, CH ve etrenjit gibi hidratasyon ürünleri ve akışkanlaştırıcı kimyasalları nano boyutlu ürünlerdir. Son yıllarda yapı malzemeleri alanında araştırma yapan ve nano teknolojinin faydalarından yararlanmaya çalışan birçok bilim adamı, çimentonun hidratasyon ürünleri ve nano malzemelerin beton içyapısına etkisi üzerine yoğunlaşmışlardır (Balaguru ve Chong 2006).

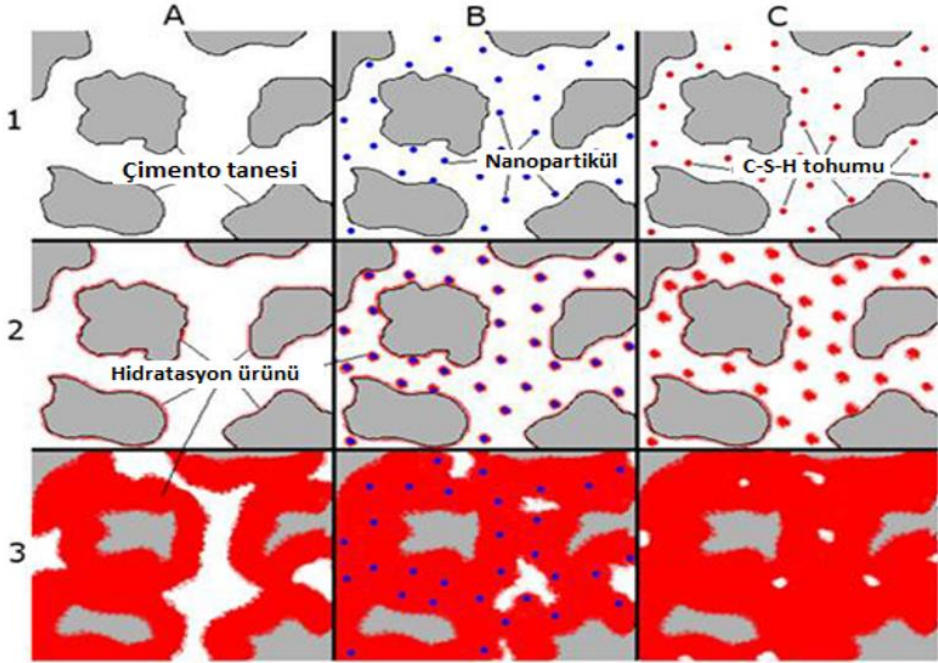


Şekil 8. Beton bileşenlerinin tane boyutu ve özgül yüzey alanı (Sanchez ve Sobolev 2010)

Nano malzemelerin beton ve/veya çimento esaslı yapı malzemelerine katılması ile çimentonun hidrasyon süreci hızlandırılabilir. Nano partiküllerinden nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-TiO₂ veya nano-Fe₂O₃ kullanımı hidrasyonu hızlandırmak için seçilen yöntemlerden biridir. Nano boyutlu katkı maddeleri çok yüksek yüzey alanlarına sahip olmaları sebebiyle hidrasyon reaksiyonlarının hızlı bir şekilde oluşmasına sebep olmaktadır. Nano-SiO₂ gibi nano malzemeler meydana getirdikleri pozolanik reaksiyonlar sebebiyle CSH jeli oluşumunu desteklemektedir. Bu sayede nano malzemeler çimento hamuru içerisinde bulunan diğer bileşenler ile reaksiyona girerek ek çekirdek oluşumuna sebep olmaktadır. Hidrasyon işleminin hızlanması, nano partiküllerin reaktif yüzeylerinde meydana gelen reaksiyonlarla ilişkili olduğundan, bu partiküllerin boyutları ve dolaylı olarak yüzey alanları çimentonun hidrasyonu açısından önem arz etmektedir (Land ve Stephan 2012).

Beton karışımında nano malzemeler kullanılarak CSH jellerinin oluşumunu ve miktarını arttırmak beton özelliklerinin olumlu yönde gelişmesini sağlamaktadır. Günümüzde nano malzemeler ile CSH jellerinin artırılmasına alternatif olarak sentetik olarak üretilmiş CSH jelleri de beton içerisine katılarak çimento hidrasyonu hızlandırılabilir. Bu yöntemin en büyük avantajı çekirdeklenme reaksiyonuna gerek kalmaması sebebiyle çimento hidrasyonunda ölü evrenin kısılmasıdır (Nicoleau 2011).

Nano malzemelerin beton karışımına katkısı ile oluşan hidrasyon ürünlerinin çekirdekleri, çimento taneleri üzerinde bulunmalarının yanında çimento taneleri arasında da oluşmaktadır(Şekil 9). Hatta nano partiküller üzerinde de oluşan bu çekirdekler hidrasyonun gelişimini iyileştirmektedir. Oluşan bu çekirdekler çimentonun hidrasyon ürünleri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sayede beton porozitesi çok kısa sürede azalmakta ve nano malzeme/partikül kullanılmayan betonlara kıyasla daha boşluksuz bir yapı ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak daha kısa sürede dayanım özellikleri gelişen ve boşlukları daha az olan üstün özelliklere sahip yüksek basınç dayanımlı beton ve/veya çimento esaslı yapı malzemeleri elde edilebilmektedir (Björnström vd. 2004; Porro vd 2005; Qing vd. 2007).



Şekil 9. Saf çimento hamurunun (A), nano silika ihtiva eden çimento hamurunun (B) ve sentetik CSH ihtiva eden çimento hamurunun (C) şematik hidrasyon gelişimi (Land ve Stephan 2012).

Nano teknolojinin betona uygulanmasına ilişkin çalışmalar artarak devam etmektedir. Fakat büyük ölçekli uygulamalar ile ilgili çalışmalar yine sınırlı sayıda kalmıştır. Yinede yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında nano teknolojinin çimento esaslı malzemelerin ve/veya betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmeler sağladığı söylenebilir. Yapılan birçok çalışma sonucunda nano partiküllerin aşağıdaki alanlarda önemli

iyileşmeleri sağlayabileceği belirlenmiştir (Lackhoff vd. 2003; Hui vd. 2004; Balaguru ve Chong 2006; Sanchez ve Sobolev 2010; Birgisson vd. 2012; Falikman ve Petushkov 2012; Jayapalan vd. 2012; Kawashima vd. 2012).

- Çimento hamuru-agrega arasındaki aderansın kuvvetlenmesi,
- Mikro çatlak oluşumunun azalması ve bu çatlakların kendiliğinden iyileşmesi,
- Betonun geçirimsizliğinin azalması,
- Rötrenin oluşumunun azalması,
- Kil ihtiva eden agregaların olumsuz etkilerinin azalması,
- Elastisite modülünün artması,
- Betonun sıcaklığa karşı direncinin artması,
- Alkali-silika reaksiyonu, korozyon, donma-çözülme gibi kalıcılık özelliklerinin iyileşmesi.

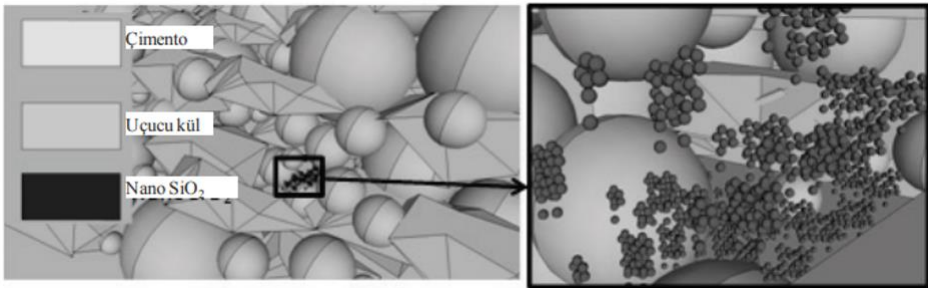
Nano çimento

Çevresel etkiler dikkate alındığında CO₂ emisyonlarının azaltımı önem arz etmektedir. Çimento üretimi CO₂ salınımını arttıran en önemli faktörlerden biridir. Bu sebeple çimento yerine uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın curufu gibi puzolanik malzemelerin kullanımı çevre/hava kirliliğini azaltacaktır. Beton üretiminde kullanılan mineral/puzolanik katkıları ile betonların fiziksel ve mekanik özellikleri iyileşmekte ve yapıların dayanıklılık ve de dayanım özellikleri olumlu yönde gelişmektedir (Kara 2020). Teknolojideki gelişmelere bağlı olarak son yıllarda nano malzemelerin birçok sektörde kullanımı arttığı gibi beton teknolojisi alanında da artmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalarda ise kayda değer bir artış görülmektedir. Yapılan çalışmalarda en çok araştırılan nano malzeme olarak karşımıza nano silika (nano SiO₂) çıkmaktadır (García-Taengua vd. 2015). Nano silika çok yüksek saflıkta (%99 SiO₂ içermektedir), küçük tane boyutunda (partikül boyutu 10-150 nm aralığında) ve yüksek özgül yüzey alanına (>80 000 m²/kg) sahip bir malzemedir. Bu özellikleri sebebiyle nano SiO₂, diğer puzolanik katkılara (silis dumanı ve benzeri) kıyasla daha üstün puzolanik davranış sergilemektedir (Huang vd 2020). Beton karışım hesabına %1 nano SiO₂ ilavesi ile elde edilen performans artışı ancak %10'luk silis dumanı katkısında elde edilebilmektedir (Li vd. 2017).

Nano SiO₂ katkısı çimento hamurunun mikro yapısını geliştirmekte ve basınç dayanımı ile eğilme dayanımlarını önemli derecede arttırmaktadır (Haruehansapong vd. 2014). Durabilite açısından da nano silikanın kullanıldığı betonlar daha sıkı/kompakt yapılı olması sebebiyle klor geçirimsizliği azalmakta ve sülfat direnci de artmaktadır (Kara 2020, Kong vd. 2013). Yüksek sıcaklık

etkisinde ise betondaki çatlak oluşumları azalmaktadır (Horszczaruk vd. 2017). Nano SiO_2 yüksek yüzey enerjisine sahip olduğu için tanelerde topaklanma olmaktadır (Rong vd. 2020). Topaklanmanın oluşmasına engel olabilmek için nano silikalar düşük oranlarda kullanılmalıdır. Birçok araştırmacı %1 oranında nano silikanın bile önemli derecede betonun özelliklerini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir (El-Didamony Ahmed 2017).

Nano teknoloji, tüm sektörleri etkilemiştir. İnşaat sektörü açısından nano teknolojinin en büyük katkısı, nano malzemeler ile üretilen yapı malzemeleridir. Nano malzemeler küçük boyutları sebebiyle beton içindeki mikro boşlukları doldurmakta ve daha sıkı bir beton içyapısı oluşturmaktadır. Bunun yanında yüksek yüzey alanları sebebiyle bağlayıcılık özellikleride diğer normal boyutlu malzemelere göre daha iyidir ve betonda olumlu sonuçlar vermektedir. Çimento harçlarında çok küçük boyutları (yaklaşık 10 nm) sebebiyle nano malzemeler büyük ve önemli bir potansiyele sahiptir. Nano boyutları sebebiyle çimento taneleri arasını doldurmakta ve bağlayıcılığı arttırmaktadırlar. Nano malzemeler/partiküller, özellikle çimento-agrega ara yüzey bölgesinde yüksek performans sağlayarak çimento hamurunun genel özelliklerini geliştirmektedirler. Şekil 10'da beton içerisinde nano malzemelerin durumunu gösteren şematik bir görüntü vardır. Nano partiküller beton içindeki boşlukları doldurmaktadır. Nano malzemelerin/parçacıkların çimento hamuruna eklenmesi ile daha iyi bir mikro yapı oluşmakta fakat kimyasal içerikte de bir değişiklik meydana gelmemektedir. Son on yılda nano malzemelerinin beton teknolojisinde kullanımıyla ilgili olumlu sonuçları aktaran birçok çalışma yapılmıştır ve halen yaygın olarak yapılmaya devam etmektedir (Sabdonno vd. 2014).



Şekil 10. Nano partiküllerin beton içindeki durumlarının şematik gösterimi

Silis dumanının beton karışımında kullanımı ile nano- SiO_2 kullanımı kıyaslandığında pozolanik reaksiyonlar açısından, nano- SiO_2 kullanımı daha etkili sonuçlar vermektedir. Bu sonuç; hem nano- SiO_2 'nin çimento harcının

mikro yapısını daha boşluksuz bir yapıya çevirmesi ve hem de puzolanik reaksiyonların nano-SiO₂ etkisiyle gelişmesi ile açıklanmaktadır (Jo vd 2007). Çimento esaslı yapı malzemelerinde kullanılacak nano malzemeler/partiküllerle ilgili olarak Solobevvd (2008) aşağıda sıralanan avantajları belirtmişlerdir.

- Nano parçacıklar dolgu maddesi görevi görür ve çimento taneleri arasındaki mikro boşlukları doldurarak yoğunluğu artırır.
- İyi dağılmış nano parçacıklar, çimento hidratlarına kristalizasyon güçlendirici görevi görür, böylece hidrasyon işlemini hızlandırır.
- Nano parçacıklar, agrega temas bölgesinin yapısını, yani agregalar ve harç arasındaki arayüzey geçiş bölgesini geliştirerek, agregalar ve harç arasında daha iyi bir bağ sağlar.
- Nano parçacıklar tarafından sağlanan kayma düzlemleri arasındaki çatlak durdurma ve birbirine kenetleme etkileri, çimento esaslı malzemelerin tokluğunu, kaymasını, gerilme ve eğilme mukavemetini artırır.

Mikro silika

Mikro silika, elemental silikonların veya silikon içeren alaşımların bir yan ürünü olarak elektrik ark ocaklarında üretilen bir amorf polimorftur. Çok yüksek yüzey alanına sahip, 150 nm çapında, çok ince düz küresel silikon oksit parçacıklarından oluşur. Mikro silika parçacıkları, ortalama çimento parçacıklarından 100 kat daha küçüktür. Kullanımı ve bertarafı, çevre kaygıları nedeniyle endişe kaynağıdır. Mikro silika, genellikle ilave çimento malzemesi olarak sınıflandırılır. Bu malzemeler; puzolanik özellikler, çimentomsu özellikler ve her iki özelliğin kombinasyonu özellikler gösterir. Bu özelliklerden dolayı, betonun davranışını birçok yönden etkileyebilir (Sharma vd. 2014).

Betondaki mikro silika, sağlamlığa ve dayanıklılığa iki şekilde katkıda bulunur. Puzolanik bir malzeme olarak mikro silika, daha düzgün bir dağılım vedaha yüksek hacimde hidrasyon ürünlerinin oluşmasını sağlar. Dolgu maddesi olarak mikro silika, çimento hamurundaki ortalama gözeneklilik boyutunu düşürür. Puzolanik ve dolgu maddesi olarak mikro silikanın etkinliği, büyük ölçüde bileşimine ve parçacık boyutuna bağlıdır. Bunlar da fırının tasarımına ve ham maddenin bileşimine bağlıdır (Sharma vd. 2014).

Mikro silikanın oluşturduğu düşük geçirimsizlik, klorür iyonlarının izinsiz girişlerine karşı koruma sağlar. Böylece klorür iyonlarının çelik donatıya ulaşması ve ilk korozyon için geçen süre artar. Ek olarak, mikro silikalı beton, geleneksel Portland çimentolu betona kıyasla çok daha yüksek elektriksel dirence sahiptir. Böylece korozyon oranını yavaşlatır. Bu birleşik etki genellikle yapıların ömrünü 5-10 kat arttırmıştır. Mikro silikalı beton, düşük geçirgenlik ve yüksek

kimyasal dirence sahiptir. Bu, düşük C_3A 'lı sülfata dirençli çimentolar ve diğer çimento esaslı bağlayıcı sistemlerden daha yüksek derecede koruma sağlar. Çimento, mikro silika ile yer değiştirilir ve mikro silikanın verimlilik faktörü gözlemlenirse aynı mukavemete sahip beton için daha düşük bir sıcaklık artışı ve sıcaklık farkı meydana gelecektir. Kalın kesitlerde, cüruf ve uçucu kül karışımlarından daha iyi performans gösterir. Aynı zamanda erken yaş dayanımından ödün vermeden düşük ısı elde etmenin en etkili yoludur. Düşük geçirgenliğinden dolayı mikro silika, otoparklar gibi bir miktar nemin kabul edilebilir olduğu yer altı yapıları için entegre bir su geçirmezlik maddesi olarak kullanılabilir. Mikro silika süper akışkanlaştırıcılarla birlikte yüksek mukavemetli beton (70-120 MPa) elde etmek için kullanılır. Mikro silikalı betonu, çok yüksek binaların yapımı sırasında pompalamak çok daha kolaydır. Mikro silikalı beton çok yüksek aşınma direncine sahiptir. Zemin ve kaldırım yapımında, paradan ve zamandan tasarruf sağlar ve tesis operatörü için operasyonel verimlilik sağlar. Aynı zamanda betonun hidrolik aşınma-erozyon direncini de iyileştirir. Böylece betonu, baraj savaklarında kullanıma uygun hale getirir. Mikro silikalı beton, bir dizi kimyasal etkiye maruz kalan endüstriyel yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Beslenme endüstrisinde, kimyasal etki yağ asitleri, diğer asitler ve deterjanlardan gelmektedir. Kimya endüstrisinde ise bu etki mineral asitleri, fosfatlar, nitratlar ve petrokimyasallardan gelmektedir. Mikro silikalı beton, bu yüzden sanayi tarım sektörlerinde paha biçilemez bir değere sahiptir (Sharma vd. 2014).

Nano silika

Nano silika endüstriyel uygulamalar için ticari kaynaklardan temin edilebilir. Nano silika genellikle ince, beyaz, kokusuz ve tatsız amorf tozlar şeklinde bulunur ve silikon tetraklorürün alev pirolizinden üretilir (Barthel vd 1998). Nano-silika parçacıkları hidrofiliktir ve son derece yüksek spesifik yüzey alanlarından dolayı çok yüksek bir yüzey enerjisine sahiptir. Nano-silisin spesifik yüzey alanının 50-400 m²/g arasında olduğu bildirilmiştir (Nordstrom vd. 2010).

Temel olarak, nano boyutlu silisin yapısı üç boyutlu bir silikon oksit ağıdır ve silisin yüzeyi silanol grupları ile kaplanmıştır. Silanol gruplarının varlığı, nano-silika parçacıklarının hidrofilik özelliği ile sonuçlanır. Ek olarak, bitişik nano partiküller üzerinde bulunan silanol grupları kolayca hidrojen bağları oluşturabilir. Bu nedenle, hidrofilik nano-silika parçacıklarının hidrofobik polimer matrisinde iyi dağılmasını sağlamak zordur. Polimer malzemeler ve silika yüzeyi arasındaki fiziksel özelliklerin farkı, genellikle faz ayrılması

sorununa neden olabilir. Polimer ve nano-silika arasındaki etkileşimi arttırmak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır (Jana ve Jain 2001).

Diğer nano partiküllerle karşılaştırıldığında nano silika, çimento hidratasyon ürünleri ile puzolanik reaksiyonda avantaja sahiptir. Ultra ince partikül boyutu nedeniyle, nano silika çok erken yaşlarda belirgin bir puzolanik reaksiyona sahip olabilir. Bu nedenle, umut verici nano silika uygulamalarından biri, uçucu kül, cüruf veya diğer puzolanik malzemelerle harmanlanmış çimentoya ilave edilmesidir (Zhang vd. 2012). Daha önceki çalışmalara göre, nano-silika, karışımında homojen bir şekilde dağılmış olması koşuluyla çimento hidratasyonunu ve erken yaş dayanımını belirgin bir şekilde arttırmıştır, aksi takdirde, bu yarar nano partiküllerin topaklaşması ile tehlikeye girebilir (Shaikh vd. 2014). Çimento esaslı malzemelerin nano-silika ile dayanıklılık özelliklerine ilişkin çalışmalar, bugüne kadar sınırlı kalmıştır çünkü önceki araştırmaların çoğu esas olarak dispersiyon sorunu ve taze durum özellikleri üzerindeki etki ile ilgilidir. Yapılan bir çalışma neticesinde; beton karışımına %3.8 nano silika ekleyerek su penetrasyon derinliğinde yaklaşık %45'lik bir azalma olduğu saptanmıştır (Ji 2005). İçeriğinde nano-silika bulunan beton karışımında daha düzgün ve kompakt bir yapı gözlemlenmiş ve bu durum nano-silika ilavesi nedeniyle meydana gelen puzolanik reaksiyona bağlanmıştır. Aynı sebepten dolayı, Gaitero ve arkadaşları, %6 nano silika katılmış çimento hamurundan kalsiyum sızma oranının gözle görülür derecede azaltılabileceğini bildirmiştir (Gaitero vd. 2008).

Yüzey alanı itibarıyla oldukça küçük tane boyutuna sahip bir malzeme olan nano silika petrokimya ve boya endüstrisinde kullanılan bir malzemedir. Betonda erken dayanım artışı ve moleküler boşluğu doldurması sebebiyle betonun fiziksel özelliklerinde olumlu etkisi söz konusudur. Nano silika ikamesinin betonda daha düzgün ve kompakt bir mikro yapı sağladığı daha önceki çalışmalarda gözlenmiştir. Beton için su ve klorür iyonlarına karşı, dayanıklılığı arttıracaktır. Bu durum silika nanopartiküllerinin matris içerisinde düzgün dağılımıyla açıklanmaktadır. Böylece, su penetrasyon derinliği, klorür geçiş katsayısı ve betona difüzyon katsayısı için azalma gözlemlenebilir. Beton özelliklerini geliştirmek için genellikle %0-6 oranında, az miktarda nanosilika yeterlidir (Bozkurt 2019).

Nano alümina

Boyutu 100 nm'den küçük olan nano kristalli seramik malzemeler, nano teknoloji alanında büyük öneme sahiptir. Nano boyutlu malzemeler yığmsal malzemeler arasında, yüzey alanı/hacim, yüksek mukavemet ve tokluk

bakımından gelişmiş üstün özelliklere sahiptir. Nano alümina, sol-jel, yanma, çökeltme, hidrotermal ve kaolinden sızdırma gibi farklı yöntemlerden elde edilmektedir. Bu yöntemler, daha az aglomerasyon, gelişmiş morfoloji ve sentez işlemi sırasındaki saf nano alümina fazının kontrollü üretimiyle kontrollü parçacık boyutu dağılımının faydasını vurgulamaktadır. Nano alümina, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu nedenle nano alüminanın sentezi için uygun maliyetli işleme yollarının geliştirilmesi, en belirgin endüstriyel zorluktur (Behera vd. 2016).

Tüm seramik malzemeler arasında alümina seramikleri; çok yönlü mekanik, elektrik ve optik özelliklerinden dolayı birçok modern endüstriyel alanlarda kullanılabilir. Alüminyum oksit esaslı seramik malzeme; sertliği, kimyasal hareketsizliği, yüksek erime noktası, uçucu olmaması, aşınma ve korozyona karşı direnci nedeniyle önemli bir avantaja sahiptir (Krell ve Shadlich 2001; Einaga ve Futamura 2004; Sun vd. 2015; Wang vd. 2000). Araştırmacılar, bu heyecan verici özelliklerinden dolayı, nano boyutlu alümina ve alümina esaslı nano kompozitlerin hazırlanması ve kullanımına ilgi göstermektedir (Koli vd. 2014). Nano alümina için elektronik, metalürji, kompozitler, aşınmaya karşı koruma, refrakterler, kataliz, otomotiv, emisyon kontrolü ve hidrojenasyon uygulama alanlarıdır (Kaya vd. 2001; Marthe vd. 2013; Huang vd. 2005; Szabo vd. 2013; Elsen ve Ramesh 2015).

Nano Al_2O_3 tozunun sentezlenmesine yönelik geleneksel işlemler, fiziksel veya kimyasal olabilir. Fiziksel yöntemlerden bazıları mekanik frezeleme, lazer ablasyon ve alev püskürtmeyi içerir; kimyasal yöntemler hidrotermal, buhar fazı reaksiyonu, birlikte çökeltme, yanma, sol-jel yöntemleri ve kaolinin süzülmesini içerir (İsfahani vd. 2013; Tok vd. 2006; Suchanek ve Garces 2010; Ganesh vd. 2009; Thiruchitrambalama vd. 2004; Ramil ve Saleh 2008). Nano alümina parçacıklarının özellikleri büyük ölçüde parçacık boyutuna, morfolojisine ve yüzey ve faz homojenliğine bağlıdır. Bu faktörler, uygun sentetik bir yol seçimi yapılarak kontrol edilebilmektedir.

Nano alümina; elektronik, metalürji ve refrakterler gibi birçok yeni alanda öneme sahiptir. Bir dizi geleneksel yöntem, nano alümina hazırlamak için kullanılabilir. Sol-jel ve çökeltme kolay işlenebilmesiyle düşük maliyetli yöntemlerdir. Ancak aglomerasyonu azaltmada zorluklarla karşılaşmaktadır. Yanma yöntemi saflık sağlayan hızlı bir süreçtir. Ancak yüksek reaksiyon sıcaklıklarını gerektirir. Hidrotermal yöntem, yüksek maliyetli ekipman içeren karmaşık bir süreçtir. Ancak daha az kümelenme içerir. Sızıntı yönteminde ise işlem sırasında ortaya çıkan safsızlıklar giderilmelidir. İşlem parametreleri

kontrol edilerek nano alümina, uygun parçacık boyutunda, yüksek yüzey alanı ve kristalliğe sahip biçimde üretilebilir (Behera vd 2016).

Betonda yüksek sıcaklık

Betonarme elemanlar içerisinde bulunan beton ve çeliğin her ikisinde de, yüksek sıcaklık etkisinde, fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıktan etkilenme sebebiyle yangın anında betonarme yapı elemanları da çelik yapılar gibi güvensiz bir ortam oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisi ile betonda çatlama, aderans kaybı ve parça atma hatta parçalanma olayları meydana gelmektedir. Yangın sebebiyle her bina yüksek sıcaklık etkisine maruz kalabilmektedir. Bunun yanında yangın dışında bazı yapı elemanları kullanım alanlarına bağlı olarak devamlı yüksek sıcaklık etkisinde kalmaktadırlar. Nükleer tesisler ve askeri amaçlı yapılar bunlara örnek olarak verilebilir. Yüksek sıcaklık etkisinde (yangın anında) betonarme yapılarda ani dayanım kayıpları, parçalanma ve patlama gibi sonuçlar sebebiyle kalıcı hasarlar oluşmakta ve bunun sonucunda can ve mal kayıpları ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklığa neden olan yangın; katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin kontrol dışı kalması olayıdır. Sıcaklık 10 dakika gibi kısa bir sürede yaklaşık 650°C'ye hızla yükselmekte ve yangın süresince de 1200°C'ye ulaşabilmektedir (Bingöl 2002; Mahsanlar 2006; Bingöl 2008).

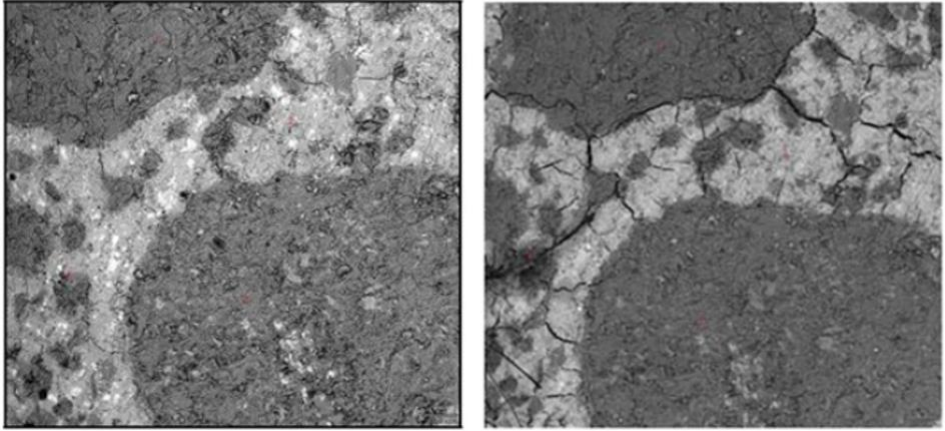
Yapı malzemeleri sınıflandırmasında A sınıfı olarak adlandırılan malzemeler yanmayan ürünlerdir. Yanmayan bu yapı malzemesi sınıfının iki alt sınıfı (A1, A2) mevcuttur. A1 sınıfındaki yapı malzemeleri hiç yanmayan malzemelerdir. Bu malzemeler yangın anında alevlenmezler ve kömürleşmezler. Bu malzeme grubunun çoğunluğu yapılarda kullanılan malzemelerdir. Kum, çakıl, çimento, kireç, harç, beton, betonarme, alçı bunlara örnek olarak verilebilir. Betonarme yapılar ve bu yapılar içerisinde kullanılan birçok malzeme yanmayan malzeme grubunda olmasına rağmen yüksek sıcaklık etkisinde olumsuz davranışlar göstermektedirler. Bu sebeple beton ve çimento esaslı ürünlerin yangın/yüksek sıcaklık etkisinde davranışının belirlenmesi önem arz etmektedir (Bingöl 2002; Mahsanlar 2006; Bingöl 2008).

Yüksek sıcaklığın betona etkileri

Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli derecede zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir. Ancak bu durabilite, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir. Örneğin silis esaslı agregası ile üretilen normal dayanımlı betonda

600°C’de mukavemet kaybı yaklaşık %50’dir (Akman 2000; Kızıllkanat ve Yüzer 2008).

Sıcaklık 500°C’nin üzerindeyken çatlaklar çimento hamurunda gelişir. Boyutları 0.01 mm’den büyüktür. Ayrıca agregaları da çatlatırlar. Bunların boyutları ise 0.05 mm’den büyüktür ve artık çatlaklar gözle görülebilir. Silis esaslı kum kullanılarak üretilmiş silis dumanı katkılı harçta yüksek sıcaklık (600°C) etkisi öncesi ve sonrası elektron mikroskoptan alınan görüntülerde (Şekil 11) çimento hamuraunda, arayüzeyde ve kısmen agreganın kendisinde de çatlakların oluştuğu görülmektedir (Kızıllkanat ve Yüzer 2008).



Şekil 11. Harçta sıcaklık (600°C) etkisi öncesi ve sonrası görüntüsü
(Kızıllkanat ve Yüzer 2008)

Agreganın yüksek sıcaklıktaki davranışı

Betonun %60-80’lik hacmi agregalardan oluşmaktadır. Agregalar betonda %60-80 arasında bir hacmi doldururlar. Agreganın mekanik ve fiziksel özellikleri içerisinde kullanıldığı betonun, termal özelliklerini (termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı vb.) önemli derecede etkilemektedir. Agregaların oluşturduğu boşluk oranı mineral kökeni, yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonu etkilemektedir. Yüksek sıcaklık etkisiyle beton içinde ortaya çıkan büzülme ve genleşmeler dayanım özelliklerinde ciddi azalmalara sebep olmaktadır (Khoury 1992; Akman 2000; Kızıllkanat ve Yüzer 2008).

600°C’ye kadar ısıtılan kalker esaslı ve hafif agregalı betonların basınç mukavemetleri, silis esaslı agregalara göre daha yüksektir. Mağmatik kökenli granit ve bazalt gibi kayalarise genellikle 1000°C sıcaklıklara kadar stabil yapılarını korumaktadırlar. Yine de ani sıcaklık değişimleri bu tür kayalarda da parçalanma ve dağılmalara sebep olmaktadır. Yangın/yüksek sıcaklık etkisinde

en olumlu etkiyi hafif yapı malzemeleri vermektedir. Perlit, pomza, genleştirilmiş kil ve cüruf gibi hafif yapı malzemeleri yüksek sıcaklık etkilerine yüksek direnç göstermektedirler. Bu sebeple hafif agregaların kullanıldığı betonlar yani hafif betonların ısı iletkenlikleri çok düşüktür (Khoury 1992; Akman 2000; Kızılkıran ve Yüzer 2008).

Mineral Katkılarının Yüksek Sıcaklıktaki Davranışı

Amaca uygun olarak yüksek dayanımlı beton üretiminde puzolonik aktivitesi yüksek ve tane boyutu küçük minerallerin (silis dumanı gibi) kullanımı yaygındır. Silis dumanı gibi katkıların kullanıldığı betonlarda yüksek sıcaklık etkisindeki davranış katkı miktarı ve özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Silis dumanının %6 ve üzerinde oranlarda beton karışımına eklenmesi ile yüksek sıcaklık etkisindeki betonlarda olumlu yönde davranışlar tespit edilmiştir (Poon vd. 2001; Ghandehari vd. 2010; Bakış 2015).

Silis dumanının üstün özellikleri beton içinde yaygın olarak kullanılması sonucunu ortaya çıkarmıştır. Bunun yanında büyük miktarlarda atık oluşturan uçucu küllerde yüksek sıcaklık etkisinde betonlarda olumlu katkı sağlayabilir. Uçucu kül, 121-149°C'ler arasında, sıcaklığın ve basıncın etkisiyle CSH jeli oluşturarak betonun basınç mukavemetini %152 oranında arttırmaktadır (Mahsanlar 2006). Uçucu külün CSH jeli oluşturması sebebiyle agrega çimento ara yüzeyi güçlenmekte ve mikro çatlak oluşumları önlenmektedir. Bunun yanında 200°C etkisinde kalan betonlarda uçucu kül kullanımı betonun basınç dayanımının artmasına sebep olmuştur (Poon vd. 2001; Ghandehari vd. 2010; Sağsöz 2013; Bakış 2015).

Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkileri

Yapı malzemeleri yangın ve termal etkiler sebebiyle yüksek sıcaklık etkisinde kalabilmektedirler. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan yapı malzemeleri ve/veya beton elamanlarda büyük ve kalıcı hasarlar oluşmaktadır. Bu sebeple betonarme yapıların ana malzemesi olan betonun yüksek sıcaklık etkisinde davranışı tespit edilmelidir. Özel betonların kullanıldığı birçok yapıda ise, yapının önemine göre bu davranış daha hassas yaklaşılması gereken bir konu olmaktadır (Sağsöz 2013).

Basınç dayanımı

Son yıllarda yapılan birçok çalışma ile betonların yangın/yüksek sıcaklık etkisinde davranışı anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre; betonların basınç dayanımı 90°C sıcaklık etkisinde %10-35 arasında azalmaktadır. 90-200°C arasında ise betonun basınç dayanımı artmakta fakat 200°C üzerindeki sıcaklıklarda ise betonun basınç dayanımı ve diğer

mekanik özellikleri azalmaktadır. 800°C’de mukavemet kaybı %20-50 arasındadır ve mukavemetteki bu değişim, beton üretiminde yararlanılan agregat türü ve oranını doğrudan etkilemektedir. Kalker esaslı agregayla oluşturulan betonlar yüksek sıcaklık tesiri altında, silis esaslı agregayla oluşturulan betonlardan daha iyi performans göstermektedir (Poon vd. 2001; Ghandehari vd. 2010; Sağsöz 2013; Bakış 2015).

Yüksek sıcaklık tesiri altında betonlar için oluşturulan standarda göre, normal mukavemetli beton için kritik sıcaklık olarak belirtilen 600°C’de, silis ve kalkerli agregayla oluşturulan betonlarda mukavemet kaybı, sırasıyla %55 ve %45’ken, üçüncü sınıf yüksek mukavemetli betonlarda bu oran %75’e çıkmaktadır. Birinci ve ikinci sınıf yüksek mukavemetli betonlar için tavsiye edilen tasarım değerleriyse sırasıyla 300-400°C’den sonra silis agregalı beton için verilen değerlerle aynıdır. Bu standarda göre, 900°C sıcaklığa maruz kalmış betonların (mukavemet sınıfına bakılmaksızın) taşıyıcılığının gözden çıkarıldığı söylenebilir (Poon vd. 2001; Ghandehari vd. 2010; Sağsöz 2013; Bakış 2015).

Çekme dayanımı

Basınç dayanımında olduğu gibi betonun çekme dayanımında yüksek sıcaklık etkisinden olumsuz olarak etkilenmektedir. 100°C sıcaklık değerlerine kadar önemli bir değişiklik olmamasına rağmen 100°C üzerinde yüksek sıcaklık etkisinde betonun çekme dayanımı azalmaktadır. 600°C sıcaklık etkisinde kalan betonarda ise bu azalmalar %70 mertebesine ulaşmaktadır. Beton yanıcılık yönünden A1 sınıfı yani ‘hiç yanmaz’ grubunda yer almasına rağmen herhangi bir sebeple yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığında, maruz kalınan sıcaklık ve etki süresi betonun mekanik, fiziksel ve termofiziksel özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Beton özelliklerini olumsuz yönde etkileyen yüksek sıcaklık, özellikle 600°C ve üzeri değerlerde, betonun yapısını tamamen bozmaktadır (Poon vd. 2001, Ghandehari vd. 2010, Sağsöz 2013, Bakış 2015).

Beklenenin aksine yüksek dayanımlı betonlar ve reaktif pudra betonları normal betonlara kıyasla yüksek sıcaklıktan daha çok etkilenmektedirler. Normal betonlar için betonun kullanılamayacağı sınır sıcaklık 600°C olarak belirlenirken, yüksek dayanımlı betonlarda bu değer 400°C’ye düşmektedir. Ayrıca silis dumanı gibi katkı maddelerinin kullanıldığı betonlarda yüksek sıcaklık etkisinde ortaya çıkan olumsuz etkiler dahada artmaktadır. Bu etkilerin azaltılabilmesi için yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanının %10 oranında kullanılması ve farklı lifler (çelik, polipropilen lifler vb.) kullanılması tavsiye edilmektedir (Poon vd. 2001; Ghandehari vd. 2010; Sağsöz 2013; Bakış 2015).

SONUÇLAR

Reaktif pudra betonlarını derinlemesine anlattığımız bu kitapta, yapılan çalışmalardan ayrıca şu sonuçlar da çıkarılabilir:

- Reaktif pudra betonlarına su kürü uygulandığı zaman, basınç dayanımları 200 MPa'a ulaşamaz.
- Reaktif pudra betonlarının basınç dayanımlarının 200 MPa ve üzerine çıkabilmesi ancak ve ancak bu betonlara otoklav kürü uygulamakla mümkündür.
- Bu betonlara otoklav uygulandığı zaman, ince agrega olarak yapıya katılan silis pudrası da, reaktif hale gelerek, yapıda ilave C-S-H jeli yani tobermorit jeli oluşturarak, basınç dayanımlarının 200 MPa ve üzerine çıkmasını sağlar.
- Otoklav kürünün basınç ve sıcaklıklarının artırılmasıyla daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşılması mümkündür.
- Reaktif pudra betonlarına nano malzeme, özellikle de nano silis katıldığı zaman, bu betonların basınç dayanımlarının 300 MPa'ın üzerine çıktığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abbas, Z. K., Al-Baghdadi, H. A., Mahmood, R. S., Abd, E. S., Reducing the reactive powder concrete weight by using building waste as replacement of cement, *Journal of Ecological Engineering*, 2023, 24(8), 25-32.
- Abid, M., Hou, X., Zheng, W., & Hussain, R. R. (2017). High temperature and residual properties of reactive powder concrete–A review. *Construction and Building Materials*, 147, 339-351.
- Aitcin, P. C. 2000. *Cements of Yesterday And Today Concrete of Tomorrow*. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1349-1359.
- Akman, S., 2000. Yapı hasarları ve onarım ilkeleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.
- Aköz, F., Türker, F., Koral, S. ve Yüzer, N., 1999. Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume, *Cement and Concrete Research*, 29, 4, 537-544.
- Aköz, F. ve Yüzer, N., 1994. Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri, *YT Ü Dergisi*, 3, 89-98.
- Al-Azzawi, A. A., Abdulsattar, R., & Al-Shaarbaf, I. 2018. A state of the art review on reactive powder concrete slabs. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(1), 761-768.
- Albakry, B. A., Abbas, Z. K., Evaluation of reactive powder concrete strength using various curing methods, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 15, No. 2, 2025, 21685-21690.
- Al-Hity, Bashar Qasem Taha. Farklı Kür Koşullarının Reaktif Pudra Betonlarının Özelliklerine Etkileri. 2019. PhD Thesis. Kastamonu Üniversitesi.
- Arfa, M. M., Sadawy, M. M., Nooman, M. T., Farag, A. T. M., El Shazly, R. M., The influence of heating on mechanical and nuclear properties of reactive powder concrete as a protective shield in nuclear facilities, *Progress in Nuclear Energy*, 143, (2022), 104046.
- Arıöz, Ö., Effects of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire Safety Journal*, 42, p: 516-522, 2007.
- Avci, A.U., 1984. Dökümde Enerji Tasarufu, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 178.
- Aydın, S. and Baradan, B., Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars, *Cement and Concrete Research*, 37 (6), p:988-995, 2007.
- Aydın, S., Yazıcı, H. And Baradan, B., High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene

- and steel fibers, *Construction and Building Materials*, 22(4), p: 504-512, 2008.
- Bajaber, M.A., Hakeem, I.Y. 2021. UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1058-1074.
- Bakış, A. (2015). Rijit Yol Üstyapı İnşasında Reaktif Pudra Betonun (RPB) Kullanılabilirliğinin Araştırılması (PhD). Atatürk University.
- Beglarigale, A., Yalçinkaya, Ç, Yazıcı H. 2014. Autoclaved reactive powder concrete: the effects of steel micro-fibers and silica fume dosage on the mechanical properties. *Usak University Journal of Material Sciences* 3.1 (2014): 7-14.
- Beßling, M., Groh, M., Koch, V., Auras, M., Orlowsky, J., & Middendorf, B. (2022). Repair and Protection of Existing Steel-Reinforced Concrete Structures with High-Strength, Textile-Reinforced Mortars. *Buildings*, 12(10), 1615.
- Bingöl, A.F., 2002. Pomza ile Üretilen Hafif Betonların Yangına Karşı Dayanımı, Atatürk Üniversitesi, Yüksek Lisans Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Bingöl, A.F., 2008. Beton-Donatı Aderansına Yüksek Sıcaklıkların Etkisi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bingöl, A.F., and Gül, R., Compressive strength of light weight aggregate concrete exposed to high temperatures, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 11, p: 68-72, 2004.
- Canbaz, M. (2014). The effect of high temperature on reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 70, 508-513.
- Chan, S.Y.N., Luo, X. and Sun, W., Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and poreproperties of high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 14, p: 261-266, 2000.
- Chan, Y. N., Peng, G. F. and Anson, M., Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 21, p: 23-27, 1999.
- Chang, Y.F., Chen, Y.H., Sheu, M.S. and Yao, G.C., Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 36, p: 1999-2005, 2006.
- Chen, B. and Liu, J., Residual strength of hybrid fiber reinforced high strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 34, p: 1065-1069, 2004.

- Chen, Tiefeng, Xiaojian Gao, and Miao Ren. 2018. Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* 158: 864-872.
- Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L. (1995). Microstructural analysis of RPB (reactive powder concrete). *Cement and concrete research*, 25(7), 1491-1500.
- Chin-Tsung Liu, Jong-Shin Huang. (2008). Fire performance of highly flowable reactive powder concrete, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2072–2079.
- Choe, G., Kim, G., Gucunski, N., Lee, S. (2015). Evaluation of the mechanical properties of 200 MPa ultra-high-strength concrete at elevated temperatures and residual strength of column. *Constr. Build. Mater.* 86, 159-168.
- Cingi, R. 2017. Çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklık ve yangın etkisinde davranışı (Master's thesis, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Collepardi, S., Coppola, L., Troli, R., & Collepardi, M. (1997). Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *ACI Special Publications*, 173, 1-22.
- Çavdar, A., 2008. Farklı puzolanik bileşime ve hamur yapısına sahip çimento harç örneklerinin, sülfat içeren ortam ve/veya aşınma etkilerine karşı dayanıklılığının incelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demez, A. 2017. Pirofillit agrega kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı betonların yangın dayanımının araştırılması (Master's thesis, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Dheyaaldin, M. H., Mosaberpanah, M. A., Alzebaree, R. (2022). Performance of Fiber-Reinforced Alkali-Activated Mortar with/without Nano Silica and Nano Alumina. *Sustainability*, 14(5), 2527.
- Du, Y., Wang, S., Hao, W., Shi, F., Wang, H., Xu, F., & Du, T. (2022). Investigations of the Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete Containing Waste Fly Ash. *Buildings*, 12(5), 560.
- Erdoğan, S., Gök, D., Aşçı, F., 2011, Marmaray projesi tünellerinde pasif yangın koruma çalışmaları, 8. Ulusal Beton Kongresi
- Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R., Middendorf, B., & Entwicklung, D. (2005). Berechnung ultrahochfester Betone (UHPC), DFG-Forschungsbericht FE 497/1-1, Structural Materials and Engineering Series.

- Feylessoufi, A., M. Crespin, P. Dion, F. Bergaya, H. Van Damme and P. Richard 1997. Controlled rate thermal treatment of reactive powder concretes. *Advanced cement based materials* 6(1): 21-27.
- Gatty, L., Bonnamy, S., Feylessoufi, A., Van Damme, H., Richard, P. (1998). Silica fume distribution and reactivity in reactive powder concretes. *Special Publication*, 178, 931-954.
- Ghandehari, M., Behnood, A., Khanzadi, M., 2010. Residual Mechanical Properties of High-Strength Concretes after Exposure to Elevated Temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, 1, 59-64.
- Gu, C., Ye, G., Sun, W. 2015. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. *Science China Technological Sciences*, 58(4), 587-599.
- Gupta, S. 2014. Development of ultra-high performance concrete incorporating blend of slag and silica fume as cement replacement'. *Int. J. Civ. Struct. Eng. Res*, 2(1), 35-51.
- Han, B., Li, Z., Zhang, L., Zeng, S., Yu, X., Han, B., Ou, J. (2017). Reactive powder concrete reinforced with nano SiO₂-coated TiO₂. *Construction and Building Materials*, 148, 104-112.
- Han, B., Li, Z., Zhang, L., Zeng, S., Yu, X., Han, B., Ou, J. 2017. Reactive powder concrete reinforced with nano SiO₂-coated TiO₂. *Construction and Building Materials*, 148, 104-112.
- Hela, R., Bodnarova, L., Rundt, L. (2018). Development of ultra high performance concrete and reactive powder concrete with nanosilica. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 371, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- Hou XM, Zheng WZ, Kodur VKR, Sun HY. Effect of temperature on mechanical properties of prestressing bars. *Constr Build Mater* 2014;61(30):24–32.
- Hussain, S. T., Sastry, K. V. S. G. K. (2014). Study of strength properties of concrete by using micro silica and nano silica. *International journal of research in Engineering and technology*, 3(10), 103-108.
- Hüsem, M., The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high performance concrete, *Fire Safety Journal*, 41, p: 155-163, 2006.
- Irshidat, M. R., Al-Saleh, M. H. (2018). Thermal performance and fire resistance of nanoclay modified cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 159, 213-219.
- Issa, I. S. A. (2021). Mineral katkıların reaktif pudra beton özelliklerine etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi).

- İpek, M., 2009. Reaktif Pudra Betonların Mekanik Davranışına Katılma Süresince Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Etkileri. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- İpek, M., İyiliksever, R., & Yılmaz, K. (2014). Atık mermer bulamacının reaktif pudra betonun mekanik özelliklerine etkisi. Sakarya University Journal of Science, 18(3), 183-192.
- İpek, M., Yılmaz, K., Sıkıştırma Basıncının Reaktif Pudra Betonunun Eğilme Dayanımına Etkisi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- Kalifa, P., Menneteau, F.D., Quenard D., 2000. Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures, Cement and Concrete Research, , 30, 1915-1927.
- Karabulut, A. Ş. 2006. Reaktif Pudra Betonunun Özelliklerinin Mineral Katkılarla Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Karaca, Z., Durmuş, A. ve Hüsem, M., Hafif Betonun Yangın Dayanımının İncelenmesi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 3. Teknik Kongre, Ankara, 1997.
- Keshavarzian, F., Saberian, M., Li, J. (2021). Investigation on mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete containing nano-SiO₂: An experimental and analytical study. Journal of Building Engineering, 44, 102601.
- Khoury, G. A. (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. Magazine of concrete Research, 44(161), 291-309.
- Kırgız, M.S., 2011. İkamelî Ve Katkılı Çimento Pastalarının Hidratasyon Bileşiklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Kullanılarak Belirlenmesine İlişkin Literatür Araştırmaları. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(1), 72-90.
- Kızılkant, Ahmet B.; Yüzer, Nabi. Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi. Teknik Dergi, 2008, 19.92: 4381-4392.
- Kocataşkın, F., 2000. Yapı Malzemesi Bilimi, İstanbul, Birsan Yayınevi.
- Kodur, V. K. R., & Phan, L. 2007. Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. Fire safety journal, 42(6-7), 482-488.
- Kodur, V.K.R., Sultan, M.A. (2003). Effect of temprature on thermal properties of high strenght concrete. J. Mater. Civil Eng. 15(2), 101-107.
- Kong, D., Su, Y., Du, X., Yang, Y., Wei, S., Shah, S. P. (2013). Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. Construction and Building Materials, 43, 557-562.

- Kumar Mehta Paulo P., Monteiro J. M., 2014. Concrete Microstructure, Properties, and Materials Fourth Edition Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education.
- Kushartomo, W. (2019, October). Durability of Reactive Powder Concrete. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 650, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.
- Kushartomo, W., Wiyanto, H., & Christianto, D. 2022. Effect of Cement–Water Ratio on the Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete with Marble Powder as Constituent Materials. In Proceedings of the Second International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials (pp. 177-185). Springer, Singapore.
- Larrard, F., Sedran, T., 1994. Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by The Use of A Packing Model. Cement and Concrete Research, 24 (6), 997–1009.
- Lau, A. and Anson, M., Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete, Cement and Concrete Research, 36, p: 1698-1707, 2006.
- Lawson, J.R., Phan, L.T. and Davis, F., Mechanical properties of high performance concrete after exposure to elevated temperatures, Department of Commerce Technology Administration. NIST, USA, 2000.
- Lee, C. D., Kim, K. B., & Choi, S. (2013). Application of ultra-high performance concrete to pedestrian cable-stayed bridges. Journal of Engineering Science and Technology, 297–306.
- Lee, J., Xi, Y., Willam, K., Properties of Concrete after High-Temperature Heating and Cooling, ACI Materials Journal, 2008, 105, 334-341.
- Li, M., Qian, C. and Sun W., Mechanical properties of high strength concrete after fire, Cement&Concrete Research, 34, p: 1001-1005, 2004.
- Li, Z., Di, S. (2017). The microstructure and wear resistance of microarc oxidation composite coatings containing nano-hexagonal boron nitride (HBN) particles. Journal of Materials Engineering and Performance, 26(4), 1551-1561.
- Li, Z., Pei, Q. (2021). Nano-materials on the strength of ultra-high performance concrete. Ferroelectrics, 578(1), 194-207.
- Lim, S., Mondal, P. (2014). Micro-and nano-scale characterization to study the thermal degradation of cement-based materials. Materials Characterization, 92, 15-25.
- Liu, C. T., & Huang, J. S. 2009. Fire performance of highly flowable reactive powder concrete. Construction and Building Materials, 23(5), 2072-2079.

- Long, G., Shi, Y., Ma, K., Xie, Y. (2016). Reactive powder concrete reinforced by nanoparticles. *Advances in Cement Research*, 28(2), 99-109.
- Luo, W., Wang, H., Li, X., Wang, X., Wu, Z., Zhang, Y., Li, X. 2022. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete with Coal Gangue as Sand Replacement. *Materials*, 15(5), 1807.
- Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials*, 93, 371-383.
- Mahsanlar, N. (2006). Effect of high temperature on concrete behaviour. master's thesis, Yildiz Technical University, Institute of Sciences, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey.
- Malvar, L.J. ve Hironaka, M.C., 1991. Heat resistant concrete for airfield pavements: Preliminary numerical study, *Computers & Structures*, 40, 2, 303-311.
- Matte, V., Moranville, M., 1999. Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes. *Cement and Concrete Composites*, 21 (1), 1-9.
- Mayhoub, O. A., Nasr, E. S. A., Ali, Y. A., & Kohail, M. (2021). The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 145-158.
- Moallem, M.R. (2010). Flexural Redistribution in Ultra-High Performance Concrete Lab Specimens. Ohio University.
- Monosi, S., Pignoloni, G., Collepardi, S., Troli, R., & Collepardi, M. (2000). Modified reactive powder concrete with artificial aggregates. *Special Publication*, 195, 447-460.
- Monteiro, P. J., Kirchheim, A. P., Chae, S., Fischer, P., MacDowell, A. A., Schaible, E., Wenk, H. R. (2009). Characterizing the nano and micro structure of concrete to improve its durability. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 577-584.
- Mukhopadhyay, A. K. (2011). Next-generation nano-based concrete construction products: a review. *Nanotechnology in civil infrastructure*, 207-223.
- Murthy, R. R., Chavali, M., Mohammad, F. (2020). Synergistic effect of nano-silica slurries for cementing oil and gas wells. *Petroleum Research*, 5(1), 83-91.
- Muzenski, S., Flores-Vivian, I., Sobolev, K. (2019). Ultra-high strength cement-based composites designed with aluminum oxide nano-fibers. *Construction and Building Materials*, 220, 177-186.

- Ni, W., Cui, X., Yuan, J., Sun, W., Cui, C., Wu, Y., Feng, J., The influence of fiber, aggregate and cementitious materials on the mechanical properties of ultra-high content steel fiber reinforced reactive powder concrete, *Construction and Building materials*, 431, (2024), 136530.
- Norhasri, M. M., Hamidah, M. S., Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 133, 91-97.
- Peng G.F., Kang Y.R., Huang Y.Z., Liu X.P., Chen Q., Experimental Research on Fire Resistance of Reactive Powder Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, Article ID 860303, 6 pages.
- Peng, G.F., Bian, S.H., Guo, Z.Q., Zhao, J., Peng, X.L. and Jiang, Y.C., Effect of thermalshock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to hightemperatures, *Construction and Building Materials*, 22, p: 948-955, 2008.
- Phan, L., 2007, Spalling and mechanical properties of high strenght concrete at high temperature, *Concrete under Severe Conditions : Envrioment & Loading* F. Toutlemonde et al (eds), 1595-1608
- Phan, L.T. and Carino, N.J., Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.10, p: 58-64, 1998.
- Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. and Wong, Y.L., Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 31, p: 1291-1300, 2001.
- Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y.L., 2001. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 31, 9, 1291-1300.
- Ramakrishnan, V., Shafai, H.F. ve Wu, G., 1991. Cyclic heating and cooling effects on concrete durability, *ACI Special Publication*, 126.
- Richard, P., Cheyrezy, M. 1995. Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 25(7), 1501-1511.
- Saad, M., El-Enein, A., Hanna, G.B. and Kotkata, M.F., Effect of temperature on phsical and mechanical properties of concrete containing silica fume, *Cement and Concrete Research*, 26, p: 669-675, 1996.
- Sadrekarimi, A. (2004). Development of a light weight reactive powder concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), 409-417.

- Sağsöz, A. E. (2013). Kendiliğinden yerleşen betonların yüksek sıcaklık etkisinde bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ile renk değişiminin incelenmesi (Doctoral dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Sakr, K. and El-Hakim, E., Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties, *Cement and Concrete Research*, 35, p: 590-596, 2005.
- Savva, A., Manita, P. and Sideris, K.K., Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 27, p: 239-248, 2005.
- Schrefler, B.A., Brunello, P., Gawin, D., Majorana, C.E. ve Pesavento, F., 2002. Concrete at high temperature with application to tunnel fire, *Computational Mechanics*, 29, 1, 43-51.
- Shin, J. (2016). Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Precast Segmental Bridges - Flexural Behaviour and Joint Design -. Technische University Hamburg.
- Staquet, S., Espion, B. (2002). Influence of cement and silica fume type on compressive strength of reactive powder concrete. In 6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete (pp. 1421-1436).
- Sultan, H. K., & Alyaseri, I. (2020). Effects of elevated temperatures on mechanical properties of reactive powder concrete elements. *Construction and Building Materials*, 261, 120555.
- Şahinoğlu, S. A. (2010). Reaktif pudra betonlar (Doctoral dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton 2004 Kongresi, İstanbul.
- Topçu, İ. B., Sarıkaya, E., & Akkan, E. (2021). Reaktif Pudra Betonlarındaki Gelişmeler. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 440-449.
- 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>
- Uygunoğlu, T., Ünal O. 2007. Buhar Kürü Uygulanmış Pomzalı Hafif Betonun Özellikleri. *Politeknik Dergisi* 10(1).
- Velichko, E. G., & Vatin, N. I. (2022). Reactive Powder Concrete Microstructure and Particle Packing. *Materials*, 15(6), 2220.

- Vodák, F., Trtík, K., Kapičková, O., Hošková, Š. ve Demo, P., 2004. The effect of temperature on strength – porosity relationship for concrete, *Construction and Building Materials*, 18, 7, 529-534.
- Voo, J. Y. L., Foster, S. J., Gilbert, R. I., Gowripalan, N., Behaviour of reactive powder concrete deep beams, *Advances in Mechanics of S*
- Walraven, J. 1999. The evolution of concrete, *Structural concrete*, Journal of fib 1(1), 3-11.
- Wang, D., Zhang, W., Ruan, Y., Yu, X., Han, B. (2018). Enhancements and mechanisms of nanoparticles on wear resistance and chloride penetration resistance of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 189, 487-497.
- Wang, T., Wang, M., Fu, L., Duan, Z., Chen, Y., Hou, X., ... Yu, J. (2018). Enhanced thermal conductivity of polyimide composites with boron nitride nanosheets. *Scientific reports*, 8(1), 1-8.
- Yadollahi, M. M., Varolgüneş, S., “Manyetize Edilmiş Suyun, Reaktif Pudra Betonların Eğilme ve Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi”, *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi* 6. Cilt-Prof. Dr. Fuat Sezgin Bilim Yılı Özel Sayısı, 21-29, 2019.
- Yadollahi, M. M., Varolgüneş, S. 2020. Farklı Kür Koşullarının Reaktif Pudra Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11.1: 353-361.
- Yalçinkaya, Ç., Yazıcı, H., Agregat Hacminin Reaktif Pudra Betonunun Mekanik ve Büzülme Özelliklerine Etkileri, *THBB Beton 2011 kongresi*, sayfa: 150 – 159, İstanbul.
- Yang, Youhua 2000. Manufacturing reactive powder concrete using common New Zealand materials. Master Thesis, Department of Civil and Resource Engineering, University of Auckland, 2000.
- Yazıcı, H. (2007). The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and environment*, 42(5), 2083-2089.
- Yazıcı, H., Deniz, E., Baradan, B. 2013. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, (42), 53-63.
- 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, 1223-1231.

- Żerek, S. 2022. Durability of reactive powder concrete based on chalcedonite (Doctoral dissertation, Instytut Inżynierii Budowlanej).
- Zhang HY, Lv HR, Kodur VKR, Qi SL. Performance comparison of fiber sheet strengthened RC beams bonded with geopolymer and epoxy resin under ambient and fire conditions. *J Struct Fire Eng* 2017;2.
- Zhang, R., Cheng, X., Hou, P., Ye, Z. (2015). Influences of nano-TiO₂ on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage. *Construction and Building Materials*, 81, 35-41.
- Zhang, W., Han, B., Yu, X., Ruan, Y., Ou, J. (2018). Nano boron nitride modified reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 179, 186-197.
- Zhao, J., Zheng, J. J., Peng, G. F., & van Breugel, K. (2014). A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure. *Cement and concrete research*, 65, 64-75.
- Zhao, Y., Cui, N., Zhao, S., Zhu, Y., Hou, P., Feng, L., Xie, N. (2021). Aggressive Environment resistance of concrete products modified with nano alumina and nano silica. *Frontiers in Materials*, 8, 223.
- Zhao, Z. Q., Sun, R. J., Xin, G. F., Wei, S. S., & Huang, D. W. (2013). A review: application of nanomaterials in concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 405, 2881-2884.
- Zoldners, N.G. and Wilson, H.S., Effect of sustained and cyclic temperature exposures on light weight concrete, behavior of concrete under temperature extremes, ACI Publication, (39) 9, p: 149-178, 1973.