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

MİNERAL KATKILARIN REAKTİF PUDRA BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

IBRAHIM SASI ALI ISSA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

EKİM - 2020

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Ibrahim Sassi Ali ISSA tarafından hazırlanan **"MİNERAL KATKILARIN REAKTİF PUDRA BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**" adlı tez çalışması 30/10/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi	.....…
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ 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 Müdürü	Prof. Dr. İzzet ŞENER	……...……

TAAHHÜTNAME

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.



Ibrahim Sassi Ali ISSA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİNERAL KATKILARIN REAKTİF PUDRA BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

IBRAHIM SASSI ALI ISSA

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. HASBİ YAPRAK

Reaktif Pudra Betonu (RPB) yüksek mekanik dayanım, süneklik, tokluk ve durabilite özelliklerine sahiptir. RPB eşsiz karışım tasarımı, üretim teknikleri, yüksek oranda bağlayıcı kullanımı, silisli malzeme ikamesi, yüksek oranda yeni nesil su azaltıcı kimyasalların kullanımı ve su/bağlayıcı oranının düşürülmesi gibi özellikleri ile geleneksel betondan farklılıklar gösterir. Çalışmada 16 farklı karışım tasarlanmış; silis dumanı (SD) %5, %10, yüksek fırın cürufu (YFC) %40, %50, %60, pomza tozu (PT) %10 ve %20 gibi farklı oranlarda, tekli, ikili ve üçlü karışımlar şeklinde çimento yerine ikame edilerek, mineral katkıların RPB'lerin mekanik performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Agrega/bağlayıcı ve su/bağlayıcı oranları sabit tutulmuş, RPB numuneleri su ve laboratuvar kürü olmak üzere iki farklı ortamda olgunlaştırılmış, sertleşmiş numunelere 3, 7, 28 ve 90. günün sonunda eğilme, basınç ve ultrases geçiş hızı testleri uygulanmıştır. %10 SD-%20 PT ikameli numunenin 90 günlük basınç dayanımının 129,0 MPa, %10 SD-%40 YFC-%20 PT ikameli numunenin 90 günlük basınç dayanımının da 133,4 MPa ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca %60-70 ikame oranı karışımlarla yüksek performanslı beton üretiminin mümkün olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Yüksek fırın cürufu, Pomza tozu, Silis dumanı, Eğilme dayanımı, Basınç dayanımı.

Ekim 2020, 65 Sayfa

ABSTRACT

MSC. THESIS

EFFECT OF MINERAL ADDITIVES ON REACTIVE POWDER CONCRETE PROPERTIES

IBRAHIM SASSI ALI ISSA

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
SUPERVISOR: PROF. DR. HASBİ YAPRAK

Reactive Powder Concrete (RPC) has high mechanical strength, ductility, toughness, and durability properties. RPC differs from conventional concrete with its unique mix design, production techniques, high rate of binder used, siliceous material substitution, use of new generation water-reducing chemicals at a high rate, and very low water/binder ratio. In this study, 16 different mixtures were designed to study the effects of mineral additives on the mechanical performance of RPC, the cement was replaced by silica fume (SD) as 5%, and 10%, blast furnace slag (BFS) as 40%, 50%, and 60%, pumice powder (PP) as 10%, and 20%, the cement substitution was in form of single, double and triple mixtures in different proportions. Aggregate/binder and water/binder ratios are kept constant, RPC samples were cured by two different regimes including normal water curing and laboratory room curing. Compressive strength and flexural strength tests were conducted in 3, 7, 28, and 90 days, in addition to ultrasonic velocity pulse test. It was determined that the 90-day compressive strength of the sample with 10% SF-20% PP replacement achieved 129,0 MPa, the 90-day compressive strength of the sample with 10% SF-40% BFS-20% PP replacement achieved 133,4 MPa. Also, it was observed that it is possible to produce high-performance concrete with 60-70% of cement replacement.

KEY WORDS: Blast furnace slag, Pumice powder, Silica fume, Flexural strength, Compressive strength, RPC

October 2020, 65 Page

TEŞEKKÜR

Bana bu çalışmayı bitirmek için sağlık, sıhhat, sabır ve anlayış veren Allah'a hamd ü senalar olsun. Onun tüm salat ve selamı Muhammed Mustafa'nın (SAV) üzerine olsun.

Tez danışmanım Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'a bana verdiği ilham, teşvik, dikkat çekici yardım ve sürekli destek için, derin şükran ve takdirle teşekkürlerimi sunuyorum. Bu süreçte onunla çalışmak benim için mükemmel bir öğrenme ve tecrübe kazanma şansı oldu. Aynı zamanda Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN'a da araştırmalarımda yaptığı rehberlik, verdiği teknik destek ve önerileri için içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Ayrıca laboratuvar çalışmasından sonraki tüm istatiksel veri analizi çalışmalarında yardımını esirgemeyen Karabük Üniversitesi öğretim üyesi Dr.Öğr. Üyesi Hüseyin ÇETİN ve Bashar Qasem Taha AL-HITY'e teşekkürlerimi sunarım.

Lütfü GÖKDERE ve Uğur SARIKAYA'nın yanı sıra Kastamonu Üniversitesi araştırma görevlilerine ve deneysel çalışmamda bana yardım eden yakın arkadaşlarıma teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Son olarak çalışmalarımda kullanılan malzemelerin temin edilmesine yardımcı olan Cryso Yapı Kimyasalları ve OYAK Beton'a teşekkürlerimi sunarım.

Ibrahim Sassi Ali ISSA

Kastamonu, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ii
TAAHHÜTNAME iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
TABLOLAR DİZİNİ x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ 3
2.1. RPB'nin Gelişimi 3
2.2 RPB Bileşenleri ve RPB Özelliklerine Etkileri 4
2.2.1 Çimento 5
2.2.2 Silis Dumanı 7
2.2.3 Öğütülmüş Granül Yüksek Fırın Cürufu 9
2.2.4 Pomza Tozu 11
2.2.5 İnce Agrega (Kum) 13
2.2.6 Süperakışkanlaştırıcılar 13
2.3 Kür Yöntemi 14
2.4 Su- Bağlayıcı Oranı 15
2.5 RPB'nin Avantajları ve Dezavantajları 15
2.6. RPB Uygulamaları 16
3. MATERYAL ve METOD 17
3.1 Malzemeler 17
3.1.1 Çimento 17
3.1.2 Silis Dumanı (SD) 17
3.1.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC) 18
3.1.4 Pomza Tozu (PT) 20
3.1.5 Kum 21
3.1.6 Süper-Akışkanlaştırıcı (SA) 21
3.1.7 Su 22
3.2 Yöntem 22
3.2.1 RPB Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları 23
3.2.3 Numune Hazırlama 24
3.2.5 Kür Yöntem 26
3.3 Test Prosedürü 27
3.3.1 RPB Yayılma Testi 27
3.3.2 RPB'nin Sertleşmiş Özellikleri 27
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 31
4.1. RPB'nin Taze Özellikleri 31
4.2 RPB'nin Birim Hacim Ağırlık (BHA) 32
4.4 RPB'nin Mekanik Özellikleri 34
4.4.1 Basınç Dayanımı 34

4.4.2 Eğilme Dayanımı 44
4.5. Karışım Malzemeleri ve Kür Koşullarının RPB Özelliklerine Etkileri 51
4.6. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki 53
4.7 Ultrases Geçiş Hızı Test Sonuçları (UGH) 54
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 56
KAYNAKLAR.....58
ÖZGEÇMİŞ.....65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 YFC partikül boyutu dağılımı 19
Şekil 3.2 RPB karışımında kullanılan YFC 20
Şekil 3.3 RPB karışımında kullanılan PT 20
Şekil 3.4 PT partikül boyutu dağılımı 21
Şekil 3.5 RPB karışımında kullanılan SD 21
Şekil 3.6 Kurutma amacıyla kullanılan fırın 22
Şekil 3.7 Bilyalı değirmen 22
Şekil 3.8 Harç karışımında kullanılan mikser 25
Şekil 3.9 Numune hazırlama aşamaları 26
Şekil 3.10 Kürleme için kullanan laboratuvar kürü 26
Şekil 3.11 Harç yayılma testi (ASTM C1437) 27
Şekil 3.12 Eğilme dayanımı testi 29
Şekil 3.13 Basınç dayanımı testi 29
Şekil 3.14 Ultrases geçiş hızı testi 30
Şekil 4.1 RPB numunelerinin yayılma değerleri 31
Şekil 4.2 RPB numunelerinin BHA değerleri 33
Şekil 4.3. RPB numunelerinin su emme değerleri 33
Şekil 4.4 I.grup RPB numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları 36
Şekil 4.5 I.grup RPB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 37
Şekil 4.6 I. grup RPB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 38
Şekil 4.7 I. grup RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 39
Şekil 4.8 II. grup RPB numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları 40
Şekil 4.9 II. grup RPB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 41
Şekil 4.10 II. grup RPB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 42
Şekil 4.11 II. grup RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 43
Şekil 4.12 I. grup RPB numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları 45
Şekil 4.13 I. grup RPB numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları 46
Şekil 4.14 I. grup RPB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 47
Şekil 4.15 I. grup RPB numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımları 47
Şekil 4.16 II. grup RPB numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları 48
Şekil 4.17 II. grup RPB numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları 49
Şekil 4.18 II. grup RPB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 50
Şekil 4.19 II. grup RPB numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımları 51
Şekil 4.20 YFC, PT, SD ve kür koşullarının 28 günlük basınç dayanımına etkisi 52
Şekil 4.21 YFC, PT, SD ve kür koşullarının 90 günlük basınç dayanımına etkisi 52
Şekil 4.22 90 günlük basınç dayanımları üzerinde etkili olan SD-PT,YFC-PT, YFC-SD optimum karışım oranları 53
Şekil 4.23 28 günlük basınç dayanımı-eğilme dayanımı arasındaki ilişki 54
Şekil 4.24 RPB numunelerinin UGH değerleri 55

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 CEM 1 42,5 R'nin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri 17
Tablo 3.2. Silis dumanının özellikleri 17
Tablo 3.3 YFC kimyasal ve fiziksel özellikleri 19
Tablo 3.4 Lab Bet 8109'un teknik özellikleri 21
Tablo 3.5 RPB karışım oranları 23
Tablo 3.6 RPB karışım bileşenleri (kg/m^3) 24
Tablo 4.1 RPB numunelerinin basınç dayanımı değerleri 35
Tablo 4.2 Eğilme dayanımı sonuçları 44
Tablo 4.3 Beton kalite sınıflarının UGH özelliklerine bağlı olarak değişimi 55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

GYFC : Granüle yüksek fırın cürufu
HRPB : Hafif reaktif pudra beton
KYB : Kendiliğinden yerleşen beton
PÇ : Portland çimentosu
PK : Pirinç kabuğu külü
PT : Pomza tozu
RPB : Reaktif pudra betonu
s/b : Su / bağlayıcı oranı
s/ç : Su / çimento oranı
SA : Süper akışkanlaştırıcı
SD : Silis dumanı
SK : Silisli kum
UK : Uçucu kül
UGH : Ultrases geçiş hızı
UYPB : Ultra yüksek performanslı beton
VAK : Viskozite arttırıcı katkı
YDB : Yüksek dayanımlı beton
CH : Kalsiyum hidroksit

1. GİRİŞ

Beton, yapıların tasarımı ve inşasında en önemli unsurlardan biridir, özellikle son yıllarda yapı kat adetlerinde ki artışa bağlı olarak, bina yüksekliklerinin artması yüksek dayanımlı betona olan talebi arttırmıştır. Modern tasarım yöntemleri ve yapı teknolojisi ekipmanlarının kullanımı, tasarım ve uygulama prosedürlerine göre geliştirilmesi, betonu ileri aşamalara taşımıştır (Al-jumaily, 2011; Ming ve Yan, 2012).

Daha yüksek mekanik dayanım ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesi için son zamanlarda çok sayıda araştırma yürütülmüş, bunun sonucu olarak da yüksek performanslı beton ve ultra-yüksek dayanımlı beton gibi, çimentolu kompozit malzemeler alanında yeni gelişmeler kaydedilmiş, çok yüksek mekanik dayanım ve durabilite özellikleri ile Reaktif Pudra Betonları (RPB) beton teknolojisi alanına önemli bir yenilik kazandırmıştır. Bağlayıcıların hidrasyonu için daha az su kullanımı, daha yüksek basınç ve eğilme dayanımının elde edilmesini, SA'ların optimal kullanımı, kendi kendine sıkıştırma seviyesinde gerekli işlenebilirliğin elde edilmesini, SD gibi mikro-mineral katkıların kullanılması da, toplam gözenek hacminin azaltılmasına katkı sağlamıştır (Tam vd., 2012 ; Yazıcı vd., 2013 ; Bharathi ve Sreekumaran, 2020).

RPB'nin en büyük dezavantajlarından biri, yüksek çimento içeriğidir. Yüksek çimento içeriği, yüksek hidratasyon ısısı ve önemli büzülme problemlerine yol açmaktadır. Ayrıca, çimento endüstrisi, küresel insan kaynaklı CO_2 emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturmakta, sürdürülebilir olmayan ve enerji tüketicisi bir üretim süreci olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, çimento yerine çevre dostu, uygun ve düşük maliyetli alternatif arayışlara acil ihtiyaç duyulmaktadır (Cwirzen vd., 2008; Zulu, 2017; Mayhoub vd., 2020). Çimento içeriğini azaltmanın etkili bir yolu, klinkerin kısmen çimento ikame malzemeleri ile değiştirilmesidir. Bu malzemeler çoğunlukla endüstriyel atık niteliğinde olduğundan ek klinker süreci gerektirmez, CO_2 emisyonlarında önemli ölçüde azalma ve ekonomik fayda sağlar (Matos vd., 2019).

RPB'nin en önemli bileşenlerinden biri olan silis dumanı (SD), yüksek inceliği ve amorf silis içeriği sayesinde, birincil hidrasyondan kaynaklanan $Ca(OH)_2$ (CH) ile reaksiyona girerek puzolanik reaksiyonu geliştir, betonun dayanım ve durabilitesini arttırır (Siddique, 2011; Mostofinejad vd., 2016; Vigneshwari vd., 2018).

YFC, pik demir üretimi esnasında ortaya çıkan bir yan ürün olup, camsı bir forma sahiptir. Daha yoğun bir iç yapı oluşturarak, betonun mekanik özelliklerini iyileştirir ve geçirimliliğini azaltır. YFC kullanımı, enerji tasarrufu ve ekonomi, ayrıca CO_2 salınımının azaltılmasına da katkı sağlar. YFC, poroziteyi azaltır, çimento hidratlarının mineralojisindeki değişim, klorür iyonlarının geçirimliliğini azaltır. Türkiye'de yılda 600.000 ton YFC üretilmekte, ancak bunun çok azı inşaat sektöründe ve diğer alanlarda kullanılmaktadır (Yazıcı vd., 2010 ; Gesoğlu, Güneyisi ve Öz, 2012).

Gözenekli yapısı, kristal suyu ihtiva etmemesi ve hiçbir işlem görmeden doğal olarak kullanılabilmesi pomzaya önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, boşluklu olmasına karşın düşük geçirimliliğe sahip olması, hafifliği, yüksek izolasyon özellikleri, atmosferik şartlara karşı direnci ve yüksek puzolonik aktivitesi sebebiyle başta inşaat sektörü olmak üzere, farklı sektörlerde de yaygın kullanım alanı sağlar (Gürkan, 2006). Hafif agregalar çok ince bir toz haline getirildiğinde, puzolanik özelliklere sahip olabilirler (Kabay vd., 2015).

Çalışmada 16 farklı karışım tasarlanmış; silis dumanı (SD) %5, %10, yüksek fırın cürufu (YFC) %40, %50, %60, pomza tozu (PT) %10 ve %20 gibi farklı oranlarda, tekli, ikili ve üçlü karışımlar şeklinde çimento yerine ikame edilerek, mineral katkıların RPB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Agrega/bağlayıcı ve su/bağlayıcı oranları sabit tutulmuş, RPB numuneleri su ve laboratuvar kürü olmak üzere iki farklı ortamda olgunlaştırılmış, sertleşmiş numunelere 3, 7, 28 ve 90. günün sonunda eğilme, basınç ve ultrases geçiş hızı testleri uygulanmıştır. Çalışmada, yüksek ikame oranlarında mineral katkılar kullanılarak, çimentonun neden olduğu olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması, ekonomik, sürdürülebilir ve yüksek dayanımlı bir beton üretimi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Araştırmanın bu bölümünde, RPB'de kullanılan karışım malzemeleri, su/bağlayıcı oranları, kür uygulamaları gibi etkisel faktörlere ek olarak, RPB'nin genel tanımı, özellikleri ve karışım tasarımları ve önceki çalışmalarda elde edilen bulgular, RPB'nin avantajları, dezavantajları ve uygulamaları hakkında yapılan değerlendirmeler sunulmaktadır.

2.1. RPB'nin Gelişimi

Yüksek performansa sahip kompozit malzemelerin üretimi amacıyla çimentolu malzemeler kullanılarak çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yüksek dayanıma sahip beton (YDB) kolonlar ilk olarak 1970'lerde yüksek katlı binaların yapımında kullanılmıştır (Man, 2009). YDP'ler, yüksek dayanımın yanı sıra göstermiş oldukları yüksek dayanıklılık ve istenilen diğer özelliklere sahip oldukları performansları ile yüksek performanslı beton (YPB) olarak nitelendirilmiştir. Son otuz yıl içerisinde YPB'ler, mühendislik alanı uygulamalarında farklı yapı uygulamalarında oldukça üstün performans sergilemiştir. 1973 yılında inşa edilen, 260 m yüksekliğe sahip Water Tower Place (Chicago, ABD) yapısında 60 MPa beton dayanımına ulaşılmıştır. İki ila otuz yıl içinde YPB, iki Union Square (Seattle, ABD), Petronas İkiz Kulesi (Kuala Lumpur, Malezya), Tsing Ma Köprüsü (Hong Kong, Çin) ve Trump Dünya Kulesi (New York, ABD) gibi yüksek katlı binaların yapımında kullanılmıştır (Malik, 2007). Beton teknolojisinde süregelen yenilenme ve gelişmeler, 150 MPa basınç dayanımı ve 6.2 MPa çekme dayanımına sahip çimento esaslı bir kompozit olan Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) olarak tanımlanan yeni bir beton türünü ortaya çıkmıştır (Alsalman vd., 2017).

RPB ilk olarak 1990'larda Fransa'da Bougues Laboratuvarı'nda geliştirilmiş ve RPB'ler ile ilgili ilk çalışmalar Richard ve Cheyrezy tarafından yapılmıştır (Srinivas vd., 2010). RPB araştırma aşamasında ilk kez ortaya çıktığından, büyük ilgi görmüş, daha da geliştirilmesi için farklı ülkelerde (Avustralya, Kanada, Japonya, Kore ve Amerika Birleşik Devletleri vb.) yürütülen çalışmalar büyük bir hızla devam etmiş,

üstün mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile RPB'ler, beton endüstrisi alanında oldukça geniş ve önemli bir etki oluşturmuştur (Maroliya, 2012).

Richard ve Cheyrezy (1995), RPB'lerin geliştirilmesi için aşağıda tanımlanan ilkeleri belirtmişlerdir (Azzawi vd., 2018):

- Daha homojen bir karışım için iri agreganın karışımda kullanılmaması,
- Sıkıştırılmış yoğunluğun arttırabilmesi için taneli karışımın optimizasyonu,
- Silis dumanının puzolanik özelliklerinden faydalanılması,
- S/ç oranını azaltılması ve yeterli işlenebilirliğin sağlanabilmesi için optimum süperakışkanlaştırıcı kullanılması,
- Sıkıştırmayı arttırabilmek için priz öncesi ve sonrası basınç uygulanması,
- Mikroyapı gelişimini artırmak için ısıl işlem uygulanması,
- Sünekliğin arttırılması için karışıma küçük boyutlu çelik lif eklenmesi.

RPB'nin üstün mekanik özellikleri ve performansı, geleneksel betonlara göre birçok avantaj sağlamaktadır. RPB, 150-800 MPa basınç dayanımı, 25-150 MPa çekme dayanımı ve %1'lik bir nihai gerilme deformasyonu sağlarken, eğilme dayanımı ve sünekliği de dikkat çekicidir. Ek olarak, kırılma enerjisi 1200 ila 40.000 J/m^2 arasında değişmektedir. Ayrıca, ultra yoğun mikro yapıları RPB'ye oldukça yüksek dayanıklılık ve düşük geçirimlilik sağlamaktadır. Bu avantajların kombinasyonu, RPB'nin özel ön gerilimli ve prekast beton elemanlarda kullanımı için umut verici bir malzeme haline getirmektedir (Mostofinejad vd., 2016).

2.2 RPB Bileşenleri ve RPB Özelliklerine Etkileri

Genel olarak, betonun basınç dayanımını etkileyen ana faktörler, düşük s/ç oranını, ince dolgu maddelerinin arttırılması, taze betonun sıkıştırılması ve boşlukların

azaltılmasıdır (Kabir ve Sadeghi, 2017), RPB açısından, basınç dayanımı değerlerini doğrudan etkileyen iki ana temel parametre:

- Doğru ve uygun bileşenlerin seçimi,
- Kür tipi, süresi ve sıcaklık ayarıdır.

Bundan dolayı, RPB'nin sıkıştırılmış yoğunluğu, ince agrega ve toz/çimentolu malzemeler dahil olmak üzere tüm katı partiküllerin optimizasyonu ile elde edilebilmektedir (Mayhoub vd., 2020).

RPB'yi diğer betonlardan farklı kılan ana özelliği, karışım malzemeleridir. RPB iri agrega içermemekte, sadece çok ince tozlar içermesine rağmen, diğer beton türlerine kıyasla birçok üstün özelliğe sahiptir (Man, 2009).

2.2.1 Çimento

Çimento seçimi, RPB'nin performansını etkileyen en önemli bileşenlerinden biridir (Man, 2009). (Richard & Cheyrezy, 1995; Staquet ve Espion, 2002), RPB üretimine uygun çimento seçiminde aşağıda belirtilen özelliklerin önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

- Mümkün olan en düşük C_3A fazı içeriği
- Düşük alkali içeriği
- Düşük özgül yüzey alanı
- Yüksek silis modülü, bu modül mükemmel reolojik ve mekanik özellikler sağlamaktadır.

Yüksek su ihtiyacına neden olabilecek yüksek incelikli çimentoların kullanımından kaçınılmalıdır. Reolojik özellikler ve mekanik performans açısından en iyi çimento, yüksek silika modüllü çimentodur. Ancak bu tip çimento, belirli uygulamaların

yapılmasını sınırlayan, çok yavaş sertleşme hızı gibi bir dezavantaja sahiptir. Geleneksel hızla sertleşen yüksek performanslı çimento, daha fazla su talebine rağmen çok iyi bir mekanik performans sunmaktadır (Ahmad vd., 2015).

Mayhoub vd. (2020), RPB'nin herhangi bir çimento türü (CEM I, CEM II, Sülfata dayanıklı çimento vb.) ile hazırlanabileceğini, çünkü çimento türü için özel bir gereklilik olmadığını, bununla birlikte, en çok tercih edilen çimentonun, betonun mekanik özelliklerinin arttırılmasına olanak sağlayan yüksek silisli çimento olduğunu belirtmiştir.

Staquet ve Espion (2002), çeşitli çimentoların faz ve kimyasal bileşiminin sertleşmiş RPB'nin özellikleri üzerindeki etkisini araştıran kapsamlı bir çalışma yürütmüş, araştırmada 42.5 dayanım sınıfına sahip üç farklı çimento (CEM I 42.5 R LA, CEM I 42.5 HSR LA ve CEM I 42.5 R) ile 52.5 dayanım sınıfına sahip üç farklı Portland çimentosu (CEM I 52.5 R LA, CEM I 52.5 HSR LA ve CEM I 52.5 R) kullanılmıştır. Isıl işlem uygulamaksızın araştırmada kullanılan tüm çimento türleri ile 28 günlük basınç dayanımı 180 MPa olan RPB'nin üretilebileceği görülmüştür.

Wille vd. (2011), çimento tipi ve özelliklerinin 200 MPa'nın üzerinde basınç dayanımına sahip UYDB'nin dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmış, basınç dayanımını etkileyen su talebinin azaltılması için çimentonun ortalama incelikte ve C_3A içeriğinin de %8'in çok daha altında kalması gerektiğini belirtmişlerdir.

Zdeb (2015), yeterli karışım özelliklerine sahip RPB'nin elde edilebilmesi için, kullanılan bağlayıcının sınırlı bir C_3A ve Na_2O içeriğine sahip olması gerektiğini, çimentonun sahip olduğu yüksek özgül yüzey alanı (Blaine 4 000 cm^2/g'nin üzerinde) nedeniyle, karışımın belirgin bir artış gösteren su talebine rağmen, RPB karışımının uygun işlenebilirlik ve aynı zamanda iyi mekanik özellik gösterdiğini ifade etmiştir.

Cwirzen vd. (2008)'e göre 800 – 1 000 kg/m^3 arasında değişen yüksek çimento içeriği, RPB'nin en büyük dezavantajlarından biridir. Yüksek çimento içeriği üründe oluşturduğu olumsuz ekolojik etki ve maliyetin yanı sıra, rötre ve matriste mikro çatlaklara da neden olmakta, ayrıca RPB karışımlarında genellikle hızlı işlenebilirlik kaybı ve yüksek oranda hapsolmuş hava sorunlarının oluştuğu da gözlenmektedir.

Mostofinejad vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, 1 100 kg/m^3 çimento katkısının RPB'de maksimum 233 MPa basınç dayanımı oluşturduğu, 1 000 kg/m^3 çimento içeren RPB'ye kıyasla basınç dayanımında 26 MPa artış gösterdiği gözlenmiştir. Aşırı miktarda çimento kullanımı sonucu, çimento partiküllerinin bir bölümünün aktive olmadığı, bunun RPB'nin heterojenliğini arttırdığı ve mekanik dayanımın düşmesine neden olduğuna da araştırma sonuçlarında vurgu yapılmıştır.

2.2.2 Silis Dumanı

Silis dumanı RPB'nin en önemli bileşenlerinden biridir. Üstün incelik özelliği ve yüksek amorf silika içeriği sayesinde, birincil hidratasyon ürünü kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek puzolanik reaksiyon gelişimini artırmaktadır (Vigneshwari vd.. 2018).

Silis dumanı, silis metali veya ferrosilisyum alaşım üretimi sürecinde oluşan endüstriyel atık niteliğinde bir yan ürünüdür. %98 oranında saf SiO_2 içerir, Portland çimentosundan yaklaşık 80 kat daha büyük, 25 m^2/g gibi oldukça geniş bir özgül yüzeye sahiptir. Güçlü puzolanik özelliklere sahiptir ve çimento hidrasyonundan kaynaklanan $Ca(OH)_2$ ile stabil C-S-H (kalsiyum silikat hidratları) bileşenlerini oluşturur. Oldukça yüksek amorf SiO2 içeriği ve yüksek incelikteki küresel partikülleri yüksek puzolanik aktiviteyi oluşturan başlıca etkenlerdir (Man, 2009).

Mostofinejad vd., (2016)'e göre, Portland çimentosuna kıyasla silis dumanının sahip olduğu yüksek özgül yüzey alanı, RPB'nin mikro yapısını iyileştirerek çimento hamurunun kompasitesini arttırır, basınç dayanımı da dahil olmak üzere diğer mekanik özellikler üzerinde iyileşme sağlar. SD, RPB'nin basınç dayanımının artışına olanak sağlayan ara yüzey geçiş bölgesinin yapısı üzerinde önemli derecede olumlu bir etkiye sahiptir. RPB bileşenlerinin özgül yüzey alanındaki artış, karışım suyuna olan talebi arttırır, bundan dolayı aşırı miktarda SD kullanmak, bazı partiküllerin reaksiyona girmemesine, bu da RPB'nin heterojenliğini arttırır ve mikro yapıyı zayıflatarak mekanik özelliklerin azalmasına neden olur.

SD, C_3S ve C_2S nin hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ile puzolanik reaksiyon oluşturarak ikincil C-S-H jelleri oluşturarak çimento matrisini ve agrega

çimento hamuru ara yüzeyini güçlendirir. CH, hidrasyon ürünleri hacminin yaklaşık %20-25'ini oluşturur ve kristaller çözelti içinde büyür. Morfolojileri nispeten zayıf, gevrek ve çimentolu değildir, bundan dolayı çatlaklar, özellikle çimento hamuru matrisi ile agregalar arasındaki ara yüzde, CH kristallerinin oluştuğu bölgeler boyunca kolayca artabilmektedir (Rao, 2003).

Peng vd., (2010), SD içeriğinin RPB'nin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediğini, belirli bir sınır değere kadar SD'nin basınç dayanımlarını arttırdığını, bu değerin üzerinde ki artışın basınç dayanımını değerlerini düşürdüğünü, bunun reaksiyona girmeyen SD partiküllerinden kaynaklandığını ifade etmiştir.

Mazloom vd., (2004), SD'nin (%0, %6, %10 ve %15) yüksek performanslı betonun 400 güne kadar basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişler. Araştırma sonucunda: (i) 28 günde, SD katkılı betonunun kontrol betonundan %21 daha yüksek dayanıma sahip olduğunu, (ii) SD içeren beton basınç dayanımlarındaki gelişimin 90. günden sonra önemsiz olduğunu belirtmişlerdir.

Alsalman vd. (2017), %10'dan fazla SD kullanımının basınç dayanımı üzerinde minimum etkiye sahip olduğunu, %5 ve %10 SD içeren beton karışımlarının 90 Günlük basınç dayanımlarının benzer değerlere sahip olduğunu bildirmiştir.

Abed vd., (2018a), %0, %15, %25 ve %35 SD katkılı RPB numunelerine iki farklı ortamda kür uygulamış, %25 silis dumanı içeren karışımın, kontrol karışımına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı artışı sağladığını belirtmiştir.

Siddique (2011), SD kullanımının avantajlarını:

- Erken yaş yüksek basınç dayanımı
- Yüksek çekme, eğilme dayanımı ve elastitisite modülü
- Artan tokluk direnci
- Agrega- çimento hamuru ara yüzeyinde iyileşme

- Yüksek aşınma direnci

- Klorür, asit, nitrat ve sülfat vb. kimyasal etkilere karşı üstün direnç.

- Yüksek elektriksel direnç ve düşük geçirgenlik olarak ifade etmiştir.

2.2.3 Öğütülmüş Granül Yüksek Fırın Cürufu

Cüruf, yüksek fırınlarda ham demir üretimi sırasında elde edilen endüstriyel atık niteliği taşıyan bir malzemedir, kimyasal bileşimi, üretim sürecindeki hammaddelerin bileşimine bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterir. Puzolanik özellikleri; kimyasal kompozisyonuna, inceliğine ve içerisindeki camsı faz miktarına bağlıdır. Çimento hidratlarının mineralojisinde değişim, klorür iyonlarının hareketliliğinde ve porozitede iyileşme sağlar (Yazıcı vd., 2010). Özgül ağırlığı çimentodan daha düşüktür, daha yüksek inceliğe sahiptir (Siddique ve Iqbal Khan, 2011).

Siddique ve Iqbal Khan (2011), betonda ÖGYFC kullanımının avantajlarını aşağıda tanımlandığı gibi özetlenmiştir:

- Yüksek işlenebilirlik ve kompasite,

- Artan pompalama kabiliyeti,

- Yüksek dayanım,

- Durabilite özelliklerinde artış,

- Düşük geçirgenlik,

- Klorür difüzyonuna karşı yüksek direnç,

- Sülfat saldırısına karşı yüksek direnç,

- Alkali silis reaksiyonuna karşı yüksek direnç,

- Düşük hidratasyon ısısı,
- Yüzey kalitesinde artış,
- Beton yapıların yaşam döngüsünde artış,
- Bakım ve onarım giderlerinde azalma,
- YFC'nin üretimi yok denecek kadar az CO_2 emisyonu içerir, SO_2 ve NO_x emisyonu içermez.

Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu olarak ortaya çıkan $Ca(OH)_2$, suda çözüldüğünden ve yeterli dayanıma sahip olmadığından betonun kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. ÖGYFC kullanımı, betonun kalitesini düşüren $Ca(OH)_2$ bileşiğinin bağlanması üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Cüruf ve $Ca(OH)_2$ reaksiyonunun sonunda, ikincil C–S–H hidrasyon ürünleri oluşmaktadır (Öner ve Akyuz, 2007; Dash, 2010).

İşlenebilirlik açısından, ÖGYFC içeren taze betonun hareket için daha az enerji gereksinimi duyduğunu, bunun özellikle pompalama ve vibrasyonda yerleştirmeyi ve sıkıştırmayı kolaylaştırdığını, ayrıca YFC'nin işlenebilirliği daha uzun süre koruyacağını belirtmiştir (Suresh ve Nagaraju, 2015).

Boukendakdji vd. (2009), sabit su/toz oranı ve SA içeriğinde, %15-20 optimum cüruf içeriğinin çökme-yayılma değerlerinde bir artış sağladığını, daha yüksek YFC içeriğinin ayrışma ve viskozite artışına neden olduğunu bildirmiştir.

YFC'nin farklı beton ve harçların dayanımına etkisi üzerine çok sayıda araştırma çalışması yapılmıştır. Karışımlarda PÇ'nin YFC ile ikamesi, basınç dayanım sonuçlarında önemli bir artış sağlamış, genel olarak, 28 günlük en yüksek dayanım değeri, optimum %50 oranı ile elde edilmiştir. Cüruf betonun dayanım gelişimi genelde daha yavaş bir seyir izler, 7 ila 28 gün arasında ki basınç dayanım değerleri, kontrol betonun değerlerine yaklaşır, bu sürenin ötesinde, YFC betonunun dayanım

sonuçları kontrol betonunun dayanım değerlerinden daha üstün performans sergiler (Siddique ve Cachim, 2018).

Yazici vd., (2008), araştırmasında alternatif bir silis kaynağı olarak ÖGYFC ve UK kullanmış, test sonuçları değerlendirildiğinde, ciddi oranda bir mekanik performans kaybı oluşturmadan, RPB'de UK ve ÖGYFC kullanımının mümkün olabileceği ifade etmiştir.

Ghassemzadeh vd., (2010), YFC içeren betonun, erken yaşlarda, uygulanan kür rejiminden büyük ölçüde etkilendiğini, YFC betonunun dayanımının geliştirilmesi için 3 günden daha fazla kür işleminin yapılması gerektiğini, ayrıca betonda aynı anda SD ve YFC kullanımının hem erken, hem de daha sonraki yaşlarda basınç dayanımının arttırılması üzerinde olumlu bir sinerjik etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Yazici vd., (2010), yüksek oranlarda ÖGYFC içeren RPB'nin mekanik özelliklerini araştırmış, çalışmada, PÇ yerine %20, 40 ve 60 oranlarında ÖGYFC kullanılmış, yüksek hacimli ÖGYFC katkılı, hem granit hem de boksit agregalı RPB üretiminin mümkün olabileceği araştırma sonuçlarında görülmüştür.

Suresh ve Nagaraju (2015), %50 YFC katkısı ile PÇ betonların 28 günlük dayanımlarına eşdeğer dayanımların elde edilebileceğini, YFC betonunun daha istikrarlı bir şekilde dayanım kazandığını, erken yaşlarda daha düşük, ancak daha ileriki yaşlarda daha yüksek dayanıma sahip olacağını, erken dayanımdaki düşüşün, yüksek ÖGYFC oranları ve düşük sıcaklıklarda daha belirgin olacağını yaptıkları çalışma sonucunda ifade etmişlerdir.

2.2.4 Pomza Tozu

Pomza, lavın katılaşması sırasında gazların açığa çıkmasıyla oluşan volkanik kökenli doğal bir malzeme olup, dünya çapında birçok ülkede hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılmaktadır. Toplam 18 milyar m^3 pomza rezervinin yaklaşık % 40'ı (7,4 milyar m^3) Türkiye'de bulunmaktadır (Kurt vd., 2016)

Kimyasal bileşimine bağlı olarak, pomza rengi genellikle beyaz-gri veya beyaz-altın, kahverengi-siyah aralığında değişmektedir. Pomza cevheri esas olarak, SiO_2 (%60-75), Al_2O_3 (%13-17), Na_2O– K_2O (%7-8), Fe_2O_3 (%1-3), CaO (%1-2) ve düşük miktarda TiO_2 ve SO_3'ten oluşmaktadır. Özgül ağırlığı toz, ince ve iri agrega durumunda sırasıyla 2,04 ila 2,85, 1,18 ila 2,52 ve 0,82 ila 2,17 arasında değişmektedir. Sertliği (Mohs) 5.5–6 aralığında, pH değeri ise ISO 10 390'a göre 7 civarındadır. Partikül porozitesi %85'e ulaşabilmektedir, bu durum toplam hacmin %15'inin katı bir malzemeden ve %85'in havadan oluştuğu anlamına gelmektedir. Ergime noktası yaklaşık 2 450 °F'dir (Rashad, 2020).

Mükemmel bir mekanik dayanıklılığa sahiptir ve kusursuz bir yalıtım malzemesidir. Pomza aynı zamanda yüksek erime noktasına sahip olduğundan, yangına dayanıklı bir maddedir ve düşük özgül ağırlığa sahiptir (Muralitharan ve Ramasamy, 2015).

Kabay vd., (2015), araştırmada, doğal bir puzolanik malzeme olan pomzayı çimento ikame malzemesi olarak kullanmış, %10 ve %20 PT (63 µm) içeriğinin, betonun 7 günlük basınç dayanımında hidrasyon sürecinin artmasından kaynaklı önemli bir düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir.

Granata (2015), KYB'de PT'nin dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmış, puzolanik özelliği olduğunu, iyi bir işlenebilirlik ve 28 günlük kür sonrasında makul seviyelerde basınç dayanımı sağladığını belirtmiştir.

Saridemir vd., (2016), yüksek dayanımlı betonlarda, %5 PT ikamesinin, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarında %3'lük bir artış, %10 PT'nin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanım değerlerinde sırasıyla %3, %3 ve %5, %20 PT'nin ise sırasıyla %14, %15 ve %16 oranında düşüşe neden olduğunu, %5 PT ikamesinin 56 günlük eğilme ve yarmada-çekme dayanımlarında sırasıyla %4 ve %2 oranında bir artış sağladığını ifade etmiştir.

Ardalan vd., (2017), PT içeren KYB karışımlarının, hedeflenen çökme-yayılma değerinin elde edilebilmesi için SA katkı gerektirdiğini, diğer karışımlara göre daha yüksek yayılma davranışı gösterdiğini belirtmiştir.

2.2.5 İnce Agrega (Kum)

Kum, %41'lik oranla RPB'nin en büyük bölümünü oluşturmaktadır. Son derece homojen bir matris ve ayrıca minimum boşluk elde edebilmek için, RPB 150 µm ve 600 µm arasında değişen ince taneli kum içermektedir. Ahmad vd., (2015), en büyük çimento parçacıklarıyla (80-100 µm) etkileşimi önlemek için 150 µm'nin altındaki kum partikül boyutlarından sakınılması gerektiğini, ortalama 250 µm partikül boyutuna sahip olan kumun tercih edilmesinin doğru olacağını ifade etmiştir.

RPB tasarımlarında, sertliği, çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin fazla olması, kolay temin edilmesi, maliyetinin uygunluğu ve reaktif silis içermemesinden dolayı kuvars kumu tercih edilmektedir. Ancak yüksek basınç dayanımına sahip diğer agregalar da RPB karışımlarında kullanılabilir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

Zhong vd. (2019), kum/bağlayıcı madde oranının RPB'nin performansı üzerine etkisini araştırmış, 0,7 ; 0,75 ve 0,8 kum/bağlayıcı madde oranları ile yapılan çalışmada, en üstün performansın 0,7 kum/bağlayıcı madde oranında elde edildiğini işaret etmiştir.

2.2.6 Süperakışkanlaştırıcı (SA)

SA'lar, betonun hem taze hem de sertleşmiş özelliklerini etkilemektedir, Kabir ve Sadeghi (2017), bunun:

- Ara yüzey gerilimin azalması,
- Çimento partikülleri arasında sıkışan suyun serbest kalması,
- Çimentoda hidratasyon etkisinin geciktirmesi,
- Hidrate olmuş çimento morfolojisinin değiştirilmesinden kaynaklandığını ifade etmiştir.

SA'lar, suyun yüzey gerilimini düşürerek, çimento partikülleri ile suyun homojen bir şekilde temasını ve daha çok sayıda çimentonun su ile ıslatılmasını sağlar. Ayrıca, çimento partiküllerinin yüzeyine yapışarak, oluşturduğu elektrostatik itki ile çimento tanelerinin bir ara gelip topaklanmasını engeller, birbirinden uzaklaşan çimento taneleri daha fazla suyla temas ederek daha hızlı bir şekilde hidratasyon sürecine katılır (Feylessoufi vd., 2000).

RPB'de son derece düşük bir su/bağlayıcı oranı kullandığından, gerekli olan yayılma kabiliyetini sağlamak için SA'lara gereksinim duyulur. Polikarboksilat, naftalin sülfonat ya da melamin sülfonat içeren yüksek-performanslı SA'lar yoğun ve son derece homojen RPB karışımların üretimine imkan sağlar, bu sayede de ayrışma oluşmadan karışımlar dökülebilir (Ahmad vd., 2015).

Lee vd., (2006), RPB'de, en düşük su/bağlayıcı oranlarının üçüncü nesil SA'lar kullanılarak mümkün olabileceğini belirtmiştir.

Yüksek dozda SA kullanımı, RPB'nin mikro yapısının zayıflamasına ve mekanik dayanım kaybına neden olur (Mostofinejad vd., 2016).

2.3 Kür Yöntemi

Betona uygulanan kür yönteminin, mikro yapı oluşumu ve nihai dayanım gelişimi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu iyi bilinmektedir (Mehta, 2001; Xincheng vd., 2012).

Mehta'ya (2001) göre, kür işleminin etkinliği; üç faktörden etkilenir: süre, nem ve sıcaklık. Belirli bir su-çimento oranında, nemli kür süresi ne kadar uzun olursa, dayanım o kadar yüksek olmaktadır. Mineral katkı içeren beton karışımlarında, puzolanik reaksiyonun dayanıma katkısını artırmak için daha uzun bir kür süresi gerekmektedir. Kür sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, çimentonun hidrasyonu ve dayanım artışı da o kadar hızlı olmaktadır.

2.4 Su/Bağlayıcı Oranı

RPB'nin s/b oranı son derece düşüktür ve betondaki fazla su miktarı çok azdır. Bu sayede betonun porozitesi azalır ve sıkıştırma iyileştirilir (Liu vd., 2009).

S/b oranının sınırlandırılması (0,2'den daha düşük), yüksek kaliteli RPB elde etmek için ana işlemlerden biridir (Richard ve Cheyrezy, 1995; Ahmad vd., 2015).

2.5 RPB'nin Avantajları ve Dezavantajları

RPB'nin başlıca avantajı öncelikle mekanik dayanımı (basınç dayanımı 150 MPa'dan daha yükseltir) ve uzun süreli (200 yıla kadar) dayanıklılığıdır (Ženíšek vd., 2016).

Tam ve Ng (2012), geleneksel betonla kıyaslandığında sahip olduğu ultra yüksek performansın RPB'ye önemli avantajlar sağladığını belirtmiştir. Bunlar:

i. 200 MPa kadar çıkan yüksek basınç dayanımı, ölü yükte ciddi oranda azalma sağlar.

ii. Yüksek süneklik ve enerji absorbsiyonu aşırı yük koşullarında ve depremlerde daha iyi bir yapı güvenliği sunmaktadır.

iii. Üstün dayanıklılık daha az bakım gerektiren uzun bir servis ömrü sağlar.

iv. Çelik çubuk donatıların ortadan kaldırılması, yüksek işçilik maliyetlerini azaltır ve daha fazla mimari özgürlük sağlar, mimarlar ve tasarımcılar için neredeyse sınırsız yapısal tasarımlara olanak sunar.

v. Yapı elemanlarının boyutlarının küçülmesi malzeme ve maliyet tasarrufu sağlar.

vi. Tamamlanmış ürün içerisinde yer alan önemli miktarda ki hidrate olmamış çimento, çatlak oluşumu sonrası kendi kendini iyileştirme potansiyeli sağlar.

RPB'nin dezavantajı: çok pahalıdır, klasik çözümün mümkün olmadığı veya ekonomik olmadığı özel uygulamalarla sınırlıdır (Ženíšek vd., 2016).

2.6. RPB Uygulamaları

Anand vd. (2016) tarafından sunulan reaktif pudra betonun çeşitli uygulama alanları şunlardır:

- Darbeye dayanıklı yapılar
- Nükleer yapılar
- Gökdelenler
- Korozyona dayanıklı yapılar
- Nükleer radyasyon için oluşturan bariyerler
- Gizliliği olan bankalar ve bilgisayar merkezleri

3. MATERYAL ve METOD

Çalışmanın bu bölümünde RPB karışımlarında kullanılan malzemeler ve bunların fiziksel ve kimyasal özellikleri, karışım oranları, taze ve sertleşmiş test yöntemleri ile numunelere uygulanan kür yöntemleri açıklanmıştır.

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento

RPB numunelerinin üretiminde esas bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmış olup, EN 197-7: 2 011 şartını sağlamaktadır. Tablo 3.1'de çimentonun kimyasal kompozisyonu, fiziksel ve mekanik özellikleri gösterilmiştir.

3.1.2 Silis Dumanı (SD)

ASTM C-1 240 standartlarında SD ve ürün özellikleri Dost Kimya firmasından temin edilmiş, SD'nin özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Silis dumanının özellikleri

Şekilsiz SiO_2	Min % 93 (gerçek 96,1%)
H_2O (nem)	Maks %0,3 (gerçek 0,19%)
Parıltı Kaybı	(L.O.I maks. %3,5) (gerçek 1, 81%)
+45 mikronun üzerinde	Maks 2.5% (gerçek 0, 58%)
Hacim yoğunluğu	0,55-0,65 kg/dm³ (D)
BET (dk)	15-28 m^2/gr (gerçek 23,36 m^2/gr)

Tablo 3.1 CEM I 42,5 R'nin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri

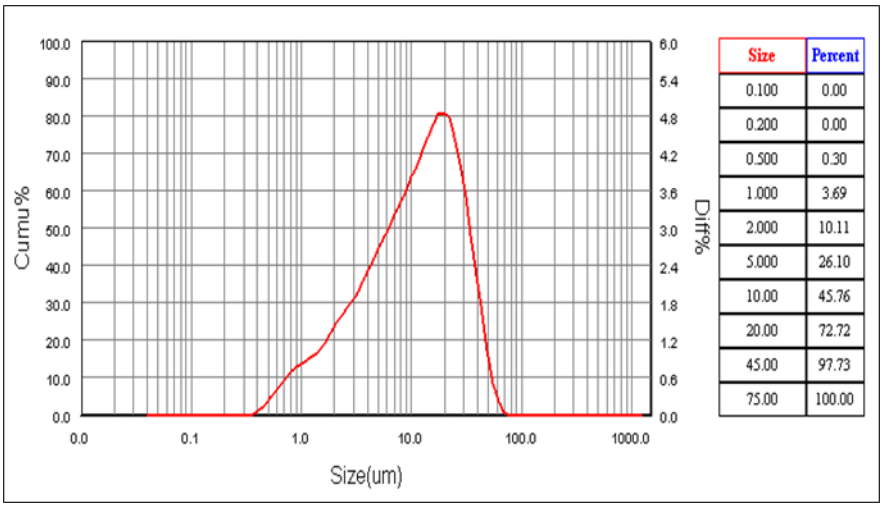
Fiziksel Özellikler			
		Standart	Ölçüm Sonuçları
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)		-	3,13
Hacim Genleşmesi (mm)		≤ 10	1
Priz Süreleri (dak.)	Başlama	≥ 60	29,25
	Bitiş	≤ 600	160
İncelik	Özgül Yüzey (cm2/g)	-	3 350
	45µ Elek Üstü	-	5
	90µ Elek Üstü	-	0,1
Mekanik Özellikler (MPa)			
2 gün		≥ 20	30,5
7 gün		-	42,1
28 gün		≥ 42,5	49
Kimyasal Özellikler			
Toplam SiO_2		% 18 ≤ - ≤ %26	19,57
Çözünmeyen Kalıntı		≤ % 5,0	0,4
Çözünen SiO_2		% 18 ≤ - ≤ % 26	19,17
Al_2O3		% 3 ≤ - ≤ % 7	5,53
Fe_2O_3		% 2 ≤ - ≤ % 6	2,86
CaO		% 59 ≤ - ≤ % 68	64,44
MgO		% 1 ≤ - ≤ % 3	2,09
SO_3		% 1 ≤ - ≤ % 3	2,81
Kızdırma Kaybı		≤ % 5,0	2,45
Cl-		≤ % 0,1	0,018
Na_2O eşdeğeri		-	1,18

3.1.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Çalışmada, Ereğli Demir Çelik Fabrikası ürünü, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) Bolu Çimento San. A.Ş. den temin edilmiştir. YFC'nin özgül ağırlığı 2.95 g/cm^3, inceliği 4 989 cm^2/g, puzolanik aktivite indeksleri 54,2 (7 gün) ve 72,5 (28 gün) olarak belirlenmiştir. YFC'nin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3.2'de, partikül boyut dağılımı Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.3 YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal kompozisyon	Test değerleri (%)	EN 197-1 Standart limit değerler	Test metodu
MgO	5,75	Max. 18	TS EN 196-2
S(sulfide)	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
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	4989	Min. 2750	TS EN 196-6
Mineralojik özellikler	%		
Cam içeriği	100.00	-	TS EN 196-2
LOI	0,09	Max. 3.0	TS EN 196-2



Şekil 3.1 YFC partikül boyutu dağılımı



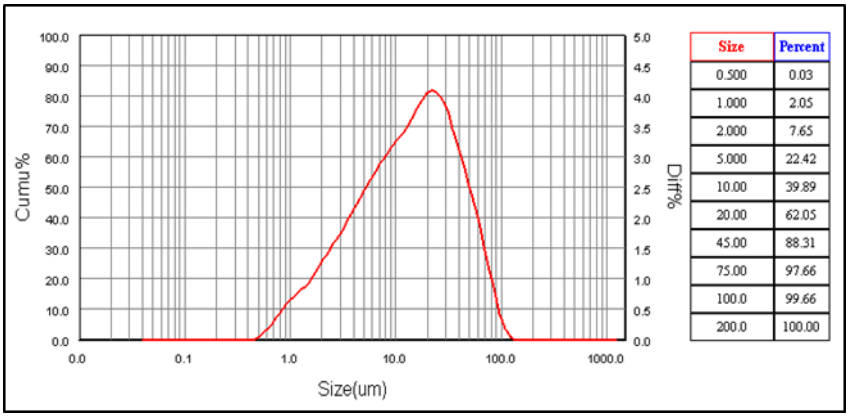
Şekil 3.2 Karışımlarında kullanılan YFC

3.1.4 Pomza Tozu (PT)

Pomza Nevşehir'de ki bir üretici firmadan temin edilmiş, kırma işleminden sonra etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulmuş, daha sonra iki aşamalı öğütme işlemine tabi tutulmuş, ikinci aşamada CHRYSO-Cem ADM 3 öğütme katkısı kullanılmıştır. PT'nin blaine değeri 6 309 cm²/g, özgül ağırlığı 2.4 olup, PT'nin partikül boyutu dağılımı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Karışımlarında kullanılan PT



Şekil 3.4 PT partikül boyutu dağılımı

3.1.5 Kum

Çalışmada 0-2 mm boyutunda silisli kum kullanılmış ve Şekil 3.5'te tanımlanmıştır.



Şekil 3.5 RPB karışımında kullanılan silis kumu

3.1.6 Süper Akışkanlaştırıcı (SA)

SA olarak CHRYSO firmasından temin edilen polikarboksilat esaslı yeni nesil CHRYSO Lab Bet 8 109 kullanılmıştır

Tablo 3.4 Lab Bet 8 109'un teknik özellikleri

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

3.1.7 Su

TS-EN 1 008 standardına uygun içme suyu karışımda ve RPB numunelerinin kür suyu olarak kullanılmıştır**.**

3.2 Yöntem

Bu çalışmada 16 farklı karışım hazırlanmış, Referans karışımda (R), SD, YFC veya PT kullanılmadan sadece PÇ ve kimyasal katkı kullanılmıştır. Mineral katkı olarak SD, YFC ve PT kullanılmıştır.

I. grup karışımlarda %5-30 arasında SD ve SD-PT karışımları mineral katkı olarak kullanılmıştır. II. grup karışımlarda ise, %60-70 oranında YFC, SD-YFC, YFC-PT ve SD-YFC-PT karışımları çimento ikame malzemesi olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.6 Kurutma amacıyla kullanılan fırın



Şekil 3.7 Bilyalı değirmen

3.2.1 RPB Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları

Bu çalışmada RPB harcını elde etmek için gereken karışım oranları Tablo 3.5'te ve malzeme miktarları Tablo 3.6'da verilmiştir. Karışımların hazırlanmasında agrega/bağlayıcı oranı 1:1, s/b oranı 0,20 değerinde sabit tutulmuştur.

Tablo 3.5 RPB karışım oranları

Grup	Karışım no	Karışım kodu	SD/b	YFC/b	PT/b	s/b	SA/b
			%				
I	1	R				20	0.017
	2	S5	5			20	0.017
	3	S10	10			20	0.017
	4	S5P10	5		10	20	0.017
	5	S5P20	5		20	20	0.017
	6	S10P10	10		10	20	0.015
	7	S10P20	10		20	20	0.017
II	8	C60		60		20	0.012
	9	S5C60	5	60		20	0.017
	10	S10C60	10	60		20	0.013
	11	C50P10		50	10	20	0.017
	12	C40P20		40	20	20	0.017
	13	S5C50P10	5	50	10	20	0.017
	14	S5C40P20	5	40	20	20	0.020
	15	S10C50P10	10	50	10	20	0.017
	16	S10C40P20	10	40	20	20	0.017

Tablo 3.6 RPB karışım bileşenleri (kg/m^3)

Grup	Karışım no	Karışım kodu	PÇ	YFC	SD	PT	Kum	Su	SA
			kg/m^3						
I	1	R	900				900	180	15,3
	2	S5	630		45		900	180	15,3
	3	S10	360		90		900	180	15,3
	4	S5P10	585		45	90	900	180	15,3
	5	S5P20	585		45	180	900	180	15,3
	6	S10P10	315		90	90	900	180	13,5
	7	S10P20	360		90	180	900	180	15,3
II	8	C60	810	540			900	180	10,8
	9	S5C60	585	540	45		900	180	15,3
	10	S10C60	270	540	90		900	180	11,7
	11	C50P10	855	450		90	900	180	15,3
	12	C40P20	765	360		180	900	180	15,3
	13	S5C50P10	630	450	45	90	900	180	15,3
	14	S5C40P20	540	360	45	180	900	180	18,0
	15	S10C50P10	270	450	90	90	900	180	15,3
	16	S10C40P20	315	360	90	180	900	180	15,3

3.2.3 Numune Hazırlama

Karışımın hazırlanmasında aşağıdaki işlem basamakları uygulanmıştır.

- Mikser içerisine kum konulduktan sonra karışım için belirlenen karışım suyunun 1/3'ü ilave edilerek 5 dak. süre ile karıştırılmış,
- Karışım kodu dikkate alınarak PÇ ve mineral katkı/katkılar karışıma ilave ederek 5 dak. karıştırma işlemine devam edilmiş, daha sonra karışım suyunun 1/3'ü karışıma eklenmiş, tüm bileşenler 5 dak. karıştırılmış,
- SA katkı 1/3 karışım suyu ile karıştırılmış ve miksere yavaç yavaş eklenmiş, SA katkının ilave edilmesi aşamasında mikser çalıştırılarak, karıştırma işlemi devam etmiş, karıştırma işlemine 5 dak. ara verilmiş,

- Son olarak tüm karışım homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiş, akabinde taze haldeki karışımın yayılma özellikleri belirlenerek, taze karışım kalıplara yerleştirilmiştir. Karışımda kullanılan mikser Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8 Harç karışımında kullanılan mikser

Sertleşmiş RPB numunelerinin test edilmesi amacıyla 40 x 40 x160 mm boyutunda prizmatik kalıplar kullanılmış, kalıplar yağlandıktan sonra taze karışım sarsma tablası kullanılarak, iki tabaka halinde kalıba yerleştirilmiştir. Numunelerin su kaybını önlemek için kalıpların üst yüzeyleri cam plaka ile kapatılarak, 24 saat süreyle laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saatlik sürenin sonunda numuneler kalıptan çıkartılarak test süresine kadar kür işlemine tabi tutulmuştur. Numunelere ait görseller Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Numune hazırlama aşamaları

3.2.5 Kür Yöntemleri

Kalıptan çıkartılan numunelere iki farklı kür yöntemi uygulanmıştır.

1. Su kürü (SK): Normal su kürü (20 ± 2 °C)

2. Laboratuvar kürü (LK): Numuneler 32 ± 2 °C ve %70 bağıl nem ortamında ısı ve nem kontrolüne sahip kür odasında olgunlaştırılmıştır.



Şekil 3.10 LK için kullanan kür odası

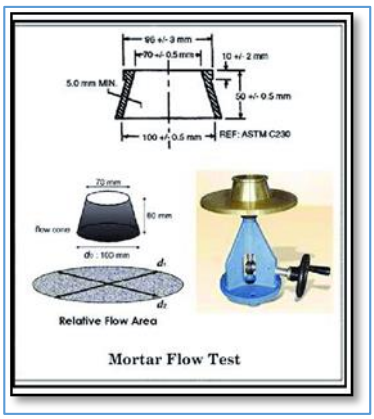
3.3 Test Prosedürü

3.3.1 RPB Yayılma Testi

Taze karışımlara ASTM C1 437'ye uygun yayılma tablası testi uygulanmıştır (Şekil 3.11). Test işleminde kesik koni harçla doldurularak dairesel yayılma tablasının tam ortasına yerleştirilmiştir, koni büyük bir dikkatle yukarı kaldırılmıştır ve harç numunesi tablada bırakılmıştır. Taze haldeki karışımda oluşan yayılma çapı ölçülmüştür. %105 ila %115 yayılma aralığı numunenin işlenebilirliğine işaret etmektedir. Çap referansı (101.6) mm ve yayılma yüzdesi Eşitlik 3.1'den hesaplanmıştır.

D_0 (mm) = 101,6 mm (test konisinin alt kenarının çapı)

$$\text{Yayılma} = ((D_{avg} - D_0)/D_0))\% \quad (3.1)$$



Şekil 3.11 Harç yayılma testi (ASTM C1 437)

3.3.2 RPB'nin Sertleşmiş Özellikleri

3.2.2.1 Birim hacim ağırlık

28 günlük sertleşmiş RPB numunelerinin BHA özellikleri ASTM C642-2 004'e uygun olarak yapılmıştır.

3.2.2.2 Su emme

Setleşmiş RPB numunelerinin su emme oranları Eşitlik 3.2 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme} = [(W_1-W_2)/W_2]\times 100\ (\%) \quad (3.2)$$

Eşitlikte,

W_1: Etüv kurusu ağırlık (g)

W_2: Doygun kuru yüzey ağırlık (g)

3.2.2.3 Eğilme dayanımı

40 x 40 x 160 mm boyutunda RPB numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları TS EN 1 015-11'e uygun olarak çimento test cihazı kullanılarak, yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde, tek noktadan yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Test işleminde her seriden üç numunenin ortalaması alınarak eğilme dayanımları belirlenmiştir. Eğilme dayanımı 3.3 eşit yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{1.5\ PL}{bd^2} \quad (3.3)$$

Eşitlikte;

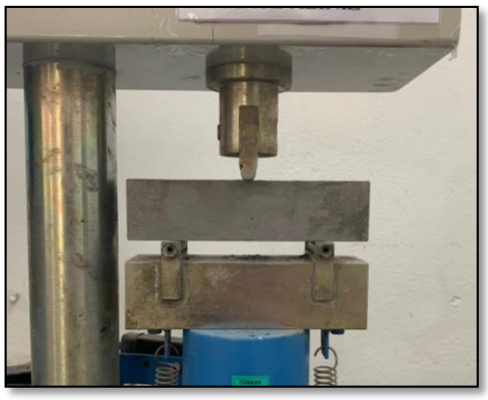
σ = Eğilme dayanımı (Mpa)

P = Kırılma yükü (kN)

L = Mesnet açıklığı (mm)

b = Numune eni (mm)

d = Numune yüksekliği (mm)



Şekil 3.12 Eğilme dayanımı testi

3.3.2.4 Basınç dayanımı

RPB numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları TS-EN196-1'e uygun olarak yapılmıştır. Basınç dayanımlarının belirlenmesinde eğilme dayanımı sonucu iki parçaya ayrılan prizma parçaları kullanılmıştır. Yükleme hızı 2,4 kN/s olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı testi Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13 Basınç dayanımı testi

3.3.2.5 Ultrases geçiş hızı (UGH)

50 °C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulan prizmatik numunelerin, soğumaları beklenmiş, yüzeyleri zımparalanarak temizlenmiş, boyutları kumpas yardımı ile hassas olarak ölçülmüş, test cihazının kalibrasyonu yapıldıktan sonra test işlemi gerçekleştirilmiştir. Frekansı 55 kHz olan test cihazı kullanılarak, ASTM 597-09'ye uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.14). Test işleminde probların tam olarak numune yüzeyine temasının gerçekleştirilmesi için problara jel sürülmüş, problar

numune yüzeylerine hafifçe bastırılarak yerleştirilmiş, probların özellikle birbirlerini karşılamaları sağlanarak, geçiş süresi μs olarak kaydedilmiştir. UGH eşitlik 3.4 ile hesaplanmıştır.

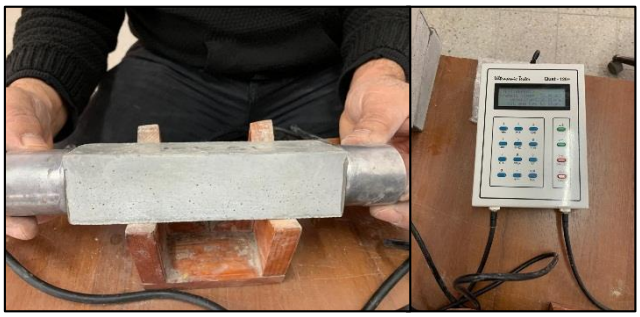
$$V = (S / t)\ 10^6 \qquad (3.4)$$

Eşitlikte;

V = P dalga hızı (km/sn),

S = Numunenin yüzeyleri arasındaki mesafe (m),

t = P dalganın geçiş süresi (μs)

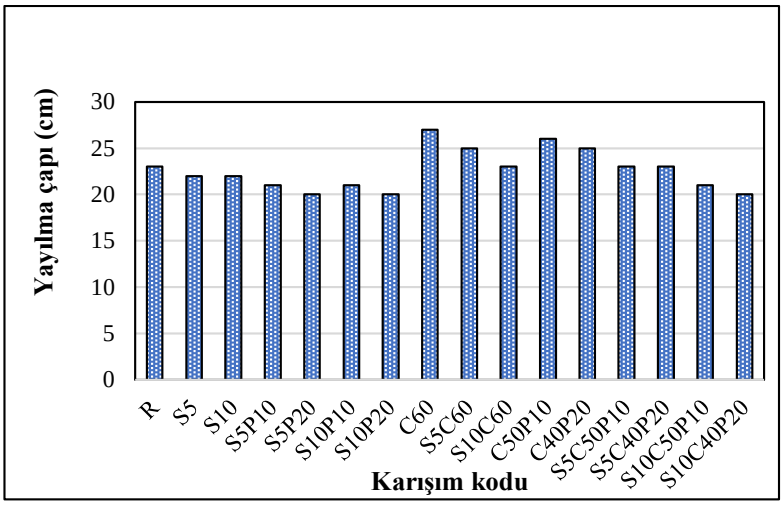


Şekil 3.14 Ultrases geçiş hızı testi

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. RPB'nin Taze Özellikleri

RPB karışımlarının taze özelliklerini test etmek için ASTM C1 437'ye göre yayılma tablası testi yapılmış, test sonucu belirlenen yayılma çapları Şekil 4.1'de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 RPB numunelerinin yayılma değerleri

RPB karışımlarının yayılma değerleri 20-27 cm arasında değişmektedir. En yüksek yayılma C60'da, en düşük yayılma değeri ise 20 cm olarak S5P20, S10P20 ve S10C40P20 karışımlarda elde edilmiştir. Yayılma özelliklerine ek olarak, taze harçlar görsel olarak incelendiğinde, karışımların herhangi birinde ayrışma veya terlemenin gerçekleşmediği görülmüştür. SD ve SD-PT ikameli karışımların yayılma çaplarının daha düşük değerler aldığı, YFC ikameli numunelerin ise daha yüksek yayılma değeri sergiledikleri belirlenmiştir. SD-YFC ikameli harçlarda SD ikame oranındaki artışın yayılma değerlerini azalttığı görülmektedir. Ayrıca SD-YFC-PT ikameli harçlarda da hem SD, hem de PT ikamesinin yayılma değerleri üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu gözlenmiştir.

Nochaiya vd., (2010), SD partiküllerinin yüksek özgül yüzey özelliğinden dolayı artan su gereksinimi nedeniyle karışımın akışkanlık özelliklerini düşürdüğünü, bununla birlikte, karışımlarda daha az kusma ve ayrışma gözlendiğini belirtmişlerdir.

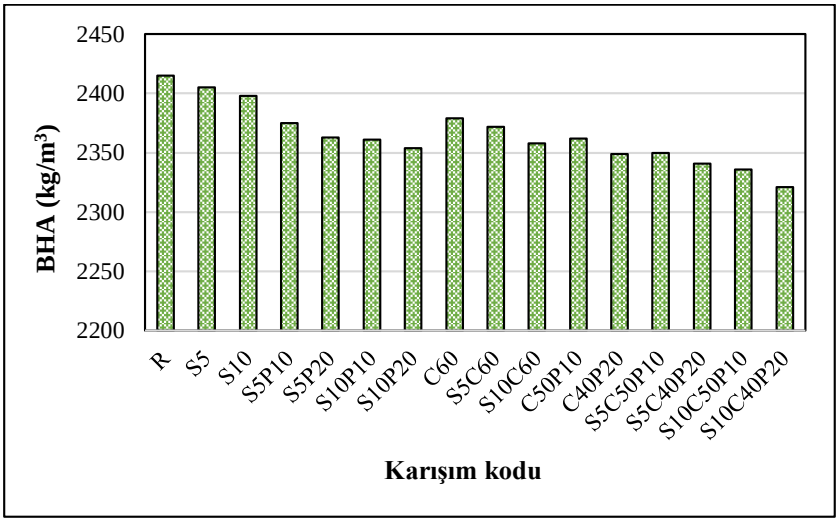
Bani vd., (2017), PT'nin gözenekli yapısı ve yüksek özgül yüzeyi nedeniyle karışım suyuna olan talebi artırdığını, be nedenle PT içeren karışımların daha yüksek doz SA'ya ihtiyaç duyduğunu ifade etmiştir. Samimi vd. (2018)'de, PT içeren karışımların yayılma değerlerinin, SA dozajında yapılacak makul artışlarla kontrol karışımına yakın değerler alabileceğini belirtmiştir.

Meusel ve Rose (1983), Zhao vd., (2015), Ishak vd., (2017), YFC'nin düzgün yüzey dokusu ve pasta hacmi artışından dolayı agrega çimento hamuru ara yüzeyinde sürtünmeyi azaltarak, ayrıca düşük su emme ve yoğun yüzey özellikleri sayesinde yayılma değerleri üzerinde sınırlı bir iyileşme sağladığını ifade etmişlerdir.

4.2 RPB'nin Birim Hacim Ağırlık (BHA) Özellikleri

SD, PT ve YFC oranlarındaki değişime bağlı olarak 28 günlük RPB numunelerin BHA değerlerinin değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir.

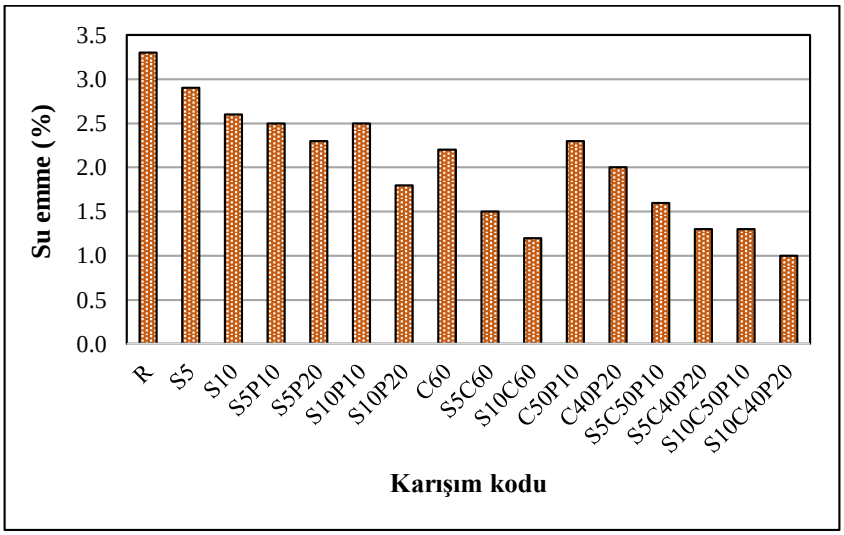
BHA değerleri karşılaştırıldığında, genel olarak mineral katkı ve ikame oranlarındaki artışlar BHA değerlerini düşürmüştür. Özellikle PT ikamesinin BHA değerlerinin azalmasında beklendiği gibi daha etkili olduğu gözlenmiştir. Li, (2011)'e göre bunun nedeni, çimento ile karşılaştırıldığında, mineral katkıların düşük özgül ağırlığıdır. Kurt vd., (2016), PT'nin çimento yerine ikame edilmesinin BHA değerlerini azaltacağını ifade etmiştir.



Şekil 4.2 RPB numunelerinin BHA değerleri

4.3 RPB Numunelerinin Su Emme Özellikleri

Farklı oranlarda SD, PT, YFC içeren ve R kodlu 90 günlük RPB numunelerinin su emme oranları Şekil 4.3'de verilmiştir. Mineral katkıların puzolanik etkilerinin su emme değerleri üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla test 90 günlük numunelere uygulanmıştır.



Şekil 4.3. RPB numunelerinin su emme değerleri

Grafik incelendiğinde en yüksek su emme oranı R numunede, en düşük değer olarak da S10C40P20'de belirlenmiştir. S kodlu numunelerde SD oranındaki artış, S-P kodlu numunelerde de PT oranlarındaki artış su emme oranlarını düşürmüştür. S-C kodlu

numunelerde de SD ile YFC'nin birlikte kullanımının su emme oranlarında önemli ölçüde azalma sağladığı, ayrıca S-C-P kodlu numunelerde de PT oranlarındaki artışın su emme değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir.

Ahari vd., (2015), SD partiküllerinin oluşturduğu dolgu ve yüksek puzolanik etki ile su emme oranlarının düşmesinde etkili olduğunu ifade etmiştir.

Samimi vd., (2018), PT'nin kılcal su emme katsayısının düşürülmesinde gösterdiği olumlu etkinin 90 günlük sürenin sonunda belirgin hale geldiğini belirtmiştir.

4.4 RPB'nin Mekanik Özellikleri

4.4.1 Basınç Dayanımı

SK ve LK ortamında kür uygulanan, SD, PT ve YFC katkılı RPB numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin değişimi Tablo 4.3'te verilmiştir.

Basınç dayanımı test sonuçları, karışımda yer alan ikame malzemeleri dikkate alınarak Tablo 4.1'de tanımlandığı gibi iki ayrı gruba ayrılmış, I. ve 2. grup numuneler kendi içinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

I. grupta Referans numune ile SD katkılı ve SD-PT katkılı numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri, 2. grupta ise; Referans ve I. grupta en yüksek 28 günlük basınç dayanımına sahip olan S10P10 kodlu numunelerle YFC, YFC-PT ve SD-YFC-PT katkılı numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Daha sonra SD, PT ve YFC ikame malzemelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkisi grafiksel olarak verilerek, optimum ikame malzemesi oranları belirlenmiştir.

Tablo 4.1 RPB numunelerinin basınç dayanımı değerleri

Grup	Karışım No	Numune Kodu	3 Günlük		7 Günlük		28 Günlük		90 Günlük	
			SK	LK	SK	LK	SK	LK	SK	LK
Referans	1	R	83,2	88,7	94,7	97,3	111,4	113,0	117,1	118,9
I	2	S5	87,7	90,7	96,9	103,4	113,6	116,3	119,5	121,8
	3	S10	88,0	93,9	99,6	107,5	116,9	118,8	123,5	126,6
	4	S5P10	73,4	83,3	81,2	91,2	102,5	104,4	121,2	125,8
	5	S5P20	68,6	78,7	75,8	87,1	92,8	99,7	129,3	131,5
	6	S10P10	76,0	82,2	88,9	94,1	106,7	108,7	125,1	129,0
	7	S10P20	70,7	74,9	82,3	88,6	94,7	102,9	128,8	129,0
II	8	C6	40,1	48,6	56,4	58,7	81,4	84,8	116,9	118,5
	9	C50P10	46,6	51,1	61,2	62,5	85,4	87,5	120,4	122,4
	10	C40P20	50,6	55,4	61,2	63,3	89,9	91,2	124,6	127,0
	11	S5C60	50,9	55,9	59,6	67,1	89,1	90,4	122,4	124,3
	12	S5C50P10	55,6	60,0	63,6	71,0	93,7	95,8	124,6	124,8
	13	S5C40P20	56,5	61,5	65,6	74,2	95,2	94,3	126,2	126,6
	14	S10C60	49,1	58,9	59,6	69,7	91,5	95,5	122,8	124,2
	15	S10C50P10	54,0	60,8	61,5	74,6	94,7	97,1	126,5	126,9
	16	S10C40P20	58,9	61,4	65,7	77,0	100,8	102,2	132,6	133,4

4.3.1.1 I. Grup numuneler

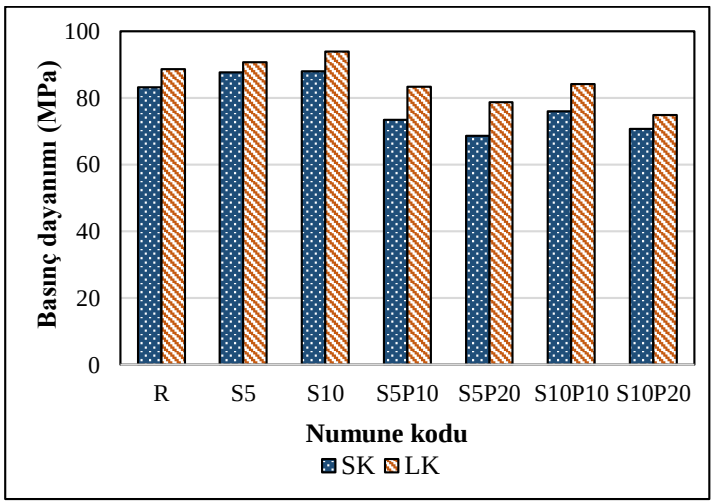
I. Grupta, Referans, %5 SD (S5), %10 SD (S10), %5 SD-%10 PT (S5P10), %5 SD-%20 PT (S5P20), %10 SD-%10 PT (S10P10), %10 SD-%20 PT (S10P20) ikameli RPB numunelerinin, SK ve LK ortamında ki 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları değerlendirilmiştir.

- **3 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

İki farklı kür ortamında olgunlaştırılan SD ve SD-PT katkılı numunelerin 3 günlük basınç dayanımı test değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları üzerinde LK'nin daha etkili olduğu görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı S10 kodlu (LK) numunede 93,9 MPa olarak belirlenmiştir. S10 kodlu numunenin basınç dayanımı her iki kür koşulunda da R kodlu numuneden %6 daha yüksek gerçekleşmiştir. S5 ve S10 kodlu numunelerin basınç dayanımı değerlerinin her iki kür koşulunda da R kodlu numuneden yüksek olduğu gözlenmiştir. Erdem ve Kirca (2008), Elahi vd., (2010), SD'nin sahip olduğu yüksek incelik ve puzolanik aktivitesi nedeniyle erken yaşlardaki mekanik dayanım üzerinde pozitif bir etki oluşturduğunu, amorf SiO_2 nin CH ile reaksiyona girerek C-S-H jelleri oluşturarak erken yaşlardaki mekanik dayanımı arttırdığını ifade etmişlerdir.

S5 ve S10 ikameli numuneler dikkate alındığında, %10 ve %20 PT ikamesinin basınç dayanımlarını düşürdüğü, dayanım kayıplarındaki azalmanın SK'de daha yüksek olduğu, ancak %10 PT ikameli S5P10 ve S10P10 kodlu numunelerin LK'de R numunesinin %94-95'ine yakın basınç dayanımı değerleri aldığı, %10 PT ikamesinin basınç dayanımı değerlerini fazla azaltmadığı, bunda kür sıcaklığında ki artış ile birlikte, PT'nin puzolanik aktivitesinin artmasının etkili olduğu görülmektedir.

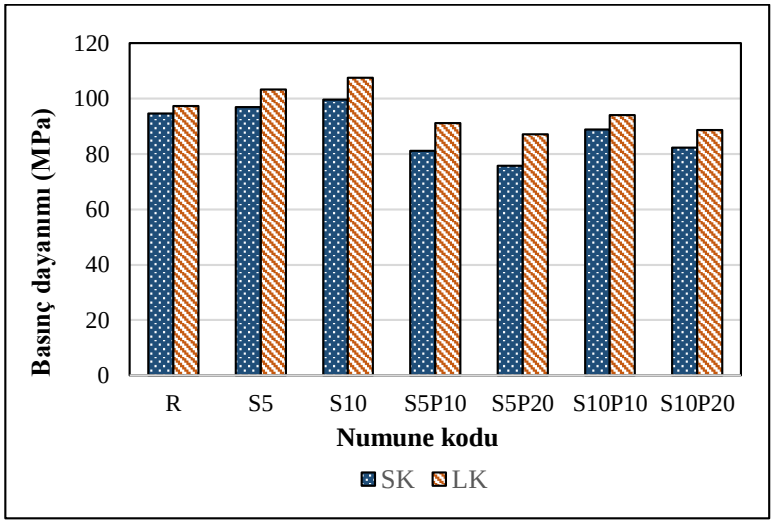
Toutanji ve Bayasi, (1999) ve Kurt, (2007), 10 ºC'lik kür ortamının SD katkılı betonun 7 günlük basınç dayanımı değerlerinde belirgin bir artış oluşturmadığını, ancak kür sıcaklığının 20 ºC'ye yükseltilmesi ile betonun dayanım değerlerinin önemli ölçüde arttığının gözlemlendiğini belirtmişlerdir.



Şekil 4.4 I. grup RPB numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları

- **7 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

SK ve LK uygulanan RPB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı değerleri grafik olarak Şekil 4.5'te verilmiştir.

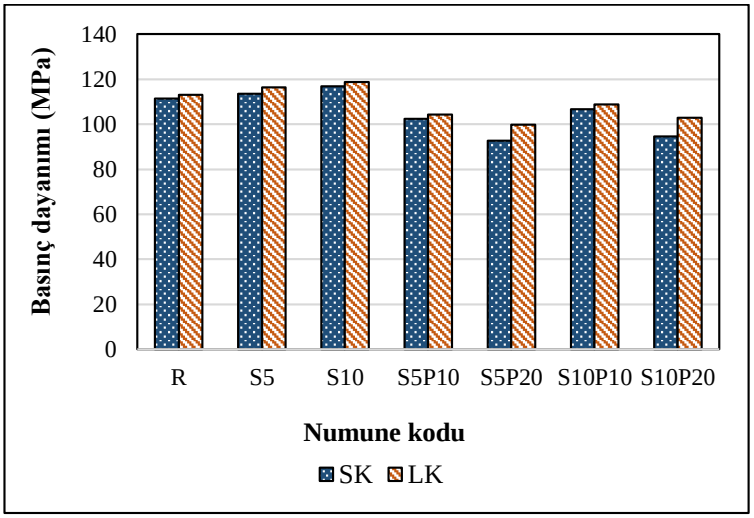


Şekil 4.5 I. grup RPB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

Tüm karışımların basınç dayanımları LK'de SK'den yüksek değerler almıştır. Kür sıcaklığındaki artışın Referans, SD ve SD-PT ikameli numunelerin hidratasyon ürünlerinin gelişimini arttırdığı görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı S10 (LK) numunesinde 107,5 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı numune SK koşulunda da 99,6 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Referans numuneye göre, LK'de dayanım artışı %10, SK'de %5 olarak gerçekleşmiştir. S5 numunesi de hem SK, hemde LK'de R kodlu numuneden daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. En düşük basınç dayanımının S5P20 (SK) numunesinde 75,8 MPa olduğu gözlenmiştir. Basınç dayanımının düşmesinde %20'lik PT ikamesi etkili olmuştur. S10P10 (LK) numunesinin R numunesinin %97'sine eşdeğer bir basınç dayanımı kazandığı görülmüştür.

- **28 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

RPB numunelerin 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4.6'da verilmiştir.

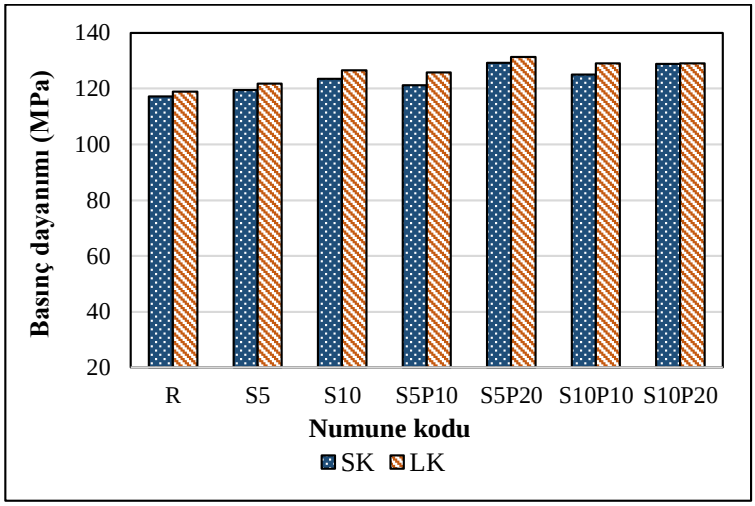


Şekil 4.6 I. grup RPB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları

Grafik incelendiğinde: tüm karışımların LK ve SK arasındaki farkın 28 günlük basınç dayanımlarında azaldığı, en yüksek basınç dayanımının sırasıyla S10, S5 ve R kodlu numunelerde oluştuğu görülmektedir. Ayrıca %5 SD katkılı numunelerle (S5) ve %10 SD katkılı numunelerin basınç dayanımı değerlerinin LK'de daha yüksek olduğu, yine LK'de birbirine yakın değerler aldığı gözlenmiştir. SD-PT katkılı numunelerde de en yüksek basınç dayanımı %10 SD, %10 PT katkılı numunelerde (S10P10), Referans numunenin %96'sına yakın değerde gerçekleşmiştir. %10 PT ikamesinin numunelerde önemli sayılabilecek basınç dayanımı kaybı oluşturmadığı görülmektedir.

- **90 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

LK ve SK uygulanan RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.7'de grafik olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.7 I. grup RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları

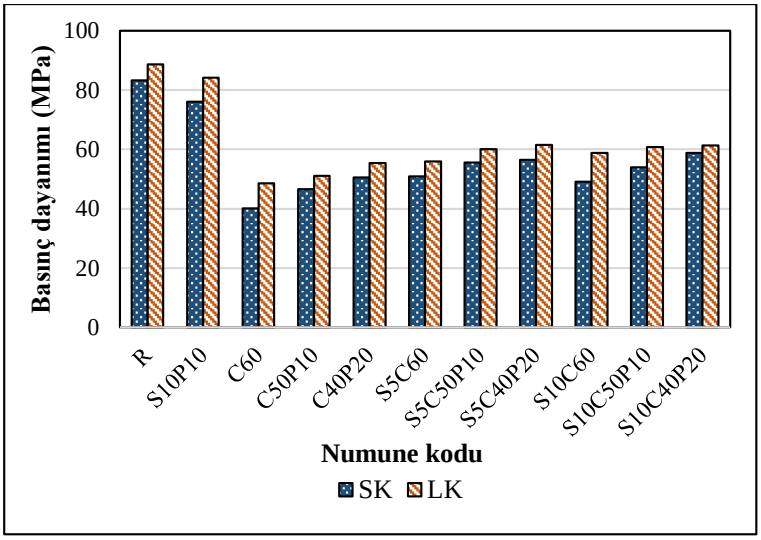
S10, S5P10 ve S10P10 numunelerinin SK ve LK değerleri arasında yaklaşık 3-4 MPa dayanım farkının oluştuğu, genelde tüm numuneler üzerinde LK'nin etkili olduğu gözlenmiştir. Aynı serilerde ki 28 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında, PT katkısının hem SK hem de LK'de %18-%39 aralığında dayanım artışı oluşturduğu, SD-PT katkılı numunelerin PT katkısız SD katkılı numunelerden daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Yüksek incelikteki PT'nin oluşturduğu puzolanik etki ile basınç dayanımı artışında etkili olduğu görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı S5P20'de (LK) 131,4 MPa, S10P10 ve S10P20'de 129 MPa olarak gerçekleşmiştir. Referans numuneye göre basınç dayanımı artışı S5P20'de %11, S10P10 ve S10P20'de %8 olarak belirlenmiştir. En düşük basınç dayanımı ise R'de (SK) 117,1 MPa olarak bulunmuştur.

4.3.1.2 II. Grup numuneler

Bu bölümde Referans numune ile I. grupta 28 günlük basınç dayanımı en yüksek değer alan S10P10 numunesinin basınç dayanımı değerleri, toplamda %60, 65 ve 70 oranında YFC, YFC-PT, SD-YFC ve SD-YFC-PT ikameli numunelerin basınç dayanımı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

- **3 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

II. grupta yer alan ve iki farklı kür ortamında olgunlaştırılan RPB numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 II. grup RPB numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları

II. grup RPB numunelerinin grafik değerleri incelendiğinde: LK'nin 3 günlük basınç dayanımları üzerinde daha etkili olduğu, basınç dayanımı değerlerini %60 YFC ikameli numunelerde ve %10 SD-%60 YFC ikameli RPB numunelerinde yaklaşık %20 oranında arttırdığı gözlenmiştir. Diğer ikame oranlarında LK'nin basınç dayanımı artışına etkisi %8-13 arasında, R'de %7, en düşük dayanım artışı ise S10C40P20'de %4 olarak gerçekleşmiştir. SD başta olmak üzere YFC ve PT'nin artan kür sıcaklığından etkilendiği görülmektedir.

SK ve LK'de S10P10 kodlu numunelerin Referans numunenin yaklaşık %91-95'ine eşdeğer basınç dayanımları kazandığı, çok sayıda numunede de R'nin yaklaşık %70'ine eşdeğer basınç dayanımlarının oluştuğu gözlenmiştir.

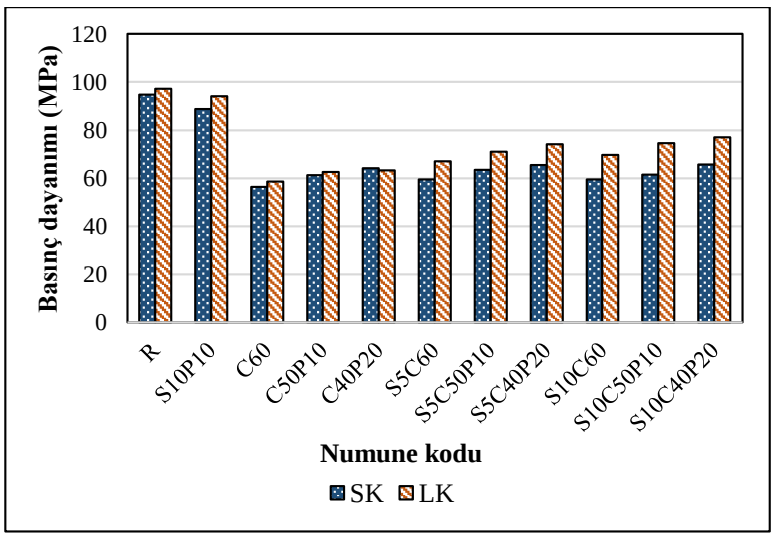
- **7 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

RPB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.9'da grafik olarak tanımlanmıştır.

S10P10 ikameli RPB numunelerin, Referans numunenin, SK'de %94, LK'de %97'sine eşdeğer basınç dayanımı kazandığı görülmektedir. Benzer kür koşulları

dikkate alındığında, YFC, YFC-PT ikameli numunelerin R'nin %60-68'ine eşdeğer basınç dayanımına sahip olduğu, %5 ve %10 SD ve YFC, YFC-PT katkılı numunelerin, özellikle LK'de, R'nin %73-79'una eşdeğer basınç dayanımı değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. %65, %70 gibi yüksek ikame oranlarında sağlanan 7 günlük yüksek basınç dayanımı değerleri dikkat çekicidir. Ayrıca LK'nin YFC ve YFC-PT ikameli numunelerin basınç dayanımı değerleri üzerinde etkili olmadığı, LK'nin daha çok SD-YFC ve SD-YFC-PT ikameli numuneler üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

En yüksek basınç dayanımı S10C50P10 ve S10C40P20 kodlu numunelerde sırasıyla 74,6 ve 77,0 MPa, en düşük basınç dayanımı C60'da (SK) 56,4 Mpa olarak belirlenmiştir. Elde edilen test değerleri, erken yaşlarda, yüksek oranda YFC ikamesinin tek başına yeterli puzolanik aktivite gösteremediğini, SD ve PT ikamesinin YFC'nin puzolanik aktivitesinin arttığını göstermektedir.



Şekil 4.9 II. grup RPB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

- **28 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

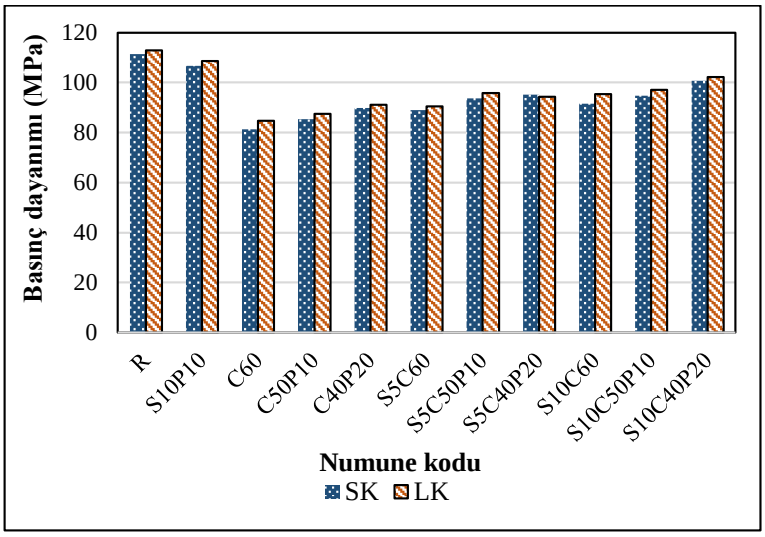
II. grup RPB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı test sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

28 günlük test sonuçları üzerinde kür farkının çok etkili olmadığı görülmektedir. LK'nin %60 YFC (C60) ve %10 SD, %60 YFC (S10C60) ikameli numunelerde yaklaşık %4 oranında en yüksek dayanım artışını oluşturduğu, bunu C50P10 ve

S10C50P10 kodlu numunelerin %2,5 artışla izlediği görülmüştür. Yüksek ikameli YFC ve PT'nin dayanım artışlarında kür sıcaklığının etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Aynı kür koşularında Referans numune dışında, en yüksek dayanımın S10P10 kodlu numunede 106,7 (SK) ve 108,7 (LK) MPa olarak gerçekleştiği görülmektedir. %60, %65 ve %70 YFC, SD-YFC ve SD-YFC-PT ikame oranları dikkate alındığında ise S10C50P10 ve S10C40P20 kodlu numunelerin, her iki kür koşulunda da sırasıyla R'nin %85 ve %90'ı oranında, yaklaşık 95,0-102,0 Mpa basınç dayanımı değerleri gösterdiğini vurgulamaktadır. Test sonuçları, YFC'nin, SD ve PT ile birlikte (üçlü karışım şeklinde) ikamesinin, %70'e yakın oranlarda puzolanik özellik gösteren ürünlerin kullanımı ile RPB üretiminin mümkün olabileceğini göstermektedir.

Referans numuneye göre, en düşük dayanım artışı %73 ve %75 oranlarında C60 kodlu numunede SK ve LK'de belirlenmiştir. Yüksek oranlarda YFC ikamesinin, 3, 7 ve 28 günlük dayanım sonuçları dikkate alındığında, tek başına dayanım artışında yeterli puzolanik etkiyi göstermediği görülmekte, test sonuçları da bunu doğrulamaktadır.



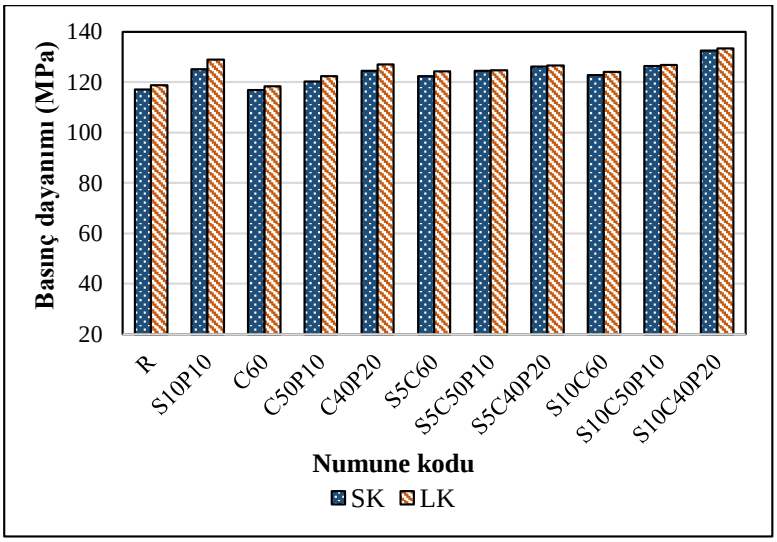
Şekil 4.10 II. grup RPB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları

- **90 Günlük basınç dayanımı sonuçları**

Farklı mineral katkı oranları ve kür koşullarının RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkisi Şekil 4.11'de verilmiştir.

90 Günlük basınç dayanımları üzerinde farklı kür koşullarının önemli bir etki oluşturmadığı, LK'nin basınç dayanımları üzerinde kısmen etkili olduğu görülmektedir.

90 günlük basınç dayanımları, 28 günlük basınç dayanımları aynı kür koşuları dikkate alınarak oransal olarak karşılaştırıldığında: C60, C50P10 ve C40P20 kodlu numunelerde SK ve LK'de %39-44 oranında, S5C60 kodlu numunelerde %37-38 dayanım artışı gerçekleşmiş, en yüksek artış ise %44 oranında C60'da görülmüştür. YFC ve YFC-PT ikameli RPB numunelerinin dayanım artışında kür süresinin etkili olduğu, puzolanik reaksiyonların daha ileriki yaşlarda gerçekleştiği görülmektedir. SD-YFC-PT ikameli numunelerde de dayanım artışının %30-34 oranları arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.11 II. grup RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları

90 günlük basınç dayanımları Referans numune dikkate alınarak karşılaştırıldığında, C60 kodlu numune dışında, tüm numunelerin basınç dayanımları R numunenin %3-%13 üzerinde gerçekleşmiştir. En yüksek dayanım artışı, S10C40P20 kodlu numunede SK ve LK'de sırasıyla, 132,6 MPa ve 133,4 Mpa olarak, en düşük basınç dayanımı da R ve C60 kodlu numunelerde birbirine yakın değerlerde, yaklaşık 117,0-119,0 MPa olarak bulunmuştur. %60, %65 ve %70 YFC, SD-YFC ve SD-YFC-PT ikame oranlarında, sıkıştırma ve lif katkısı olmaksızın yüksek dayanımlı RPB üretiminin mümkün olduğu test sonuçlarından görülmektedir.

4.4.2 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı test sonuçları I. ve II. grup numunelerde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. I. grupta Referans numune ile SD katkılı ve SD-PT katkılı numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri, II. grupta ise Referans ve I. grupta 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek değer olan S10P10 kodlu numunelerle YFC, YFC-SD ve SD-YFC-PT katkılı numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. SK ve LK'de olgunlaştırılan RPB numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Eğilme dayanımı sonuçları

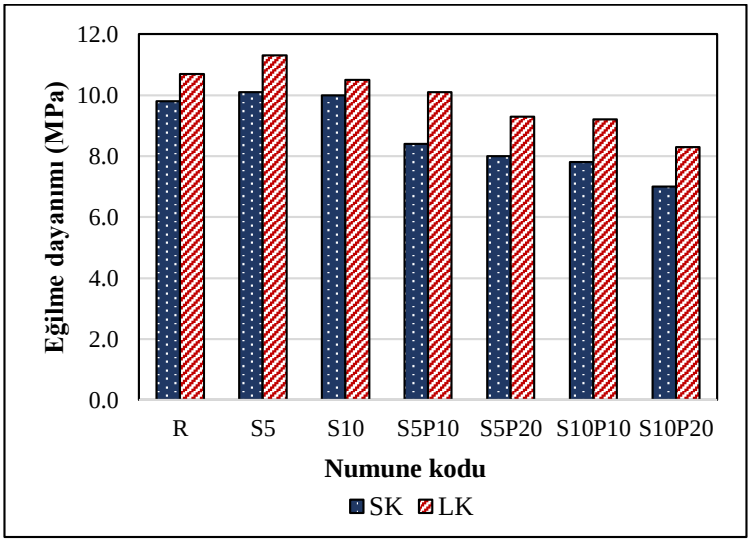
Grup	Karışım No	Numune kodu	3 günlük		7 günlük		28 günlük		90 günlük	
			SK	LK	SK	LK	SK	LK	SK	LK
Referans	1	R	9,8	10,7	13,9	14,7	14,2	15,4	16,9	17,0
I	2	S5	10,1	11,3	14,7	15,1	14,9	15,8	17,3	18,0
	3	S10	10,0	10,5	14,2	14,8	15,3	16,2	17,5	17,9
	4	S5P10	8,4	10,1	11,3	11,6	14,5	15,2	17,8	18,1
	5	S5P20	8,0	9,3	10,2	10,5	12,9	13,4	18,2	18,4
	6	S10P10	7,8	9,2	11,3	11,6	15,9	16,4	18,2	19,0
	7	S10P20	7,0	8,3	9,8	10,1	13,2	13,6	19,0	19,5
II	10	C60	5,2	5,7	5,9	6,1	9,6	9,9	10,8	11,1
	11	C50P10	5,5	5,9	6,2	6,4	9,8	10,4	12,8	13,3
	12	C40P20	5,7	6,2	6,6	6,9	10,0	10,7	13,9	14,6
	13	S5C60	6,8	7,7	7,2	7,5	9,9	10,0	12,7	13,1
	14	S5C50P10	6,9	7,8	7,8	8,0	10,0	10,4	13,2	13,7
	15	S5C40P20	7,2	8,2	8,2	8,3	10,3	10,5	14,5	14,9
	16	S10C60	5,6	6,2	7,6	7,8	9,8	10,1	13,1	14,4
	17	S10C50P10	6,0	6,6	7,3	7,4	10,3	10,7	14,5	14,9
	18	S10C40P20	6,2	6,9	7,8	8,0	10,5	10,9	16,3	16,7

4.3.2.1 I. Grup numuneler

Tablo 4.8'de numune kodları tanımlanan, SK ve LK'de olgunlaştırılan, farklı oranlarda SD, SD-PT ikameli RPB numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları grafiksel olarak değerlendirilmiştir.

- **3 Günlük eğilme dayanımı sonuçları**

SK ve LK ortamında olgunlaştırılan, farklı oranlarda SD, SD-PT ikameli RPB numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.12'de grafik olarak verilmiştir.

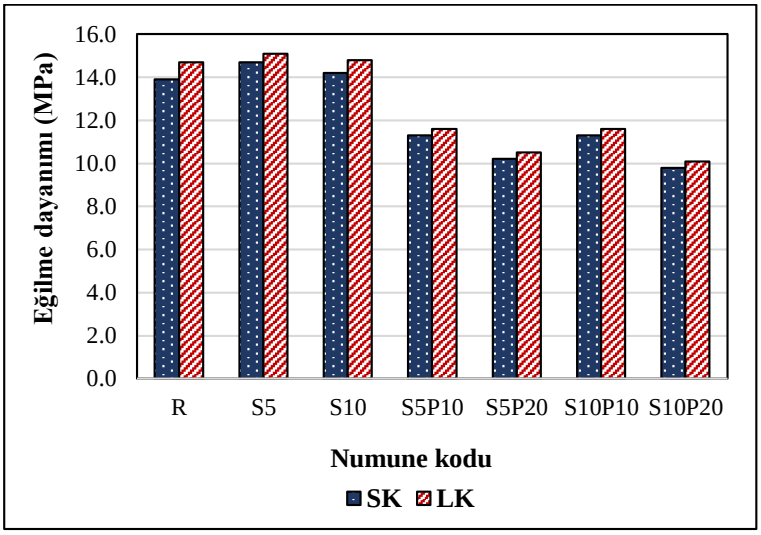


Şekil 4.12 I. grup RPB numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları

Tüm serilerde ki numuneler üzerinde LK'nin daha etkili olduğu görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı S5'de, 10,1 MPa (SK) ve 10,7 MPa (LK) olarak belirlenmiştir. Benzer kür koşulları dikkate alındığında, S5, S10, S5P10, S5P20 ve S10P10 kodlu numunelerin eğilme dayanımlarının R'nin %80-106 değerleri oranında gerçekleştiği görülmüştür. %5 SD-%10 PT (S5P10) ikameli numunenin LK'de, R, S5 (LK) ve S10 numunelerinin eğilme dayanımına eş değer bir eğilme dayanımı kazanmış olması dikkat çekicidir. PT ikamesi, SD-PT katkılı numunenin eğilme dayanımını düşürmemiş, aksine, geliştirdiği puzolanik aktivite ile eğilme dayanımını, %10 SD katkılı numunenin eğilme dayanımı değerine yükseltmiştir. En düşük eğilme dayanımı S10P20 kodlu numunede elde edilmiştir.

- **7 Günlük eğilme dayanımı sonuçları**

RPB numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.13'te grafik olarak tanımlanmıştır.



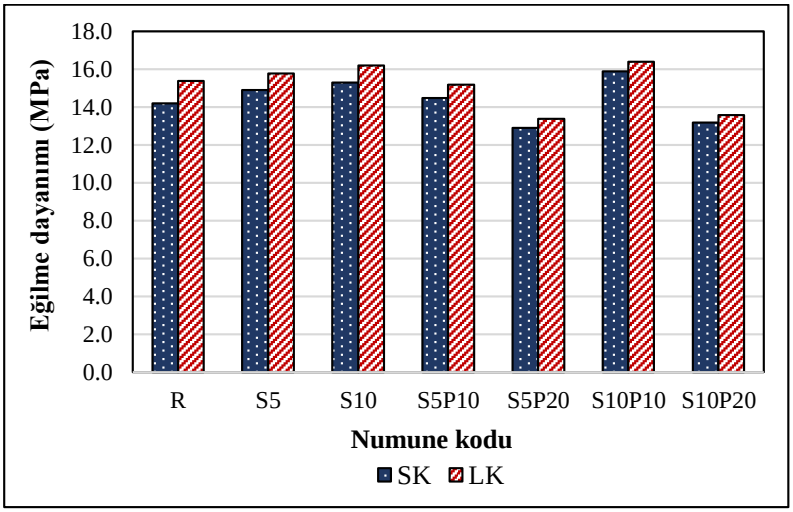
Şekil 4.13 I. grup RPB numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları

7 günlük eğilme dayanımlarının SK ve LK'de bir iki istisna dışında birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. %5 ve %10 SD ikameli numunelerin dayanımlarının, hem SK, hem de LK'de, Referans numunenin dayanımından yüksek olduğu gözlenmiştir. SD-PT katkılı numunelerin eğilme dayanımlarının SD katkılı numunelerden oldukça düşük değerler aldığı, en düşük eğilme dayanımının %20 PT ikameli numunelerde oluştuğu belirlenmiştir.

- **28 Günlük eğilme dayanımı sonuçları**

RPB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları grafik olarak Şekil 4.14'te tanımlanmıştır.

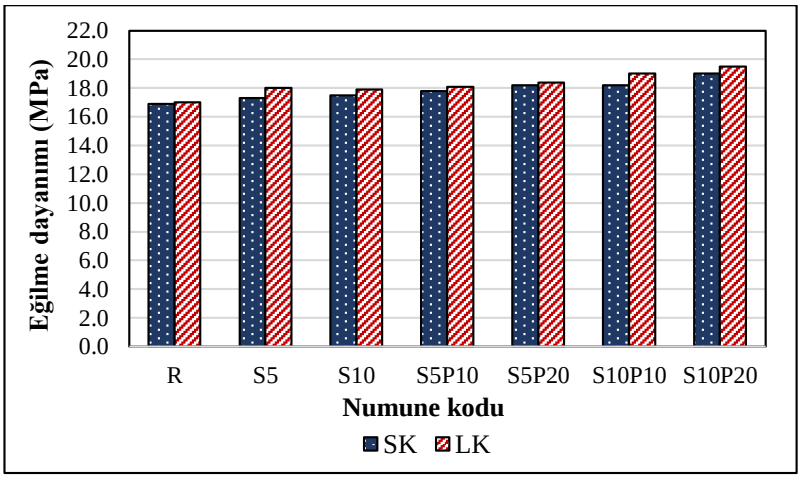
LK'nin, 28 günlük eğilme dayanımları üzerinde sınırlı bir etkisinin olduğu, S5, S10, S5P10 ve S10P10 kodlu numunelerin dayanımlarının Referans numune eğilme dayanımından daha yüksek çıktığı, S5P20 (SK) ve S10P20 (SK) numunelerinin eğilme dayanımlarının da R numunesinin yaklaşık %90'ı oranında dayanım kazandığı görülmektedir. Ayrıca, %10 PT ikameli numunelerin (S5P10 ve S10P10) hem SK, hem de LK'de, %5 ve %10 SD ikameli numunelere eş değer eğilme dayanımı kazanmaları göze çarpan bir değer test sonucudur. Bu değerler PT'nin 28. günde önemli sayılabilecek bir puzolanik reaksiyon gelişimi gösterdiğini kanıtlamaktadır. En yüksek mekanik dayanım S10P10'da (LK) 16,4 MPa, S10'da 16,2 MPa olarak, En düşük dayanım ise S5P20'de (SK) 12,9 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.14 I. grup RPB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları

- **90 Günlük eğilme dayanımı**

I. grupta yer alan RPB numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15 I. grup RPB numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımları

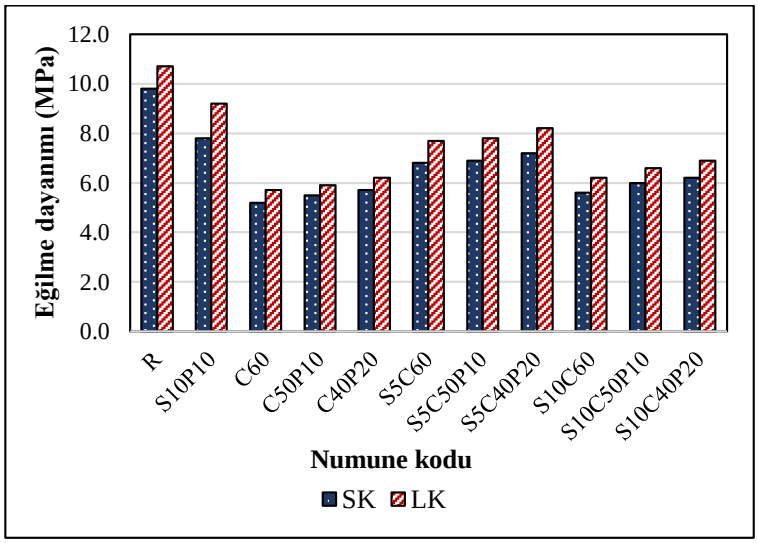
Tüm serilerdeki RPB numunelerinin SK ve LK ortamındaki eğilme dayanımlarının Referans numunenin %2-%12'si üzerinde gerçekleştiği görülmüştür. SD-PT ikameli numunelerin mekanik dayanım artışının SD katkılı numunelerden daha yüksek gerçekleştiği, %10SD-%20 PT (S10P20) ikameli numunelerin 19,0 MPa (SK) ve 19,5 MPa (LK) dayanım değerine eriştikleri belirlenmiştir. %10 ve %20 PT ikamesinin dayanım kaybı yerine, numunelerin dayanım artışlarında etkili olması dikkat çekicidir.

4.3.2.2 II. Grup numuneler

Referans ve I. grupta 28 günlük basınç dayanımı en yüksek değer alan S10P10 numunesinin eğilme dayanımı değerleri, toplamda %60, 65 ve 70 oranında YFC, YFC-PT, SD-YFC ve SD-YFC-PT ikameli numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

- **3 Günlük eğilme dayanımı sonuçları**

II. grupta yer alan RPB numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.16'da görülmektedir.

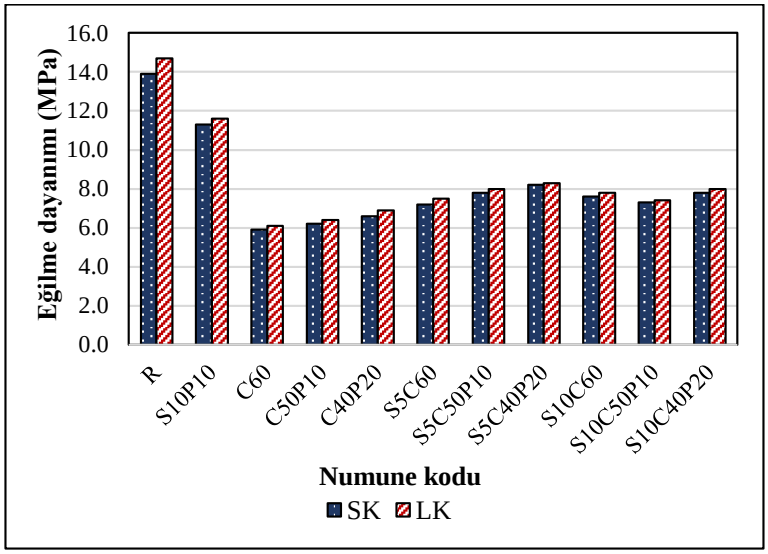


Şekil 4.16 II. grup RPB numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları

Tüm serilerde LK'nin 3 günlük eğilme dayanımları üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. En yüksek mekanik dayanım R'de 9,8 MPa (SK) ve 10,7 MPa (LK) S10P10'da 9,2 MPa (LK) olarak belirlenmiştir. Yüksek oranda ikame malzemesi içeren karışım serileri dikkate alındığında ise S5C60, S5C50P10, S5C40P20 kodlu numunelerin daha yüksek, YFC ve YFC-PT ikameli numunelerin daha düşük bir eğilme dayanımı gelişimi kazandıkları gözlenmiştir. Bu da YFC ve PT'nin puzolanik reaksiyonlarının gelişimi için daha uzun süreli bir kür süresine ihtiyaç duyduklarını göstermektedir.

- **7 Günlük eğilme dayanımı sonuçları**

Toplamda yüksek oranda farklı mineral katkı içeren (YFC, YFC-PT, SD-YFC-PT) RPB numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları R ve S10P10 kodlu numunelerin eğilme dayanımı değerleri ile karşılaştırılmış ve grafik olarak Şekil 4.17'de sunulmuştur.

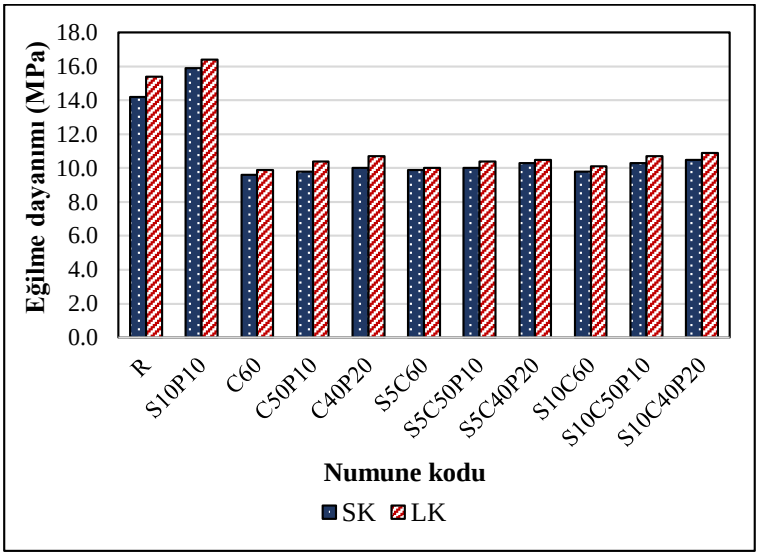


Şekil 4.17 II. grup RPB numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları

R dışında, diğer numunelerin eğilme dayanımları üzerinde LK'nin önemli bir etki oluşturmadığı, en yüksek eğilme dayanımının R'de 13,9 MPa (SK) ve 14,7 MPa (LK), S10P10'da 11,3 MPa (SK) 11,6 MPa (LK) olarak gerçekleştiği görülmektedir. Diğer numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin R'nin %41-56'sı oranında belirlenmiştir. Yüksek oranda kullanılan mineral katkının eğilme dayanımlarını düşürdüğü gözlenmiştir. YFC'nin tek başına kullanıldığında yeterli eğilme dayanımı sergileyemediği C60 kodlu numunenin eğilme dayanımından anlaşılmaktadır.

- **28 Günlük eğilme dayanımı sonuçları**

SK ve LK ortamında olgunlaştırılan, II. grup numunelerin eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.18'de verilmiştir.

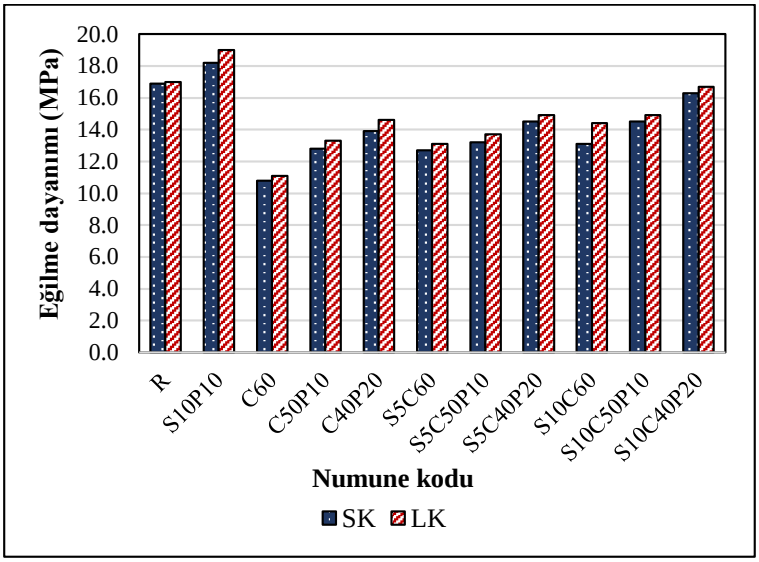


Şekil 4.18 II. grup RPB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları

28 günlük RPB numunelerinin eğilme dayanımları incelendiğinde, genel olarak numuneler üzerinde LK'nin sınırlı da olsa daha etkili olduğu, S10P10'nun SK'de R'nin %12, LK'de %6 üzerinde eğilme dayanımı artışı kazanarak en yüksek eğilme dayanımlarına eriştiği görülmektedir. YFC-PT, SD-YFC, SD-YFC-PT ikameli numunelerin özellikle LK'de 10,0 MPa'nın üzerinde dayanım kazandıkları belirlenmiştir. Ayrıca %65-%70 SD-YFC-PT ikameli numunelerin ise SK ve LK'de R'nin yaklaşık %68-74'ü oranında dayanım değerlerine ulaştıkları görülmektedir.

- **90 Günlük eğilme dayanımı sonuçları**

Şekil 4.19'da verilen 90 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde, yüksek oranda mineral katkı maddesi içeren RPB numunelerinin eğilme dayanımlarının R ve S10P10'nun dayanım değerlerinin altında gerçekleştiği görülmektedir. Bu sonuçlarda yüksek oranda kullanılan YFC'nin etkili olduğu düşünülmektedir. Ancak toplamda kullanılan ikame oranının %60-70 olduğu düşünüldüğünde, SD katkısız C40P20'nin Referans numunenin %82-86'sı, S5C40P20 ve S10C50P10'nun %86-88'i, S10C40P20'nin ise %96-98'i oranında bir eğilme dayanımı kazanmaları dikkat çekicidir. En düşük eğilme dayanımı C60'da 10,8 MPa (SK), 11,1 MPa (LK) olarak belirlenmiştir. Tüm serilerde gerçekleşen dayanım artışlarında LK'nin etkili olduğu görülmüştür.



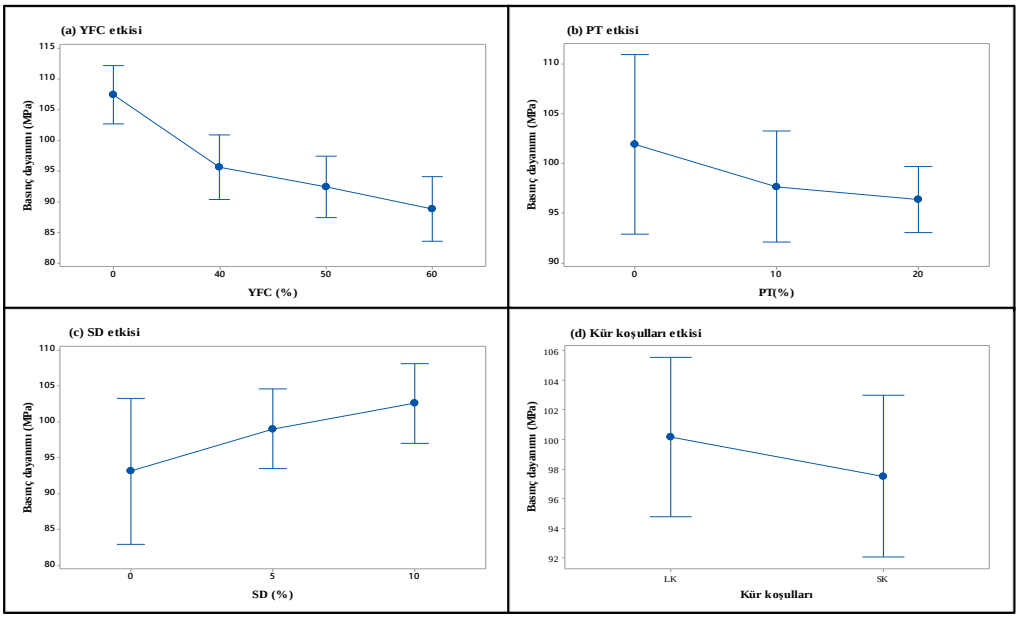
Şekil 4.19 II. grup RPB numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımları

4.5. Bağlayıcı Malzemeler ve Kür Koşullarının RPB'lerin Mekanik Özelliklerine Etkileri

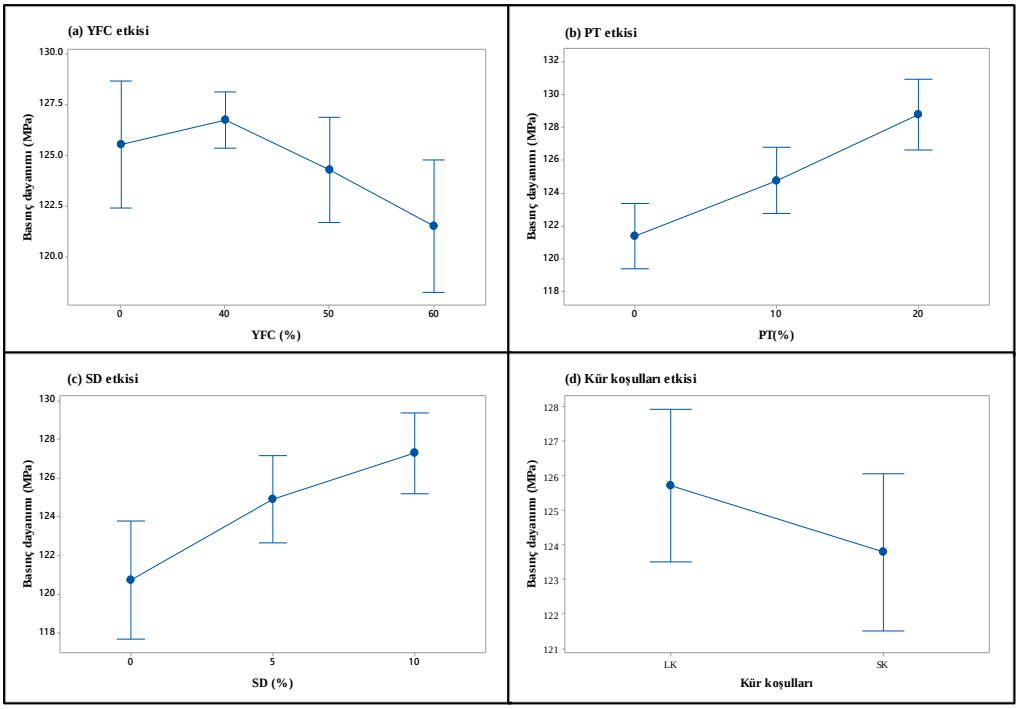
Bu bölümde çimento dışında karışımda kullanılan YFC, PT, SD ikame malzemeleri ile kür koşullarının, RPB numunelerinin 28 ve 90 günlük dayanımlar üzerindeki etkileri irdelenmiş, optimum karışım oranları belirlenmiştir.

Şekil 4.20 incelendiğinde YFC ve PT oranlarında ki artışın 28 günlük basınç dayanımlarını düşürdüğü, SD oranlarındaki artışın ise basınç dayanımlarını arttırdığı, LK'nin basınç dayanımı değerlerinin artışında daha etkili olduğu görülmektedir.

YFC, PT, SD ve kür koşullarının RPB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları üzerine etkisi Şekil 4.21'de görülmektedir. %40 YFC ikamesinin basınç dayanımlarını artırdığı, ancak artan YFC oranları ile birlikte 90 günlük basınç dayanımlarını düşürdüğü gözlenmektedir. Ayrıca PT ve SD oranlarındaki artışlarında basınç dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturarak basınç dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. LK'nin, 28 günlük basınç dayanımlarında olduğu gibi 90 günlük basınç dayanımlarını arttırdığı grafikte gözlenmektedir. Dayanım artışlarında artan kür sıcaklığının, özellikle YFC ve PT'nin puzolanik reaksiyonlarında oluşturduğu etki sonucu oluştuğu söylenebilir.



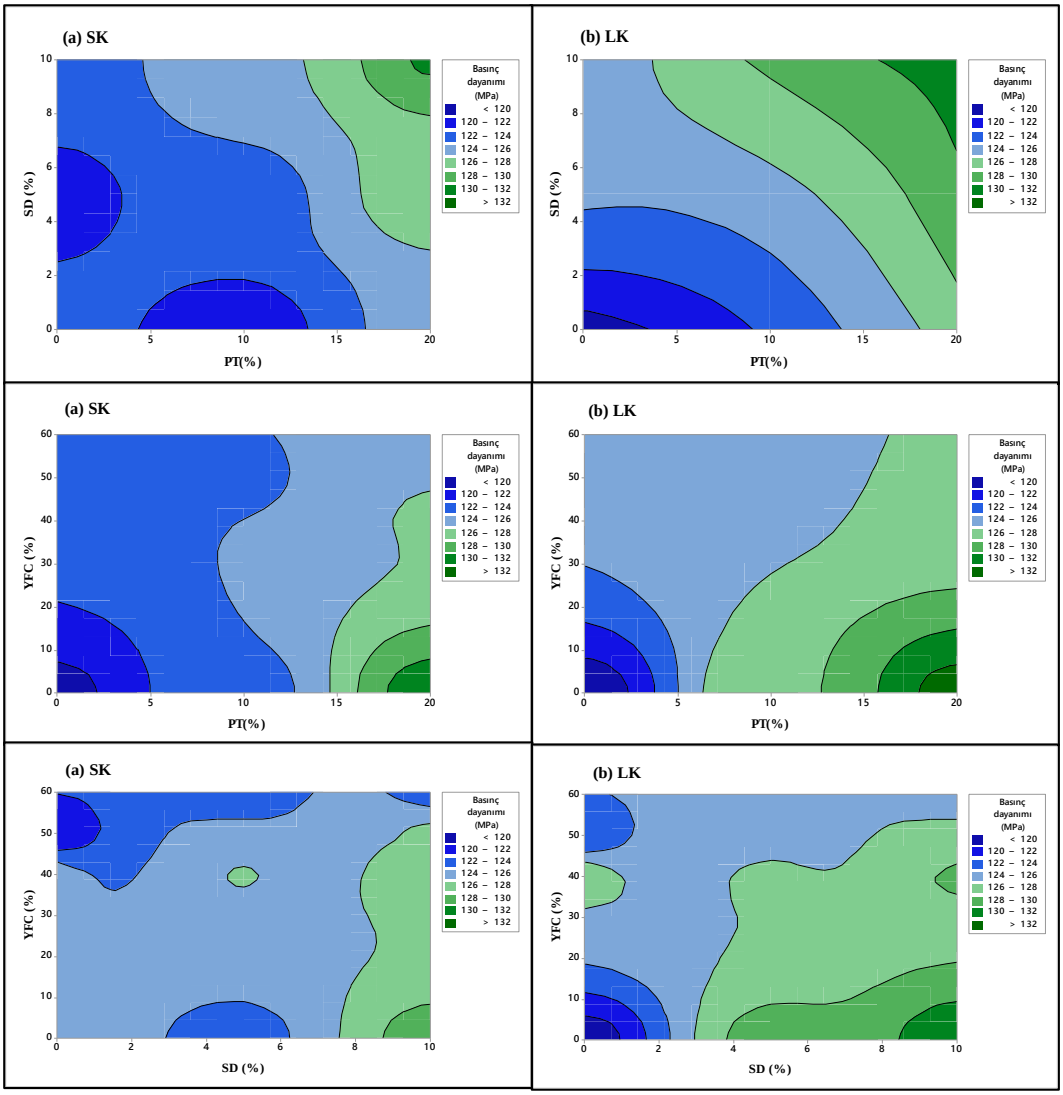
Şekil 4.20 YFC, PT, SD ve kür koşullarının 28 günlük basınç dayanımına etkisi



Şekil 4.21 YFC, PT, SD ve kür koşullarının 90 günlük basınç dayanımına etkisi

Kür koşuluna bağlı olarak, 90 günlük mekanik dayanım değerlerinin değişimi üzerinde etkili olan SD-PT, YFC-PT, YFC-SD optimum karışım oranları Şekil 4.22'de verilmiştir. Basınç dayanımı değişim aralığına bağlı olarak, optimum ikame oranlarındaki değişkenlikler grafikte görülmektedir. Optimum ikame oranları üzerinde

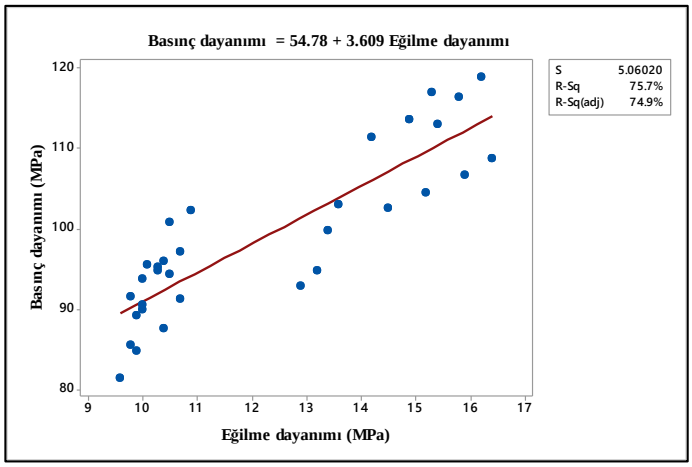
kür koşullarının etkili olduğu, LK'nin optimum ikame oranı değerlerini arttırdığı göze çarpmaktadır.



Şekil 4.22 90 günlük basınç dayanımları üzerinde etkili olan SD-PT, YFC-PT, YFC-SD optimum karışım oranları

4.6. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki

RPB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı ile eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.23'te görülmektedir.

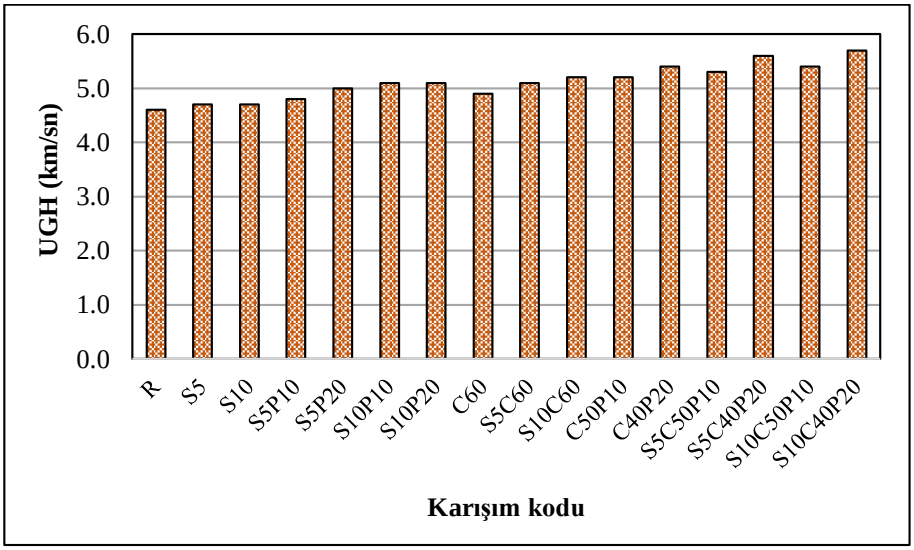


Şekil 4.23 28 günlük basınç dayanımı-eğilme dayanımı arasındaki ilişki

28 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerleri arasında R^2 = %75,7 oranında istatiksel olarak yeterli bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir.

4.7 Ultrases Geçiş Hızı Test Sonuçları (UGH)

UGH testi 90 günlük numunelere uygulanmış, RPB numunelerinin SK ve LK UGH değerlerinin hemen hemen aynı özellikleri gösterdiği belirlenmiştir. YFC, PT, SD ikameli ve R kodlu numunelerin UGH test değerleri Şekil 4.24'te grafik olarak tanımlanmıştır. En düşük UGH 4,6 km/sn olarak R, en yüsek UGH ise S10C40P20 kodlu numunede 5,7 km/sn olarak gerçekleşmiştir. I. grupta yer alan SD ve SD-PT ikameli numunelerin UGH değerlerinin 4,7-5,1 km/sn aralığında, II. Grupta yer alan YFC, SD-YFC, YFC-PT ve SD-YFC-PT ikameli numunelerin UGH değerlerinin ise 4,9-5,7 km/sn aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir. Yüksek ikame oranının UGH değerlerini arttırdığı, özellikle SD-YFC-PT ikameli numunelerin UGH değerlerinin diğerlerinden daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. SD ve PT'nin YFC ile birlikte kullanımı sonucu oluşan, filler-puzolanik etkinin UGH değerlerinin artışında etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.24 RPB numunelerinin UGH değerleri

Shariq vd., (2013), %40 YFC ikamesinin 56 günden sonra UGH'nin artışında etkili olduğunu, bunun hidratasyon gelişimi ve poroziteden den kaynaklandığını ifade etmiştir. PT içeriğindeki artış da UGH değerlerini yükseltmiştir. Karataş vd., (2019), PT içeriğindeki artışın UGH sonuçlarında bir iyileşme sağladığını, bunun PT'nin SiO_2 içeriği ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. (Kim vd., 2019), SD'nin CH'ı tüketmesi ile C-S-H oluşumunu arttırması ve bunun sonucu olarak da çimento kompozitlerin mikro yapısında oluşan iyileşmenin UGH değerlerini artırdığını açıklamıştır.

Whitehurst (1951), UGH değişimine bağlı olarak beton kalite değerlendirmesini Tablo 4.13'te tanımlandığı şekilde yapmıştır (Gesoğlu ve Özbay, 2007; Vosoughi vd., 2015). Bu değerlendirme dikkate alındığında, RPB numunelerinin tümünün UGH değerlerinin 4,5 km/sn'nin üzerinde gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 4.3 Beton kalite sınıflarının UGH özelliklerine bağlı olarak değişimi

UGH (km/sn)	Beton Kalitesi
4,5'ten fazla	Mükemmel
3,6 - 4,5	İyi
3 - 3,6	Şüpheli
2,1 - 3	Düşük
1,8 - 2,1	Çok düşük

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, düşük ve yüksek oranda çimento ikame malzemesi olarak kullanılan SD, SD-PT, YFC, SD-YFC, YFC-PT ve SD-YFC-PT mineral katkılarının ve kür koşullarının RPB numunelerinin farklı yaşlardaki mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen test sonuçlarının değerlendirmesi aşağıda sıralanmıştır.

1. SD ve SD-PT ikameli karışımların yayılma çaplarının daha düşük değerler aldığı, YFC ikameli numunelerin daha yüksek yayılma değeri sergiledikleri, SD-YFC ikameli harçlarda SD ikame oranındaki artışın yayılma değerlerini azalttığı belirlenmiştir.

2. Mineral katkı ve ikame oranlarındaki artışlar, BHA değerlerini azaltmış, PT ikamesinin BHA değerlerinin azalmasında beklendiği gibi daha etkili olduğu gözlenmiştir.

3. SD ile YFC'nin birlikte kullanımının su emme oranlarında önemli ölçüde azalma sağladığı, ayrıca SD-YFC-PT ikamesinin numunelerin su emme değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir.

4. LK'nin tüm yaş gruplarında basınç dayanımları üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür.

5. I. grup numunelerde %5 ve %10 SD katkılı numunelerin 3, 7 ve 28, ancak SD-PT ikameli numunelerin ise ileri yaş (90 günlük) basınç dayanımlarının daha yüksek değerler aldığı, yüksek incelikteki PT'nin oluşturduğu puzolanik etki ile 90 günlük basınç dayanımlarının artışında etkili olduğu görülmüştür.

6. Yüksek ikame oranına sahip II. grup numunelerde YFC, YFC-PT, SD-YFC ve SD-YFC-PT katkılı numunelerin 3 ve 7 günlük basınç dayanımı artışlarının yavaş geliştiği, bunda puzolanik reaksiyonların etkili olduğu belirlenmiştir.

7. 28 günlük basınç dayanımı değerleri dikkate alındığında, SD-YFC-PT ikameli numunelerin, Referans numunenin %85-90'ına eşdeğer basınç dayanımı değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

8. %60 YFC ikameli (C60) numune dışında, 90 günlük tüm numunelerin hem SK, hem de LK'de, Referans numuneden daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu, S10C40P20 kodlu numunenin 90 günlük basınç dayanımının SK ve LK'de sırasıyla 132,6 MPa ve 133,4 Mpa olarak gerçekleştiği, %60, %65 ve %70 YFC, SD-YFC ve SD-YFC-PT ikame oranlarında, sıkıştırma ve lif katkısı olmaksızın yüksek dayanımlı RPB üretiminin mümkün olduğu görülmüştür.

9. I. grup numunelerde SD ve SD-PT ikameli numunelerin 90 günlük eğilme dayanımları R'den daha yüksek gerçekleşmiştir.

10. II. grup numunelerin 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının R'den daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir.

11. Tüm ikame oranlarında 90 günlük numunelerin UGH değerleri Referans numuneden daha yüksek çıkmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada elde edilen test sonuçları değerlendirildiğinde, ileriki çalışmalar için aşağıda ifade edilen öneriler sıralanabilir.

1. Buhar ve sıcak su kürünün, farklı oranlarda SD-PT içeren karışımların, erken ve ileri yaş mekanik özelliklerine etkileri incelenebilir.

2. Daha etkin kür koşullarının, daha düşük YFC içeren, YFC-PT katkılı karışımların mekanik özelliklerine etkisi araştırılabilir.

3. Lif katkılı, yüksek SD-YFC-PT ikame oranına sahip karışımların mekanik özelikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

A. Elahi, P.A.M. Basheer, S.V. Nanukuttan, Q.U.Z. Khan Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials Constr Build Mater, 24 (2010), pp. 292-299

Abed, M., Nasr, M. and 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), pp. 8–12. doi: 10.1051/matecconf/201816202022.

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*. Elsevier Ltd, 99, pp. 73–81. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010.

Al-jumaily, I. a S. (2011) 'Some mechanical properties of reactive powder light weight concrete', 4(1), pp. 47–61.

Alex, J., Dhanalakshmi, J. & Ambedkar, B. (2016) 'Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 127, pp. 353–362. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.150.

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

Al Saffar, D. M., Al Saad, A. J. K. & Tayeh, B. A. (2019) 'Effect of internal curing on behavior of high performance concrete: An overview', *Case Studies in Construction Materials*. The Authors, 10, p. e00229. doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00229.

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

Aparicio, S. *et al.* (2016) 'The effect of curing relative humidity on the microstructure of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, 104, pp. 154–159. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.057.

Asteray, B., Oyawa, W. & Shitote, S. (2017) 'Experimental ınvestigation on compressive strength of recycled reactive powder concrete containing glass powder and rice husk ash', *Journal of Civil Engineering Research*, 7(4), pp.

124–129. doi: 10.5923/j.jce.20170704.03.

ASTM C 1437-07 (2009) ‘Standard test method for flow of hydraulic cement mortar’, *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 6–7.

ASTM (2009), (American Society for Testing and Materials): 597-09 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.

ASTM, C. (2013). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. C642-13.

Azzawi, A. A. A.-, Abdulsattar, R. & Shaarbaf, I. A.- (2018) ‘A State of the Art Review on Reactive Powder Concrete Slab A State of the Art Review on Reactive Powder Concrete Slabs’, (March).

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

Bani Ardalan, R., 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*. Elsevier Ltd, 134, pp. 116–122. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.090.

Boukendakdji, O. *et al.* (2009) ‘Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 23(7), pp. 2593–2598. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.029.

C. Shi, D. Wang, L. Wu, Z. Wu The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement-silica fume-slag binder Cem. Concr. Compos, 61 (2015), pp. 44-52

Cwirzen, A., Penttala, V. & Vornanen, C. (2008) ‘Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC’, *Cement and Concrete Research*, 38(10), pp. 1217–1226. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.03.013.

Dash, A. K. (2010) ‘Effect of pozzolanas on fıber reınforced concrete master of technology reınforced concrete’, (208).

Feylessoufi, A. *et al.* (1996) ‘Water environment and nanostructural network in a Reactive Powder Concrete’, *Cement and Concrete Composites*, 18(1), pp. 23–29. doi: 10.1016/0958-9465(95)00036-4.

Geso, M., Güneyisi, E. and Öz, H. Ö. (2016) 'Using of fly ash and blast furnace slag in the production of lightweight aggregates through cold-bonding process', (January 2012).

Ghassemzadeh, F. *et al.* (2010) 'Effect of silica fume and GGBS on shrinkage in the high performance concrete', *Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading - Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'10*, 2(December 2015), pp. 1007–1012. doi: 10.1201/b10552-128.

Gürkan, A. (2006), Pomza ve zeolitin alkali silika reaksiyonu üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.ÖZGEÇMİŞ

Granata, M. F. (2015) 'Pumice powder as filler of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 96, pp. 581–590. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.040.

Kabay, N. *et al.* (2015) 'Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials', *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*. Elsevier Ltd, 85, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.026.

Kabir, H. and Sadeghi, M. (2017) 'Reactive silica sand powder concrete (rsspc) uniaxial compressive strength ınvestigation', 5, pp. 1–8. doi: 10.11131/2017/101230.

Karatas, M. *et al.* (2019) 'High temperature effect on the mechanical behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete containing ground pumice powder', *Structural Concrete*, 20(5), pp. 1734–1749. doi: 10.1002/suco.201900067.

Kim, S. S. *et al.* (2019) 'Influence of coarse aggregates and Silica Fume on the mechanical properties, durability, and microstructure of concrete', *Materials*, 12(20). doi: 10.3390/ma12203324.

Kurt, M. *et al.* (2016) 'The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete', *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*. Elsevier Ltd, 103, pp. 36–46. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.043.

Lee, N.P. and Chisholm, D. H. (2006) 'Study report ractive powder concrete', 146(146).

Liu, J., Song, S. and Wang, L. (2009) 'Durability and micro-structure of reactive powder concrete', *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 24(3), pp. 506–509. doi: 10.1007/s11595-009-3506-1.

Man, N. K. (2009) ‘Studyıng the productıon process and mechanıcal propertıes of reactıve powder concrete made usıng local avaılable materıals’, *thesis*, p. 269. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.09.003.

Maroliya, M. K. (2012) ‘Mechanical Behavior Of Modified Of Reactive Powder Concrete’, 2(5), pp. 2062–2067.

Matos, P. R. de, Sakata, R. D. and Prudêncio, L. R. (2019) ‘Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 225, pp. 941–955. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.254.

Mayhoub, O. A. *et al.* (2020) ‘The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review’, *Ain Shams Engineering Journal*. THE AUTHORS, (xxxx). doi: 10.1016/j.asej.2020.07.016.

Mazloom, M., Ramezanianpour, A. A. & Brooks, J. J. (2004) ‘Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete’, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), pp. 347–357. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00017-9.

Mehta, P. K. & P. J. M. M. (2001) *Concrete Microstructure, Properties, and Materials P., McGraw-Hill*.

Meusel, J. W. & Rose, J. H.(1983) “Production of granulated blast furnace slag at sparrows point, and the workability and strength potential of concrete incorporation the slag,” fly ash, silica fume, slag & other mineral by- products in concrete, ACI Sp-79, pp.867-890.

Ming, C. & Yan, V. W. Microstructural behaviour of reactive powder concrete under different heating regimes. *Mag. Concr. Res.* **64**, 259–267 (2012).

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*. Elsevier Ltd, 123, pp. 754–767. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.082.

Muralitharan, R. S. & Ramasamy, V. (2015) ‘Basic properties of pumice aggregate’, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 8(4), pp. 1845–1852.

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*. Elsevier Ltd, 89(3), pp. 768–774. doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.003.

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), pp. 505–514. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.01.001.

Patel, Y. J. & Shah, N. (2018) 'Enhancement of the properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag based Self Compacting Geopolymer Concrete by incorporating Rice Husk Ash', *Construction & Building Materials*. Elsevier Ltd, 171, pp. 654–662. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.166.

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), pp. 349–354. doi: 10.1007/s11595-010-2349-0.

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

Rashad, A. M. (2020) 'An Overview of Pumice Stone as a Cementitious Material – the Best Manual for Civil Engineer'. Silicon.

Richard,Cheyrezy, 1995 (1995) 'Composition of reactıve powder concretes', 25(7), pp. 1501–1511.

Saleh Ahari, R., Erdem, T. K. & Ramyar, K. (2015) 'Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 79, pp. 326–336. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.053.

Samimi, K., Kamali-bernard, S. & Akbar, A. (2018) 'Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack , carbonation and marine environment', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 165, pp. 247–263. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.235.

Saridemir, M. *et al.* (2016) 'The influence of elevated temperature on strength and microstructure of high strength concrete containing ground pumice and metakaolin', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 124, pp. 244–257. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.109.

Shariq, M., Prasad, J. & Masood, A. (2013) 'Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 40, pp. 944–950. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070.

Siddique, R. (2011) 'Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 55(11), pp. 923–932. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.06.012.

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

Siddique, S. *et al.* (2018) 'Strength and impact resistance properties of concrete containing fine bone china ceramic aggregate', *Construction and Building Materials*, 169, pp. 289–298. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.213.

Staquet, S. & Espion, B. (2002) 'Influence of cement and silica fume type on compressive strength of reactive powder concrete', pp. 1421–1436.

Suresh, D. and Nagaraju, K. (2015) 'Ground granulated blast slag (ggbs) ın concrete – a review', *International Journal of Advanced Engineering Technology E- Int J Adv Engg Tech V/Issue II*, 12(4), pp. 82–84. doi: 10.9790/1684-12467682.

T.K. Erdem, O. Kirca Use of binary and ternary blends in high strength concrete Constr Build Mater, 22 (2008), pp. 1477-1483

Tam, C. M., Tam, V. W. Y. & Ng, K. M. (2012) 'Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong', 26, pp. 79–89. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006.

Toutanji, H. A. (1996) 'The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates', *Cement and Concrete Composites*, 18(2), pp. 135–139. doi: 10.1016/0958-9465(95)00010-0.

Vigneshwari, M., Arunachalam, K. & Angayarkanni, A. (2018) 'Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 188, pp. 264–277. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.008.

Wang, C. *et al.* (2012) 'Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 34(4), pp. 538–544. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005.

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

Xincheng, P. (2012) *Super-high-strength high performance concrete*, *tayloe and fracis group*. doi: 10.1201/b13112.

Yazici, H. *et al.* (2008) 'Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete', *Fuel*, 87(12), pp. 2401–2407. doi: 10.1016/j.fuel.2008.03.005.

Yazici, H. *et al.* (2010) 'Mechanical properties of reactive powder concrete containing

high volumes of ground granulated blast furnace slag', *Cement and Concrete Composites*, 32(8), pp. 639–648. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005.

Yigiter, H. *et al.* (2012) 'Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC)', *Composites Part B: Engineering*, 43(8), pp. 2907–2914. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.07.042.

Zdeb, T. (2015) 'Influence of the physicochemical properties of Portland cement on the strength of reactive powder concrete', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 108, pp. 419–427. doi: 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), pp. 108–111. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.249.108.

Zhao, H. *et al.* (2015) 'The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 95, pp. 66–74. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.050.

Zhong, C. *et al.* (2019) 'Study on mix proportion optimization of manufactured sand RPC and design method of steel fiber content under different curing methods', *Materials*, 12(11). doi: 10.3390/ma12111845.

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

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı	: Ibrahim Sassi Ali ISSA
Doğum Yeri ve Yılı	: Libya – Zawiya, 01/05/1970
Medeni Hali	: Evli
Yabancı Dili	: İngilizce
E-posta	: rumny2014@gamil.com

Eğitim Durumu

Lise	: Alzawiya Lisesi, 1993
Lisans	: 7 Nisan üniversitesi – İnşaat Mühendisliği- Alzawiya, 1999

Mesleki Deneyim

İş Yeri	: Al-Zawiyah Yüksek Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, 2000-2014