T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



SİLİS DUMANI VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN REAKTİF PUDRA BETONLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mahmoud M. Mohamed ISSA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ

HAZİRAN - 2022
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Mahmoud M. Mohamed ISSA tarafından hazırlanan "**Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Reaktif Pudra Betonların Özelliklerine Etkisi**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **17.06.2022** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi. Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdür V. Prof. Dr. İzzet ŞENER .....

TAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Mahmoud M. Mohamed ISSA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİLİS DUMANI VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN REAKTİF PUDRA BETONLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

MAHMOUD M. MOHAMED ISSA

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ

Reaktif pudra beton (RPB), beton endüstrisinin malzeme kullanımını optimize etmesine, ekonomik faydalar sağlamasına ve güçlü, dayanıklı ve çevreye duyarlı yapılar inşa etmesine olanak sağlayarak gelişen bir kompozit malzemedir. Reaktif pudra beton (RPB) nispeten yeni bir çimentolu malzemedir. Başlıca özellikleri, çok düşük bir su-çimento (s/ç) oranı olan yüksek oranda portland çimentosu bileşeni içerir. RPB, mekanik özellikler, özellikle de basınç dayanımında ve ultra yüksek performans ile karakterize edilir ve bu inşaat sektörü için muazzam bir ilgi oluşturmuştur. Bu çalışmanın temel amacı, çelik lif ilavesiyle silis dumanı (SD) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufundan (YFC) RPB üretmektir. Deneysel program, SD ve YFC içeriği kullanılarak hazırlanan on deneme karışımı olarak hazırlanmıştır. Karışımlarda çimento ağırlıkça %0, %15 ve %30 silis dumanı içerikleri ve çimento ağırlıkça %0, %15 ve %30 YFC içerikleri kullanılmaktadır. Piyasadan temin edilen malzemeler kullanılarak RPB üretiminin araştırıldığı bu çalışmada standart koşullarda ve 25°C kür sıcaklığında 90 günlük numunelerin 107.9 MPa minimum basınç dayanımına başarıyla ulaştığı belirlenmiştir. RPB betonlarında 90 gündeki en yüksek basınç dayanımı ise %30 SD ve %30 YFC ile elde edilmiş ve 117,2 MPa ulaşılmıştır. Ayrıca, SD eklenmesinin RPB'nin erken ve sonraki yaşlarında basınç dayanımı ve yarmada-çekme dayanımı üzerinde olumlu etkileri olduğu, YFC 'nin ise RPB'nin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, daha sonraki yaşlarda YFC'nin dahil edilmesi mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yol açmıştır. Ayrıca, SF ve YFC ile çimento ikamesi, RPB'nin gözenekliliği ve su absorpsiyonu üzerinde olumlu bir etkiye sahip olfuğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Reaktif pudra beton, RPB, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, porozite, su emme

Haziran 2022, 85 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE EFFECT OF SILICA FUME AND BLAST FURNACE SLAG ON THE PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE

MAHMOUD M. MOHAMED ISSA

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSOC. PROF. SELÇUK MEMİŞ

Reactive powder concrete (RPC) is a developing composite material that will allow the concrete industry to optimize material use, generate economic benefits, and build structures that are strong, durable, and sensitive to environment. Reactive Powder Concrete (RPC) is a relatively new cementitious material. Its main features include a high percentage ingredient of Portland cement, very low water-to- cement ratio. RPC is characterized by ultra-high performance in mechanical properties, particularly in compressive strength; and this would be of tremendous interest to construction practitioners. The main goal of this study is to produce RPC from silica fume (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) with inclusion of steel fiber. The experimental program was prepared as a mixture of ten trials using SD and YFC content. In the mixtures, silica fume contents of 0%, 15% and 30% by weight of cement and 0%, 15% and 30% of YFC contents by weight of cement are used. In this study, in which RPB production was investigated using commercially available materials, it was determined that 90-day samples successfully reached 107.9 MPa minimum compressive strength under standard conditions and 25°C curing temperature. The highest compressive strength in RPB concretes in 90 days was obtained with 30% SD and 30% YFC and reached 117.2 MPa. In addition, it was observed that the addition of SD had positive effects on the compressive strength and split-tensile strength in the early and later ages of the RPB, while YFC had a negative effect on the mechanical properties of the RPB. However, the incorporation of YFC at later ages led to improved mechanical properties. In addition, cement substitution with SF and YFC was found to have a positive effect on the porosity and water absorption of the RPB.

KEYWORDS: Reactive powder concrete, RPC, silica fume, ground granulated blast furnace slag, porosity, water absorption

June 2022, 85 Page

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım Doç.Dr. Selçuk MEMİŞ'e bana verdiği ilham, teşvik, dikkat çekici yardım ve sürekli destek için, derin şükran ve takdirle teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN. hocalarıma da araştırmalarımda yaptığı rehberlik, verdiği teknik destek ve önerileri için içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum. KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ asistanlarına ve yakın arkadaşlarım Bashar Qasem Taha AL-HITY ve destek veren laboratuvar kadromuza da özel teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Kariyerim boyunca sürekli duaları ve destekleriyle gelişmeme ve yeni hedeflere ulaşmama yardımcı olan ebeveynlerime, aile üyelerime ve arkadaşlarıma yönlendirmeleri, teşvikleri ve destekleri için aileme teşekkür etmek istiyorum. Onlar bana güç, ilham ve güven kaynağı oldular.

Son olarak, her şeye gücü yeten, bizlere merhameti ile muamele eden, bu çalışmayı yürütme ve sonlandırma gücünü bana veren Yüce Rabbime sonsuz şükranlarımı sunuyorum.

Mahmoud M. Mohamed ISSA

Kastamonu, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **xi**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ **5**
2.1 Reaktif Pudra Beton (RPB) 5
2.2 RPB Özelliklerini Etkileyen Faktörler 9
2.2.1 Malzeme Unsuru 9
2.2.2 Su / Bağlayıcı (S/B) Oranı 23
2.2.3 Kür Koşulları 26
2.2.4 Parçacıklar Dizilimi 28
2.3 Önceki Araştırmalarda Kullanılan Karışımlardan Elde Edilen Karışım Tasarımları 29
2.4 RPB Uygulamaları 30
3. MATERYAL VE METOD **32**
3.1 Materyal 32
3.1.1 Çimento (PÇ) 32
3.1.2 Silis Dumanı (SD) 33
3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC) 34
3.1.4 İnce Agrega (Kum) 35
3.1.5 Çelik Lifler (ÇL) 36
3.1.6 Süper-Akışkanlaştırıcı (SA) 36
3.1.7 Su 36
3.2 Yöntem 37
3.2.1 Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları 37
3.2.2 Karışım Dizaynı 38
3.2.3 Numune Hazırlama 39
3.2.4 Kür Koşulları 39
3.3 Yapılan Testler 40
3.3.1 Çökme Akış Testi 40
3.3.2 Birim Ağırlık, Su Emme Oranı ve Prozite Testi 40
3.3.3 Yarmada Çekme Dayanımı Testi 41
3.3.4 Basınç Dayanımı Testi 42
3.3.5 Yüksek Sıcaklık Etkisi 43
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA **45**
4.1 RPB'nin Taze Hal Özellikleri 45
4.2 Birim Ağırlık, Gözeneklilik ve Su Emme Oranı 48
4.2.1 Birim Hacim Ağırlığı Sonuçları 48

4.2.2 Görünür Porozite Sonuçları 50
4.2.3 Su Emme (SE) Oranı Deney Sonuçları 52
4.3 Basınç Dayanımı Sonuçları 55
4.3.2 SD'nin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi 56
4.3.3 YFC'nin Basınç Dayanımın Üzerindeki Etkisi 59
4.3.4 Basınç Dayanımı ile BHA, Gözeneklilik ve SE Arasındaki İlişki 63
4.4 Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları 64
4.4.2 SD'nin Yarmada çekme dayanımı Üzerindeki Etkisi 65
4.4.3 YFC'nin Yarma da çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi 67
4.4.4 Yarmada-Çekme Dayanımı ile Basınç Dayanımı, BHA, Gözeneklilik ve Su Emme Oranı Arasındaki İlişki 69
4.5 Yüksek Sıcaklık Etkisi Testi 71
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 74
5.1 Sonuçlar 74
5.1.1 RPB'nin Taze Özellikleri 74
5.1.2 RPB'nin Yığın Yoğunluğu, Gözenekliliği ve Su Emme Oranı 74
5.1.3 RPB'nin Mekanik Özellikleri 75
5.2. Öneriler 76
KAYNAKLAR 77
ÖZGEÇMİŞ 85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 RPB'nin basınç dayanımı ile farklı çimento oranları arasındaki ilişki 11
Şekil 2.2 S/C'nin farklı kürleme yöntemleri için basınç dayanımı açısından deneysel grafikleri 25
Şekil 3.1 Kullanan CEM I 52,5 R beyaz Portland çimentosu 32
Şekil 3.2 Kullanılan SD 33
Şekil 3.3 YPB üretiminde kullanılan YFC 34
Şekil 3.4 YFC'nin parçacık boyutu sınıflandırması 35
Şekil 3.5 RPB üretiminde kullanılan silis agregası 35
Şekil 3.6 Kullanan çelik lif 36
Şekil 3.7 RPB karışımlarını karıştırmak için kullanılan mikser 39
Şekil 3.8 Su kürü 39
Şekil 3.9 YPB karışımlarında gerçekleştirilen çökme akış testi 40
Şekil 3.10 Yarmada çekme dayanımı deneyi 42
Şekil 3.11 Basınç dayanımı testi 43
Şekil 3.12 Yüksek sıcaklı etkisi test için kullanılan fırnı 44
Şekil 4.1 RPB karışımlarının yayılma çapı sonuçları 45
Şekil 4.2 SD'nin RPB'nin yayılma çapı sonuçları üzerindeki etkisi 46
Şekil 4.3 YFC'nin RPB'nin yayılma çapı sonuçları üzerindeki etkisi 47
Şekil 4.4 Daha yüksek yayılma çapı sonuçları için optimum SD ve YFC 48
Şekil 4.5 RPB karışımlarının BHA test sonuçları 49
Şekil 4.6 SD'nin birim ağırlık sonuçlarına etkisi 49
Şekil 4.7 YFC'nin birim ağırlık sonuçlarına etkisi 49
Şekil 4.8 RPC karışımlarının gözeneklilik sonuçları 50
Şekil 4.9 SD'nin gözeneklilik sonuçları üzerindeki etkisi 51
Şekil 4.10 YFC'nin gözeneklilik sonuçları üzerindeki etkisi 51
Şekil 4.11 Gözeneklilik ve BHA arasındaki ilişki 52
Şekil 4.12 RPB karışımlarının su emme sonuçları 52
Şekil 4.13 SD'nin SE sonuçları üzerindeki etkisi 53
Şekil 4.14 YFC'nin SE sonuçları üzerindeki etkisi 53
Şekil 4.15 SE ve RPB'nin BHA'sı arasındaki ilişki 54
Şekil 4.16 SE ile RPB'nin gözenekliliği arasındaki ilişki 55
Şekil 4.17 RPB karışımlarının basınç dayanımı sonuçları 55
Şekil 4.18 SD'nin 7 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi 56
Şekil 4.19 SD'nin 28 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi. 57
Şekil 4.20 SD'nin 56 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi 58
Sekil 4.22 SD'nin 90 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi. 58
Şekil 4.21 SD'nin 360 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi. 59
Şekil 4.22 YFC'nin 7 gün içinde basınç dayanımı üzerindeki etkisi. 59
Şekil 4.23 YFC'nin 28 gündeki basınç dayanımı üzerindeki etkisi. 60
Şekil 4.24 56 günlükte YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi 61
Şekil 4.25 90 günlükte YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi 62
Şekil 4.26 360 günlükte YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi 62
Şekil 4.27 90 günlükte SD ve YFC'nin optimum yüzdeleri 62
Şekil 4.28 90 günlükte basınç dayanımı ile BHA arasındaki ilişki 63

Şekil 4.29 90 günlükte basınç dayanımı ile gözeneklilik arasındaki ilişki..... 63
Şekil 4.30 90 günlükte basınç dayanımı ile SE arasındaki ilişki..... 64
Şekil 4.31 RPB karışımlarının yarmada çekme dayanımı sonuçları 65
Şekil 4.32 7 günlükte SD'nin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi. 65
Şekil 4.33 28 gün içinde SD'nin yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkisi..... 66
Şekil 4.34 56 gün içinde SD'nin yarmada çekme mukavemeti üzerindek etki. 66
Şekil 4.35 90 günlük içinde SD'nin yarma gerilme mukavemeti üzerindeki etkisi . 67
Şekil 4.36 YFC'nin 7 günlükte yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi..... 67
Şekil 4.37 YFC'nin 28 günlükte yarmada çekme dayanımı üzerindeki etki 68
Şekil 4.38 56 günlük içinde YFC'nin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etki ... 68
Şekil 4.39 90 gün içinde YFC'nin yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkisi .. 69
Şekil 4.40 Yarmada çekme dayanımı ile BHA arasındaki ilişki. 69
Şekil 4.41 Yarmada çekme dayanımı ile gözeneklilik arasındaki ilişki..... 70
Şekil 4.42 Yarmada çekme dayanımı ve SE ile arasındaki ilişki 70
Şekil 4.43 Yarmada çekme dayanımı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki 71
Şekil 4.44 Yüksek sıcaklığın basınç dayanımına etkisi..... 72
Şekil 4.45 300°C'de basınç dayanımı 72
Şekil 4.46 450°C'de basınç dayanımı 73
Şekil 4.47 600°C'de basınç dayanımı 73

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (CEM I 52,5 R)..33
Tablo 3.2 SD'nin teknik özellikleri 34
Tablo 3.3 YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri 34
Tablo 3.4 SA'nın özellikleri..... 36
Tablo 3.5 Karışım tasarımında malzemelerin kullanım oranları 37
Tablo 3.6 YPB karışım tasarımı detayları 38
Tablo 4.1 Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı 71

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

YFC	**:** Granüle Yüksek Fırın Cürufu
NDB	**:** Normal Dayanımılı Betonn
PÇ	**:** Portland Çimentosu
PK	**:** Pirinç Kabuğu Külü
PT	**:** Perlit Tozu
s/b	**:** Su / bağlayıcı oranı
S/C	**:** Su / çimento oranı
SA	**:** Süper Yayılma çapıkanlaştırıcı
SD	**:** Silis Dumanı
SK	**:** Silisli Kum
RPB	**:** Reaktif Pudra Beton
UK	**:** Uçucu Kül
YPB	**:** Yüksek Performanslı Beton

1. GİRİŞ

Beton, günümüzde en fazla kullanılan yapı malzemelerinden biridir ve ayrıca beton sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzeme olma özelliğini taşımaktadır. Betonun mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılması, betonun diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha fazla ulaşılabilir ve ucuz olmasından kaynaklanmaktadır. Dünyada yılda yaklaşık 10 milyar ton beton üretilmekte ve bu miktarın 2050 yılına kadar yılda yaklaşık 18 milyar ton olacağı tahmin edilmektedir. Betonun avantajları arasında ekonomikliği, verimliliği, dayanımı ve sertliği onu binalar, köprüler, açık deniz platformları ve diğer inşaat mühendisliği yapıları gibi çok çeşitli yapısal uygulamala için aranan bir malzeme haline getirmiştir. Betonun avantajlarından bir diğeri ise, hemen hemen istenen herhangi bir şekle kolayca kalıplanabilmesidir (Malik, 2007; Rashiddadash, Akbar ve Mahdikhani, 2014; Kim vd., 2019).

Dayanım ve durabilite esaslarına göre beton, normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı beton, yüksek performanslı beton ve ultra yüksek performanslı beton olarak adlandırılmakta (Hiremath ve Yaragal, 2017) ve yıllar boyunca betonun daha iyi mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin elde edilmesini amaçlayan birçok araştırma yürütülmüştür. Beton teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte, Reaktif Pudra Beton (RPB) yüksek direnç ve dayanıklılık performansları nedeniyle ilgi çekici hale gelmiştir (Bharathi ve Sreekumaran, 2020).

Reaktif Pudra Beton (RPB), P. Richard and M. Cheyrezy tarafından 1993 yılında başarılı bir şekilde geliştirilmiş, ultra yüksek dayanım, iyi boyustal kararlık kararlılığı ve mükemmel dayanıklılığa sahip olan nispeten yeni bir çimento esaslı kompozit malzeme türüdür (Chen ve Zheng, 2018). Reaktif Pudra Beton (RPB), gelişmiş mekanik özelliklere sahip ultra yüksek dayanımlı ve yüksek sünek kompozit malzemedir. RPB, iri agrega içermeyen bir betondur. Ancak çimento, silis dumanı, kum, kuvars tozu, süperakışkanlaştırcı ve çelik lif içeren çok düşük su bağlayıcı oranına sahip bir betondur. RPB'nin en önemli farkı iri agreganın bulunmayışıyla beraber geliştirenler tarafından, çimento matrisi ve agrega arasındaki heterojenliği azaltmak RPB'nin mikro yapısı ve performansı için kilit unsur olarak kabul edilmiştir (Anand vd., 2016).

RPB üretiminde göz önünde bulundurulan en önemli husus yüksek çimento içeriğidir. Bu nedenle bu ultra yüksek performanslı betonu elde etmek için çok miktarda çimento içeriği kullanılmalıdır. RPB'deki çimento dozu çok düşük su içeriği altında yaklaşık 700-1.000 kg/m^3 arasındadır. Yüksek çimento dozajı, parçacık yüzey alanları arasında çok fazla C-S-H jeli oluşturan hidratasyon işlemini ve dolayısıyla da parçacıkların paketlenmesini artırmak için önemlidir. Bununla birlikte, RPB'de çimento hidratasyonu eksiktir ve bu durum çok sayıda serbest çimento tanesine neden olur. Bu taneler, RPB'de granül paketlemede hayati bir rol oynar. Beton karışımına büyük oranlarda çimento eklenmesinin hidratasyon ısısı üzerinde birçok dezavantajı vardır. Bu da uzun vadede rötre problemlerine ve boyutsal kararlığın düşmesine neden olur. Hidratasyon problemlerine ek olarak, bu çimento miktarlarının kullanımı ekonomik maliyetleri artırır ve çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonu nedeniyle daha yüksek bir çevre sorunu oluşturur. Bilindiği gibi, çimento üretimi atmosfere üretilen ton çimento başına yaklaşık bir ton CO_2 yayar. Ayrıca çimento endüstrisi tarafından tüketilen enerjinin, küresel birincil enerji tüketiminin yaklaşık yüzde ikisi olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle, RBP betonda yüksek oranda kullanılan çimento için çevre dostu, uygun fiyatlı ve düşük maliyetli bir alternatif aramaya acil ihtiyaç duyulmaktadır (Aydın ve Baradan, 2013; Mayhoub vd., 2020; Zulu, 2017).

Betonun içerdiği karbonu azaltmanın başlıca yollarından biri, geleneksel Portland Çimentosunun (PÇ) çimento ikeme malzemeleri ile kısmen puzolanik ve hidrolik özelliklere sahip atık malzemeler ile yer değiştirilmesidir. Uçucu kül, cüruf, silis dumanı, metakaolin, pirinç kabuğu külü (PK) vb,. malzemeler SCM'lerde, on yıllardır kısmi ikame olarak kullanılmıştır. Betonda SCM'lerin kullanılması da bu atıkları yönetmek için bir yol oluşturmakta ve böylece bu atıkların bertarafı sonucunda çevre üzerinde oluşabilecek olumsuz etkilerin önüne geçilmektedir. Bu SCM'lerin betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde farklı etkileri vardır ve uygun tip ve PÇ ikame seviyesinin seçiminin bu atık malzemeleri betona dahil etmenin en etkili yolu olduğu bildirilmiştir (Adesina, 2018).

Ayrıca, beton endüstrisinde ek çimentomsu malzemelerin kullanımı, atık depolama alanlarına aşırı atık bertarafını önlemek için önemlidir. Çevre dostu beton üretimine büyük fayda sağlayan çeşitli atıklar vardır ve bunlar endüstriyel atıklar, doğal

mineraller, tarımsal atıklar, su ürünleri, toprak, tozlar ve küller olarak sınıflandırılabilir. Tüm bu gruplar SCM olarak başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Zeyad vd., 2019).

RPB'de, ultra ince malzemelerin kullanımı ve karışımın kaba agrega parçalarının ortadan kaldırılması, betonun çok yoğun bir mikro yapısının elde edilmesine yardımcı olabilir. Bağlayıcıların hidratasyonu için daha az suyun kullanılıyor oluşu, daha iyi basınç ve eğilme dayanımının elde edilmesini sağlar (Bharathi ve Sreekumaran, 2020). RPB'deki çimentomsu bileşenler, çimento ve puzolanik malzemelere ayrılır. Kullanılan puzolanik malzemeler silis dumanı, uçucu kül, metakaolin veya öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu olabilir (Mayhoub vd., 2020).

RPB'de kullanılan en güçlü puzolanik malzemelerden biri silis dumanıdır (SD), çünkü SiO_2 esaslı bir malzemedir (Mayhoub vd., 2020). Silis dumanı yüksek reaktif puzolanik özelliğe sahipken, ince tanecikleri, geniş yüzey alanı ve yüksek SiO_2 içeriği nedeniyle betonda kullanılmaktadır. Silis dumanı, endüstride yan ürün olarak elde edilen çok ince ayrılmış silikadır. Beton karışımında katkı maddesi olarak kullanılır ve ortaya çıkan malzemenin özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Mikro silika olarak da bilinen silis dumanı, SiO_2 amorf (kristal olmayan) bir polimorfudur. Silisyum ve ferrosilikon alaşım üretiminin bir yan ürünü olarak toplanan ultra ince bir tozdur (Imam vd., 2018). Silis dumanının belirli bir oranda (toplam bağlayıcı oranından %15'ten %25'e kadar) çimento ile ikamesi, RPB'nin basınç dayanımında mükemmel bir artış sergiler. RPB'ye daha fazla silis dumanı eklemek, basınç dayanımında herhangi bir gelişme sağlamayacaktır (Mayhoub vd., 2020).

Ayrıca, RPB üretiminde Öğütülmüş Granül Yüksek fırın cürufunun (YFC) kullanımı, YFC'nin RPB'de alternatif bir silika kaynağı olarak kullanılabileceği yerlerde çok etkilidir. Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC), demir yapmak için kullanılan yüksek fırınlardan çıkan bir yan üründür. Çimento yerine YFC'nin dahil edilmesi, çevre dostu oluşu nedeniyle hem RPB hem de çevre için birçok avantaja sahiptir. RPB için, %20 YFC ikamesi eklendiğinde, basınç dayanımında bir iyileşme, hem hidratasyon ısısında hem de büzülmede bir azalma ve çimentonun mikro yapısında bir gelişme gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, C–S–H jeli ile doldurulmuş kapiler gözeneklerin

oranının yüksek olmasıyla açıklanmaktadır (Siddique ve Khan, 2011; Mayhoub vd., 2020).

Bu çalışma, RPB üretiminde çimento ikame malzemesi olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) gibi mineral katkılar kullanarak, RPB üretimi (tasarımı) yapmak ve basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme oranı, porozite, yüksek sıcaklık etkisi ve yayılma çökme-yayılma çapı testi gibi özellikleri belirlemektir. Çalışmanın kapsamı, bir dizi mineral katkı maddesiyle RPB'nin özelliklerinin geliştirilmesi hakkında bilgi edinmenin yanı sıra RPB'nin bu süreçlerdeki özelliklerini araştırmaktır.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Bu bölümde, RPB'nin özelliklerini etkileyen faktörler ve mekanizmalar gözden geçirilerek, RPB için malzeme seçimi, malzeme oranları, kür yöntemleri ve test yöntemleri ile ilgili önceki bilimsel çalışmalar ve bu çalışmaların bulguları tanıtılmış ve geçmiş çalışmaların eksikliklerine değinilmiştir.

2.1 Reaktif Pudra Beton (RPB)

Çimento, su ve agregalar geleneksel beton üretimi için temel bileşenlerdir. Normal dayanımlı beton ilk olarak 1900'lü yılların başlarından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Ancak son otuz yılda, özellikle pulverize uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi katkı maddelerinin (tamamlayıcı çimentomsu malzemeler) ve bunun yanı sıra süper akışkanlaştırıcı (su azaltıcı ajan), hava-sürükleyici, priz geciktirci vb. kimyasal katkılar ve çelik, sentetik ve karbon gibi farklı lif türlerinin kullanılmaya başlandığı dönemde, beton teknolojisi alanında önemli ilerleme ve gelişme kaydedilmiştir. Bu yenilikçi bileşenler kullanılmadan modern veya gelişmiş beton üretimi mümkün olmayacaktır. (Nematullahi, 2012).

Mühendisler, sürekli olarak, karşılaşılan karmaşık sorunlara cevap verecek yeni malzemeler arayışında olmuşlardır. İnşaat ve malzeme maliyetleri arttıkça, daha güçlü malzemelere olan talep de aynı oranda artmıştır. İlk önemli atılımlardan biri, inşaat mühendisliğinde şaşırtıcı sonuçlara yol açan 100-120 MPa basınç dayanımı ve yüksek düzeyde dayanıklılık ile karakterize edilen Yüksek Performanslı Betonun (YPB) geliştirilmesi olmuştur (Sadrekarimi, 2007). YPB ilk kez 1950'lerde kullanılmıştır. 260 m yüksekliğindeki Water Tower Palace, 1973 yılında 60 MPa betonla inşa edilmiştir (Shaeffer, 1992). Birlik Meydanı (ABD), Petronas İkiz Kuleleri (Malezya), Tsing Ma Köprüsü (Hong Kong) ve Trump World Tower (ABD), takip eden yirmi ila otuz yıl içinde köprülerde ve yüksek binalarda YPB'nin geniş uygulama alanlarına birkaç örnektir (Voo ve Foster, 2009).

Beton teknolojisindeki ilerlemeler, Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) adı verilen yeni bir beton türünün ortaya çıkmasına yol açmıştır (Alsalman vd., 2017). Son

yıllarda, Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) yeni geliştirilmiş bir beton türü olarak kabul edilmiştir. Yeni binyılın başında inşaat piyasasında köprü yapımında ve güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. UYPB esas olarak süreksiz elyaf ile takviye edilmiş çimento esaslı kompozit malzemelerin karıştırılmasıyla üretilir. UYPB türlerinden biri de reaktif pudra betondur (RPB). RPB, kısa çelik lif takviyesi ile hem ultra yüksek mukavemet hem de mükemmel dayanıklılık ile karakterize edilebilen üstün bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Hussein ve Atea, 2018).

Sıradan çimento esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında, RPB'nin birincil iyileştirmeleri parçacık boyutu homojenliği, gözeneklilik ve mikroyapılar ile ilgilidir. Elde edilebilecek mekanik özellikler arasında 200 ile 800 MPa aralığında basınç dayanımı, 1.200 ila 40.000 J/m^2 aralığında kırılma enerjisi ve %1'lik nihai çekme gerilimi bulunur. Bu genellikle, kaba agregaların ortadan kaldırılması, su-çimentolu malzeme oranının azaltılması, silika bileşenlerin eklenmesiyle $CaO\text{-}SiO_2$ oranının düşürülmesi ve çelik mikro lifin ilave edilmesi dahil olmak üzere bir mikro-yapısal mühendislik yaklaşımı ile elde edilir. Günümüzde RPB, endüstriyel ve nükleer atık depolama tesislerindekiler de dahil olmak üzere özel öngerilmeli ve prefabrik beton elemanlar için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Yazıcı vd., 2010).

Tam vd. (2012)'ye göre, RPB'nin ultra yüksek performansı, geleneksel betona kıyasla birçok avantaj sağlar. Bu avantaj aşağıdaki gibi sıralanabilir:

(i) 200 MPa'lık çok yüksek basınç dayanımı (geleneksel betonun dayanımının yaklaşık dört katı), ölü yükte önemli bir azalmaya neden olur. RPB yapıları, benzer geleneksel beton yapıların yalnızca üçte biri veya yarısı ağırlığında olabilir. Ağırlığın azalması, daha ince ulaşım yapıları üretmede, genel maliyetleri düşürmede ve yüksek binalarda kullanılabilir zemin alanını artırmada etkilidir.

(ii) Üstün süneklik ve enerji yutma (YPB'ninkinden 300 kat daha büyük ve bazı metallerinkiyle benzer tipik değerler) aşırı yük koşulları veya depremler altında bile daha fazla yapı güvenilirliği sağlar; RPB'nin yüksek enerji yutme özellikleri

ayrıca kolonların, kiriş-kolon bağlantılarının ve perde duvarların gelişmiş elastik-sonrası tepkisine de izin verebilir.

(iii) Daha az bakım ile uzun servis ömrüne imkan veren üstün dayanıklılık özelliğine sahip RPB'ler neredeyse geçirimsizdir, bu da klorür ve sülfatın neredeyse hiç karbonatlaşmasına veya nüfuz etmesine izin vermez. Gelişmiş aşınma direnci, köprü güverteleri ve endüstriyel zeminler için daha uzun ömür sağlarken, gelişmiş korozyon direnci, yoğun yağmur ve kar ve ağır kum fırtınaları gibi kötü veya sert iklim koşullarına sahip alanlara koruma sağlar.

(iv) Çelik takviye çubuklarının ortadan kaldırılması, yüksek işçilik maliyetlerini azaltır ve daha fazla mimari özgürlük sağlayarak, mimarlar ve tasarımcılar için neredeyse sınırsız yapısal eleman şekline ve formuna izin verir.

(v) Beton elemanların kalınlığının azaltılması malzeme ve maliyet tasarrufu sağlar.

(vi) Nihai üründe önemli miktarda bulunan hidratsız çimento, çatlama koşulları altında kendi kendini iyileştirme potansiyeli sağlar.

(vii) RPB ürününün inceliği, yüksek kaliteli yüzey kaplamasına imkan verir.

RPB'nin dezavantajlarına gelince, bu malzeme çok pahalıdır ve bu nedenle kullanımı klasik çözümün mümkün olmadığı veya ekonomik olmayacağı özel uygulamalarla sınırlıdır (Ženíšek vd., 2016). Bu duruma rağmen günümüzde RPB, endüstriyel ve nükleer atık depolama tesislerindekiler de dahil olmak üzere özel öngerilmeli ve prefabrik beton elemanlar için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Yazıcı vd., 2010).

Richard ve Cheyrezy (1995) tarafından yürütülen araştırmada ortaya konulan RPB'nin geliştirilmesine yönelik temel ilkeler aşağıdaki gibidir:

- Daha kaba agregaların ortadan kaldırılmasıyla homojenliğin artırılması,

- Granül karışımın optimizasyonu ile sıkıştırılmış yoğunluğun artırılması., yani yüksek silis dumanı içeriğinin ve ince kuvars kumunun tek agrega olarak kullanılmasının nedeni,

- Mikro yapının post-set ısıl işlemle iyileştirilmesi; diğer bir deyişle, kuvars kumu bu yüksek sıcaklıklarda reaktif hale gelebilir,

- Küçük boyutlu çelik liflerin eklenmesiyle sünekliğin arttırılması,

- Normal ve yüksek dayanımlı betonlar için mevcut uygulamaya mümkün olduğunca yakın karıştırma ve döküm prosedürlerinin sürdürülmesi

Bununla birlikte, yaygın kullanılan çimento bazlı malzemelerle karşılaştırıldığında, RPB'ler, Mostofinejad vd. (2016) tarafından belirtildiği gibi geleneksel muadillerine göre aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- Kaba agregaların ortadan kaldırılması ve kuvarz pudrası (100-600 μm) gibi ultra ince tozların kullanılması sonucu yoğun bir mikro yapıya yol açan parçacık boyutunda ve kompaktlıkta gelişmiş homojenlik.

- RPB'nin mekanik özelliklerini hem eğilme hem de basınç dayanımı açısından artıran süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasının bir sonucu olarak, su-çimentomsu malzeme oranlarının 0,2'den daha düşük olması.

- Silis dumanı (SD) gibi yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip mikro-çimentolu malzemelerin eklenmesi nedeniyle çimento hamurundaki toplam gözenek hacmindeki önemli azalış ve artan reaktivite ve böylelikle ek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) zincirleri (pozzolanik reaksiyon) oluşturmak için $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonun hızlanması.

- RPB'nin süneklik, modül ve gerilme mukavemeti başta olmak üzere mekanik özellikleri iyileştirmek için sert bileşenler olarak çimento hamurunda uygun şekilde dağılmış çelik mikro lifler.

- Taze haldeki RPB'ye uygulanan sıkıştırma basıncının ve kullanılan farklı kürleme koşullarının (standart, otoklav, buhar kürü ve ısıl işlem) sonucu hızlandırılmış çimento hidratasyonu nedeniyle iyileştirmiş mikroyapı.

Anand vd. (2016) çalışmalarında, küp dayanımları olan sınıflamada RPB 200 ve RPB 800 olmak üzere iki türü olduğunu ve bunların ya Lifli yada lifsiz olabileceğini belirtmişlerdir. Liflerin, kompozit malzemenin kırılma özelliklerini geliştirmek için RPB'ye dahil edildiği görülmektedir. RPB 200, darbeye dayanıklı yapılar, nükleer yapılar, gökdelenler ve korozyona dayanıklı yapılar gibi uygulama alanlarında kullanım için büyük bir potansiyel göstermektedir. RPB 800'ün kullanımı, köprü mesnetleri, güvenlik kasaları ve atık/taşıma gemileri gibi küçük veya orta ölçekli prefabrik yapı elemanları ile sınırlıdır (Aydın ve Baradan, 2013).

2.2 RPB Özelliklerini Etkileyen Faktörler

2.2.1 Malzeme Unsuru

RPB'yi diğer betonlardan farklı kılan en önemli özelliği bileşen malzemeleridir. RPB herhangi bir kaba agrega içermez. Sadece çok ince tozlar içermesine rağmen, diğer beton türlerine göre birçok üstün özelliğe sahiptir. Bu nedenle, RPB'yi güçlü ve dayanıklı bir malzeme yapan bileşenlerin özelliklerini incelemeye olan ilgi artarak devam etmektedir (Man, 2009).

2.2.1.1 Çimento

Bilindiği gibi, Portland çimentosu ince öğütülmüş klinker ve alçıdan oluşur. Klinkerin ana bileşimleri C_3S, C_2S, C_3A ve C_4AF içerir. C_2S ve C_3S'nin bir hidrasyon ürünü olan C-S-H jel, betonun dayanımına katkıda bulunan ana maddedir. C_2S ve C_3S'nin bir başka hidrasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$, pozzolanik reaksiyonun ana işlemi olan ilave C-S-H jeli üretmek için pozzolanlardan amorf silika ile reaksiyona girer (Li, 2015).

RPB'deki çimento içeriği genellikle 700 – 1.000 kg/m^3 kadar yüksek olduğundan (Collepardi vd., 2003), çimento seçimi RPB performansını etkileyen kritik bir faktör olabilir. İdeal çimentonun yüksek C_3S ve C_2S (di & tri-kalsiyum silikat) içeriğine, çok

düşük veya sıfır C_3A (tri-kalsiyum alüminat) içeriğine sahip olması gerektiği bildirilmektedir (El-louh, 2014) . Lee ve Chisholm (2005), C_3A'nın bağlayıcı bir katkı olarak çok az içsel değere sahip olduğunu ve kalsinasyon işlemi sırasında bir eritici olarak rolünden dolayı öncelikle çimentoya dahil edildiğini açıklamıştır.

Richard ve Cheyrezy (1995); Staquet ve Espion (2002) 'a göre, reaktif pudra beton üretimine yönelik uygun çimento seçimi için genel gereksinimler şu şekilde karakterize edilmelidir:

- Mümkün olan en düşük C_3A faz içeriği
- Azaltılmış alkali iyon miktarı
- Su talebinde aşırı artışa neden olmayacak şekilde spesifik yüzey alanının nispeten düşük gelişimi
- Olgunlaşmış malzemenin hem mükemmel reolojik hem de mekanik özelliklerini sağlayan yüksek silika modülü

RPB her türlü çimento ile hazırlanabilir. Çünkü çimento tipi (CEM I, CEM II, sülfat dayanımlı çimento vb.) için özel bir gereklilik olmadığı görülmektedir. Ancak en çok tercih edilen çimento, betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde görev alabilen yüksek silisli çimentodur. Parçacık boyutuna gelince, çimento inceliği yalnızca RPB'de çimento seçimini etkileyebilir. Daha yüksek incelikte çimento kullanılması, karışımın büyük miktarda su tüketmesine neden olur (Mayhoub vd., 2020).

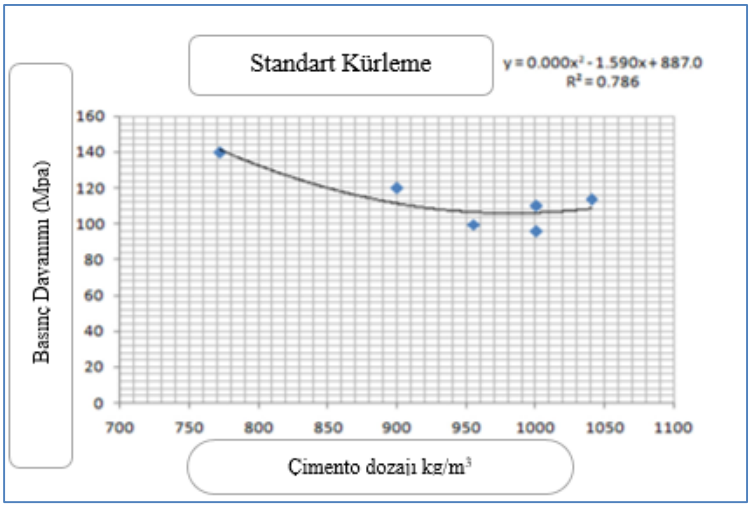
Staquet ve Espion (2002) tarafından, farklı çimentoların faz ve kimyasal bileşiminin sertleştirilmiş RPB'nin özellikleri üzerindeki etkisi üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada üç farklı normal dayanımlı Portland çimentosu (CEM I 42,5 LA; CEM I 42,5 HSR LA ve CEM I 42,5 R) ve üç farklı yüksek dayanımlı Portland çimentosu (CEM I 52,5 R LA; CEM I 52,5 HSR LA ve CEM I 52,5 R) kullanılmıştır. Sonuçlar, şimdiye kadar bildirilen RPB'deki tüm uygulamalarda kullanılmış gibi görünen çimento CEM I 52,5'in, ısıl işlem görmeden 28 günde 180 MPa'lık bir basınç dayanımı elde etmek için çimento CEM I 42,5 ile ikame edilebileceğini göstermiştir.

Araştırmacılar ayrıca CEM I 42,5 LA, CEM I 42,5 HSR LA, CEM I 52,5 R LA, CEM I 52,5 HSR LA ve CEM I 52,5 R çimentoları ile elde edilen betonların basınç dayanımının etkin bir şekilde 180 MPa'ya ulaştığını belirtmişlerdir.

Wille vd. (2011), farklı değişkenlerin etkisini araştırmışlardır. Araştırılan değişkenlerden biri, 200 Mpa'yı aşan bir basınç dayanımına sahip bir UYPB'nin gelişimi üzerinde çimento tipinin etkisi olmuştur. Çalışma, çimentonun basınç dayanımını etkileyen su talebini azaltmak için orta derecede bir inceliğe ve %8'den önemli ölçüde daha düşük bir C_3A içeriğine sahip olması gerektiğini ortaya koymuştur.

Zdeb (2015), yeterli karışım özelliklerine sahip reaktif pudra betonlar elde etmek için kullanılan bağlayıcının sınırlı bir C_3A ve Na_2O içeriği ile karakterize edilmesi gerektiği sonucuna varmıştır. Açıkça artan su talebine rağmen, oldukça gelişmiş çimento spesifik yüzey alanı (Blaine'e göre 4.000 cm^2/g'nin üzerinde), RPB karışımının uygun kıvamının ve aynı zamanda en iyi mekanik özelliklerinin elde edilmesini sağlar. W/B oranının CEM I 42,5 N MSR NA'ya dayalı olarak RPB'de 0,03 oranında azaltılması, mekanik özelliklerde önemli değişikliklere neden olmamıştır.

Mayhoub vd. (2020), Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, standart kürleme koşulları altında RPB'nin basınç dayanımı ile farklı çimento oranları arasında bir ilişkinin varlığına işaret etmiş ve RPB'nin gerekli reaktiviteyi elde etmek için yüksek çimento içeriği ve puzolanik malzemeler gerektirdiğini bildirmiştir.



Şekil 2.1 RPB'nin basınç dayanımı ile farklı çimento oranları arasındaki ilişki (Mayhoub vd., 2020)

Mostofinejad vd. (2016), optimum çimento miktarını belirlemek için RPB basınç dayanımı üzerinde farklı çimento miktarlarının (850, 900, 950, 1.000, 1.050, 1.100, ve 1,150 kg/m^3) etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, numunelerde kullanılan 1.100 kg/m^3 çimento miktarının, 233 MPa'ya eşit maksimum basınç dayanımına yol açtığını ve 1,000 kg/m^3 çimentonun kullanıldığı numuneler tarafından kaydedilen dayanıma kıyasla yaklaşık 26 MPa'lık bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur.

2.2.1.2 Silis dumanı

Silis dumanı (SD), silikon ve ferrosilikon endüstrisinde eritme işleminin bir yan ürünüdür. 1 mikrondan daha küçük parçacıklar ve ortalama çimento parçacıklarından yaklaşık 100 kat daha küçük olan ortalama 0,1 mikron çapında son derece incedir. Davranışı yüksek amorf silika içeriği (>%90) ile ilgilidir. 2.000 ºC'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek saflıkta kuvartzın silikona indirgenmesi, düşük sıcaklık bölgesinde kristal olmayan silikadan oluşan küçük parçacıklara oksitlenen ve yoğunlaşan SiO_2 buharı üretir (Imam vd., 2018).

Silis dumanı, aderans dayanımında artış (agregadan matrise / betondan donatıya), aşınma dayanımında artış, geçirgenlikte azalma, aşındırıcı kimyasallara karşı dirençte artış, betondaki güçlendirilmiş çeliğin korozyon direncinde artış ve alkali-silika reaksiyonu nedeniyle genleşmede azalma gibi, betonun bazı özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Silis dumanı üç mekanizma vasıtasıyla çalışır:

1) Gözenek boyutu takviyesi ve matris yoğunlaşması,
2) Serbest kireç ile reaksiyon (çimentonun hidrasyonundan)
3) Çimento harcı agregalarının arayüzey arıtımı (Motahari vd., 2017).

El-louh (2014) tarafından belirtildiği üzere, silis dumanı (SD), beton teknolojisinde aşağıdaki dört ana işleve sahiptir:

1. Büyük sınıf parçacıkların (çimento) arasındaki boşlukların doldurulması
2. Çimento hamuru matrisinin geçirgenliğini azaltarak betonun direncinin ve dayanıklılığının artırılması.
3. Birincil hidrasyondan kaynaklanan kireç ile ikincil hidrasyonun üretilmesi

4. Betonun aşındırıcı kuvvetlere karşı daha dirençli hale getirilmesi ve alkali agrega tarafından üretilen genleşmenin azaltılması

Siddique (2011), silis dumanı kullanımının avantajlarını şu şekilde özetlemiştir:

- Yüksek erken basınç dayanımı
- Yüksek çekme, eğilme dayanımı ve elastisite modülü
- Artan tokluk
- Yüksek aderans dayanımı gücü
- Gelişmiş dayanıklılık
- Klorür ve su girişine karşı çok düşük geçirgenlik
- Artan aşınma direnci
- Klorürler, asitler, nitratlar ve sülfatlar vb. kaynaklı kimyasal saldırılara karşı üstün direnç
- Yüksek elektrik direnci ve düşük geçirgenlik

Lee ve Chisholm (2006) tarafından belirtildiği gibi, silis dumanı betonda kullanılmak üzere aşağıdaki gereksinimleri düzgün bir şekilde yerine getirmelidir:

- Çimento tanelerinin etrafına yakın bir şekilde paketlenecek, kompozit matrisin yoğunluğunu artıracak ve parçacıklar arasındaki boşlukların potansiyelini en aza indirecek kadar ince olmalıdır.

- Önemli puzolanik aktiviteye sahip olmalıdır, öyle ki, çimentonun hidratasyonu ile üretilen çimentosuz portlandit kristalleri [Ca (OH_2)], ilave C – S – H jeli oluşturmak üzere silika ile reaksiyona girer ve kompozitin bağlanmasını güçlendirir.

- Parçacıklar, taze karışım içinde bir yağlayıcı olarak hareket etmek için temel olarak küresel bir şekle sahip olmalı, böylece akma ve kalıplara dökülebilme yeteneğini geliştirmelidir.

SD'nin kimyasal davranışına gelince, puzolanik bir malzeme olarak silis dumanı, Portland çimentosunun C_3S ve C_2S'sinin hidrolizi ile açığa çıkan kalsiyum hidroksit

(CH) ile reaksiyona girer. CH, hidrasyon ürünlerinin hacminin yaklaşık %20-25'ini oluşturur ve CH kristalleri çözelti içinde büyür. Morfolojileri nispeten zayıf, gevrek ve çimentosuzdur. Bu nedenle, özellikle çimento hamuru matrisi ve agregalar arasındaki arayüzde, CH kristallerinin bulunduğu bölgelerde çatlaklar kolayca artabilir (Rao, 2003). Rao (2003) ' e göre, reaksiyon süreci aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

$$2C_3S + 6H \longrightarrow C_3S_2H3 + 3CH \quad (2.1)$$

Portland çimentosu

$$2C_2S + 4H \longrightarrow C_3S_2H3 + CH \quad (2.2)$$

Silis dumanı

$$3CH + 2S \longrightarrow C_3S_2H_3 \quad (2.3)$$

Burada C = CaO; S = SiO_2; H = H_2O

SD'nin RPB'nin özellikleri üzerindeki etkisi açısından, Peng vd. (2010), SD içeriğinin RPB'nin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Basınç dayanımı, bir sınıra kadar artan SD miktarı ile yükselmiştir. Spesifik değerin ötesinde, SD içeriğinin artırılması, basınç dayanımını hafifçe azaltmıştır, bu da sistemde herhangi bir reaksiyon göstermeyen bazı aşırı SD'lerin kaldığı anlamına gelir. Başka bir deyişle, her karışım için maksimum dayanım sağlayan optimum bir SD içeriği vardır. Ayrıca, araştırmacılar, SD içeriğinin RPB'nin gücü üzerindeki etkisinin farklı mikro yapılara ve hidratasyon ürünlerine atfedildiğini belirtmişlerdir.

Khadiranaikar ve Muranal (2012) silis dumanı dozajı arttıkça basınç dayanımının azalma eğiliminde olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmada, en yüksek basınç dayanımı %15 silis dumanı ilavesi için gözlenmiştir ve basınç dayanımının su/bağlayıcı oranından bağımsız olarak silis dumanının %15 ila %25 aralığında dalgalandığı görülmüştür.

Alsalman vd. (2017b), silis dumanının %10'undan fazlasının basınç dayanımı üzerinde minimum etkiye sahip olduğunu ve silis dumanının %5 ve %10'unu içeren beton karışımlarının benzer 90 günlük basınç dayanımlarına sahip olduğunu aktarmışlardır.

Abed vd. (2018), iki kürleme sisteminde kürlenen reaktif pudra betonunun basınç dayanımı üzerindeki toplam bağlayıcı miktarına göre silis dumanı oranının etkisini araştırmıştır. Çimento ağırlığının ikamesi olarak dört silis dumanı oranı (%0, %15, %25 ve %35) dikkate alınmıştır Sonuçlar, %25 silis dumanı içeren karışımın, kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımı üzerinde daha fazla artış sağladığını göstermiştir.

Liu vd. (2019), 131,8 MPa ve 13,1 MPa ile en yüksek basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin SD/C 0,4 olduğunda elde edildiğini bildirmiştir. Araştırmacılar, silis dumanında bulunan SiO_2 ile puzolanik etki yoluyla C-S-H jeli oluşturan çimento kaynaklı $Ca(OH)_2$'nin hidratasyon reaksiyonunun, RPB'nin iç mikro gözeneklerini doldurduğunu, bunun da karışımın kompaktlığını ve dolayısıyla basınç ve eğilme dayanımını iyileştirdiğini belirttiler. Çalışma, aşırı miktarda silis dumanının karışımdaki serbest suyun göçünü sınırlayacağını ve bunun da kuru büzülmeye yol açabileceğini gösterdi.

Mostofinejad vd. (2016) çalışmalarında, silis dumanının (SD) ilave edilmesinin, arayüzey geçiş bölgesinin (ITZ) yapısı üzerinde gözle görülür olumlu bir etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Bu aynı zamanda RPB'nin basınç dayanımının artmasını da açıklayabilir. Öte yandan, bileşenlerin hacmine göre yüzey alanı ne kadar spesifik olursa, su tüketimi için daha fazla talep olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, aşırı miktarda silis dumanının kullanılması, bazı kısımlarının reaksiyona girmemesine neden olur, bu da RPB içeriğinin heterojenliğini artırır ve zayıflamış mikro yapı nedeniyle mekanik özellikleri bozar.

Betonun işlenebilirliği veya yayılma çapı açısından (Liu vd., 2019), SD içeriğindeki artışın %7-14'lük bir yayılma çapıkanlık cezası taşıdığını bulmuştur. Geniş spesifik yüzey alanı nedeniyle, küçük silis dumanı parçacıkları bulamaçtaki serbest suyu emecek ve bu da karışımın yayılma çapıkanlığında bir azalmaya yol açacaktır. Ayrıca Khadiranaikar ve Muranal (2012) ve Yazici vd. (2009) silis dumanı içeriği arttıkça,

karışımın taze betonda dağılması için daha fazla süper akışkanlaştırıcıya gereksinim duyduğunu belirtmiştir.

2.2.1.3 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC)

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC), demir yapmak için kullanılan yüksek fırınlardan elde edilen bir yan üründür. Yüksek fırınlar kontrollü demir cevheri, kok ve kireçtaşı karışımı ile beslenir ve yaklaşık 1500 ^{o}C sıcaklıkta çalıştırılır. Demir cevheri, kok ve kireçtaşı yüksek fırında eridiğinde, erimiş demir ve erimiş cüruf olmak üzere iki ürün üretilir. Erimiş cüruf daha hafiftir ve erimiş demirin üstünde yüzer. Erimiş cüruf çoğunlukla orijinal demir cevherinden silikatlar ve alümina ile kireçtaşından gelen bazı oksitlerden oluşur. Cürufu granüle etme işlemi, erimiş cürufun yüksek basınçlı su jetleri yoluyla soğutulmasını içerir. Bu, cürufu hızla söndürür ve genellikle 5 mm'den büyük olmayan granüler parçacıklar oluşturur. Hızlı soğutma, daha büyük kristallerin oluşumunu engeller ve ortaya çıkan granüler malzeme, yaklaşık %95 kristal olmayan kalsiyum-alüminosilikatlar içerir. Granüle edilmiş cüruf kurutularak ve daha sonra dönen bir bilyalı değirmende çok ince bir toz (YFC) haline gelene kadar öğütülerek işlenir (Mansoor vd., 2018; Siddique ve Khan, 2011).

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu camsı bir malzemedir. YFC'nin rengi, nem içeriğine, kimyasına ve granülasyon verimliliğine bağlı olarak bejden koyuya ve kirli beyaza kadar değişir. Öğütüldüğünde genellikle beyaz renge sahiptir. Betona daha açık ve parlak bir renk verir. YFC ince camsı bir malzemedir. Özgül ağırlığı çimentonunkinden daha azdır ancak inceliği daha fazladır (Siddique ve Khan, 2011).

YFC, ağırlıkça bire bir bazda sıradan çimento yerine doğrudan ikame olarak kullanılabilir. YFC için ikame oranları %30 ile %85 arasında değişmektedir. Genellikle çoğu uygulamada %50 kullanılır. Agresif ortamlar gibi özel uygulamalarda ve hidratasyon ısısını azaltmak için %85'e varan daha yüksek ikame oranları kullanılır. YFC, yalın karışım betonda %70'lik ikame seviyelerinde kullanılabilir (Siddique ve Khan, 2011).

Bir cürufun kimyasal bileşimi, demir üretim sürecindeki hammaddelerin bileşimine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Cevher ve kok kömüründen elde edilen silikat ve

alüminat safsızlıkları, yüksek fırında cürufun viskozitesini düşüren bir akı ile birleştirilir. Pik demir üretimi durumunda, akı çoğunlukla kireçtaşı ve forsterit veya bazı durumlarda dolomit karışımından oluşur. Yüksek fırında cüruf demirin üstünde yüzer ve ayırma için boşaltılır (Suresh ve Nagaraju, 2015).

YFC çimento ikamesi olarak kullanıldığında, hidrasyon işlemi üzerindeki etkisi şu şekilde öngörülebilir: Portland çimentosunun hidratasyonu, büyük miktarlarda portlandit kristali [$Ca(OH)_2$] ve amorf kalsiyum silikat hidrat jeli [$C_3S_2h_3$] (C–S–H) üretiminden kaynaklanır. Hidratlı çimento hamuru yaklaşık %70 C–S–H, %20 $Ca(OH)_2$, %7 sülfoalüminat ve %3 ikincil fazlar içerir. Kimyasal tepkimeler sonucu ortaya çıkan $Ca(OH)_2$, suda kısmen çözündüğü ve yeterli dayanıma sahip olmadığı için boşluklar oluşturarak betonun kalitesini olumsuz etkiler. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kullanılması, betonun kalitesini düşüren $Ca(OH)_2$ bileşiğinin bağlanması üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Cüruf ve $Ca(OH)_2$'nin reaksiyonu sonunda C–S–H jeli gibi hidratasyon ürünleri oluşur (Oner ve Akyuz, 2007). Dash (2010) tarafından ifade edildiği gibi, YFC ve Çimento'nun su varlığında etkileşimi aşağıdaki gibi açıklanmaktadır:

PÇ hidratasyon ürünü

$$PÇ\ (C_3S/C_2S) + H_2O \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H + CH \qquad (2.4)$$

YFC hidratasyon ürünü

$$YFC\ (C_2AS/C_2MS) + H_2O \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H + SiO_2 \qquad (2.5)$$

$$\text{Pozzolanik malzemenin reaksiyonu } SiO_2 + CH + H_2O \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H \qquad (2.6)$$

YFC'nin çimento yerine ikamesi, çevre dostu olması nedeniyle hem RPB hem de çevre için birçok avantaja sahiptir. RPB için, %20 YFC ikamesi eklendiğinde, basınç dayanımında bir iyileşme, hem hidratasyon ısısında hem de büzülmede bir azalma ve çimentonun mikro yapısında bir gelişme gözlemlendiği bulunmuştur. Bunun nedeni, C – S – H jel ile doldurulmuş kapiler gözeneklerin oranının yüksek olması olabilir (Mayhoub vd.,2020).

Yazici vd. (2008), RPB'de alternatif bir silika kaynağı olarak öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanmıştır. Çalışma, uçucu kül (UK) ve/veya öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC) ile RPB'nin çimento ve SD içeriğini azaltmayı amaçlamıştır. Test sonuçları, RPB'de UK ve / veya YFC'lerin kullanımının önemli mekanik performans kaybı olmadan mümkün olduğunu göstermiştir.

Liu vd. (2017), YFC partiküllerinin tamamı çimento partiküllerinden daha küçük olan mikroküreler olduğunu belirtmiştir. YFC, yoğunlaşmayı iyileştirmek ve betonun geçirgenliğini azaltmak için boşluklara doldurulabilir. Ek olarak, YFC, C-S-H jeli üretebilen ve çimentonun hidratasyon sürecini daha da kolaylaştıran volkanik aktivite gösterir. Ancak YFC'nin reaktif aktiviteleri çimentoya göre daha azdır. Sonuçlar ayrıca, PÇ'nin YFC ile karıştırılmasıyla RPB'nin dayanımının azaldığını gösterdi. Dayanım, düşük ikame oranlarında biraz azalır, ancak değiştirme oranı %50'nin üzerinde olduğunda düşüş eğilimi daha belirgin hale gelir. Çalışma, bu dayanım azalmasını çimento ikame malzeme'lerin hidratasyon mekanizmasına dayandırmaktadır. Ekstra C-S-H jeli oluşturmak için, SCM'lerin su ve çimentonun hidratasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesi gerekir.

Suresh ve Nagaraju (2015), aynı çimentomsu malzeme içeriğiyle (Portland çimentosunun toplam ağırlığı + YFC), normalde %50'ye kadar YFC kullanıldığında Portland çimentosuna benzer 28 günlük dayanımların elde edileceğini belirtmiştir. Daha yüksek YFC yüzdelerinde 28 günlük eşdeğer dayanım elde etmek için çimento içeriğinin arttırılması gerekebilir. YFC betonu, Portland çimentosu ile yapılan eşdeğer betondan daha istikrarlı bir şekilde dayanım kazanır. Benzer 28 günlük dayanım için, bir YFC betonu erken yaşlarda daha düşük dayanıma sahip olacaktır, ancak uzun vadeli dayanım daha büyük olacak ve erken dayanımdaki azalma en çok yüksek YFC seviyelerinde ve düşük sıcaklıklarda fark edilecektir. Tipik olarak, bir Portland çimentosu betonu 28 günlük dayanımının yaklaşık yüzde 75'ini yedi günde elde edecektir ve 28 ila 90 gün arasında yüzde beş ila onluk küçük bir artış gerçekleşecektir.

Chi vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, 14 günlükken, PÇ betona kıyasla çimento ikamesi olarak YFC ile betonun ilk hidratasyon hızı daha yavaştır. Bu nedenle, normal performanslı betonunun basınç dayanımı, YFC'li betondan daha yüksektir. Bununla

birlikte, 28 gün sonra, çimento ikamesi olarak YFC'li betonun basınç dayanımı, normal betona kıyasla daha yüksektir. %40 YFC'ye sahip beton en yüksek basınç dayanımına sahiptir, bunu %20 YFC'ye sahip beton ve daha sonra %60 YFC'ye sahip beton izler. YFC ile %40'lık oranda çimento ikamesinin puzolanik reaktivite nedeniyle hidratasyon ürünlerini ortaya çıkardığını ve daha sonraki yaşlarda gözenekleri doldurduğunu belirtmişlerdir. %60 çimento ikameli YFC betonu, %20 ve %40 çimento ikameli YFC betonundan daha düşük basınç dayanımına sahiptir. Bu nedenle, %40 çimento ikameli YFC betonu bu çalışmada optimum ikame olarak görülmektedir.

2.2.1.4 Agrega

Agrega, beton karışımlarının hacimsel olarak büyük bölümünü kaplar. Agreganın türü, maksimum agrega boyutu, tane boyutu dağılımı ve agreganın çimentoya oranı gibi agreganın özellikleri betonun işlenebilirliğini, basınç dayanımını ve dayanıklılığını etkiler. Düşük S/C ve yüksek oranda su azaltıcı katkı (SA) içeriği, normal çimentomsu karışımlardan farklı olarak yüksek işlenebilirlikte bile yapışkan bir kıvamda UYPB ile sonuçlanır. Düşük S/C oranı, agrega ve hamur arasındaki yoğunluk farkını azaltarak segregasyon riskini de azaltır. Bu iki faktörün her ikisi de segregasyon şansını azaltır (Li, 2015).

Kum, RPB'nin ağırlıkça yaklaşık %41'i ile RPB'nin en büyük bölümünü oluşturur. Minimum boşluğun yanı sıra oldukça homojen bir matris elde etmek için RPB, 150 μm ile 600 μm arasında ince gradasyonlu kum içerir. En büyük çimento taneleriyle (80–100 μm) etkileşimi önlemek için 150 μm'nin altındaki kum partikül boyutlarından kaçınılır. Ortalama partikül boyutu yaklaşık 250 μm olan kum tercih edilir (Ahmad vd., 2015).

Ji vd. (2011), RPB'nin dayanımının, kum karışımlarının maksimum tane boyutu ve paketleme derecesinden etkilendiği sonucuna varmıştır. Çalışma, daha küçük maksimum tane boyutunun ve daha büyük paketleme derecesinin kum karışımının daha yüksek RPB dayanımına ulaşmasını sağlayabildiğini belirtmiştir.

Zhong vd. (2019), dört faktörün RPB performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir ve bu faktörlerden biri de agrega/bağlayıcı oranı olmuştur. Çalışmada (0,7; 0,75 ve 0,8)

agrega bağlayıcı oranı araştırılmış ve sonuçlar en iyi performansın 0,7 agrega/bağlayıcı oranı ile olduğunu göstermiştir.

Ženíšek vd. (2016), maksimum agrega boyutunun eğilme dayanımı üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamıştır. Bu amaçla iki seri halinde altı RPB (lifsiz) karışımı yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler, maksimum agrega boyutu ne kadar düşükse, eğilme dayanımının o kadar yüksek olduğunu göstermiştir.

Hamiruddin vd. (2018), kum derecelendirmesinin (600 – 1.180 μm) basınç dayanımının 7 günde %12,07; %3,95; %9,68 ile 63 – 300 μm, 300 – 600μm ve normal kumdan daha yüksek sonuç verdiğini bildirmiştir. 28 günde kum derecelendirmesinin (600 – 1.180 μm) basınç dayanımı sırasıyla 63 – 300 μm, 300 – 600 μm ve normal kumdan %12,07; %3,95; %9,68 ile daha yüksek sonuçlanmıştır. Ayrıca basınç dayanımının 7 ve 28. günlerde üniform olarak artan şekilde gösterilebileceğini belirtmişlerdir.

2.2.1.5 Çelik lif

Çeşitli nedenlerden dolayı, betonun çoğu çatlar. Betonun çatlamasının nedeni yapısal, çevresel veya ekonomik faktörlere bağlanabilir, ancak çatlakların çoğu, malzemenin çekme kuvvetlerine direnme konusundaki doğal zayıflığından dolayı oluşur. Beton büzülür ve kısıtlandığında tekrar çatlar. Çelik lif takviyesinin betonu daha rijit ve sünek hale getirerek çatlama sorununa bir çözüm sunduğu artık iyi bilinmektedir (Sukumar ve John, 2014). Dixon (2003) tarafından belirtildiği gibi, günümüz mühendislerinin lifleri dahil ederek betonun özelliklerini değiştirme girişimlerindeki temel amaçlar şunlardır:

a) Malzemenin reolojisini veya plastik çatlama özelliklerini taze halde veya dökümden sonra yaklaşık 6 saate kadar iyileştirmek
b) Çekme veya eğilme dayanımını geliştirmek
c) Darbe dayanımını ve tokluğu geliştirmek
d) Çatlama-sonrası süneklik yoluyla çatlamayı ve kırılma modunu kontrol etmek
e) Durabiliteyi artırmak

Banthia ve Sheng (1990), betona çelik liflerin eklenmesinin, yükleme altındaki betonun davranışını etkili bir şekilde arttırdığını bildirmiştir. Çelik liflerin eklenmesi, betonun

dayanabileceği maksimum yüke ulaştıktan sonra ani kırılmayı önler ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmı, çelik elyafların dahil edilmesinin yumuşama etkisinden dolayı daha da düzleşir. Sonuç olarak, betona çelik liflerin eklenmesi, betonun basınç altındaki davranışını etkiler. Ayrıca, çelik liflerin eklenmesi, ultra yüksek dayanımlı betonun (UYPB) çekme dayanımını, sünekliğini ve işlenebilirliğini kayde değer oranda etkiler (Li, 2015; Al-Tikrite ve Hadi, 2018).

RPB kompozitleri arasında en çok bilinen malzemeler çelik lif içerenlerdir. Çelik liflerin uygulanması için temel hedefler şunlardır: mekanik özelliklerin artırılması, büzülmenin azaltılması ve yüklü malzemenin sünekliğinin indüklenmesi. RPB'deki çelik liflerin ortalama uzunluğu 6 ila 15 mm ve çapı 0,16 ila 0,18 mm arasında değişirken, hacimsel içerik %2,0 ila 2,5 arasında değişmektedir (Zdeb ve Sliwinski, 2011). Cheyrezy (1995), RPB'nin süneklik performansını artırmak için %2'lik bir çelik lif fraksiyonu kullanılmasını önermiştir. Lif takviyesinin etkisi değişen dozaj ve lif türü ile değişmiştir (Raza vd., 2020).

Mayhoub vd. (2020)'e göre, en-boy oranı, lif dağılımı ve çelik lif fraksiyon hacmi gibi esas olarak beton performansını etkileyebilecek çeşitli faktörler aşağıdaki gibidir:

- **Lif dağılımı :** Betonun mekanik performansı, çimentolu bir matristeki liflerin dağılımına büyük ölçüde bağlıdır. Suda çözünür bir malzeme ile birlikte daldırılan demetlenmiş liflerin tutulması tavsiye edilir.

- **Lif En Boy Oranı (L/d) :** En-boy oranı, lif uzunluğunun lif çapına oranı olarak tanımlanır. Yüksek en boy oranı, düşük en boy oranına kıyasla daha iyi performans sağlar.

- **Çelik liflerin hacim fraksiyonu:** Liflerin hacim fraksiyonu arttıkça, mikro çatlakların büyümesi kısıtlanmıştır, burada hem kırılma tokluğunda hem de dolaylı gerilme dayanımında (yarmada-çekme dayanımı) bir artış olmuştur. Belirgin bir lif kilitleme ve işlenebilirlik kaybı, betona yüksek hacimli çelik liflerin dahil edilmesi ile birlikte ortaya çıkar. Sonuç olarak, verilen herhangi bir RPB matrisi için optimum bir lif içeriği vardır.

Araştırmacılar, çelik lifin mekanik özellikler üzerindeki etkisi üzerine çok sayıda çalışma yürütmüştür. Çalışmalar, çelik lif içeriğinin ve basınç dayanımı tipinin belirgin geliştirme etkilerine sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, sonuçlar kullanılan çelik lifin boyut ve tipindeki farklılıklar nedeniyle değişmektedir (Zhong vd., 2019).

Long vd. (2002), çelik lif içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının basınç dayanımına oranının arttığını bulmuştur. Ayrıca, çelik liflerin uzunluk/çap oranı (L / D) ne kadar büyük olursa, çok yüksek performanslı betonun tokluğunun o kadar iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Yunsheng vd. (2008) ; Al-Tikrite ve Hadi (2018), RPB'nin basınç dayanımının, çelik elyafın artan hacim fraksiyonu (%0-4) ile arttığını göstermiştir. Ju vd. (2007), çelik elyafın %1,5 hacim fraksiyonu ile üretilen RPB'nin, daha küçük lif fraksiyonları ile yapılan RPB'den daha iyi dayanım özellikleri sergilediğini bildirmiştir.

Tai vd. (2011); Abid vd. (2017), çelik fiber eklenmesi nedeniyle RPB'nin dayanımının önemli ölçüde arttığını aktarmışlardır. Çelik liflerin eklenmesi, yüksek sıcaklıklarda termal çatlamaya direnç gösterilmesine yardımcı olmuş ve böylece RPB'nin çekme dayanımını iyileştirmiştir.

2.2.1.6 Süper Akışkanlaştırıcı (SA)

Yüksek oranda su azaltıcı katkılar olarak da bilinen super akışkanlaştırıcılar, yüksek verimli su azaltıcılardır. 1960'ların sonlarında Japonya'da naftalin sülfonat bazlı ürünler geliştirildi ve aynı zamanda Batı Almanya'da melamin sülfonat ürünleri tanıtıldı. Karışımın anyonik uzun zincirli molekülleri, elektriksel itme yoluyla suda etkin bir şekilde dağılan çimento parçacıklarının yüzeyinde adsorbe olur (Mehta, 1970). Süper akışkanlaştırıcı, temel olarak, Kabir ve Sadeghi (2017) tarafından belirtildiği gibi, aşağıdaki gerçeklerden dolayı hem taze hem de sertleştirilmiş formlarda betonun çeşitli özelliklerini etkiler:

1. Ara yüzey geriliminde azalma

2. Çimento parçacıkları arasında sıkışan suyun serbest bırakılması

3. Çimento hidratasyonunun etkisinin geciktirilmesi

4. Hidratlı çimentonun morfolojisinin değiştirilmesi

RPB'de suya daha fazla talep vardır, aksi takdirde işlenebilirlikte bir azalma ortaya çıkacaktır. Bu nedenle, düşük su içeriğine rağmen RPB'nin işlenebilirliğini artırmak için bir süper yayılma sağlayıcı akışkanlaştırıcı katkı eklenir. Yüksek performanslı süperakışkanlaştırıcılar polikarboksilat ve naftalin sülfonat veya melamin sülfonat (MS) tek tip RPB matrisi geliştirmeye uygundur. Optimum süper akışkanlaştırıcı dozajları, S/B oranlarına bağlı olarak bağlayıcı ağırlığına göre %1–3,6 arasında uygundur (Mayhoub vd., 2020).

Collepardi vd. (1990), süper akışkanlaştırıcı dozaj oranındaki %2 ila 4 bir değişikliğin, yüksek dayanımlı beton için silis dumanı varlığında basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, süper akışkanlaştırıcının aşırı dozu, kimyasal uyumsuzluk sorunlarına ve priz süresinin aşırı gecikmesine neden olabilir (Kwan, 1995).

Lee ve Chisholm (2005), Sika NA Ltd'nin tavsiyesi üzerine RPB için en uygun süper akışkanlaştırıcı (SA) olarak Sika ViscoCrete-5'in seçildiğini bildirmiştir. Bu, özellikle ultra yüksek su azaltma uygulamaları için tasarlanmış sulu bir modifiye karboksilat olarak tanımlanmaktadır. %2 kadar yüksek bir doz gereklidir.

Yazıcı vd. (2008), referans karışım ile karşılaştırıldığında öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve/veya UK'nın değiştirilmesinin süper akışkanlaştırıcılara (SA) olan talebi azalttığını belirtmiştir. RPB karışımlarında sürüklenen veya hapsolmuş hava gözenekleri fark edilir. Bu küre şeklindeki gözeneklerin çoğunun muhtemelen süper akışkanlaştırıcı kullanımının yan etkileri olarak oluştuğunu belirtmişlerdir.

2.2.2 Su / Bağlayıcı (S/B) Oranı

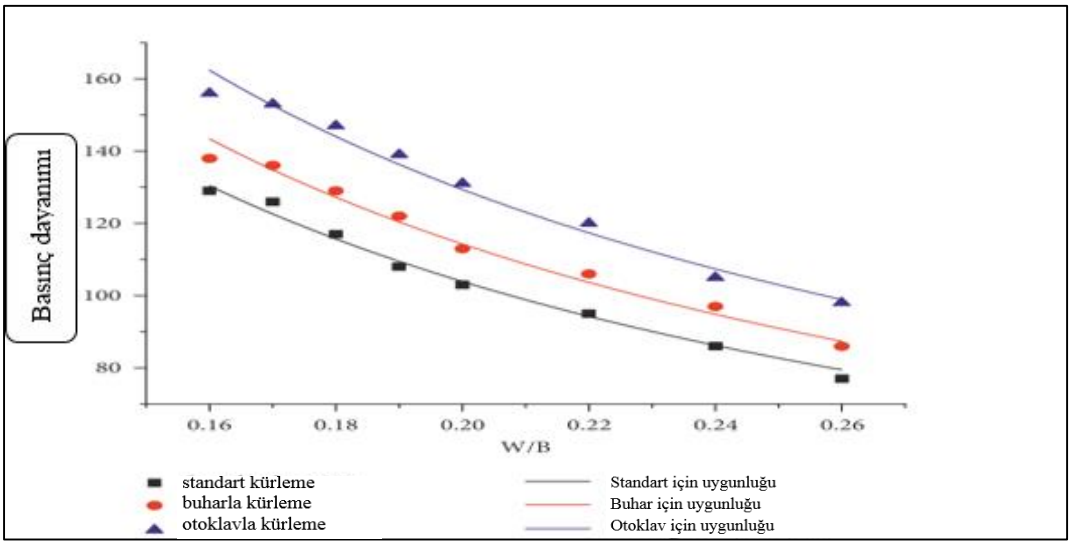
Su, Portland çimentosu hidratasyonu süreci ve puzolanik reaksiyon süreci içerisnde yer alır. ASTM C94'te açıklanan su kalitesine ilişkin gereksinim, askıda katı madde içeriği, organik kirlilik içeriği, çözünmüş sülfat ve klorür içeriği vb. içerir. Ancak, belediye suyu

kullanım için yeterince iyi olduğundan, beton üretimi sırasında suyun kalitesi büyük bir sorun değildir. Betondaki suyla ilgili temel endişe, su/çimento oranı (S/C) veya su/çimentolu malzeme (S/B) oranı olarak ifade edilen su içeriğidir (Li, 2015).

Betonun basınç dayanımını artıran temel faktörler; düşük S/C oranı kullanılması, ince dolgu maddelerinin artırılması, yaş betonun sıkıştırılması ve boşlukların giderilmesidir (Kabir ve Sadeghi, 2017).

Reaktif pudra betonda yayılma çapıkanlaşmayı sağlamak için karışımda kullanılacak minimum su içeriğinin elde edilmesi gerekmektedir. En yoğun karışımlardan elde edilen en düşük su-bağlayıcı oranı 0,08'dir. 0,2'den düşük S/C oranlarının sınırlandırılması, yüksek kalitede RPB elde etmek için ana işlemlerden biridir (Richard ve Cheyrezy, 1995; Ahmad vd., 2015). Düşük S/C oranı partiküller arasındaki boşlukları azaltır ve böylece paketleme yoğunluğu artırılabilir. Artan paketleme yoğunluğunun, çimento matrisindeki azaltılmış gözeneklilik üzerinde olumlu bir etkisi vardır (Mayhoub vd., 2020).

Chen ve Zheng (2018), RPB dayanımını, standart kürleme, buhar kürleme ve otoklav kürleme altında 0,16 ila 0,26 arasında değişen S/C oranı açısından sunmuştur (Şekil 2.2). Bu ilişkiye göre, S/C 'nin 0,16'dan 0,26'ya yükseltilmesi, dayanımın standart kürleme altında 129 MPa'dan 77 MPa'ya düşmesine yol açar. RPB dayanımı ve S/C oranı arasındaki bağlantı, RPB'nin dayanımının S/C oranı ile ters orantılı olduğunu gösterir. Tahmini eğrileri deneysel verilerle karşılaştırarak, deneysel olarak gözlemlenen verilerin çoğunun tahmini değerlerden küçük bir sapmaya sahip olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, S/C= 0,16 durumunda, testte gözlemlenen dayanımlar uydurulmuş eğrilerden daha düşüktür ve sapma daha büyüktür. Bunun nedeni, esas olarak, S/C= 0,16 durumunda, yayılma çapı 136 mm olması ve RPB karışımının sertleşmesi ve kabarcıkların dışarı atılmasının zorluğuna neden olmasıdır.



Şekil 2.2 S/C 'nin farklı kürleme yöntemleri için basınç dayanımı açısından deneysel grafikleri (Chen ve Zheng, 2018)

Sonuç olarak, (Chen ve Zheng, 2018) tarafından ifade edildiği gibi, basınç dayanımının Khadiranaikar ve Muranal (2012) RPB'nin en yüksek basınç dayanımını veren en uygun S/C oranının 0,2 olduğunu göstermiştir. Düşük S/C oranında dayanımda da azalma olduğu rapor edilmiştir. Bu durum, RPB'de yeterli sıkıştırma ve uygun hidratasyonun gerçekleşmesini sağlamak için yeterli miktarda karışım suyu bulunmamasıyla açıklanmıştır. Ayrıca çalışma, 0,2'lik bu optimal s/b oranının ötesinde, artan s/b oranları ile basınç dayanımının azaldığını bulmuştur. Araştırmacılar bu durumu, karıştırma işleminin katlama etkisinden dolayı hava kabarcıklarını sürüklemeye daha duyarlı olan daha fazla suyun var oluşu ile açıklamışlardır. Sonuç olarak, matriste gözenekliliği artıran ve dolayısıyla basınç dayanımını önemli ölçüde azaltan daha fazla boşluk bırakılır.

Akbar ve Bilal (2015), RPB için karışım oranlarını optimize etmiş ve basınç dayanımını araştırmıştır. Numuneler, basınç dayanımı açısından maksimum performansı sağlayacak optimize edilmiş karışım tasarımı elde etmek için basınç dayanımı açısından test edildi. Toplam 54 adet 3x3x3 inç küp hazırlanmıştır. Numuneler normal su ile ve ayrıca sıcak su ile muamele edilmiştir. İçerik ve s/ç oranı da daha iyi anlaşılması için sürekli olarak değiştirilmiştir. Sonuçlar, daha yüksek SiO_2 içerikli ve daha düşük su-çimento oranına sahip karışım oranlarının iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Zhong vd. (2019), RPB özellikleri üzerindeki birçok faktörün etkisini araştırmak üç s/b oranını (0,16; 0,18 ve 0,2) kullanmıştır. Silis dumanı ve uçucu kül varlığında, sonuçlar optimal su/bağlayıcı oranının 0,18 olduğunu göstermiştir.

2.2.3 Kür Koşulları

Betonun kürlenmesi terimi, bir beton karışımının kalıba yerleştirilmesinden hemen sonra çimento hidratasyonunu, yani zaman, sıcaklık ve nem koşullarını teşvik eden koşulların bir kombinasyonunu içerir. Betonun kürlenme şeklinin mikroyapısal oluşumu ve nihai dayanım gelişimi üzerinde belirgin bir etkisi olduğu iyi bilinmektedir (Mehta, 2001; Xincheng vd., 2012).

Mehta (2001) tarafından belirtildiği gibi, aşağıda açıklandığı biçimde, kürleme verimliliğini üç faktör etkiler: zaman, nem ve sıcaklık:

Zaman: Basınç dayanımının zamanla değerlendirilmesi, yapı mühendisleri için büyük bir endişe kaynağıdır. Beton teknolojisinde zaman-dayanım ilişkilerinin genellikle nemli kürleme koşullarını ve normal sıcaklıkları varsaydığına dikkat edilmelidir. Belirli bir su-çimento oranında, nemli kürleme süresi ne kadar uzun olursa, dayanım o kadar yüksek olur. Normal Portland çimentosu içeren betonlarda genellikle minimum 7 günlük nemli kürleme önerilir; açıkçası, harmanlanmış Portland çimentosu veya mineral katkı içeren beton karışımlarında, puzolanik reaksiyondan mukavemet katkısını sağlamak için daha uzun kürleme süresi arzu edilir.

Nem: Nemli kürleme, püskürtme veya ponding ile veya beton yüzeyini ıslak kum, talaş veya pamuklu matlarla kaplayarak sağlanır. Beton karışımında kullanılan karışım suyu miktarı genellikle Portland çimento hidratasyonu için gerekenden daha fazla olduğu için (tahminen çimento ağırlığının yaklaşık yüzde 30'u), beton yerleştirildikten hemen sonra geçirimsiz bir membranın uygun bir şekilde uygulanması, tatmin edici bir oranda dayanımı gelişimini korumanın kabul edilebilir bir şeklidir. Bununla birlikte, otojen büzülme veya termal büzülme nedeniyle çatlamanın kontrolü önemli olduğunda nemli kürleme tercih edilen bir yöntem olmalıdır.

Sıcaklık: Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, çimento hidratasyonu ve dayanım artışı o kadar hızlı olur. Genel olarak, kürleme sıcaklığı ne kadar düşük olursa, 28 güne kadar dayanım o kadar düşük olur.

Erken dönemde aşağıdaki amaçlar için kürlenmelidir (Eurocode, 2006):

- Plastik büzülmeyi en aza indirmek
- Yeterli yüzey mukavemeti sağlamak
- Yeterli yüzey alanı dayanıklılığı sağlamak
- Donmaya karşı korumak
- Zararlı titreşim, darbe veya hasardan korumak

RPB üretimine ilişkin literatürde farklı kürleme sistemlerinin uygulanışına yer verilmiştir. Aktiviteyi hızlandırmak için, karışımda silis dumanı kullanıldığında, mikro yapıyı iyileştirmek ve RPB'nin daha önceden var olan mukavemetini arttırmak için ısıl işlem uygulanabilir (Abed vd., 2018b).

Yazıcı (2007), standart su kürü, buhar kürü ve otoklav olmak üzere beton karışımlarına üç kür koşulu uygulamıştır. Silis dumanı (SD) ile öğütülmüş uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunun bir araya gelmesiyle birlikte, 12 gün 90°C buharla kürleme ve 8 saat, 2MPa, 210 1C'lik yüksek basınçlı buharla kürlemeden sonra, çimentonun FA, PS ve SD ile ikamesi ile, buharla kürleme altındaki basınç dayanımı, otoklavlama sonrası dayanımın %89 ila %126'sı arasında değişmiştir. Başka bir deyişle, çalışma, otoklav kürleme altındaki basınç dayanımının, 12 günlük buhar kürlemeli numunelerin basınç dayanımına eşit olamayacağını bildirmiştir.

Lawend vd. (2013) farklı kürleme yöntemlerinin etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda altı çeşit kürleme yöntemi açıklanmaktadır: bir gün gecikmeli buhar kürü, iki gün gecikmeli buhar kürü, kaynar su kürü, sis kürü, su kürü ve son olarak normal kür. Sonuç olarak, buhar ve kaynatma yöntemleri, kürlenmenin ilk zamanlarında Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)'un mekanik özelliklerini orantılı olarak arttırır. Bu, her iki kürleme yönteminin de UYPLB'nin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı oranını hızlandırdığı anlamına gelir. Kürlemenin hidratasyon ısısını koruyarak veya buhar veya

kaynatma yöntemi ile ısı eklenerek hızlandırıldığı fark edilmiştir. Sıcaklık artışı yöntemi, erken kürleme döneminde UYPLB'nin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkiler.

2.2.4 Parçacıklar Dizilimi

RPB karışımlarının iri agregaları yoktur, bunun yerine silis dumanı, kum ve ezilmiş kuvars gibi 0,02 ila 300 μm arasında değişen parçacık boyutuna sahip malzemeleri vardır. Tane boyutunun optimize dağılımı beton temel yoğunluğunu artırmaktadır (Cyr ve Shah, 2002).

(Apollonian) kavramı, parçacık dizilimi için klasik düşüncenin kaynağıdır. Bu düşünce, daha küçük boyutlara sahip parçacıkların, boşluk bölgelerine dolarak büyük parçacıkları oluşturduğunu belirtmektedir. Agreganın ideal dağılımına (agrega derecelendirmesi) uyum, beton temel boşluklarının azaltılmasını sağlamaktadır ve bu durumun, çimento içeriği üzerinde olumlu etkisi vardır. Agreganın fiyatının genellikle çimentonun sadece onda biri olması, parçacık boyutlarının derecelendirilmesinin sadece betonun dayanımını ve düşük geçirgenliğini iyileştirmekle kalmadığı anlamına gelmektedir. Ayrıca agregaların sınıflandırılmasının, beton karışımının performansı üzerinde de önemli bir etkisi olabileceği bilinmektedir ama aynı zamanda beton üretim masrafı üzerindeki etkisi daha düşük maliyetli olacaktır (Li, 2011; Wong vd., 2005).

Wong, Kwan ve Kong (2005) ayrıca, agreganın "dizilim yoğunluğu" olarak adlandırılan bir kavram sunmuştur ve bunu, beton performansı üzerindeki en önemli nokta etkisi olarak kabul etmiştir. Katı madde veya agrega parçacıklarının herhangi bir kütlesi için" dizilim yoğunluğunu", katı maddelerin hacimleri arasındaki oran ve katı parçacıkların kütle hacmi olarak tanımlamıştır (kütle hacmi, boşluk hacminin yanı sıra katı madde hacmi anlamına gelmektedir) ve bu da daha küçük boşluk hacmi içeren malzemenin "dizilim yoğunluğu"nun daha yüksek bir değere sahip olduğu anlamına gelir. Yani, yüksek dizilim yoğunluğu elde etmek için, parçacık boyutunda birden çok olan veya çeşitliliğe sahip agregaların varlığı, aynı hamur hacmi için daha yüksek dizilim yoğunluğuna yol açmaktadır. Betonun işlenebilirliği, işlenebilirlikle aynı düzeydeki su/çimento- çimento esaslı malzeme oranını azaltarak beton dayanımını artırmakla veya

aynı düzeydeki su/çimento veya çimento esaslı malzemelerdeki yüksek yoğunluk özelliğini kullanmakla geliştirilebilir. .“Dizilim yoğunluğu “ düşüncesi, çimento ve yoğunlaştırılmış silis dumanı (YSD), toz yakıt külü (TYK) ve granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi diğer çimento bazlı malzemeler de dahil olmak üzere, çimento malzemelerine uygulanacak şekilde genişletilebilir.

Farklı çimento esaslı malzemelerin parçacık boyutunun varyansı, beton karışımındaki doldurma işlemine yansımaktadır; bunların oranları karıştırıldığında, orta boyutlu parçacık büyük parçacıklar arasındaki boşlukları doldurur, daha küçük parçacıklar orta parçacıklar arasındaki boşlukları doldurur ve bu şekilde devam eder. Bu nedenle, parçacık boyutlarında çeşitli çimento esaslı malzemelerin kullanımı, dizilim yoğunluğunu artırmaya ve su talebini azaltmaya yol açmaktadır (Wong, Kwan ve Kong, 2005). Genellikle daha yüksek dizilim yoğunluğu malzemesi, parçacıklar arasındaki boşlukları doldurmak için daha az su talebi kullanacaktır ve bu da beton performanslarını artırmaktadır (Kwan vd., 1995).

2.3 Önceki Araştırmalarda Kullanılan Karışımlardan Elde Edilen Karışım Tasarımları

RPB için çoğu karışım tasarımı, Richard tarafından geliştirilen kıyaslama karışımına dayanmaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1995). Çimento içeriği, toplam karışım ağırlığının yüzde 28 ila 38'i arasında değişir ve bu da RPB karışımının metreküpü başına 650 kilogramdan daha büyük bir kütleye eşittir. Karışım tasarımları arasındaki çimento içeriğindeki yüzde 10'luk değişim, çimento içeriğinde bir azalma sağlayan ince tozların (silika unu veya öğütülmüş kuvars) kullanılmasıyla ortaya çıkmaktadır (Menefy, 2007).

Silis dumanı tiplerindeki varyasyonlar, RPB için geçmiş karışım tasarımlarında belirgindir. Bu varyasyonlar genellikle farklı karbon, kükürt ve kalsiyum içeriklerinden ve ayrıca silis dumanının toplandığı fırındaki geri alma seviyesinden kaynaklanmaktadır (Coppola vd., 1996). Kullanılan süper yayılma çapıkanlaştırıcıların türü ve miktarı, bağlayıcı malzemelerin su talebine ve RPB karışımının istenen yayılma çapıına büyük ölçüde bağlıdır. RPB'de yüksek dozaj oranlarında (tipik olarak çimento içeriğinin yüzde

6 ila 7'si) yüksek aralıklı süper yayılma çapıkanlaştırıcılar (polikarboksilik eter polimeri) kullanılır (Menefy, 2007).

2.4 RPB Uygulamaları

Reaktif pudra betonun çeşitli uygulama alanları aşağıdaki gibidir (Anand vd., 2016):

- Darbeye dayanıklı yapılar
- Nükleer yapılar
- Gökdelenler
- Korozyona dayanıklı yapılar
- Kaldırımlar
- Nükleer radyasyona karşı bariyer görevi gören yapılar
- Bankalar ve bilgisayar merkezleri için güvenlik amaçlı tasarlanan yapılar

Dünyada RPB kullanılarak inşa edilen ilk yapı 1997 yılında inşa edilen Kanada'daki Sherbrooke Köprüsü'dür. RPB'nin kolonlarda olduğu gibi yapısal uygulamalarda kullanılması, beton elemanların boyutlarını azaltarak ve tüm yapının beton hacmini azaltarak tasarım verimliliğini arttırır. Bununla birlikte, RPB, olası donatı tıkanıklığı nedeniyle tasarım kodlarıyla sınırlandırılan süneklik iyileştirmesini sağlamak için normal dayanımlı betondan daha fazla hapsetme gerektiren çok kırılgan bir malzemedir. Ayrıca aşırı gevrekliğe bağlı ani kırılma, özellikle sismik aktivite bölgelerinde RPB'nin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır (Hadi ve Al-Tikrite, 2017).

Wapello Country Köprüsü, 35,6 m kiriş uzunluğuna sahip RPB'den yapılmış, yerinde dökme güverte ile kompozit hareket sağlama dışında, yumuşak çelik donatı olmadan yapılan ilk karayolu köprüsüdür (Man, 2009).

Japonya'daki Sakata-Miari Yaya Köprüsü, aynı eşdeğer geleneksel ön gerilmeli beton yapıların ölü yükünün yaklaşık beşte birine eşit olan ve %10 civarında ekonomik avantajlar sağlayan sadece 56 tonluk ölü yüklerle son derece hafiftir. Bu yapı herhangi bir pasif donatı kullanılmadan inşa edilmiştir (Jungwirth, 2005; Rebentrost ve Cavill, 2006). Dolayısıyla bu projedeki RPB teknolojisi, yaya köprüsü inşaatçılarının malzeme

kullanımını optimize etmelerine, ekonomik avantajları gerçekleştirmelerine ve çevre dostu bir yapı inşa etmelerine yardımcı olmuştur (Dauriac, 1997; Sadrekarimi, 2004).

Avustralya'daki Shepherds Creek Yolu Köprüsü, kendisinden önce var olan ahşap köprünün yerine inşa edilmiştir. RPB ile yapılmış olan kalıcı ön dökümlü ince çerçeve paneller vardır ve kalıplar kirişlerle temas ettirilir ve plakaları tutar. Kiriş ağırlığı sadece 4,2 tondur ve uzunluğu 15,1 m uzunluğundadır. Bu kiriş, 9 tonluk geleneksel bir ön gerilimli kirişle kıyaslandığında, son derece hafiftir. Ek olarak, son derece hafif çerçeve plakalar, güverteye yüksek dayanıklılık sağlar (Rebentrost ve Cavill, 2006).

Köprü ve kiriş gibi yapı konstrüksiyonlarının ana elemanı olarak kabul edilen farklı şekillerdeki ön döküm ve öngerilmeli beton elemanlar, betonun çok daha düşük dayanımı için orantılanmıştır. Bu oranlar, RPB yeteneklerinden maksimum fayda sağlamayacaktır. Artık yeni şekillerle yeni öngerilmeli kiriş tasarımlarını tanıtma şansı doğmuştur. Bunlar, X şeklinde ve kum saati stiline yakın kesitlere sahip RPB öngerilmeli kirişlerdir. Bu kirişler herhangi bir ikincil donatı olmadan yapılmıştır. Benzer derinliklere ve çok yakın ağırlıklara sahip çelikten yapılmış muadil geniş flanşlarına kıyasla aynı moment kapasitesini taşıyacak şekilde tasarlanmış ve test edilmiştir. RPB kullanımı, geleneksel öngerilmeli betona kıyasla derinlikte %50 ve ağırlığında %75 oranında faydalı bir azalma sağlar (Dauriac, 1997).

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

Bu çalışmanın amacı, mineral katkılar ve çelik lif ilavesinin taze ve sertleştirilmiş YPB olan RPB'nin özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu doğrultuda RPB'nin hazırlanmasında Portland çimentosu, ince agrega, iri agrega, kum, su, YFC, SD, çelik lif ve SA malzemeleri kullanılmıştır. Bu bölüm, tüm bileşenlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini detaylandırmaktadır. Bu araştırmada kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemek için ilgili ASTM ve TSE standartlarında belirtilen prosedürler takip edilmiştir.

3.1.1 Çimento (PÇ)

Bu çalışmada, EN 197-1:2011 gerekliliklerini karşılayan ve özgül ağırlığı 3,06 g/cm^3 olan ve 4.600 cm^2/g özgül yüzey alanına sahip olan beyaz portland çimentosu CEM I 52,5 R kullanılmıştır. Tablo 3.1, üreticiden alınan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini göstermektedir. Şekil 3.1, YPB'de kullanılan çimentoyu göstermektedir.



Şekil 3.1 Kullanan CEM I 52,5 R beyaz Portland çimentosu

Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (CEM I 52,5 R) (URL-1, 2022)

			TS EN 197-1 Standard Limit Değerleri	
		Ölçüm Sonuçları	Min,	Maks,
Kimyasal Özellikler				
Çözünmeyen Kalıntı	(%)	0,18	-	5
SiO_2	(%)	21,6	-	-
$Al_2 O_3$	%	4,05	-	-
$Fe_2 O_3$	%	0,26	-	-
CaO	%	65,7	-	-
MgO	(%)	1,30	-	-
SO_3	(%)	3,30	-	4
Kızdırma Kaybı	(%)	3,2	-	5
$Na_2 O$	(%)	0,3	-	-
$K_2 O$	(%)	0,35	-	-
Klorür (CI-)	(%)	0,01	-	0,1
Puzolanik Özellik	-	-	-	-
Fiziksel Özellikler				
Özgül Ağırlık	(gr/cm^3)	3,06	-	-
Özgül Yüzey	(cm^2/gr)	4.600	-	-
Beyazlık (CIE sistemine göre, Y değeri)	%	85,5	85	-
Priz Başlangıcı	(dakika)	100	45	-
Priz Sonu	(dakika)	130	-	-
Hacim Genleşmesi	(mm)	1	-	10
2 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	37	30	-
7 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	50	-	-
28 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	60	52,5	-

3.1.2 Silis Dumanı (SD)

Piyasadan temin edilen, amorf SiO_2 partiküllerinin iki formunda yoğunlaştırılmış ve yoğunlaştırılmış olmayan ASTM C-1240 gereksinimlerini karşılayan silis dumanı (SD), kullanışmış (Şekil 3.2) teknik özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir (URL-2, 2022).



Şekil 3.2 Kullanılan SD

Tablo 3.2 SD'nin teknik özellikleri

SiO2	Min% 93 (gerçek 96.1%)
H20 (nem)	Max%0,3 (gerçek 0,19%)
Kızdırma Kaybı	(L.O.I max%3,5)(gerçek 1, 81%)
+45 mikronun üzerinde	Max 2.5% (gerçek 0, 58%)
Hacim Yoğunluğu	0,55-0,65 kg/dm³(D)
BET min.	1 5-28 m2/gr (gerçek 23,36 m^2/gr)

3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Bu çalışmada (Zonguldak-Ereğli) demir-çelik fabrikası (Erdemir) ve OYAK Bolu çimento San. A. P.'nin öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) atığı kullanılmıştır. YFC'nin özgül ağırlığı 2,95 g/cm^3 ve inceliği 4.989 cm^2/g'dir. Üreticiden Tablo 3.2'de verilen YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksleri sırasıyla 54,2 ve 72,5 olarak belirlenmiştir. YFC'nin parçacık boyutu derecelendirmesi Şekil 3.4'te ve bu çalışmada kullanılan YFC Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



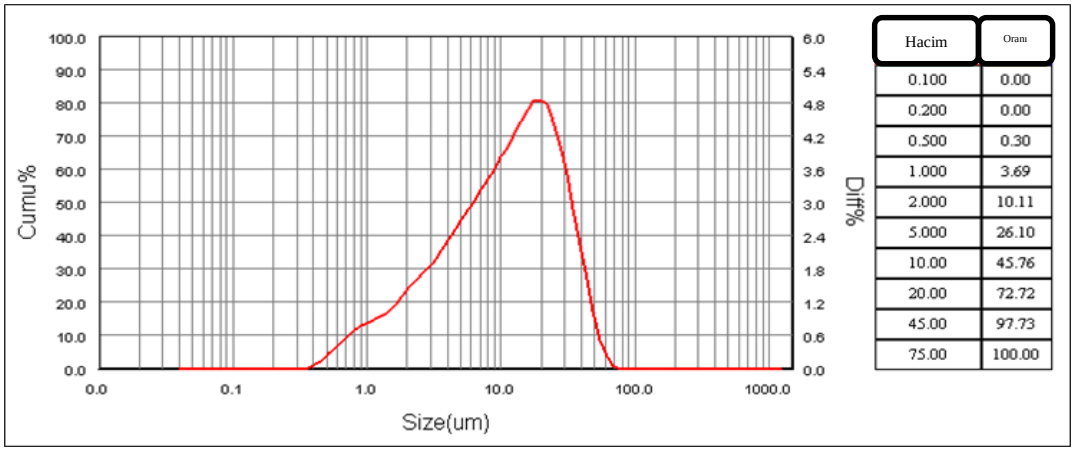
Şekil 3.3 YPB üretiminde kullanılan YFC

Tablo 3.3 YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oksit	%	EN 197-1 Standart limit değerler	Test metodu
MgO	5,75	Max. 18	TS EN 196-2
S(sülfür)	0,54	Max. 2,0	TS EN 196-2
SO_3	0,19	Max. 2,5	TS EN 196-2
CL^-	0,0185	Max. 0,1	TS EN 196-2
nem	0,06	Max. 1,0	TS EN 15167-1
Na_2O	0,56	-	TS EN 196-2

Tablo3.2 Devamı ..

K_2O	0,28	-	TS EN 196-2
Na_2O eşdeğeri	0,74	-	TS EN 196-2
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık g/cm^3	2,95	-	TS EN 196-6
Özgül yüzey cm^2/g	4.989	Min. 2.750	TS EN 196-6
Mineralojik özellikler	%		
Cam içeriği	100	-	TS EN 196-2
LOI	0,09	Max. 3,0	TS EN 196-2



Şekil 3.4 YFC'nin parçacık boyutu sınıflandırması

3.1.4 İnce Agrega (Kum)

Kullanılan kum Kastamonuda bulunan yerel ve doğal silis kumudur. Karışımdaki temel bileşen olması sebebiyle RPB'yi geliştirme açısından iyi kalitede bir agrega olup Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Parçacık büyüklüğü 2 mm'den küçüktür (ASTM C 33, 2017).



Şekil 3.5 RPB üretiminde kullanılan silis agregası

3.1.5 Çelik Lifler (ÇL)

YPB karışımlarının üretiminde, (Kemerix) firması tarafından temin edilen bir uzunluk çelik lifi (6 cm) kullanılmıştır. Çelik lifinin genel görünümü Şekil 3.6'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Kullanan Çelik lif

3.1.6 Süper-Akışkanlaştırıcı (SA)

Çalışmada yeni nesil polikarboksilat bazlı süper yayılma çapıkanlaştırıcı (SP) CHRYSO Lab Bet 8.109 kullanılmıştır. SP suda çözünür polikarboksilat bazlı bir polimerdir ve üçüncü nesil bir yayılma çapıkanlaştırıcıdır. Lab Bet 8.109'un özellikleri Tablo 3.4'da verilmiştir.

Tablo 3.4 SA'nın özellikleri

Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,075±0,02 g/cm3
pH	4±1
Cl	> %0,1
Etken madde	polikarboksilat

3.1.7 Su

Karışımların üretiminde ve kürleme işleminde içilebilir TS-EN 1.008 standardına uygun Kastamonu Üniversitesi kampüsündeki şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Yöntem

3.2.1 Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları

Bu çalışmasında, RPB numunelerinin karışım tasarımı ultra yüksek dayanımlı olacak şekilde tasarlanmış, bağlayıcı malzeme 960 kg/m^3, agrega/bağlayıcı oranı 1.2, su/bağlayıcı oranı (S/B) 0,19 olarak seçilmiştir. Referans karışımda bağlayıcı olarak %100 Portland çimentosu kullanılmış, SD %0, %15 ve %30, YFC %0, %15 ve %30 oranında çimento ikame malzemesi olarak karışıma eklenmiştir. RPB karışımlarında lif/bağlayıcı (L/B) oranı %1.2 olacak şekilde, çelik lif (ÇL) karışımlara eklenmiştir. Beton karışımlarında düşük S/B oranı, yüksek işlenebirlik sağlamak için SA kullanılmış, SA/B oranı %3,5 değerinde sabit tutulmuştur.

Bu çalışmadaki deneysel program, referans karışıma ek olarak hazırlanmış 10 deneme karışımı içermektedir. Testler için toplam 270 adet numune hazırlanmıştır. Referans karışımda silis dumanı, cüruf tozu kullanılmamıştır, sadece ince agregalı ve kimyasal katkılı ve Portland çimentosu kullanılmıştır. RPB karışım oranları ve metreküp cinsinden kullanılan malzemeler Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'de sunulmaktadır.

Tablo 3.5 Karışım tasarımında malzemelerin kullanım oranları

karışım No.	karışım kodu	PÇ %	SD %	YFC %	ÇL %
1	REF1	100	0	0	0
2	REF2	100	0	0	1,2
3	S0C15	85	0	15	1,2
4	S0C30	70	0	30	1,2
5	S15C0	85	15	0	1,2
6	S15C15	70	15	15	1,2
7	S15C30	55	15	30	1,2
8	S30C0	70	30	0	1,2
9	S30C15	55	30	15	1,2
10	S30C30	40	30	30	1,2

Tablo 3.6 YPB karışım tasarımı detayları

karışım kodu	PÇ	SD	YFC	Agrega	Su	ÇL	SA
				Kg/m^3			
REF1	960	0	0	974	190	0	35
REF2	960	0	0	974	190	11,7	35
S0C15	816	0	144	974	190	11,7	35
S0C30	672	0	288	974	190	11,7	35
S15C0	816	144	0	974	190	11,7	35
S15C15	672	144	144	974	190	11,7	35
S15C30	528	144	288	974	190	11,7	35
S30C0	672	288	0	974	190	11,7	35
S30C15	528	288	144	974	190	11,7	35
S30C30	384	288	288	974	190	11,7	35

3.2.2 Karışım Dizaynı

Karışımlar, Tablo 3.5'de verilen karışım oranlarına göre hazırlanmıştır. Bunu, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi mikserde karıştırma takip etmiştir.

RPB üretiminde, karıştırma dizisi ve süresi, tüm karışımlarda aynı homojenliği ve üniformluğu sağlamak için çok önemlidir. Harmanlama dizisi aşağıdaki adımları içermektedir:

- Mikserde 30 saniye boyunca kum eklenmesi
- Karıştırma suyunun yarısının miksere ilave edilmesi ve bir dakika boyunca karıştırmaya devam edilmesi.
- Agrega mikserdeki suyu bir dakika boyunca emecek şekilde bırakılır.
- Çimento ve mineral katkılar eklenir; karıştırma işlemi bir dakika daha sürdürülmüştür.
- Son olarak, kalan suyla SA ilave edildi ve beton 3 dakika karıştırıldı ve daha sonra 2 dakika dinlendirildi. Sonunda, beton karışımı tamamlamak için iki dakika daha karıştırılmıştır.



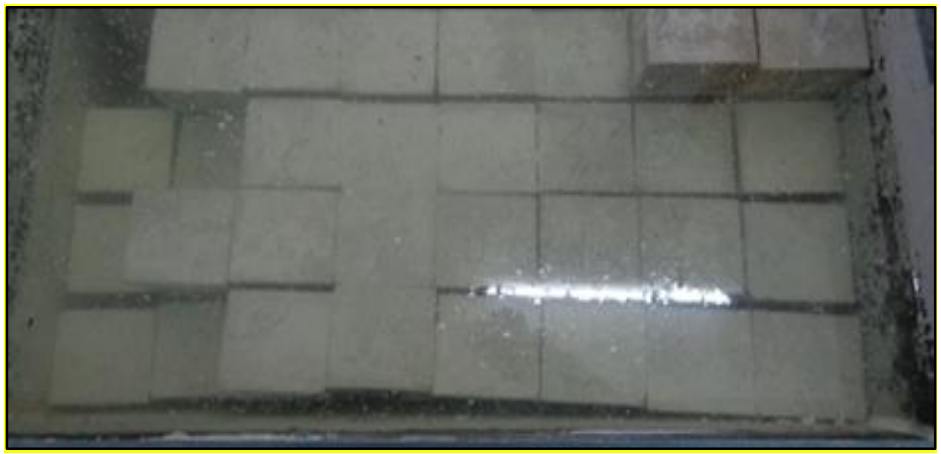
Şekil 3.7 RPB karışımlarını karıştırmak için kullanılan mikser

3.2.3 Numune Hazırlama

Bu çalışmada her bir karışım için kırk beş numune dökülmüştür. Numune boyutu (100*100*100) mm'dir. Kalıplar herhangi bir sıkıştırma yapılmadan taze beton ile doldurulmuş ve numunelerin dökümü tamamlandıktan sonra; kalıplar nem kaybını önlemek için 24 saat cam panel ile kaplanmıştır.

3.2.4 Kür Koşulları

RPB'nin dökümünden sonra malzemeler Şekil 3.8'de gösterildiği gibi kalıplardan çıkartılmış ve su kürüne alınmıştır. Bu amaçla örnek malzemeler su tankında suyun ısısı 20 ± 2°C olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 3.8 Su kürü

3.3 Yapılan Testler

3.3.1 Çökme Akış Testi

İşlenebilirlik, karıştırmadan hemen sonra ölçülmüştür. Mineral katkıların SCC'nin taze özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için TS EN 12350-8'e göre akış testi yapılmıştır (Şekil 3.11). Bu Avrupa Standardı, kendiliğinden yerleşen beton için çökme akışını ve T500 zamanını belirleme prosedürünü ve engellerin yokluğunda kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlığını ve akış hızını belirler.



Şekil 3.9 YPB karışımlarında gerçekleştirilen çökme akış testi

3.3.2 Birim Ağırlık, Su Emme Oranı ve Prozite Testi

ASTM C642-97 yönetmeliği esasına göre yapılmıştır. Beton numunelerin yoğunluk testi, porozite ve su emme oranları ASTM C642-97'ye göre belirlenmiştir. Betonun gözenekliliği, su, hava, asit ve bazın geçebileceği küçük deliklerle dolu bir yapı anlamına gelmektedir. Gözeneklilik, bir malzemedeki tüm gözeneklerin hacminin, dökme malzemenin hacmine oranı olarak tanımlanabilir. Betonda bulunan gözenekler, karışımların kalıba yerleştirilmesi sırasında yetersiz sıkıştırmanın bir sonucudur. En önemli özellik olan betonun dayanımı de bu gözeneklerden etkilenebilmektedir. Yoğunluk direkt olarak 105°C sıcaklıkta 24 saatlik sürede aşağıdaki formülasyonlara göre (eşitlik 3.1 – 3.7) hesaplanmıştır:

Su emme oranı = [(B - A) / A] x 100 (3.1)

Kaynama ve kür sonrası su emme oranı = [(C - A) / A] x 100 (3.2)

Hacimsel kuru yoğunluk = [A / (C - D)]. ρ (3.3)

Kür sonrası hacimsel yoğunluk = [B / (C - D)]. ρ (3.4)

Kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk = [C / (C - D)]. ρ (3.5)

Görünür yoğunluk = [A / (A - D)]. ρ (3.6)

Porozite = (C - A) / (C - D) x 100 (3.7)

Eşitliklerde;

A = fırında kurutulmuş numunenin açık havadaki kütlesi, (g)

B = daldırma işleminden sonra yüzeyi kuru numunenin açık havadaki kütlesi, (g)

C = daldırma ve kaynatma işleminden sonra yüzeyi kuru numunenin açık havadaki kütlesi, (g)

D = daldırma ve kaynatma işleminden sonra suda görünen numune kütlesi, (g)

g1 = kütle yoğunluğu, kuru (Mg / m^3)

g2 = görünür yoğunluk (Mg / m^3)

ρ = su yoğunluğu = 1 Mg / m^3 = 1 g / cm^3

3.3.3 Yarmada Çekme Dayanımı Testi

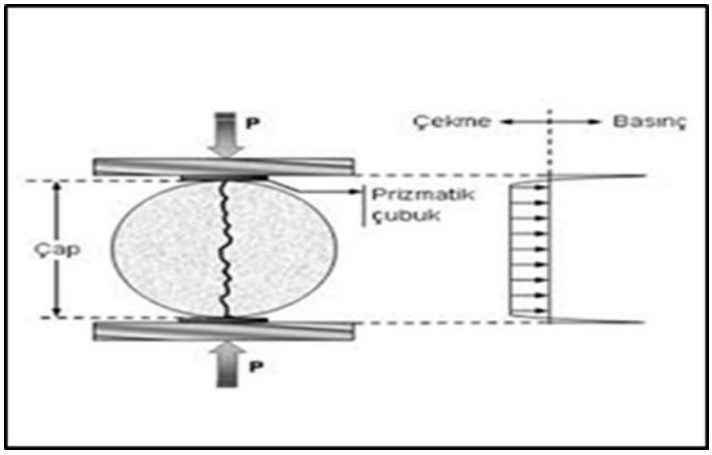
Yapısal hafif beton elemanların tasarımında beton tarafından sağlanan kesme direncini değerlendirmek için yarma çekme mukavemeti kullanılır. Betonun iki metal kenar arasında kesildiğinde vereceği yükü belirlemek için yarma çekme dayanımı testi yapılır (Şekil 3.12). Yarma çekme mukavemeti sonuçları, kesme yüklerine eğilimli film ve levha ürünleri tasarımcıları veya uygulanan ezme yüklerinin riskli olduğu uygulamalar için önemlidir.

Çalışmada ASTM C 496/C 496M – 04'e göre Yarmada Çekme Dayanımı Testi için standart olan 15 x 30 cm boyutlarında silindirik beton numuneleri kullanılmıştır. Yarma çekme mukavemetinin hesaplanması aşağıdaki formül (Denklem 3.8) kullanılarak yapılmıştır:

$$\text{Yarmada Çekme Dayanımı} = 2P/\pi DL \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

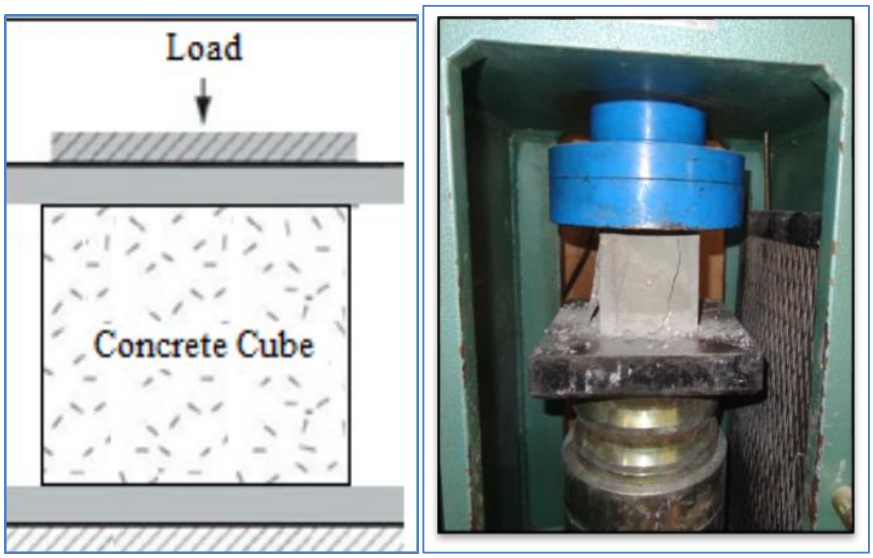
P: maksimum uygulanan yük (N)
D: örnek çapı (mm),
L : örnek silindirin uzunluğu (mm)' nu ifade etmektedir.



Şekil 3.10 Yarmada Çekme dayanımı deneyi

3.3.4 Basınç Dayanımı Testi

American Society for Testing Materials (ASTM) tarafından C39/C39M standardı ve Avrupa Normu tarafından EN 12.390-4 standardı betonun basınç dayanımı için test yöntemleri sağlanmaktadır. 3, 7, 28, 90 ve 360 günlük kürlemeden sonra 10x10x10 cm numunelerin basınç testi yapılmıştır. Numuneler kırılasıya kadar kademeli olarak dakikada 140 kg/cm^2 yük uygulanmalıdır. Numune alanına bölünen kırılmadaki yük, betonun basınç dayanımını vermektedir. Betonun basınç dayanımı Denklem (3.8)'de formüle edilmiş ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Basınç dayanımı testi

$$f_c = P / A \quad (3.9)$$

Burda;

Fc: beton basınç dayanımı (MPa),
P çökme yüküdür (N),
A, numunenin alanıdır (mm2)

3.3.5 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklık etkisi betonun performansı, betonun yapısal bütünlüğünün korunmasını, yangına karşı bozulmaması ve yüksek ısıya mükemmel koruma sağlamasını ifade etmektedir. Bu özellik betonu yangına karşı güvenilir bir malzeme yapmaktadır. Yapısal malzemelerin ve montajların yangın derecesi genellikle testlerle ve birincil ölçü birimleri olarak geleneksel birimlerin ölçüm değerleriyle belirlenmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, bu tür testler genellikle ASTM'ye göre yapılır, "Yangına dayanıklılık testleri için Standart Test Yöntemleri, yapı elemanlarının yük taşıma veya yangın ayırma özellikleri (genellikle yangın direnci olarak adlandırılır) için performanslarını değerlendirmek için tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında üç farklı sıcaklık dikkate alınarak 300 ºC, 450 ºC ve 600ºC sıcaklık etkisine bırakılmış, sonrasında basınç dayanımları belirlenmiştir.



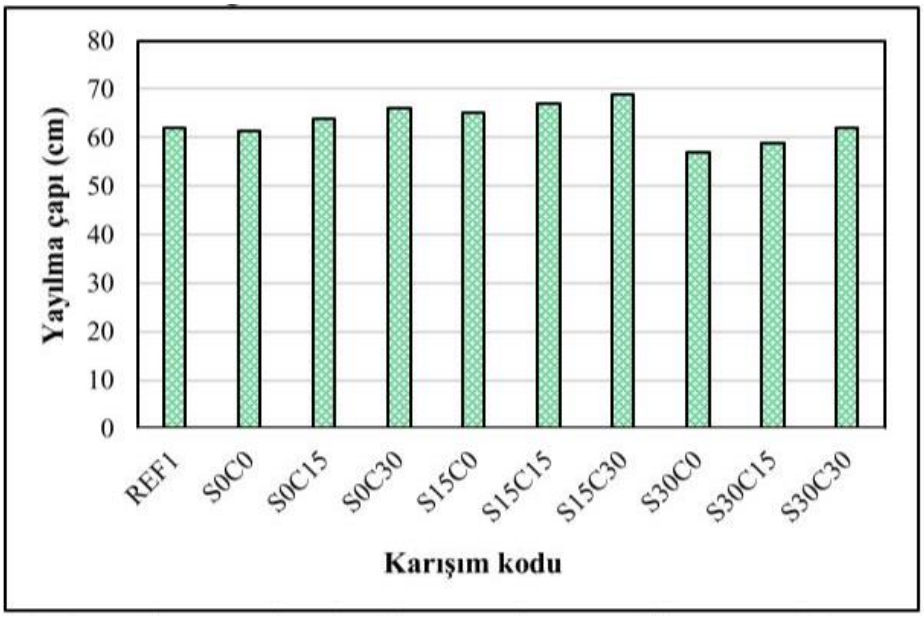
Şekil 3.12 Yüksek sıcaklı etkisi test için kullanılan fırın

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde çökme-yayılma testi, kütle yoğunluğu, gözeneklilik, su emme, basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımı ile yüksek sıcaklık test sonuçlarından elde edilen veriler açıklanmıştır.

4.1 RPB'nin Taze Hal Özellikleri

Çeşitli RPB karışımlarının yayılma çapı testi sonuçları Şekil 4.1'de sunulmuş, SD ve YFC'nin RPB'nin yayılma çapı sonuçları üzerindeki etkileri Şekil 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir.

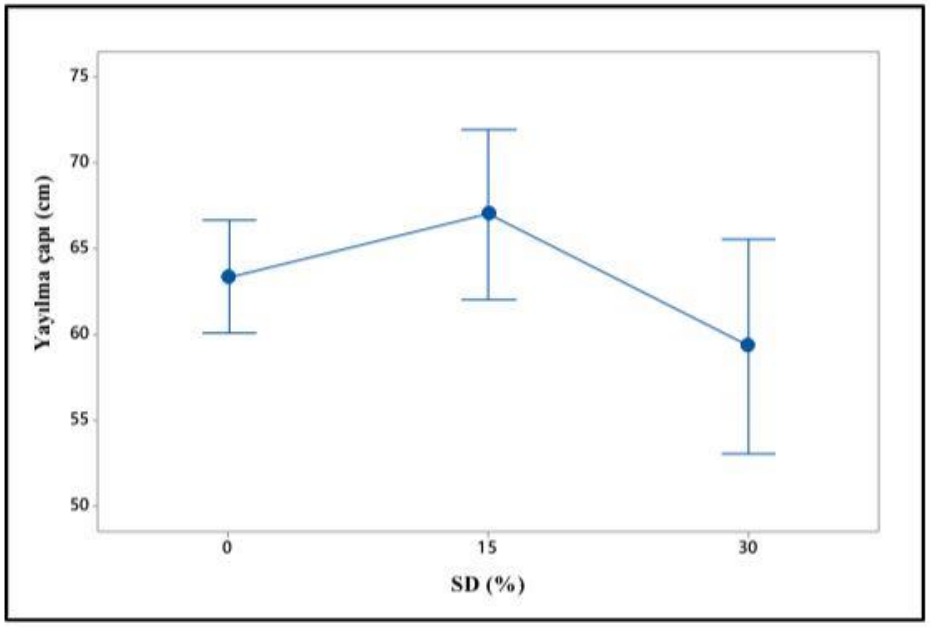


Şekil 4.1 RPB karışımlarının yayılma çapı sonuçları

Şekil 4.1'den, yayılma çapı sonuçlarının 57 cm ile 67 cm arasında değiştiği görülmüş olup, en düşük yayılmanın %30 SD ve %0 YFC ile S30C0 karışımında, en yüksek yayılma çapı ise %15 SD ve %30 YFC içeren S15C30 karışımında belirlenmiştir.

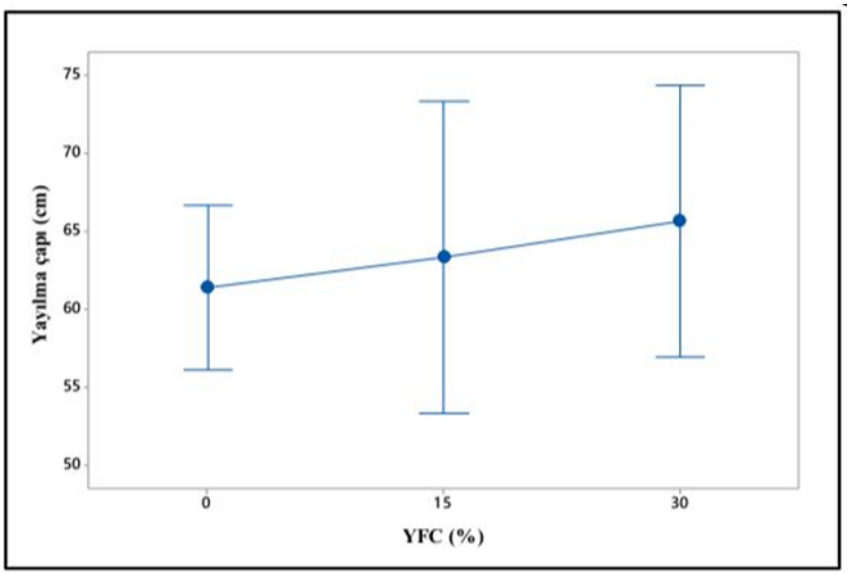
Katkıların etkisi incelendiğinde (Şekil 4.2) ise, SD içeriğindeki %0'dan %15'e artış, yayılma çaplarında değerler ortalamasının SD'deki değişiminde 63,4 cm'den 67 cm'e yükselişini göstermekdedir, ancak %30'dan fazla artış, yayılma çapı sonuçlarında 59,3 cm'ye kadar bir azalmaya neden olmaktadır (Van Tuan vd., 2011). Bu durum %15 Sd

içeriğine kadar yayılma çapındaki artışa neden olduğu, artan oranıyla birlikte yayılmadaki azalışa neden olduğunu göstermiştir. Bu durum ise %10 ile %20 arasında SD ile çimento değişimi karışımların işlenebilirliği üzerinde olumlu bir etkisi olduğu önceki çalışmalar ile de bildirilmiştir. Bu durum, bir kayganlaştırıcı görevi gören SD'nin ince yuvarlak parçacıklarından kaynaklanmıştır. Ancak, %20'den fazla çimento SD ile değiştirildiğinde, süper yayılma çapı miktarı önemli ölçüde armış ve bu SD yüzdesine bağlı olan çimento ile SD karışımının toplam yüzey alanını etkilemesi ile açıklanmıştır. Bu nedenle, daha fazla çimento SD ile yer değiştirildiğinde 'yağlayıcı etkisi' yüzey alanının etkisini telafi etmemiştir. Bunlar (Khayat vd., 2000; Nochaiya vd., 2010; Bani vd., 2017), silis dumanı parçacıklarının daha yüksek yüzey alanlarına bağlı olarak çökme sonuçlarındaki azalmayı ve bunun su ihtiyacının artmasına yol açması da bununla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.2 SD'nin RPB'nin yayılma çapı sonuçları üzerindeki etkisi

Şekil 4.3'te, YFC katkısının yayılma çapına etkisi verilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde YFC içeriğinini %0'dan %15'e ve ardından %30'a artmasıyla birlikte sırasıyla 61,7 cm, 63,3 cm ve 65,6 cm olarak yayılma çapları elde edilmiştir. Sonuç olarak, YFC'nin RPC karışımlarına dahil edilmesi yayılma çapı sonuçlarının iyileştirilmesine yol açmıştır. (Ishak vd., 2017) tarafından belirtildiği gibi, betonun işlenebilirliğinin mineral katkıların parçacık boyutu, özgül yüzey alanı, yer değiştirme seviyesi ve reaktivitesi ile ilişkili olduğu iyi bilinmektedir.



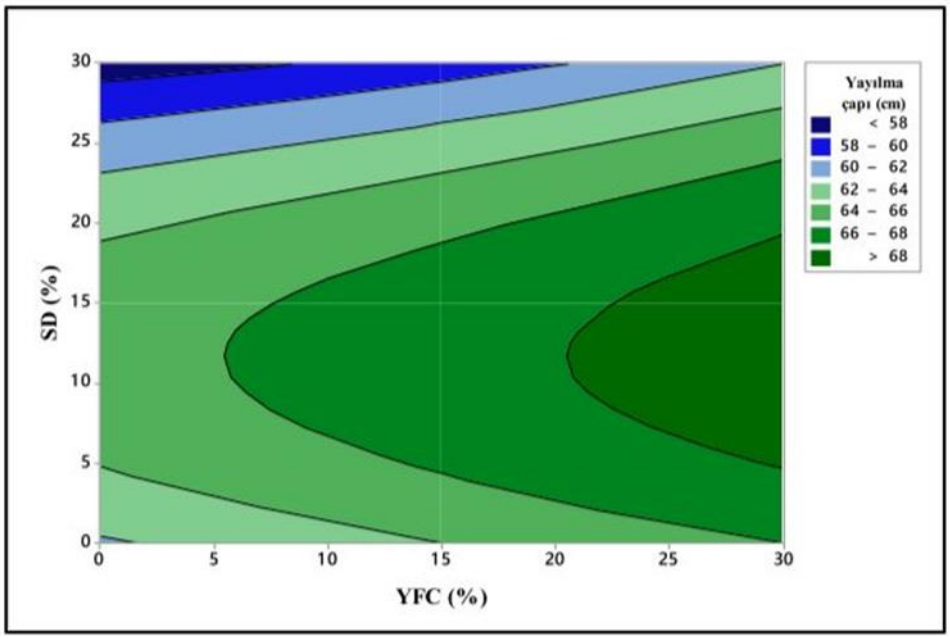
Şekil 4.3 YFC'nin RPB'nin yayılma çapı sonuçları üzerindeki etkisi

Bu çalışmada, YFC ile karışımların yayılma çapını iyileştirmesinin nedeni partiküllerin yuvarlak şekli olmuştur. PÇ'den farklı olarak YFC, yayılma çapındaki iyileşmenin nedeni olarak da değerlendirilebilecek zayıf hidratasyona neden olabilir (Zhao vd., 2015; Bharathi ve Sreekumaran, 2020). YFC partiküllerinin düzgün yüzey dokusu ve yoğun yüzeyinden de kaynaklanabilir, ve ilk karıştırma sırasında PÇ'ye kıyasla %3 daha az su içeriği gerektirir (Ishak vd., 2017).

Chandrakar (2017) YFC %20 kadar kullanıldığında betonun slump değerinin arttığını ve ardından %20'den sonra azaldığını gözlemlemiş, slump değerindeki artışın, cürufun yüksek düzgünlüğü ve inceliğinden kaynaklandığını açıklamıştır. Bu durum matris içindeki havanın sıkışması ile ve ardından macun hacmini artması ile olmuştur. Boukendakdji vd. (2009) ayrıca YFC içeriğini %20'sine kadar çökme değerinde ve yayılma çapında bir artışa neden olduğu, ancak daha yüksek cüruf içeriğinde hem ayrışma hem de viskozite artmasına sebebiyet verdiği açıklanmıştır. Shafigh vd. (2013) YFC değiştirme yüzdesinin %0'dan %30'a çıkarılmasının betonun çökmesini iyileştirdiğini bulmuştur. Bu değiştirme seviyesinin ötesinde, çökme değeri önemli ölçüde azalmıştır. YFC içeriğinin artmasıyla yayılma çapı sonuçlarının azalmasının nedeni, daha ince malzemenin artması, yüzey alanının daha fazla olması ve dolayısıyla yüzeyi ıslatmak için daha fazla suya ihtiyaç duyulması olarak açıklanabilir. Bu nedenle, verilen sabit su miktarı için daha ince malzeme arttıkça işlenebilirlik azalır. (Ranga, 2014; Suresh ve Nagaraju, 2015), YFC içeren taze betonun hareket için daha az enerji

gerektirme eğiliminde olduğunu belirtmiştir. Bu, özellikle mekanik titreşimi pompalarken veya kullanırken yerleştirmeyi ve sıkıştırmayı kolaylaştırır. Ayrıca işlenebilirliğini daha uzun süre korumaktadır.

Şekil 4.4'te, en yüksek yayılma çapı değerlerine ulaşmak için optimum SD ve YFC içerikleri SD'nin %15'i ve YFC'nin %22 ila %30 olduğu belirlenmiştir. En düşük sonuç ise YFC'nin %0'ı ve SD'nin %30'u ile üretilen karışımda elde edilmiştir.

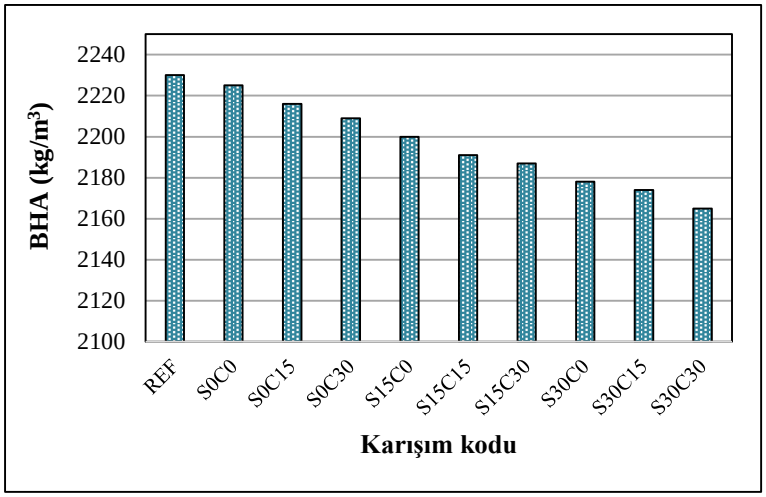


Şekil 4.4 Daha yüksek yayılma çapı sonuçları için optimum SD ve YFC

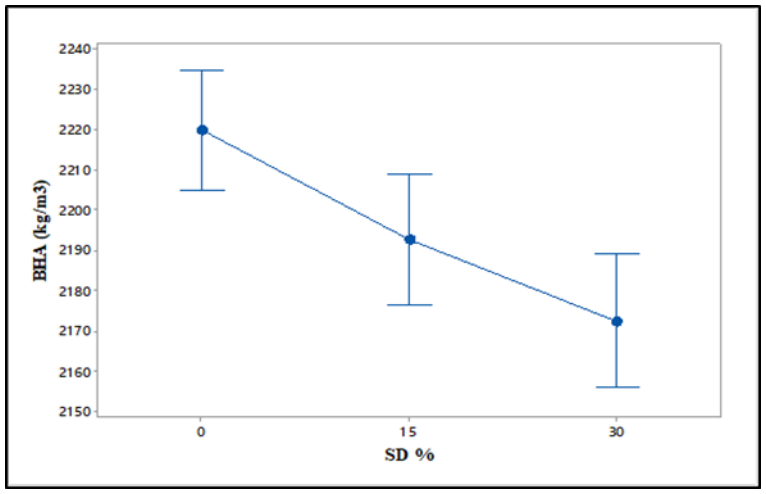
4.2 Birim Ağırlık, Gözeneklilik ve Su Emme Oranı

4.2.1 Birim Hacim Ağırlığı Sonuçları

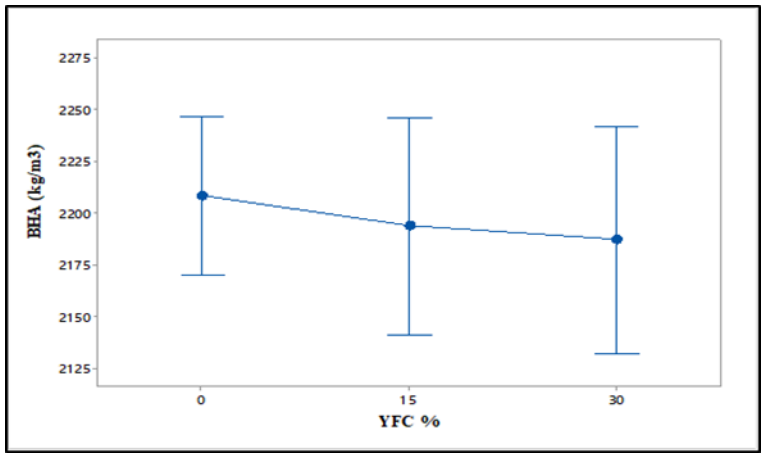
Betonun yoğunluğu, gözenekliliğin belirlenmesinde, dayanıklılık ve dayanımın değerlendirilmesinde ve hidrate Portland çimentosunda CSH fazı için kafes yapısı (lattice sabitleri) tahmininde önemli bir faktördür (Fapohunda vd., 2017). Bu çalışmada, RPC karışımlarının BHA sonuçları Şekil 4.5'te ve SD ve YFC'nin BHA üzerindeki etkileri Şekil 4.6 ve 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 RPB karışımlarının BHA test sonuçları



Şekil 4.6 SD'nin birim ağırlık sonuçlarına etkisi

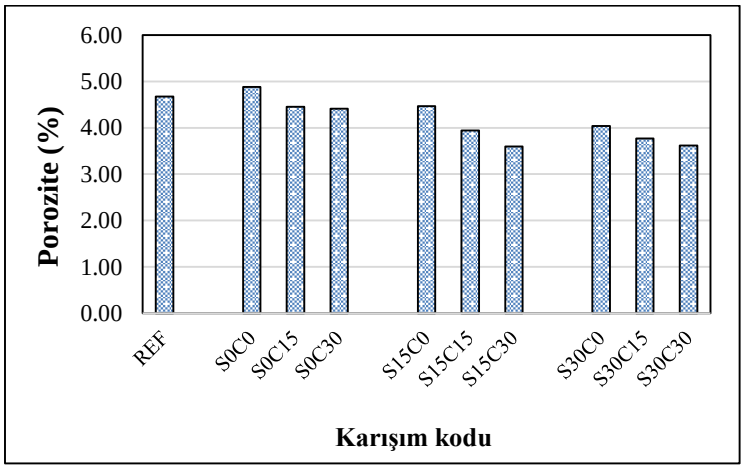


Şekil 4.7 YFC'nin birim ağırlık sonuçlarına etkisi

Şekil 4.5incelendiğinde, RPC karışımlarında çimentonun değiştirilmesi BHA sonuçlarında bir azalmaya neden olmuştur. En yüksek BHA sonucu 2.230 kg/m^3 ile REF karışımına aitken, en düşük sonuç 2.165 kg/m^3 ile S30C30 karışımı ile elde edilmiştir. Şekil 4.6'da, özellikle, SD içeriğindeki %0'dan %15'e ve %30'a artış, BHA ortalama sonuçlarının sırasıyla 2.220 kg/m^3'ten 2.192 kg/m^3'e ve 2.172 kg/m^3'e düşmesine yol açmıştır. Bu, çimentonun özgül ağırlığı ile SD'nin özgül ağırlığı arasındaki farkla ilgilidir (Li, 2011). Bunun nedeni, çimentonun kapladığı alanın kısmen daha hafif bir silis dumanı tozu ile yer değiştirmesi olabilir (El-louh, 2014). Bu çalışmada SD ve çimentonun özgül ağırlığı sırasıyla 2,2 ve 3,08 kg/m^3 olmuştur. YFC içeriğinin artmasıyla (Şekil 4.7) (YFC'nin %0,15 ve %30 olarak artırılması ile) sırasıyla 22.208 kg/m^3, 2.193 kg/m^3 ve 2.187 kg/m^3 BHA sonuçları elde edilmiştir.

4.2.2 Görünür Porozite Sonuçları

RPC karışımlarının gözenekliliğinin sonuçları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Farklı karışımların gözeneklilik değerleri %3,62 ile %4,74 arasında değişmiştir. Gözeneklilik açısından en düşük sonuçları %3,62 ile S30C30 kodlu karışıma, en yüksek sonuçlar ise %4,76 ile REF karışımına aittir. Ayrıca çelik lif ilavesinin gözeneklilik sonuçlarında REF artışına neden olduğu görülmüştür.

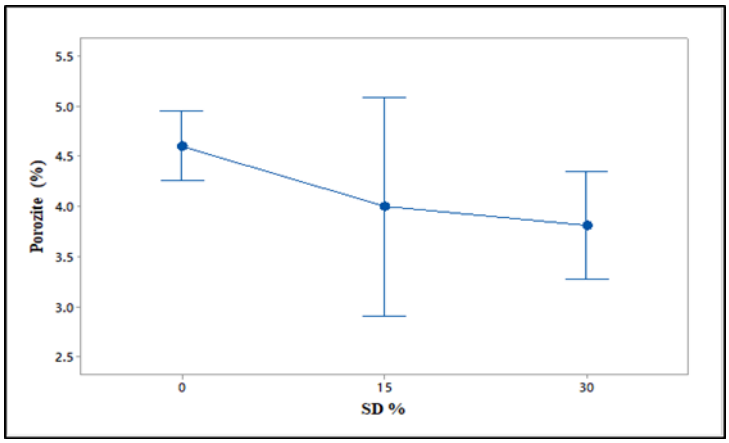


Şekil 4.8 RPC karışımlarının gözeneklilik sonuçları

Şekil 4.8'de, SD içeriğindeki artış, tüm RPC karışımları için gözeneklilik değerlerinde bir azalmaya neden olmuştur. SD'nin %0; %15 ve %30'u sırasıyla %4,6; %4 ve %3,8 ile sonuçlanmıştır. Bu (Gönen, 2007)'nin buldukları ile büyük ölçüde örtüşmektedir.

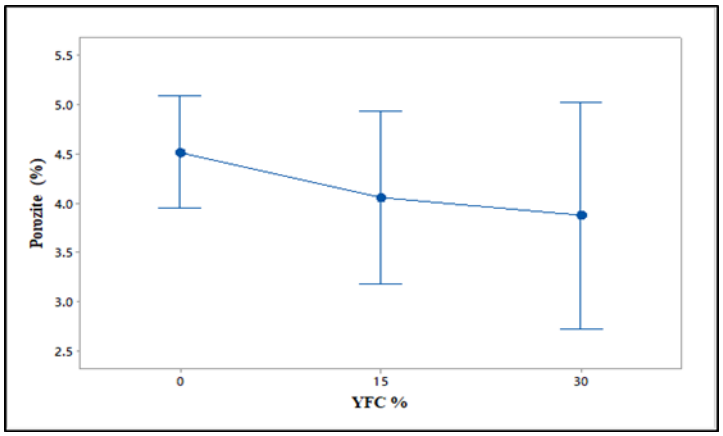
(Allahverdi vd., 2018) hem doldurma mekanizmasıyla hem de ilave kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) üretmek için $Ca(OH)_2$ tüketen puzolanik reaksiyonlarla silis dumanı (SD) gibi ikincil çimentolu malzemelerin eklenmesinin gözenek hacmini azaltmak için kullanıldığını göstermiştir.

SD ve YFC'nin dahil edilmesinin gözeneklilik sonuçları üzerindeki etkisi Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 SD'nin gözeneklilik sonuçları üzerindeki etkisi

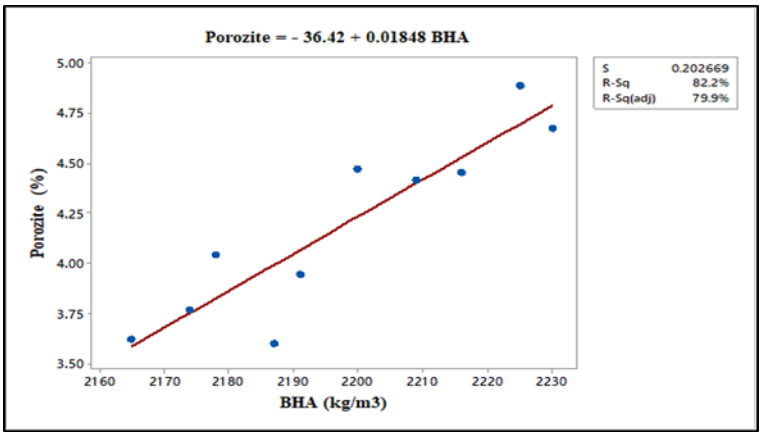
Şekil 4.9 incelendiğinde, YFC'nin artmasıyla, RPC karışımlarının gözeneklilik sonuçlarınıda biraz azalma olmuştur. YFC'nin %0, %15 ve %30'u sırasıyla %4,4, %4 ve %3,8'e ulaşmıştır.



Şekil 4.10 YFC'nin gözeneklilik sonuçları üzerindeki etkisi

Şekil 4.11'da gözeneklilik ve BHA arasındaki ilişki verilmiştir. İlişki, gözeneklilikteki artışın BHA sonuçlarının artışına karşılık geldiğini ifade etmektedir. Bu artış,

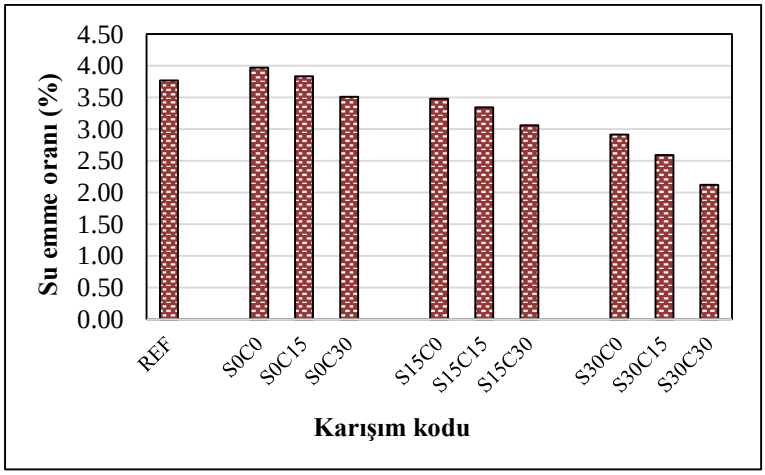
“gözeneklilik = - 36,42 + 0,01848 BHA” denkleminde R^2= 82,2 ilişkisi ile sunulmaktadır. Bu, aynı zamanda gözenekliliğin azalmasına ve BHA'nın azalmasına yol açan YFC ve SD kullanımına atfedilebilir.



Şekil 4.11 Gözeneklilik ve BHA arasındaki ilişki

4.2.3 Su Emme (SE) Oranı Deney Sonuçları

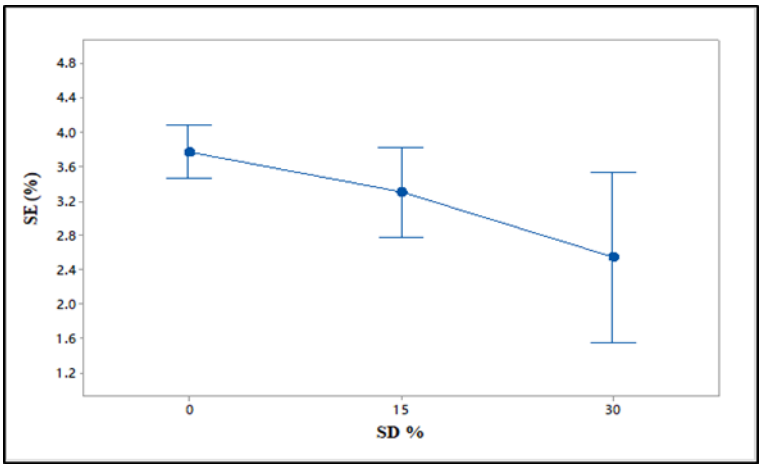
RPB karışımlarının SE sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 RPB karışımlarının su emme sonuçları

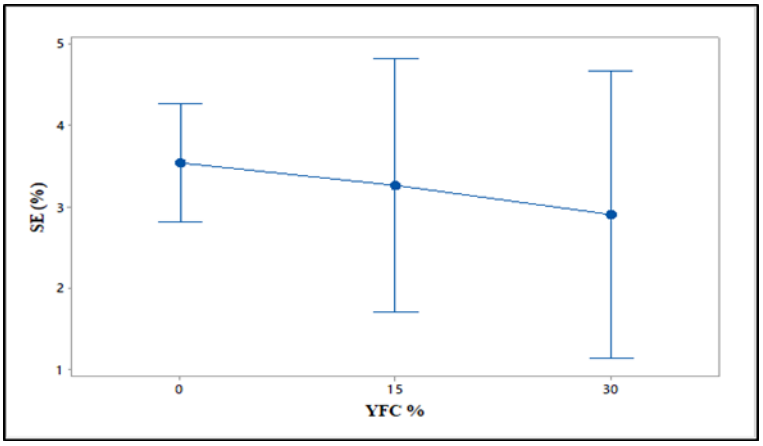
Şekil 4.12 incelendiğinde, çimento ile SD ve YFC ikamesi, tüm RPC karışımları için su emme oranı (SE) değerlerinin düşmesine yol açmıştır. En yüksek sonuç %3,77 ile REF karışımı ile elde edilirken, en düşük sonuç %2,12 ile S30C30 karışımına ait olmuştur. Genel olarak, bu çalışmada RPB karışımlarının SE sonuçları %5'ten düşüktür. Kaliteli harcın su emmesinin genellikle %5'in altında olduğu bildirilmiştir. Ayrıca çimento

esaslı malzemelerin %5 ve üzeri, %3–5 ve %0–3 olan başlangıç su emme değerleri için sırasıyla zayıf, orta ve iyi olarak sınıflandırılabileceği belirtilmiştir (Aprianti vd. 2016). Başka çalışmalarda ise yüksek kaliteli bir betonun nihai emmesinin %5'ten az olması gerektiğini Shetty, 2001; Sabet vd., 2013; Ahari vd., 2015 tarafından bildirmiştir. Bu sınıflandırmaya göre, bu çalışmada hazırlanan tüm SCC karışımları su emme açısından yüksek kaliteli olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 4.13 SD'nin SE sonuçları üzerindeki etkisi

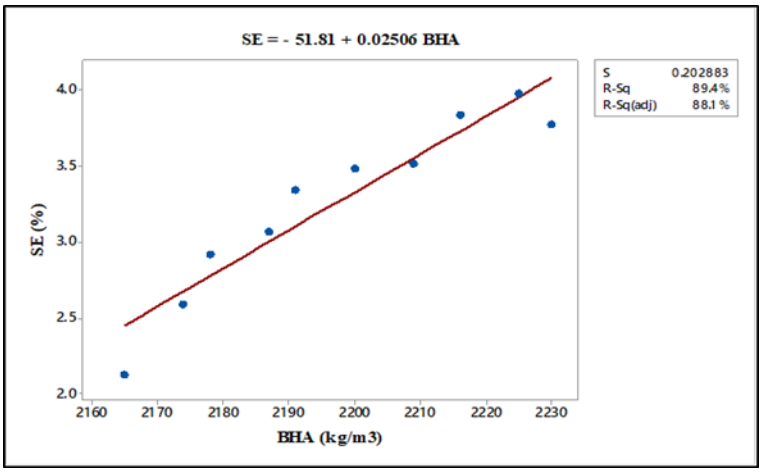
SD su emme sonuçlarının etkisi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Sonuçlar SD, RPB'nin tüm karışımlarında birim ağırlık değerlerini azalttığını göstermiştir. Böylece %0, %15 ve %30 oranında SD ile çimento ikamesi SE değerlerini sırasıyla %3,7; %3,2 ve %2,5 oranında azaltmıştır.



Şekil 4.14 YFC'nin SE sonuçları üzerindeki etkisi

Su emmesindaki azalmanın nedeni, çimento hamurunda gözenek yapısında azalmaya yol açan puzolanik reaksiyona bağlanmaktadır. Bu nedenle puzolanik malzemelerin su emmesine etkisi sonraki yaşlarda olması beklenmektedir. Puzolanik malzemelerin çimento esaslı matris üzerindeki bir diğer etkisi, özellikle erken yaşlarda gözenek doldurma kabiliyetleridir (reaksiyona girmemiş partiküllerin katkısı) ve buna bağlı olarak su emilimini azaltması beklenmektedir (Amed ve Kabay, 2013).

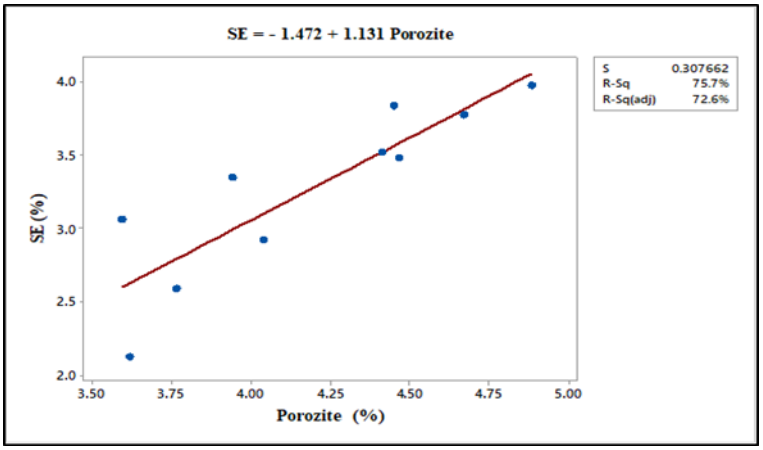
Şekil 4.14'te YFC'nin artması su emme değerlerini bir miktar azaltmasına neden olduğunu göstermiştir. Böylece YFC'nin %0, %15 ve %30'u ile SE %3,5, %3,2 ve %2,9 olarak bulunmuştur. Bu, daha önce belirtildiği gibi YFC'nin dolgu etkisine neden olan ve çimento hamurunda gözenek yapısında azalmaya neden olan puzolanik reaksiyona atfedilmiştir (Amed ve Kabay, 2013). Chi vd. (2018), YFC ile çimento değiştirme yüzdesinin artmasıyla, SE azaldığını bildirmiştir, ve YFC içeren betonun düşük SE'sı YFC'nin partikül doldurma etkisinden olduğunu açıklamıştır.



Şekil 4.15 SE ve RPB'nin BHA'sı arasındaki ilişki

Şekil 4.15'te BHA ve SE arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde SE değerleri BHA ile arttığı ve istatistiksel olarakta R^2=89,4 ile "SE = - 51,81 + 0,02506 BHA" ilişkisi olduğu belirlenmiştir.

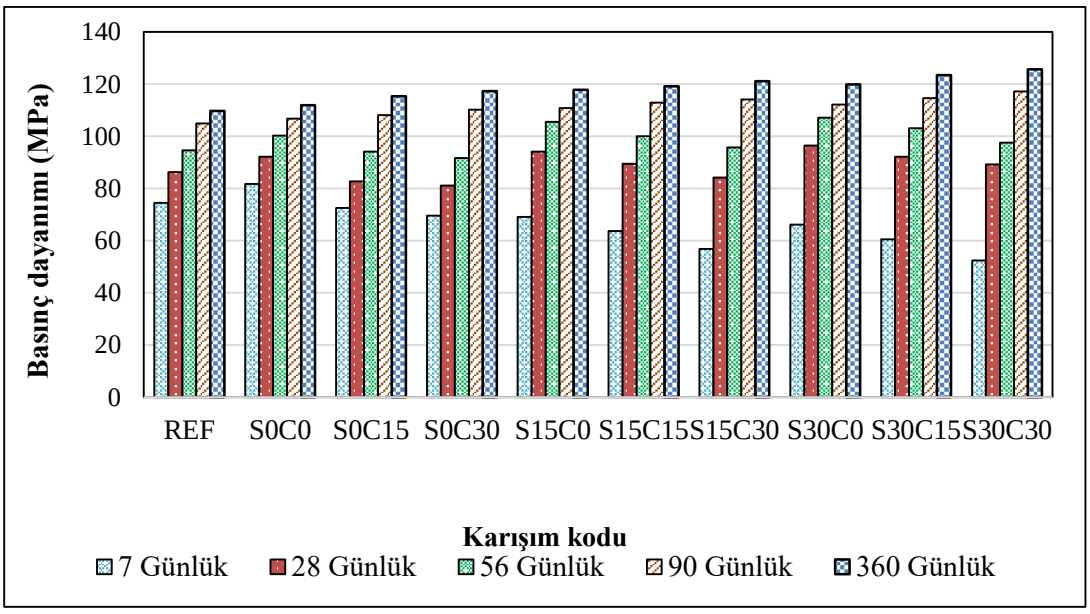
Şekil 4.16 SE ve gözeneklilik sonuçları arasındaki ilişki verilmiştir. Yayılma çapın artmasıyla gözenekliliğin arttığı gözlenmiştir. Bu, gözenekliliği ve su emme sonuçlarını aynı zamanda azaltan YFC ve SD'nin varlığına bağlıdır. İstatistiksel olarak ilişki, R^2=44,5 ile "SE = - 1,472 + 1,131 gözeneklilik" şeklinde sunulmaktadır.



Şekil 4.16 SE ile RPB'nin gözenekliliği arasındaki ilişki

4.3 Basınç Dayanımı Sonuçları

7, 28, 56, 90 ve 360 günlük RPB karışımları için basınç dayanımı test sonuçları Şekil 4.16'da verilmiştir.



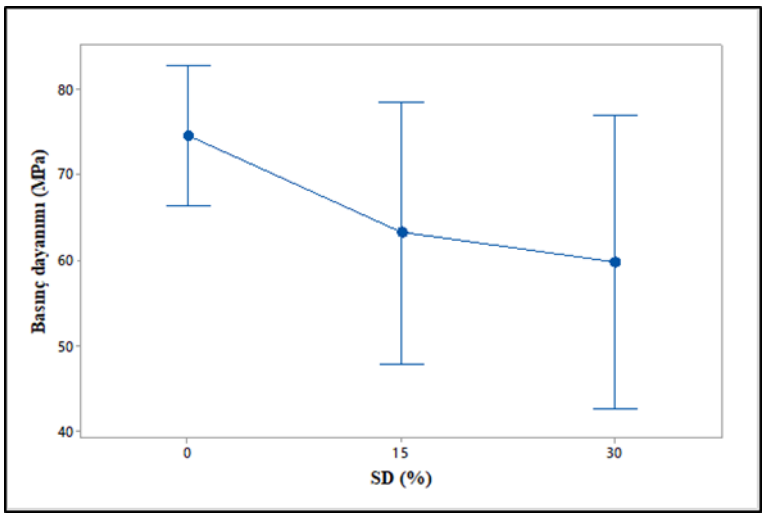
Şekil 4.17 RPB karışımlarının basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.17'da görüldüğü gibi, herhangi bir çimento değiştirimi olmayan REF karışım 7. günde en yüksek basınç dayanımı sonuçlarını elde etmiştir. Ancak %1,2 ÇL içeren S0C0 karışımı, REF karışımından daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu elde edilmiştir. RPB numunelerden en yüksek basınç dayanımının sonucu 81,7 MPa olmuştur. 7. günde en düşük basınç dayanımı sonuçları S30C30 %30 SD ve %30 YFC

numunelerine aittir. 28 ve 56 günlükte en yüksek basınç dayanımı sonuçları hazırlanan S30C0 karışımına ait olup, bu karışım 28 ve 56 günlerde sırasıyla 96,5 MPa ve 107,2 MPa değerine ulaşmıştır. En düşük sonuçlar 28 ve 56 günlerde sırasıyla 81,2 MPa ve 91,7 MPa olmuştur ve S0C30 karışımına aittir. 90 günde, REF karışımı 107,9 MPa ile en düşük basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. En yüksek sonuçlar ise 117,2 MPa olmuştur ve S30C30 karışımına aittir. Ayrıca sonuçlar, genel olarak tüm beton numunelerin kür yaşının artmasıyla basınç dayanımında sürekli bir artış sergilediğini göstermiştir. 360 günde, REF karışımı 109,8 MPa ile en düşük basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. En yüksek sonuçlar ise 125,7 MPa olmuştur ve S30C30 karışımına aittir.

4.3.2 SD'nin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

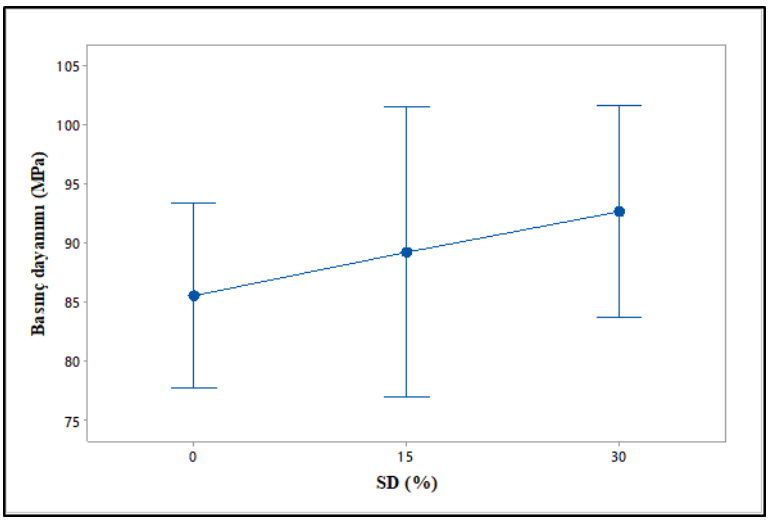
SD'nin 7, 28, 56, 90 ve 360 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.18 SD'nin 7 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi

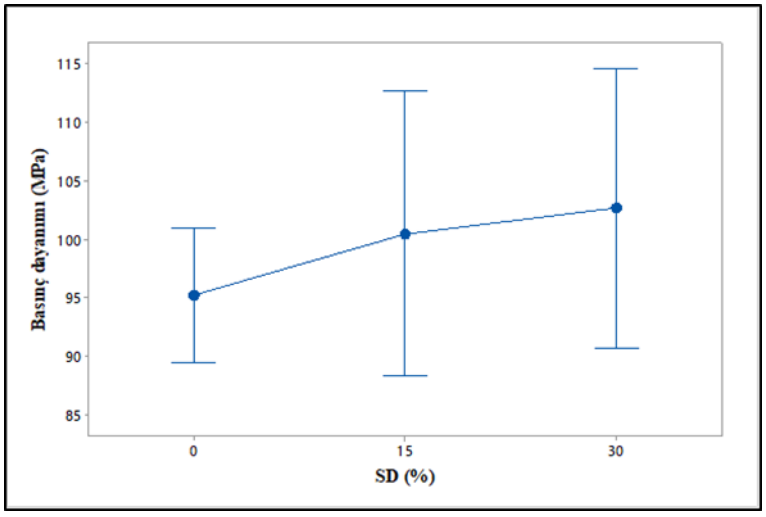
Şekil 4.18'de, SD'nin dahil edildiğinden dolayı 7 günlük RPB karışımlarının basınç dayanımında bir azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. SD'nin %0, %15'i ve %30'u sırasıyla 74,6 MPa, 63,2 MPa ve 59,7 MPa'ya ulaşmıştır. Betonun erken yaşlarında silis dumanın belirli bir seviyede reaksiyona girebilmesi, ve daha sonra silis dumanının hidratasyon reaksiyonuna katılmaması, en zayıf noktasıda betonda inert olarak kalması ile açıklanabilir (El-louh, 2014).

Şekil 4.19'de 28 günde, SD'nin %0,15 ve %30'unun dahil edilmesi sonucunda 85,6 MPa, 89,3 MPa ve 92,6 MPa'ya ulaşmıştır. Sonuç olarak, SD içeriğindeki artış, 28 günde basınç dayanımı sonuçlarının iyileşmesine yol açmıştır. (Rao, 2003)'ya göre, SD'nin dayanımı geliştirmesinden üç mekanizma sorumlu olmuştur: (i) gözenek boyutu iyileştirme ve matris yoğunlaştırma yoluyla dayanımı geliştirme, (ii) $Ca(OH)_2$ (CH) içeriğinde azalma ile mukavemet artışı ve (iii) çimento hamuru-agrega ara yüzey bölgesi iyileştirmesi ile dayanımı geliştirme.



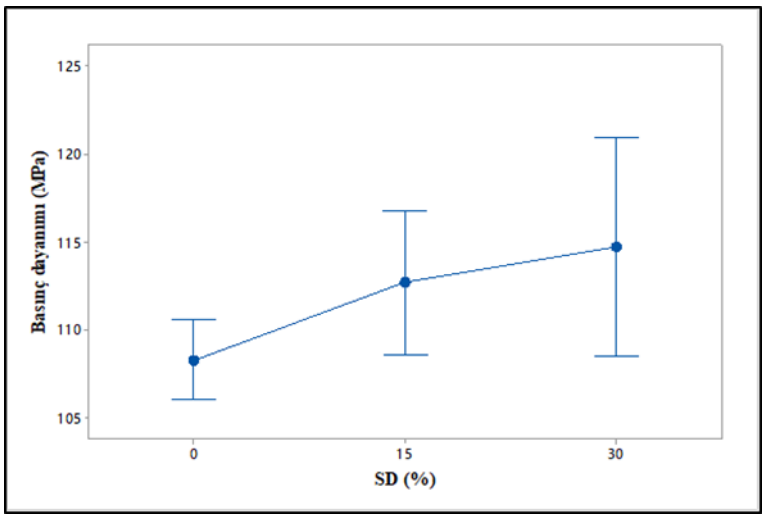
Şekil 4.19 SD'nin 28 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

Şekil 4.20'da, SD'nin yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımın sonuçlarında iyileşme gözlemlenmiştir. %0, %15 ve %30'luk basınç dayanımı değerleri sırasıyla 95,2 MPa, 100,5 MPa ve 102,6 MPa olarak elde edilmiştir. Silis dumanı (SD) ve kalsiyum hidroksit (CH), Portland çimentosu hidratasyonunu artırabilen ve C-S-H jelleri dahil olmak üzere hidratasyon üretim miktarını geliştirebilen puzolanik reaksiyonu gerçekleştirir. Portland çimentosuna kıyasla silis dumanının geniş özgül yüzey alan-hacim, RPB içeriğinin mikro gözeneklerinin doldurulmasına ve çimento hamurunun paketleme yoğunluğunun artmasına ardından basınç dayanımı dahil olmak üzere RPB'nin mekanik özelliklerinin artmasına neden olur. Ek olarak, silis dumanının (SD) dahil edilmesi, arayüzey geçiş bölgesinin yapısı üzerinde fark edilir derecede olumlu bir etkiye sahiptir ve bu aynı zamanda RPB'nin basınç dayanımını arttırmayı da açıklayabilir (Mostofinejad vd., 2016).

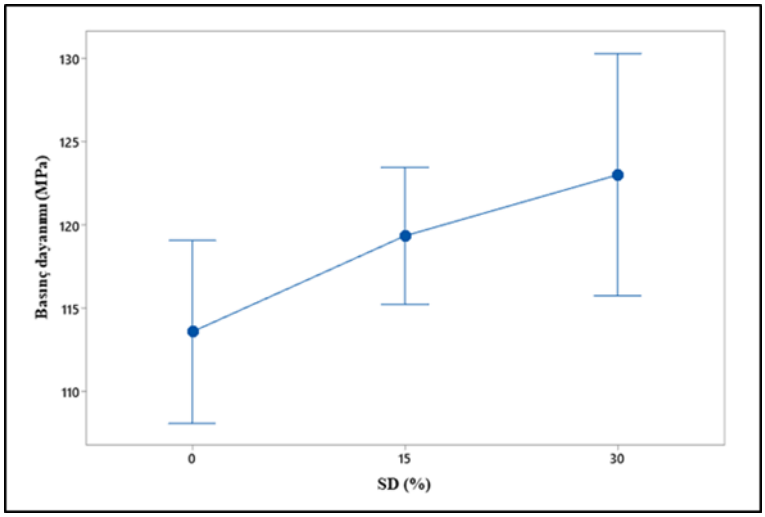


Şekil 4.20 SD'nin 56 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi

28 ve 56 günde olduğu gibi, SD içeriğindeki artış, 90 ve 360 günde açıkça basınç dayanımı değerlerinin iyileşmesine yol açmıştır. 90 günde %0, %15 ve %30 sırasıyla 108,3 MPa, 112,7 MPa ve 114,7 MPa'ya ulaşmışken (Şekil 4.21), 360. günde %0, %15 ve %30 oranlarında sırasıyla 113,6 MPa, 119,4 MPa ve 123 MPa'ya ulaşmıştır (Şekil 4.22).



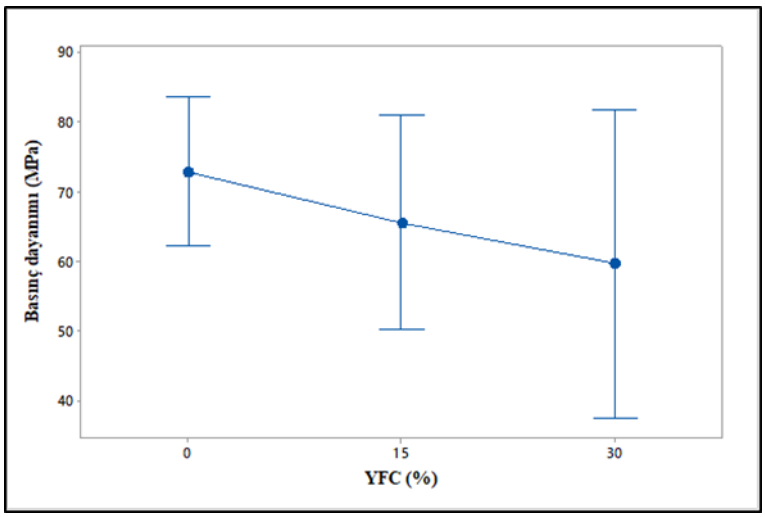
Şekil 4.21 SD'nin 90 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi.



Şekil 4.22 SD'nin 360 günde basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

4.3.3 YFC'nin Basınç Dayanımın Üzerindeki Etkisi

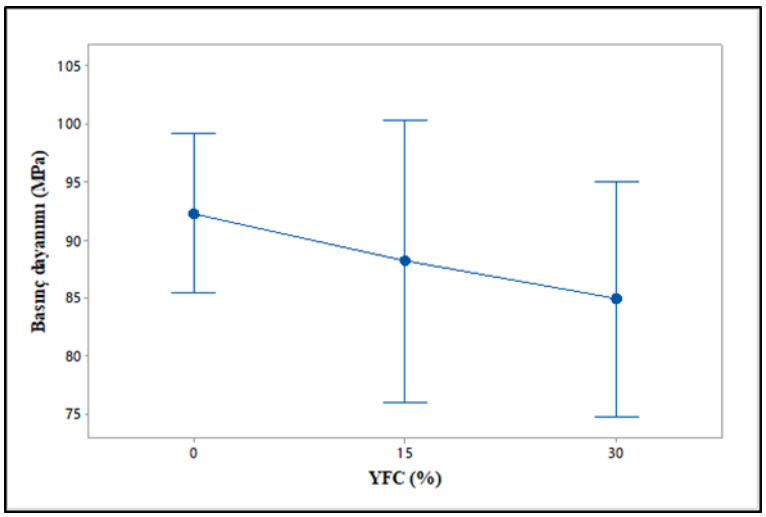
YFC'nin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.23 YFC'nin 7 gün içinde basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

Şekil 4.22 incelendiğinde, YFC içeriği arttıkça 7 günlük basınç dayanımı artmıştır. %0, %15 ve %30 oranında YFC ile çimento ikameli RPB karışımları, 72,8 MPa, 65,6 MPa ve 59,6 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Basınç dayanımındaki bu azalma, YFC'nin PÇ'ye kıyaslayarak daha düşük bir CaO 'ya (yani >%60) sahip olmasına bağlanmaktadır. YFC'de bir artışla, Cao içeriği azalmıştır, bu da Gholampour ve Özbakkaloğlu, 2017'de belirttiği gibi daha erken yaş dayanımlarına yol açılmış ve daha düşük hidratasyon

seviyesi ile sonuçlanmıştır. Bu aynı zamanda %100 PÇ ile hazırlanan numunelere kıyaslayarak YFC'nin yavaş puzolanik reaksiyonuyla da ilgili olduğunu göstermiştir (Gholampour ve Özbakkaloğlu, 2017). Bu durum betonun 3. veya 7. günlerdeki gibi erken yaşlarında bir dezavantaj olsa da, 28 gün ve üzeri yaşlar için dayanımın yavaş gelişmesi bir avantajdır. GGBFS içeren beton, PÇ betona göre daha sonraki yaşlarda daha yüksek oranda dayanım kazanmaya devam etmektedir (Siddique ve Cachim, 2018).

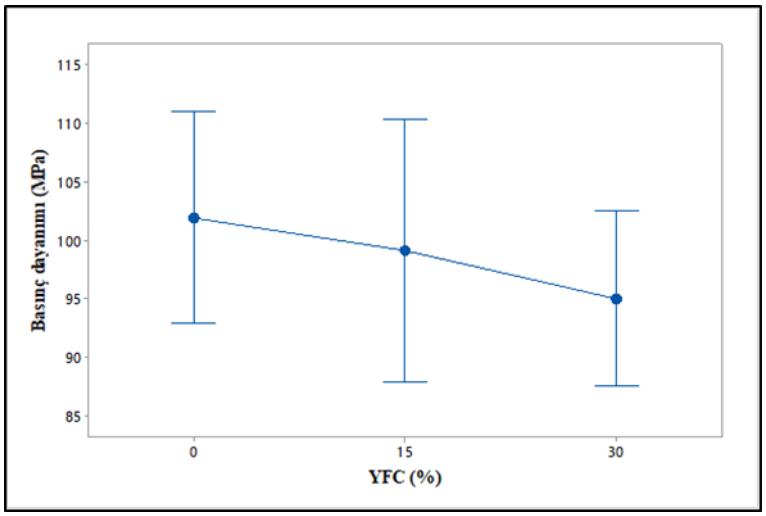


Şekil 4.24 YFC'nin 28 gündeki basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

Şekil 4.23, 28 günlükte YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.23'de görüldüğü gibi 7 günlükte olduğu gibi YFC katkı yüzdesindeki basınç artışı dayanımı değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Böylece YFC'nin %0, %15 ve %30'u 92,3 MPa, 88,1 MPa ve 84,9 MPa'ya ulaşmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, YFC'li beton, (Gholampour ve Özbakkaloğlu, 2017; Siddique ve Cachim, 2018) tarafından bildirildiği gibi 28 günlük yaştan sonra daha sonraki yaşlarda dayanım kazanmaktadır. Ayrıca, GGBS içeriği %20'den fazla olan karışımlar için basınç dayanımında bir azalma gözlenmiştir. Dayanımdaki azalmanın nedeni, YFC partikülleri tarafından üretilen düşük yoğunluklu C-S-H jelin varlığıdır. Ayrıca (Bharathi ve Sreekumaran, 2020) tarafından belirtildiği gibi puzolanik aktivite için mevcut serbest kalsiyum hidroksitin yetersizliğine de atfedilebilir.

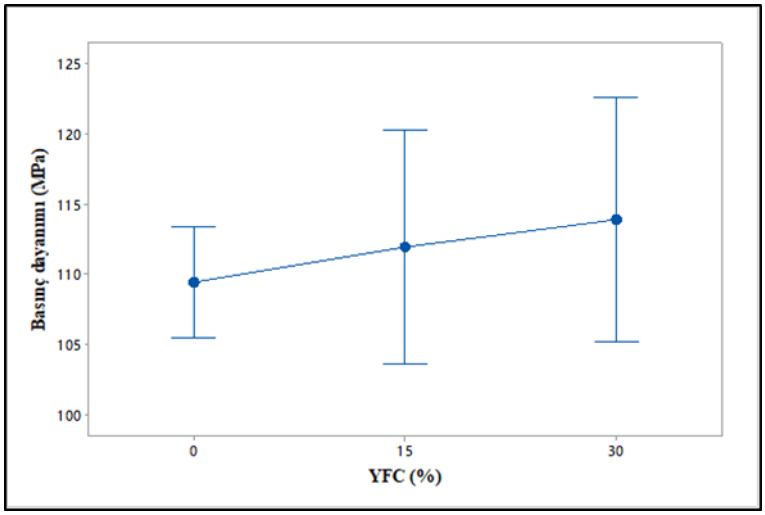
56 günde (Şekil 4.24), YFC içeriğindeki %0'dan %15'e ve %30'a artış, sırasıyla 101,9 MPa, 99,1 MPa ve 95 MPa olarak basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Kaïkea vd.

(2014) tarafından belirtildiği gibi, YFC ile betonun basınç dayanımı, SF'ye göre daha düşüktür. Bunun başlıca nedeni, normal sıcaklıkta YFC'nin puzolanik reaksiyonunun yavaş bir işlem olmasıdır.

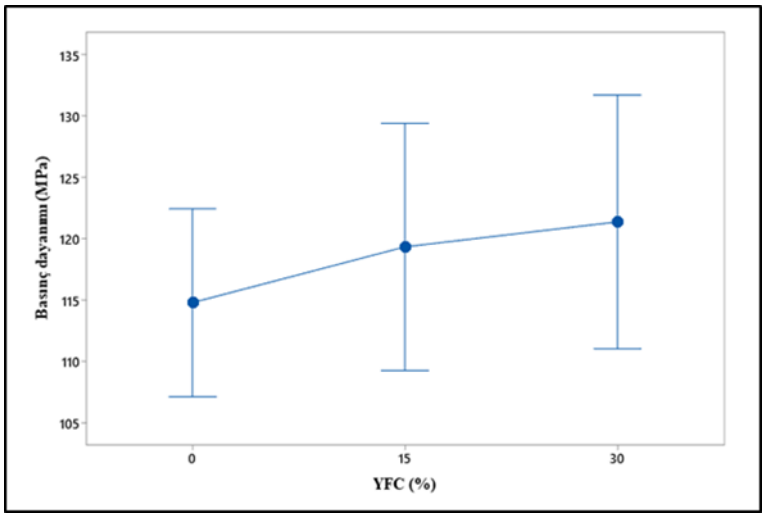


Şekil 4.25 56 günlükte YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi

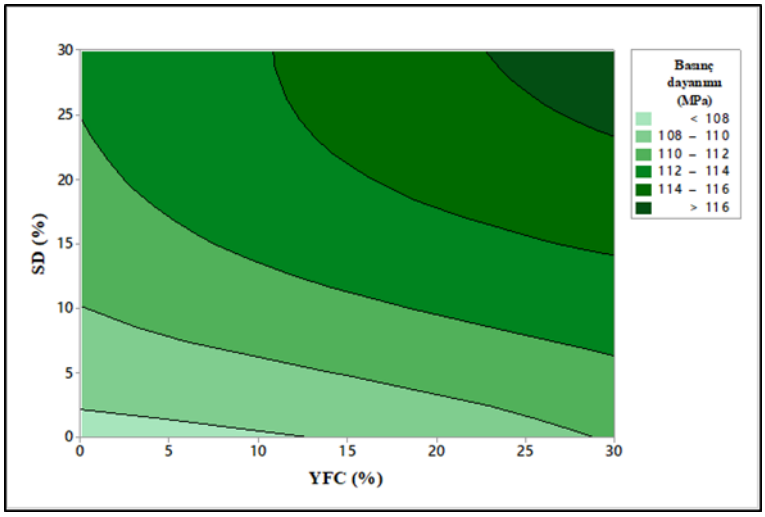
Şekil 4.25'te ve Şekil 4.26'da, 90 ve 360 günlük RPB karışımlarında YFC'nin dahil edilmesi, basınç dayanımı değerlerinin iyileştirilmesine yol açmıştır. 90 günde, Böylece sırasıyla %0, %15 ve %30 YFC içeren karışımlar için 109,5 MPa, 112 MPa ve 113,8 MPa elde edilmiştir. 360 günde, 114,8 MPa, 119,4 Mpa ve 121,4 Mpa elde edilmiştir. Thomas ve Rajaselvi (2016), YFC ile optimum yer değiştirmenin %30 olduğunu ve %30'un üzerinde tüm dayanım değerlerinin normal betona göre azaldığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, beton karışımındaki tatmin edici YFC ikame seviyesi, %40 ila %50 aralığında gözden geçirilmiştir. Cüruf içeren betonun mukavemeti, ilk yaşlarda daha düşük olma eğilimindedir, ancak (Ishak vd., 2017) tarafından belirtildiği gibi sonraki yaşlarda sürekli olarak iyileşmektedir. Bapat (2012) cürufun daha ince hidratasyon ürünlerinin oluşması nedeniyle basınç dayanımını iyileştirdiğini açıklamıştır.



Şekil 4.26 90 günlükte YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi



Şekil 4.27 360 günlükte YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi

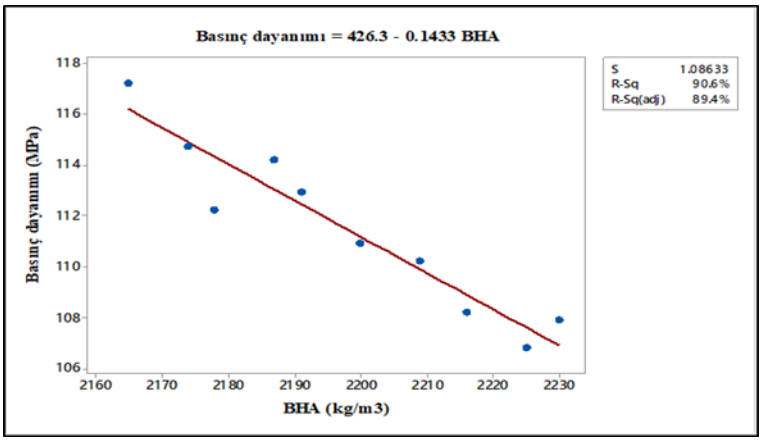


Şekil 4.28 90 günlükte SD ve YFC'nin optimum yüzdeleri

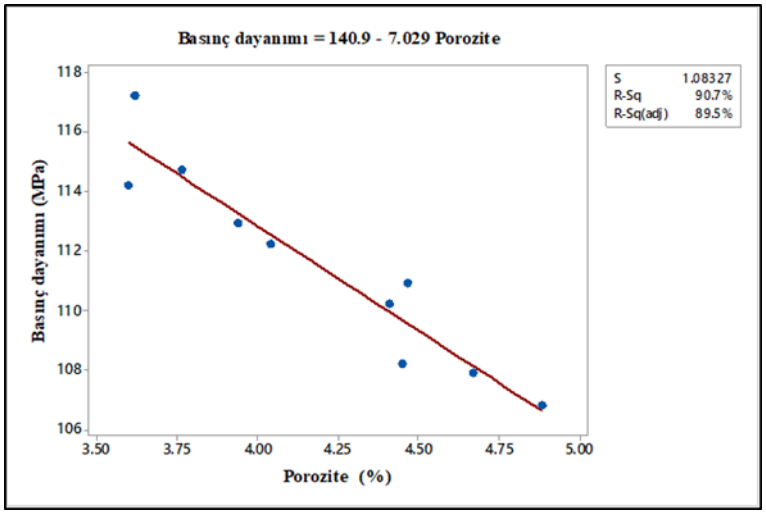
RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımı için optimum SD-YFC oranları Şekil 4.27'te gösterilmiştir. hedef basınç dayanımı 114 - > 116 MPa arasında alındığında, bu derecedeki basınç dayanımını elde etmek için SD ve YFC'nin optimum yüzdeleri SD ve YFC için %30'dur.

4.3.4 Basınç Dayanımı ile BHA, Gözeneklilik ve SE Arasındaki İlişki

Şekil 4.28'de basınç dayanımı ve BHA arasındaki ilişki sunulmaktadır. İlişki, basınç dayanımındaki artışın BHA sonuçlarının azalmasına karşılık geldiğini ifade etmektedir. Bu artış, bu "Basınç dayanımı = - 98,74 + 0,09431 BHA'' denkleminde R^2= 90,6 ilişkisi ile sunulmuştur. Bu, 90 günlükte basınç dayanımının artmasına, aynı zamanda BHA'nın azalmasına neden olan YFC ve SD kullanımına bağlıdır.

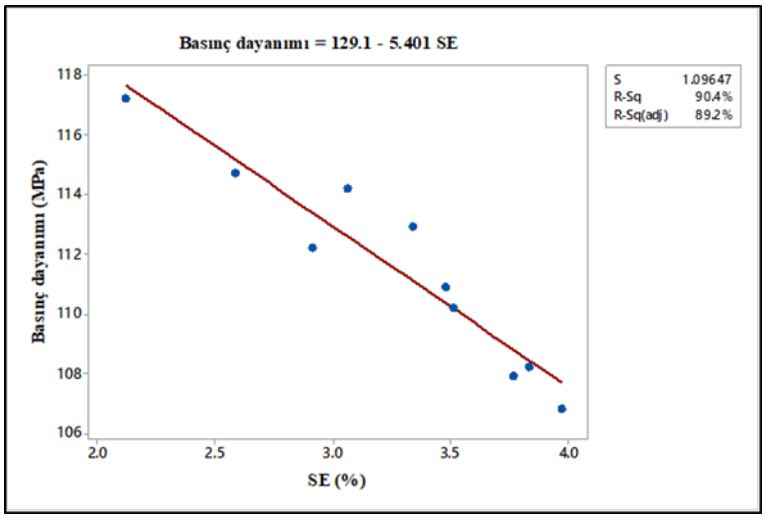


Şekil 4.29 90 günlükte basınç dayanımı ile BHA arasındaki ilişki



Şekil 4.30 90 günlükte basınç dayanımı ile gözeneklilik arasındaki ilişki

Şekil 4.29, 90 günlükte gözeneklilik ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 4.29 incelediğinde, basınç dayanımının artması, gözenekliliğin azalmasıyla olmuştur. İstatistiksel olarak 90 günlükte RPB'nin basınç dayanımı ile gözenekliliği arasındaki ilişki "Basınç dayanımı = 140,9 – 7,029 gözeneklilik" ile %90,7 korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile ifade edilmiştir.

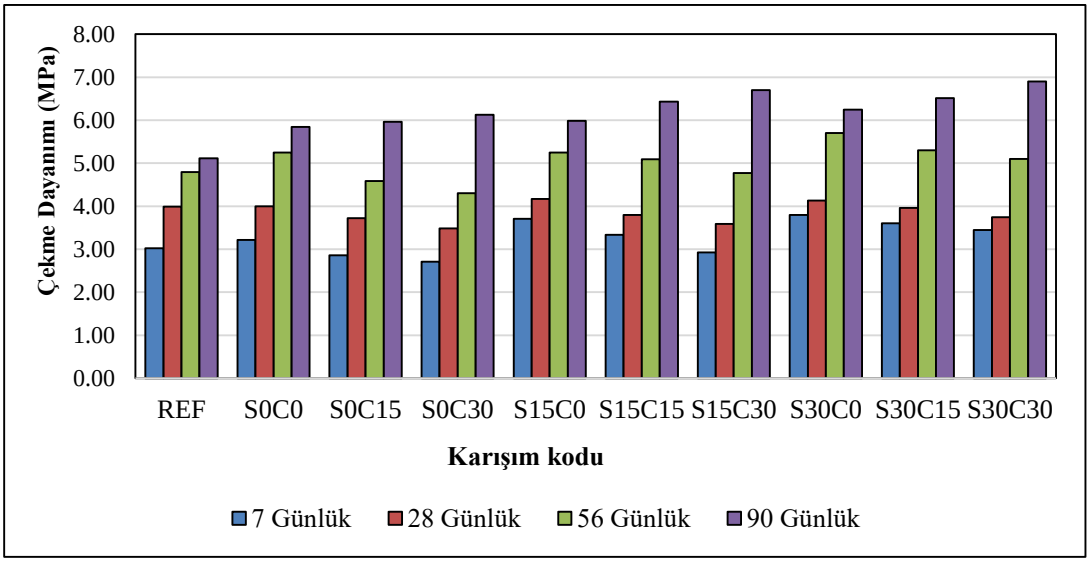


Şekil 4.31 90 günlükte basınç dayanımı ile SE arasındaki ilişki

Şekil 4.29'de 90 günlükte su emme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki verilmektedir. Şekilden, basınç dayanımının artması, su emmesinin azalmasıyla olmuştur. İstatistiksel olarak basınç dayanımı ile su emme arasındaki ilişki "Basınç dayanımı = 129,1 – 5,401 SE" ile korelasyon katsayısı (R^2) %90,4 olarak belirlenmiştir.

4.4 Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

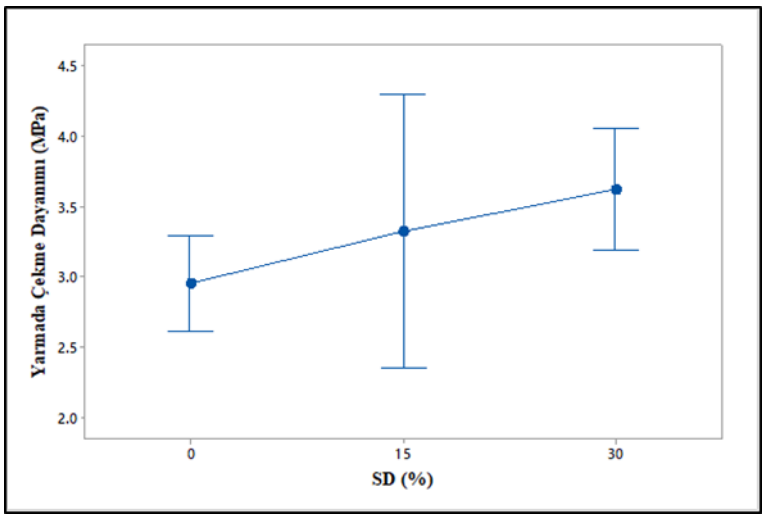
Yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.29'da incelendiğinde 7 günlük dayanımların 2,7 MPa ile 3,8 MPa arasında değiştiği, en yüksek dayanımınsa S30C0 kodlu karışıma, en düşük sonuç ise S0C0 kodlu karışıma ait olduğu belirlenmiştir. 28 ve 56 günlük dayanımlarda, aynı karışımlardan en yüksek ve en düşük sonuçlar elde edilmiştir. S30C0 karışımının en yüksek yarmada çekme dayanımının değeri 4,14 MPa ve 5,7 MPa'ya ulaşırken, en düşük değerler 3,48 MPa ve 4,31 MPa olup S0C30 karışımına aittir. En yüksek sonuç 6,9 MPa ile S30C30 karışımına, en düşük sonuç ise 5,1 MPa ile REF karışımına aittir.



Şekil 4.32 RPB karışımlarının yarmada çekme dayanımı sonuçları

4.4.2 SD'nin Yarmada çekme dayanımı Üzerindeki Etkisi

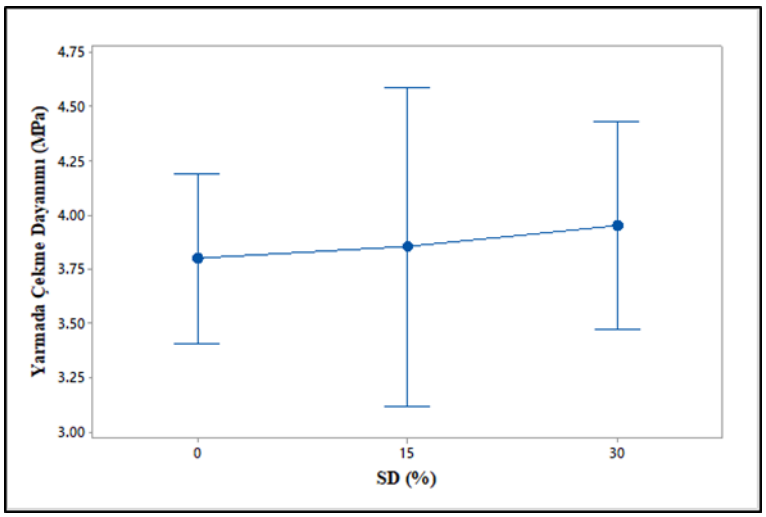
SD'nin Yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 4.32, 4.33, 4.34 ve 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4.33 7 günlükte SD'nin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi.

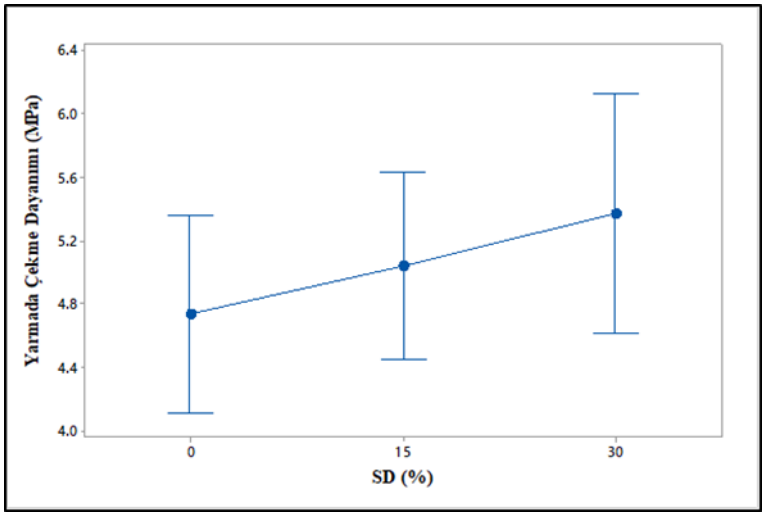
Şekil 4.32'da SD içeriğindeki artışın 7 günlükte yarmada çekme dayanımının artmasına yol açtığı bulunmuştur. SD 2,9 MPa'nın %0; %15'i ve %30'u ile sırasıyla 3,3 MPa ve 3,6 MPa elde edilmiştir. Esas olarak (Eren ve Çelik, 1999) tarafından belirtildiği gibi daha yüksek SD içeriği ve küçük en-boy oranı ile elde edilen yüksek derecede sıkıştırmadan kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar göre, silis dumanı kullanımına

bağlı olarak geliştirilen daha iyi bir bağlanma olarak doğrulanabilir, Arayüz Geçiş Bölgesini (ITZ) daha yoğun hale getirmenin en etkili yolu, bölgedeki büyük gözeneklerin çoğunu ortadan kaldırır ve çimento hamuru ile lifler arasındaki bağın gücünü arttırır, böylece çimento hamurundaki gözenekleri azaltır, ve her partide homojen olarak dağıtılan ve takviye görevi gören çelik liflerin eklenmesi, geliştirilen çekme gerilmelerini sürdürecek ve böylece numunelerin eğilme mukavemetini artıracaktır (El-louh, 2014).

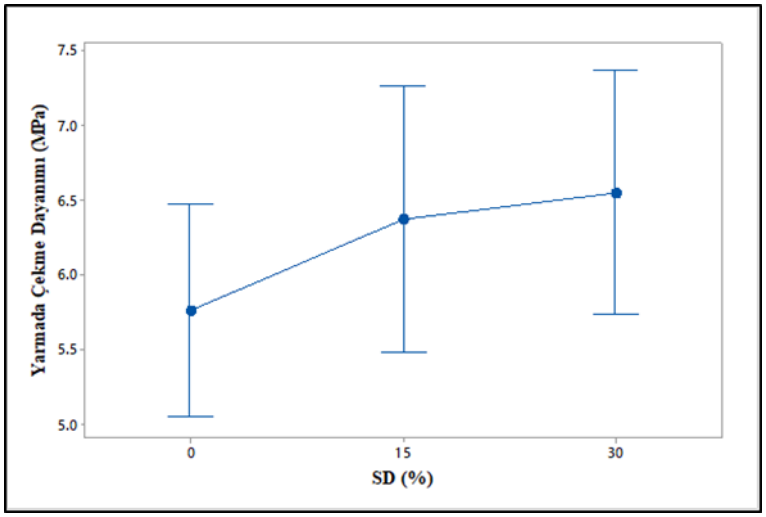


Şekil 4.34 28 gün içinde SD'nin yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkisi.

Şekil 4.32'de 7 günlükte olduğu gibi SD içeriğindeki artışın 7 günlükteki yarmada çekme dayanımını biraz arttırdığı gözlenmiştir. SD 3,7 MPa'nın %0, %15'i ve %30'u ile sırasıyla 3,9 MPa ve 3,95 MPa'ya ulaşılmıştır.



Şekil 4.35 56 gün içinde SD'nin yarmada çekme mukavemeti üzerindek etki.

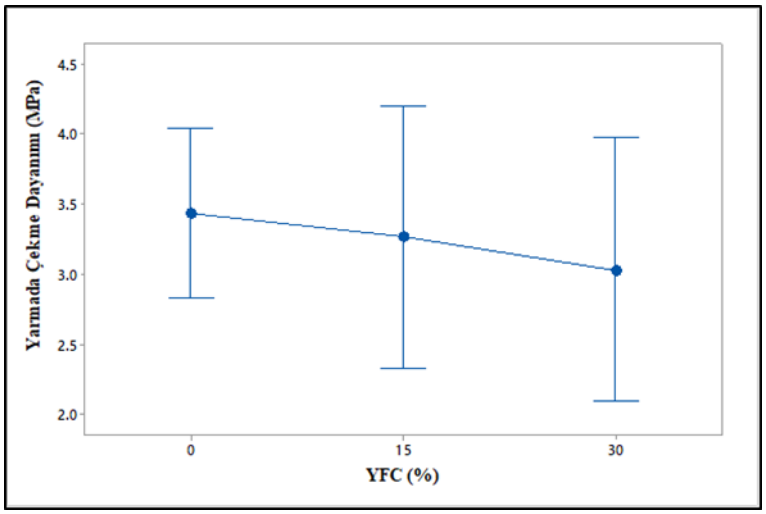


Şekil 4.36 90 günlük içinde SD'nin yarma gerilme mukavemeti üzerindeki etkisi

Erken yaşta olduğu gibi, daha sonraki RPB yaşlarında, 56 ve 90 günlükte, SD içeriğindeki artış, yarma da çekme dayanımının iyileşmesine yol açtmıştır. (Şekil 4.33 ve Şekil 4.34). 56 günlükte SD'nin %0, %15 ve %30'u ortalama yarmada-çekme dayanımı 4,7 MPa, 5 MPa ve 5,4 MPa olarak elde edildi. 90 günlükte sırasıyla 5,7 MPa, 6,4 MPa ve 6,6 MPa'ya ulaşmıştır.

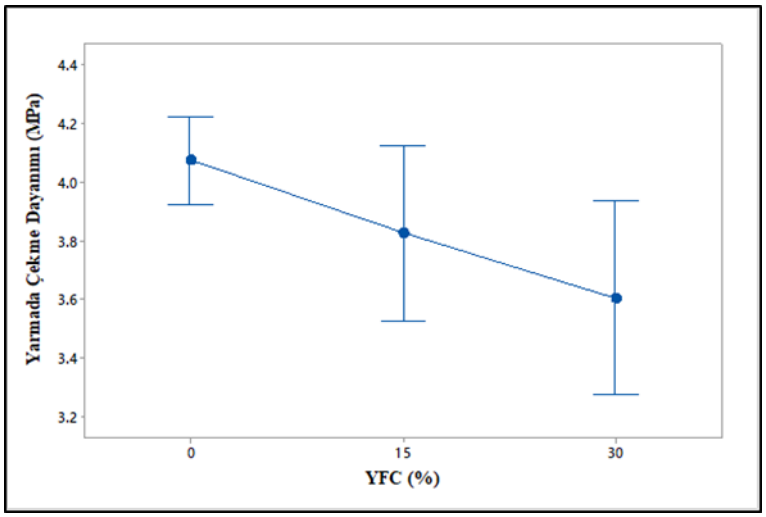
4.4.3 YFC'nin Yarma da çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.36, 4.37, 4.38 ve 4.39'da YFC'nin yarmada çekme dayanımına etkileri verilmiştir..

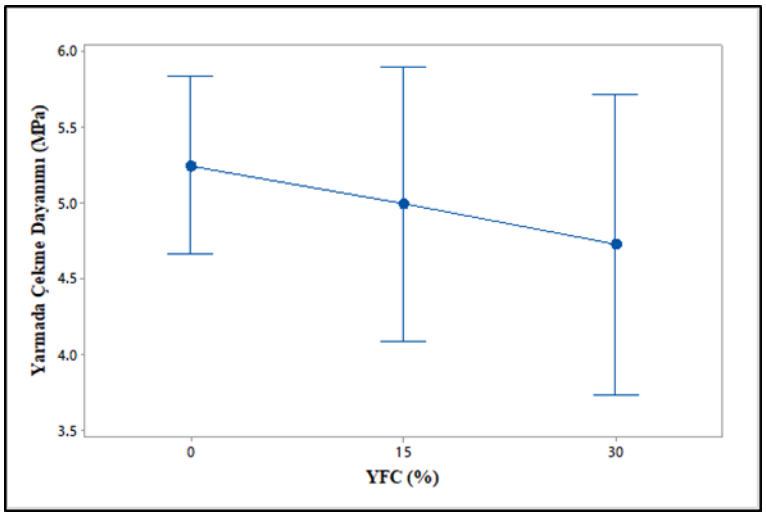


Şekil 4.37 YFC'nin 7 günlükte yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi.

Şekil 4.36, 4.37 ve 4.38'de görüldüğü gibi, YFC'nin 7 günlükteki yarma çekme dayanımın üzerindeki etkisi, YFC'nin RPB'nin erken yaştaki basınç dayanımın üzerindeki etkisine benzerlik göstermiştir. Böylece YFC içeriğindeki artış, yarmada çekme dayanımında 56 günlüğüne kadar bir azalmaya neden olmuştur. 7 günlükte YFC'nin %0, %15 ve %30'u 3,4 MPa, 3,2 MPa ve 3 MPa yarmada-çekme dayanım ortalaması elde edilmiştir. 28 günlükte YFC'nin %0, %15 ve %30'u 4,1 MPa, 3,8 MPa ve 3,6 MPa olarak ortalama yarmada çekme dayanımına ulaşmıştır. 56 günlükte 5,2 MPa, 4,9 MPa ve 4,7 MPa'ya ulaşmıştır. (Siddique ve Kaur, 2012; Khan vd., 2018). YFC ile yapılan betonun erken yaşlardaki yarmada-çekme dayanımın YFC içeriğinin artmasıyla azaldığını da gözlemlenmiştir.

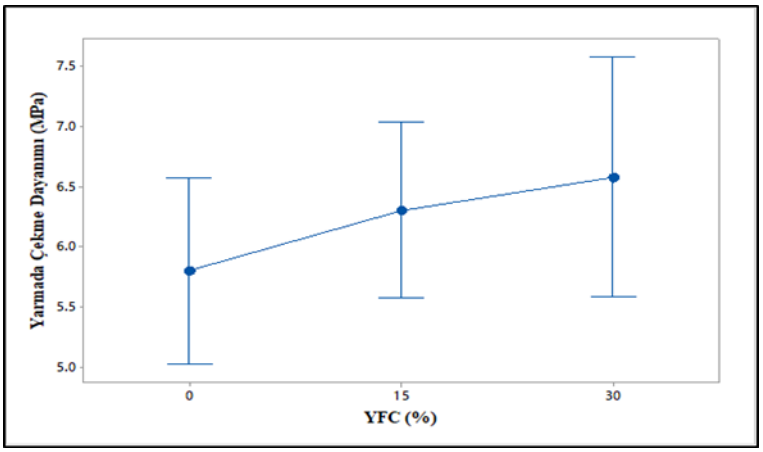


Şekil 4.38 YFC'nin 28 günlükte yarmada çekme dayanımı üzerindeki etki



Şekil 4.39 56 günlük içinde YFC'nin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etki

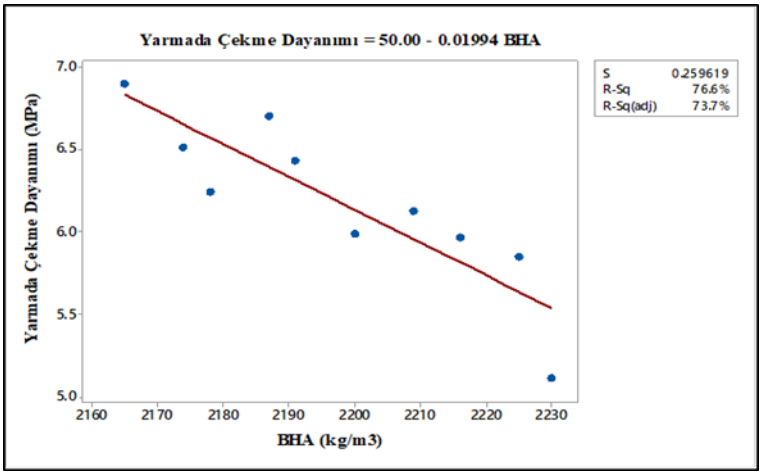
Şekil 4.39'da, YFC içeriğindeki artış, yarmada çekme dayanımını %30'a kadar iyileştirmeye yol açmıştır, bu nedenle YFC'nin %0'dan %15'e ve ardından %30'a çıkarılması, sonuçları 5,9 MPa, 6,3 MPa ve 6,6 MPa olarak iyileştirmiştir.



Şekil 4.40 90 gün içinde YFC'nin yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkisi

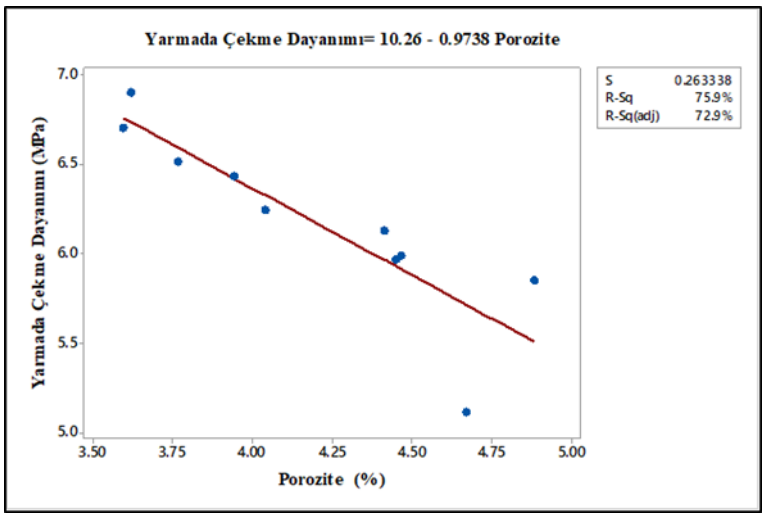
4.4.4 Yarmada-Çekme Dayanımı ile Basınç Dayanımı, BHA, Gözeneklilik ve Su Emme Oranı Arasındaki İlişki

Şekil 4.40, 90 günlükteki yarmada çekme dayanımı ile BHA arasındaki ilişkiyi gösterilmiştir, çekme mukavemetindeki artış BHA sonuçlarının azalmasına karşılık geldiğini gözlemlenmiştir. Bu artış "Çekme Dayanımı = 50,00 – 0,01994 BHA" denklemi R^2= %76,6 bağıntısı ile sunulmuştur. Bu, 90 günlükte çekme mukavemetini artırırken aynı zamanda BHA'yı da azaltan YFC ve SD kullanımına bağlanmıştır.



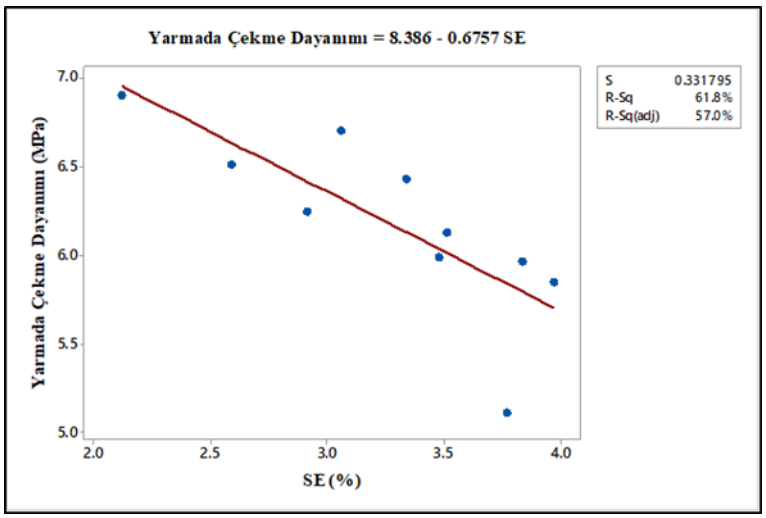
Şekil 4.41 Yarmada çekme dayanımı ile BHA arasındaki ilişki.

Şekil 4.41'de çekme mukavemeti ve gözeneklilik arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.41 incelendiğinde, gözeneklilikteki artış çekme mukavemetinin azalması nedeni ile olmuştur. Bu "Çekme Dayanımı= 10,26 – 0,9738 gözeneklilik" denkleminde R^2= %75,9 ile bir ilişki olarak belirlnemiştir.



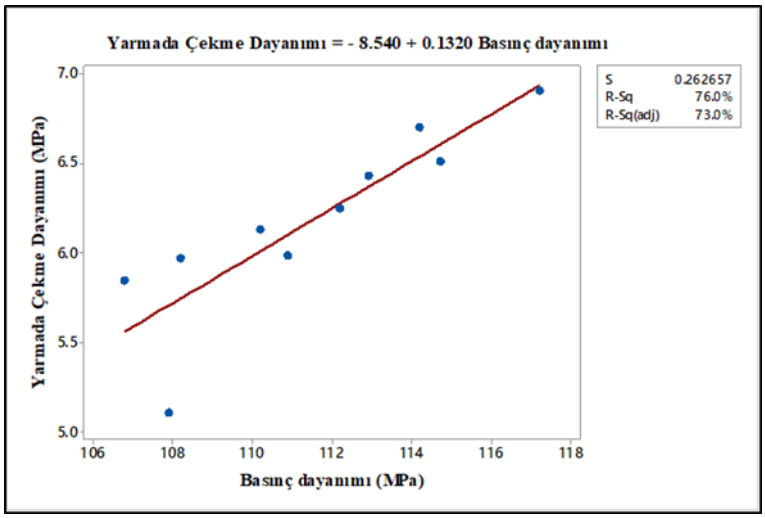
Şekil 4.42 Yarmada çekme dayanımı ile gözeneklilik arasındaki ilişki

Şekil 4.42, 90 günlükteki yarmada-çekme dayanımı ile SE arasındaki ilişkiyi göstermektedir, yarmada-çekme dayanımdaki artışı SE sonuçlarının azalmasına karşılık geldiğini gözlemlenmiştir. Bu artışın "Çekme Dayanımı = 8,386 – 0,6757 SE" denkleminde R^2= %61,8 bağıntısı ile ilişkili bulunmuştur.



Şekil 4.43 Yarmada çekme dayanımı ve SE ile arasındaki ilişki

Şekil 4.43, 90 gündeki yarmada çekme dayanımı ile aynı yaştaki basınç mukavemetin arasındaki ilişkiyi göstermektedir, çekme mukavemetindeki basınç artışı mukavemetin sonuçlarının artışına karşılık geldiği gözlemlenmiştir. Bu artış "Çekme Dayanımı = -8,540 + 0,1320 Basınç Kanı" denkleminde R^2= %76 ilişkisi çok kuvvetli olmayan bir ilişkiyi göstermektedir.



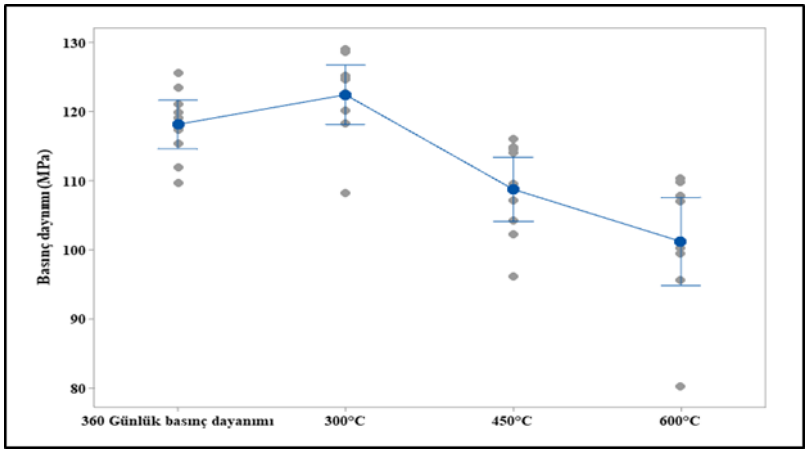
Şekil 4.44 Yarmada çekme dayanımı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki

4.5 Yüksek Sıcaklık Etkisi Testi

RPB küp numuneler, bir saat süreyle 300°C, 450°C ve 600°C'lik yüksel sıcaklığa tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesinde kullanılan basınç dayanımı Tablo 4.1, Şekil 4.44'te gösterilmiştir.

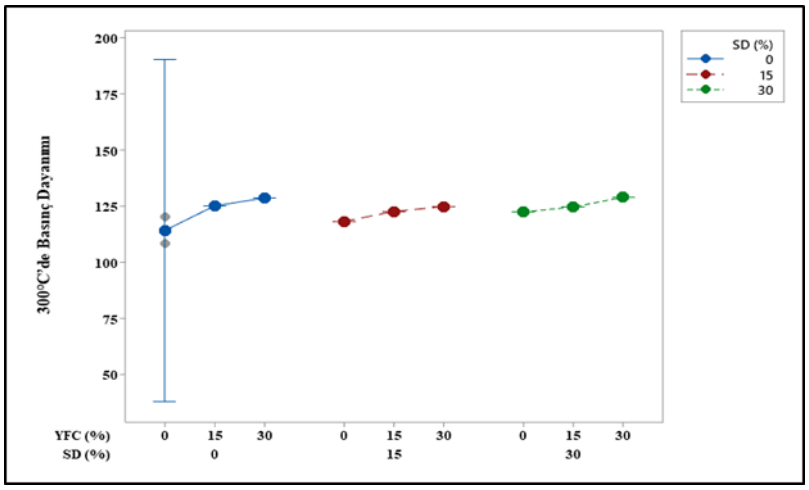
Tablo 4.1 Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı

Karışım kodu	360 Günlük Basınç Dayanımı	300°C'de Basınç Dayanımı	450°C'de Basınç Dayanımı	600°C'de Basınç Dayanımı
REF	109,7	120,2	114,6	107,8
S0C0	111,9	108,2	102,2	95,6
S0C15	115,4	125,2	116,1	109,8
S0C30	117,4	128,7	114,9	110,4
S15C0	117,8	118,3	96,1	80,2
S15C15	119,2	122,7	104,3	99,5
S15C30	121,1	124,9	107,2	100,3
S30C0	119,9	122,5	109,6	107,05
S30C15	123,5	124,7	114,07	101,3
S30C30	125,7	129,1	108,6	100,2



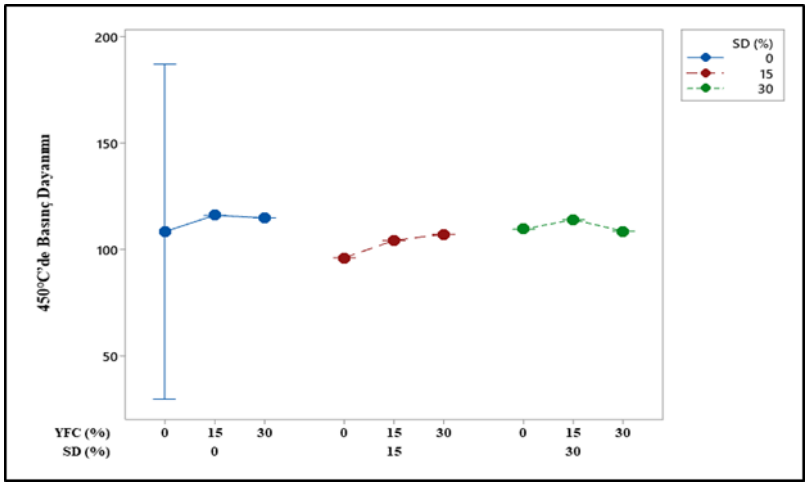
Şekil 4.45 Yüksek sıcaklığın basınç dayanımına etkisi

Yüksek sıcaklıklar sonrası belirlenen basınç dayanımları Tablo 4.1 ve Şekil 4.43 verilmiş olup, değişimler incelendiğinde sıcaklık değerleri 300°C'ye arttığında dayanımların 360 günlük dayanımlara göre bir miktar artış olduğu görülmüştür, ancak sıcaklık değerleri 450°C ve 600°C'a arttığında basınç dayanımları azalmıştır.



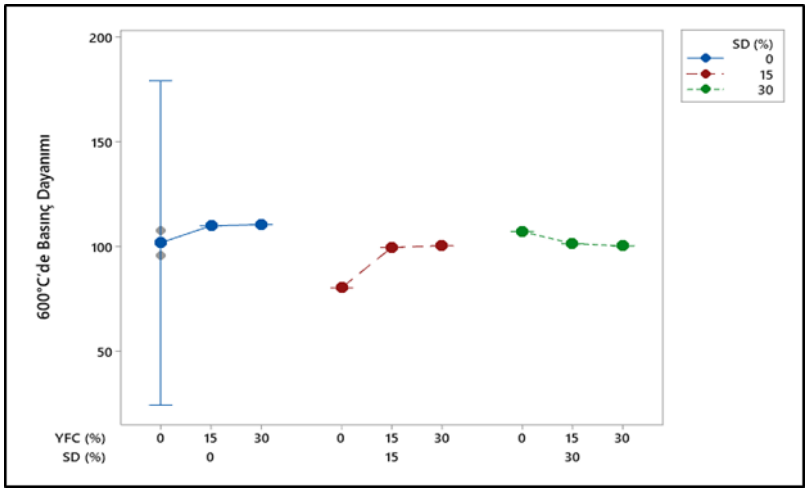
Şekil 4.46 300°C'de Basınç Dayanımı

RPB karışımlarında kullanılan SD ve YFC'nin değişen oranları ile oluşturulan karışımların yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldığında basınç dayanımına etkisi Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 46'da gösterilmiştir. Şekil 4.44 incelendiğinde, 300 °C sıcaklıkta; SD'nin %0, %15 ve % 30 ve YFC %15 ve %30 kullanımında, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımında iyileşmeye yol açmaktadır. Ancak SD'nin %15 ile diğer oranlardan daha az sonuçları elde edlmiştir, genel olarak SD'nin %30'a kadar artışında SD'nin artan kulanımı basınç dayanımını azaltmıştır. YFC'nin %15 oranında ve SD'nin ise %0'dan %30'e çıkan oranında basınç dayanımının artmasına yol açmıştır.



Şekil 4.47 450°C'de Basınç Dayanımı

Şekil 4.45 incelendiğinde, 450 °C sıcaklıkta; SD'nin %0 ve %30 ve YFC %0'dan %15'e kadar kullanımında, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımında iyileşmeye yol açmaktadır, ancak SD'nin %15 ve YFC'nin %0'dan %30'e yükselmesi basınç dayanımını yükselmiştir.



Şekil 4.48 600°C'de Basınç Dayanımı

Şekil 4.46 incelendiğinde, 600 °C sıcaklıkta; SD'nin %0 ve %15 ve YFC %0'dan %30'a kadar kullanımında, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımında iyileşmeye yol açmaktadır, ancak SD'nin %30'sinde YFC'nin %0'dan %30'e yükselmesi basınç dayanımını diğer gruplara göre azaltmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Farklı oranlarda SD ve YFC içeren RPB numuneleri üzerinde yapılan testlerin sonuçları, standart su kürü sonuçlarına göre alt başlıklarda verilmiştir.

5.1.1 RPB'nin Taze Özellikleri

SD ve YFC'nin RPB'nin taze özellikleri üzerindeki etkisi aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

1. SD yüzdesinin %0'dan %15'e yükselmesi, çökme değerlerinin iyileşmesine yol açmıştır, ancak, SD içeriğinde daha fazla artış olumsuz bir etkiye sahiptir.

2. YFC içeriğindeki artış, tüm RPB karışımlarında yayılma çapı değerlerinin artmasına neden olmuştur.

3. En yüksek yayılma çapı değeri 69 cm olup %30 YFC; %15 SD ve %0 SF ile hazırlanan karışıma aittir.

4. En düşük yayılma çapı değeri 57 cm olup, %0 YFC; %30 SD ve %1,2 SF ile hazırlanan karışıma aittir.

5.1.2 RPB'nin Yığın Yoğunluğu, Gözenekliliği ve Su Emme Oranı

SD ve YFC'nin RPB'nin yığın yoğunluğu, porozitesi ve su emme oranı üzerindeki etkisi aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

1. Çimentonun SD ve YFC ile değiştirilmesi, daha düşük kütle yoğunluğu, gözeneklilik ve su emme özelliğine sahip RPB'nin üretilmesine yol açmıştır.

2. SF'nin dahil edilmesi, tüm karışımlarda RPB'nin yığın yoğunluğunun azalmasına yol açmıştır.

3. En yüksek kütle yoğunluğu değeri 2.175 kg/m^3 ile REF karışımına, en düşük sonuç ise 2.110 kg/m^3 ile %30 SD, %30 YFC ile hazırlanan karışıma aittir.

4. SF'nin dahil edilmesi, daha yüksek su emmesi ile RPB karışımlarının üretilmesine yol açmıştır.

5. Porozitenin en yüksek değeri %4,18 olup, bu değer %0 SD; %0 YFC; %1,2 SA ile hazırlanan karışıma aittir. En düşük gözeneklilik ise %2,95 olup %30 SD ve %30 YFC ile hazırlanan karışıma aittir.

6. En yüksek su emme değeri %4,10 olup, bu değer %0 SD; %0 YFC; %1,2 SF ile hazırlanan karışıma aittir. En düşük gözeneklilik ise %2,10 olup; %30 SD ve %30 YFC ile hazırlanan karışıma aittir.

5.1.3 RPB'nin Mekanik Özellikleri

SD ve YFC'nin RPB'nin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

1. Çimentonun SD ile değiştirilmesi, betonun erken ve geç yaşlarında basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

2. 3, 7, 28 ve 90'cı gün içinde basınç dayanımında ve yarma çekme dayanımındaki artış, %1,2 bağlayıcı ile SF eklenmesiyle gözlemlenmiştir.

3. Çimentonun %15'inin YFC ile değiştirilmesi, basınç dayanımı arttırmıştır ve 56'ıncı günde daha da arttırılması (%30'a kadar) dayanımları azaltmıştır.

4. 90 gün içinde, YFC ve SD'nin eklenmesi, basınç ve yarmada çekme dayanımı üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. YFC'nin %30'u ve SD'nin %30'u, en yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerini vermiştir.

5. 90 günde RPB yaşlardaki en yüksek basınç dayanımı sonuçları 117,6 olup, en yüksek basınç dayanımı değeri %1,2 SF; %30 YFC; %30 PT ile hazırlanan numunelerde elde edilmiştir.

6. YPB yaşının 90 gündeki en yüksek yarma çekme dayanımları 6,45 MPa olmuştur ve %1,2 SF; %30 SD; %30 YFC ile hazırlanan numunelerde elde edilmiştir.

7. YFC ve SD'nin eklenmesi, yüksek sıcaklıkta RPB performansının iyileştirilmesine yol açtmıştır.

8. 300 °C yüksek sıcaklıktan sonra basınç dayanımı sonuçları iyileştirildi.

5.2. Öneriler

Daha ileri aşamadaki araştırmalar için aşağıdaki gibi özetlenebilecek bazı önzeriler aşağıda verilmiştir:

1. RPB için kür koşullarının etkisi ile ilgili daha çok çalışma yapılması önerilmektedir.

2. Bu çalışmada kullanılan malzemelerle (silis dumanı, cüruf), RPB'nin klor geçirgenlik değerleri, dayanımı geliştirme mekanizması, donma ve çözülme direnci, kimyasal ortalmlardaki dirençleri gibi) daha detaylı araştırlımalıdır. RPB'larda büzülme, sünme, basma gerilmelerinde gerilme-çekilme ve gerilme deformasyon değişimi gibi mekaniksel özellikleride incelenmelidir.

3. Polipropilen lif, karbon lifi ve cam lifi gibi farklı boyut ve tipteki diğer liflerin RPB üretiminde kullanımı araştırılmalıdır.

4. Çimento tipinin RPB mekanik özelliklerine etkileri dikkate alınmalıdır.

5. Daha fazla kür yöntemi ve yüksek kür sıcaklığı ve bunların RPB performansı üzerindeki etkiler incelenebilir.

6. Başka farklı bir puzzolanik malzemenin RPB üzerinde etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

Abed, M., Nasr, M., & Hasan, Z. (2018). Effect of silica fume/binder ratio on compressive strength development of reactive powder concrete under two curing systems. *MATEC Web of Conferences*, *162*(May), 8–12. https://doi.org/10.1051/matecconf/201816202022

Abid, M., Hou, X., Zheng, W., & Waqar, G. Q. (2017). Mechanical properties of steel fiber-reinforced reactive powder concrete at high temperature and after cooling. *Procedia Engineering*, *210*, 597–604. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.119

Adesina, A. (2018). *USE OF RICE HUSK IN CONCRETE: REVIEW OF MECHANICAL PROPERTIES*. *September*.

Ahari, R. S., Erdem, T. K., & Ramyar, K. (2015). Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *79*, 326-336.

Ahmad, S., Zubair, A., & Maslehuddin, M. (2015). Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, *99*, 73–81. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010

Allahverdi, A., Azimi, S. A., & Alibabaie, M. (2018). Development of multi-strength grade green lightweight reactive powder concrete using expanded polystyrene beads. *Construction and Building Materials*, *172*, 457-467.

Al-Tikrite, A., & Hadi, M. N. S. (2018). Stress–Strain Relationship of Unconfined RPC Reinforced with Steel Fibers under Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *30*(10), 04018234. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002445

Alsalman, A., Dang, C. N., & Micah Hale, W. (2017a). Development of High Performance Concrete with Locally Available Materials. *Construction and Building Materials*, *133*(May), 135–145. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.040

Alsalman, A., Dang, C. N., & Micah Hale, W. (2017b). Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. *Construction and Building Materials*, *133*(May 2018), 135–145. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.040

Anand, A., Abraham, G. M., & George, J. (2016). *Review Paper on Reactive Powder Concrete (RPC)*. *12*, 15–21.

Ardalan, R. B., Joshaghani, A., & Hooton, R. D. (2017). Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, *134*, 116-122.

Aydın, S., & Baradan, B. (2013). *Composites : Part B The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag / silica fume mortars*. *45*, 63–69. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.080

Bahadur, A. M. E. D., & Kabay, N. (2019). Glass fibre reinforced precast concrete containing high content pozzolanic materials. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, *37*(2), 675-686.

Bapat, J. D. (2012). *Mineral admixtures in cement and concrete*. CRC press.

Bharathi, S. H., & Sreekumaran, S. (2020). A probabilistic approach to the design of reactive powder concrete mixes modified using slag. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.770

Banthia, N., and J. Sheng. 1990. "Micro-reinforced cementitious materials." In Vol. 11 of MRS Online Proc., Library Archive. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E. H., & Rouis, F. (2009). Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, *23*(7), 2593-2598.

Cavili, B., & Rebentrost, M. (2006). Ductal–a high-performance material for resistance to blasts and impacts. *Australian Journal of Structural Engineering*, *7*(1), 37-45.

Chandrakar, K., & Singh, V. V. (2017). An Experimental Study on High Performance Concrete Using Mineral Fly Ash and GGBS with M-60 grade Concrete. ‖ *International Journal Of Advance Research, Ideas and Innovations In Technology (ISSN)*, *3*(6).

Chen, M., & Zheng, W. (2018). *A Study on Optimum Mixture Ratio of Reactive Powder Concrete*. *2018*.

Chi, M. C., Chi, J. H., & Wu, C. H. (2018). Effect of GGBFS on Compressive Strength and Durability of Concrete. *Advanced Materials Research*, *1145*, 22–26. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1145.22

Collepardi, S., Coppola, L., Troli, R., & Collepardi, M. (2003). *Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete*.

Dash, A. K. (2010). *EFFECT OF POZZOLANAS ON FIBER REINFORCED CONCRETE Master of Technology REINFORCED CONCRETE*. *208*.

Dixon, R. G. and N. (2003). Self-compacting concrete. *Advanced Concrete Technology*, 1–47. https://doi.org/10.1016/B978-075065686-3/50299-8

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

El-louh, O. M. (2014). Fresh and Hardened Properties of Locally Produced Reactive Powder Concrete. *Master Thesis*.

Fapohunda, C., Akinbile, B., & Shittu, A. (2017). Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement–A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *6*(2), 675-692.

Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2017). Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, *162*, 1407-1417.

Gonen, T., & Yazicioglu, S. (2007). The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Building and Environment*, *42*(8), 3080-3085.

Hamiruddin, N. A., Razak, R. A., & Muhamad, K. (2018). *The Effect of Different Sand Gradation with Ultra High Performance Concrete (UHPÇ) The Effect of Different Sand Gradation with Ultra High Performance Concrete (UHPÇ). August*. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.280.476

Hiremath, P., & Yaragal, S. C. (2017). Investigation on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete under Different Curing Regimes. *Materials Today: Proceedings*, *4*(9), 9758–9762. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.262

Hussein, H. M. A., & Atea, R. S. (2018). Investigation of torsional behavior and capacity of reactive powder concrete (RPC) of hollow T-beam. *Journal of Materials Research and Technology*, *x x*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.10.008

Imam, A., Kumar, V., & Srivastava, V. (2018). Review study towards effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete. *Advances in Concrete Construction*, *6*(2), 145–157. https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.145

Ishak, N. I., Johari, M. A. M., & Hashim, S. F. S. (2017, October). Effects of using blended binder of RHA and GGBS on the properties of concrete: A review. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1892, No. 1, p. 020027). AIP Publishing LLC.

Ji, T., Chen, B., Zhuang, Y., Li, F., Huang, Z., & Liang, Y. (2011). Effects of sand particle size and gradation on strength of reactive powder concrete. *Advanced Materials Research*, *261–263*(May 2011), 208–211. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.208

Kaïkea, A., Achoura, D., Duplan, F., & Rizzuti, L. (2014). Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete. *Materials & Design*, *63*, 493-499.

Kabir, H., & Sadeghi, M. (2017). *Reactive Silica Sand Powder Concrete (RSSPÇ) Uniaxial Compressive Strength Investigation*. *5*, 1–8. https://doi.org/10.11131/2017/101230

Khadiranaikar, & S.Muranal. (2012). *FACTORS AFFECTING THE STRENGTH OF REACTIVE POWDER CONCRETE RPC_FACTORS AFFECTING THE STRENGTH OF REACTIVE POWDER CONCRETE RPC.pdf*. 455–464.

Khayat, K. H. (2000). Optimization and performance of air-entrained, self-consolidating concrete. *Materials Journal*, *97*(5), 526-535.

Kim, S. S., Qudoos, A., Jakhrani, S. H., Lee, J. B., & Kim, H. G. (2019). Influence of coarse aggregates and Silica Fume on the mechanical properties, durability, and microstructure of concrete. *Materials*, *12*(20). https://doi.org/10.3390/ma12203324

Kwan, A. K. H., Cai, Y. B., & Chan, H. C. (1995). Development of very high strength concrete for Hong Kong. *HKIE Transactions*, *2*(2), 9-16.

Lawend, K., askar, Bassam A. Tayeh and B.H. Abu Bakar. (2013). "Effect of Different Curing Conditions on the Mechanical Properties of UHPFC". Iranica Journal of Energy & Environment 4 {(3) Geo-hazards and Civil Engineering)}: ISSN 2079-2115, PP. 209-303

Lee, N., & Chisholm, D. (2005). Reactive Powder Concrete, Study Report SR 146.

Li, Z. (2011). Introduction to concrete. Advanced Concrete Technology, John Wiley and Sons.

Li, Z. (2015). *Proportioning and properties of ultra-high performance concrete mixtures for application in shear keys of precast concrete bridges* (Doctoral dissertation, Clemson University).

Liu, H., Liu, S., Zhou, P., Zhang, Y., & Jiao, Y. (2019). Mechanical Properties and Crack Classification of Basalt Fiber RPC Based on Acoustic Emission Parameters. *Applied Sciences*, *9*(18), 3931. https://doi.org/10.3390/app9183931

Liu, J., Ou, Z., Mo, J., Wang, Y., & Wu, H. (2017). The effect of SCMs and SAP on the autogenous shrinkage and hydration process of RPC. *Construction and Building Materials*, *155*, 239–249. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.061

Long, G.C., Wang, X.Y. and Xie, Y.J. (2002). "Very-high-performance concrete with ultrafine powders". Cement and Concrete Research, Vol. 32, PP. 601-605.

Malik, A. R. (2007). An investigation into the behaviour of reactive powder concrete columns. *Doctor of Philosophy Theis*, *April*, 693–698.

Man, N. K. (2009). STUDYING THE PRODUCTION PROCESS AND MECHANICAL PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE MADE USING LOCAL AVAILABLE MATERIALS. *Thesis*, 269. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.09.003

Mansoor, J., Shah, S. A. R., Khan, M. M., Sadiq, A. N., Anwar, M. K., Siddiq, M. U., & Ahmad, H. (2018). Analysis of mechanical properties of self compacted concrete by partial replacement of cement with industrial wastes under elevated temperature. *Applied Sciences (Switzerland)*, *8*(3). https://doi.org/10.3390/app8030364

Mayhoub, O. A., Nasr, E. A. R., Ali, Y. A., Kohail, M., & Ash, F. (2020). The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete : A review. *Ain Shams Engineering Journal*, *xxxx*. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.016

Mayhoub, O. A., Nasr, E. S. A. R., Ali, Y., & Kohail, M. (2020). Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, *xxxx*. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.013

Mehta, K. (1970). *Advancements in Concrete Technology*. 69–76.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.

Menefy, L. (2007). Investigation of reactive powder concrete and it's damping characteristics when utilised in beam elements. *Griffith University, Gold Coast*.

Mostofinejad, D., Nikoo, M. R., & Hosseini, S. A. (2016). Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*, *123*, 754–767. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.082

Motahari, S. M., Ramezanianpour, A. A., Ebadi, T., Isapour, S., & Karakouzian, M. (2017). A new approach for application of silica fume in concrete : Wet granulation. *Construction and Building Materials*, *157*, 573–581. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.132

Nematollahi, B., Saifulnaz, R. M., Jaafar, M. S., & Voo, Y. L. (2012). A review on ultra high performance'ductile'concrete (UHPdC) technology. *International journal of civil and structural engineering*, *2*(3), 994.

Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, *89*(3), 768-774.

Oner, A., & Akyuz, S. (2007). An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, *29*(6), 505–514. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.01.001

Peng, Y., Hu, S., & Ding, Q. (2010). Preparation of reactive powder concrete using fly ash and steel slag powder. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, *25*(2), 349–354. https://doi.org/10.1007/s11595-010-2349-0

Ranga, S., Kaur, G., Salhotra, S., & Sharma, R. (2014). Effect of Slag in various Fresh and Mechanical Properties of Mortar-A Review. In *NATIONAL CONFERENCE* (p. 80).

Rao, G. A. (2003). Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, *33*(11), 1765–1770. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00171-6

Rashiddadash, P., Akbar, A., & Mahdikhani, M. (2014). Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, *51*, 313–320. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.087

Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). *COMPOSITION OF REACTIVE POWDER CONCREXES*. *25*(7), 1501–1511.

Raza, S. S., Qureshi, L. A., Ali, B., Raza, A., & Khan, M. M. (2021). Effect of different fibers (steel fibers, glass fibers, and carbon fibers) on mechanical properties of reactive powder concrete. *Structural Concrete*, *22*(1), 334-346.

Sabet, F. A., Libre, N. A., & Shekarchi, M. (2013). Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, *44*, 175-184.

Sadrekarimi, A. (2007). Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *2*(3), 409–417. https://doi.org/10.3151/jact.2.409

Shafigh, P., Alengaram, U. J., Mahmud, H. B., & Jumaat, M. Z. (2013). Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. *Materials & Design*, *49*, 613-621.

Shaeffer, R. E. (1992). *Reinforced concrete: preliminary design for architects and builders*. McGraw-Hill College.

Siddique, R., & Khan, I. M. (2011). *Ground Granulated Blast Furnace Slag*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17866-5_3

Staquet, S., & Espion, B. (2002). *Influence of Cement and Silica Fume Type on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete*. 1421–1436.

Sukumar, A., & John, E. (2014). Fiber Addition and Its Effect on Concrete Strength. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, *1*(8), 144–149.

Suresh, D., & Nagaraju, K. (2015). Ground Granulated Blast Slag (GGBS) In Concrete – A Review. *International Journal of Advanced Engineering Technology E- Int J Adv Engg Tech V/Issue II*, *12*(4), 82–84. https://doi.org/10.9790/1684-12467682

Tai, Y. S., Pan, H. H., & Kung, Y. N. (2011). Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °c. *Nuclear Engineering and Design*, *241*(7), 2416–2424. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.008

Tam, C. M., & Tam, V. W. Y. (2012). Microstructural behaviour of reactive powder concrete under different heating regimes. *Magazine of concrete research*, *64*(3), 259-267.

Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K., Fraaij, A. L. A., & Bui, D. D. (2011). The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, *25*(4), 2030–2035. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046

Voo, Y. L., & Foster, S. J. (2009). *Reactive powder concrete: analysis and design of RPC girders*. Lambert Academic Publishing.

Wille, K., Naaman, A. E., & Parra-Montesinos, G. (2011). UHPÇ with compressive strength exceeding 150 Mpa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Materials Journal*, *108*(108), 46–54.

Wong, H. H., & Kwan, A. K. (2005, May). Packing density: a key concept for mix design of high performance concrete. In *Proceedings of the materials science and technology in engineering conference, HKIE materials division, Hong Kong* (pp. 1-15).

Xincheng, P. (2012). *Super-high-strength high performance concrete*. CRC Press.

Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Yiğiter, H., Aydın, S., & Türkel, S. (2010). Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, *32*(8), 639-648.

Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, *87*(12), 2401–2407. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.005

Yunsheng, Z., Wei, S., Sifeng, L., Chujie, J., & Jianzhong, L. (2008). Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors. *Cement and Concrete Composites*, *30*(9), 831–838. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.008

Zdeb, T., & Śliwiński, J. (2011). The influence of selected material and technological factors on mechanical properties and microstructure of reactive powder concrete (RPC). *Archives of Civil Engineering*, *57*(2), 227-246.

Zdeb, Tomasz. (2015). Influence of the physicochemical properties of Portland cement on the strength of reactive powder concrete. *Procedia Engineering*, *108*, 419–427. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.166

Ženíšek, M., Vlach, T., & Laiblová, L. (2016). Flexural Strength of the Reactive Powder Concrete. *Solid State Phenomena*, *249*(April), 108–111. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.249.108

Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Yusuf, M. O. (2019). Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder based high strength concrete. *Construction and Building Materials*, *216*, 314–324. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.026

Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, *95*, 66-74.

Zhong, C., Liu, M., Zhang, Y., & Wang, J. (2019). Study on mix proportion optimization of manufactured sand RPC and design method of steel fiber content under different curing methods. *Materials*, *12*(11). https://doi.org/10.3390/ma12111845

Zulu, S. N. F., & Engineering, I. C. (2017). *Optimizing the usage of fly ash in concrete mixes*. *May*.