

**T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI KÜR KOŞULLARININ REAKTİF PUDRA
BETONLARININ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Bashar Qasem Taha AL-HITY

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Hasbi YAPRAK
Dr. Öğr. Üyesi M. Yasin DURGUN
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

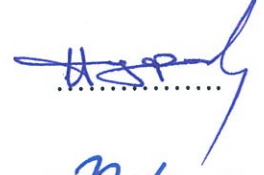
KASTAMONU – 2019

TEZ ONAYI

Bashar Qasem Taha AL-HITY tarafından hazırlanan "**Farklı Kür Koşullarının Reaktif Pudra Betonlarının Özelliklerine Etkileri**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

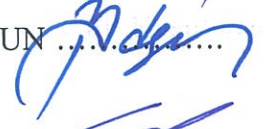
Danışman

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK
Kastamonu Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi M. Yasin DURGUN
Bartın Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN
Kastamonu Üniversitesi



04/10/2019

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Nur BELKAYALI



TAAHHÜTNAME

Tez içindeki 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 yaptığımı bildirir ve taahhüt ederim.

Bashar Qasem Taha AL-HITY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI KÜR KOŞULLARININ REAKTİF PUDRA BETONLARININ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Bashar Qasem Taha AL-HITY
Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasbi Yaprak

Çimento esaslı malzemelerin çimento yerine ikame edilmesinin temel amacı çevre dostu çözümler üretmek olsa da son yıllarda ekonomik kaygılar daha ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu çerçevede yapılan çalışmalar, yeni nesil ultra yüksek performanslı betonu kapsayacak şekilde genişletilmiş ve reaktif pudra betonu (RPB) olarak adlandırılmıştır. RPB'leri yüksek mekanik dayanım ve durabilite özelliklerine sahiptir. RPB'ü eşsiz karışım tasarımı, üretim teknikleri, yüksek oranda çimento kullanımı, silisli malzeme ikamesi, yüksek oranda yeni nesil su azaltıcı kimyasalların kullanımı ve su/bağlayıcı oranının düşürülmesi gibi özellikleri ile geleneksel betondan farklılıklar gösterir. Bu çalışmada; çimento yerine uçucu kül, doğal ince agrega yerine öğütülmüş pomza ikame edilmiş RPB'lerinin mekanik performansı üzerine silis dumanının etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 10 farklı karışım tasarlanmış, uçucu kül %30, %40 and %50 oranlarında çimento yerine, öğütülmüş pomza ise %0, 10 ve %15 oranında ince agrega yerine kullanılmış, su/bağlayıcı ve süperakışkanlaştırıcı oranları sırasıyla 0,2 ve 0,03 oranlarında sabit tutulmuştur. Harç numuneler laboratuvar, su ve sıcak su kürü olmak üzere üç farklı ortamda bekletilmiş, numunelerin eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. En düşük basınç dayanımı 97,88 MPa olarak su kürü uygulanan %0 PT ve %50 UK ikameli harçlarda, en yüksek basınç dayanımı da 123 MPa olarak sıcak su kürü uygulanan %10 PT ve %30 UK ikameli harçlarda elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları dikkate alınarak seçilen 8 harç numunesinin taramalı elektron mikroskobu yardımı ile mikro yapı analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Pomza tozu, Silis dumanı, Mekanik özellikler, Mikro yapı, SEM

2019, 84 Sayfa
Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSc. Thesis

THE EFFECTS OF DIFFERENT CURING CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE

Bashar Qasem Taha AL-HITY
Kastamonu University
Graduate School Of Natural And Applied Sciences
Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

Abstract: The topic of cement replacement with cement-based materials friendly with environment is the interested aim and with economic considerations started play important role in concrete industry. This topic has been extended to include a new generation of ultra-high performance concrete and it called reactive powder concrete (RPC). It is a type from concretes with high performance and high durability. RPC has many differences from conventional concrete and those differences summarized by its unique mix design considerations and producing techniques, usage of cement in high amount, siliceous material addition, using high amount of new generation water reducer, and also reduction of water / binder ratio. The main goal of this study is utilization of fly ash (FA) as replacement with Portland cement, and replacement the fine partition of sand by and pumice powder to investigate the influence of them on the mechanical performance of RPC, with presence of silica fume as fixed at 20% of cement for all trial mixes. Experimental program includes ten trial mixes. Fly ash content was 30%, 40% and 50% by weight of cement. Pumice powder content was 0%, 10% and 15% by the weight of fine partition of sand. Water/binder ratio and superplastizer were fixed at 0.2 and 0.03 respectively. By using three curing conditions included (standard normal water curing, laboratory room curing and hot water curing), production of reactive powder mortar sampels successfully carried out at the minimum compressive strength of 97.88 MPa in age of 28 days at standard water curing condition and by utilization of 0% pumice powder and 50% fly ash. 123MPa has been achieved at 28 days by utilization of 30% fly ash and 10% pumice powder under hot water curing. Depending on the results of compressive strength in 28 days, microstructure of mortars by SEM test have been conducted for eight trials mixes.

Key Words: Fly ash, Pumice powder, Silica fume, RPC, Mechanical properties, Microstructure, SEM

2019, 84 Pages

Science Code: 91

TEŞEKKÜR

Çalışmanın her aşamasında emeği geçen, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmeme yardımcı olan ve beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalışmanın her aşamasında emeği geçen ve beni yönlendiren çok değerli hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN, Sayın Dr. Öğr. Üyesi M. Yasin DURGUN 'ya teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yaklaşık üç yıldır uzağımda olsalar da bana olan güven ve inançları ile her zaman yanımda hissettiğim, beni destekleri ile yücelten, bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan, bana hep çok şanslı olduğumu hissettiren canım aileme sonsuz teşekkürler.

Bashar Qasem Taha AL-HITY
KASTAMONU, EKİM,2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TAAHHÜTNAME.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
FOTOĞRAF DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Beton Teknolojisindeki Gelişmeler (Genel Bakış).....	4
2.2. Reaktif Pudra Beton (Tanım ve Açıklama).....	6
2.3. RPB'nin Temel Özellikleri.....	7
2.3.1. Fiziksel Özellikler.....	7
2.3.2. Mekanik Özellikler.....	9
2.4. RPB'nin Performansı (Etkileyen Faktörler).....	12
2.4.1. Malzeme Seçimi.....	12
2.4.2. Parçacıklar Dizilimi.....	22
2.4.3. Su - Bağlayıcı Oranı.....	24
2.4.4. Kür Yöntemleri.....	27
2.5. Hidratasyon ve Puzolanlı Reaksiyon (RPB)'de.....	31
2.6. Eski Çalışmalardan RPB Karışım Tasarımı.....	32
2.7. RPB'nin Avantajları.....	33
2.8. Reaktif Pudra Beton Dezavantajları.....	35
2.9. RPB'nin Uygulamaları.....	35
2.9.1. ABD'deki Wapello Ülke Köprüsü.....	35
2.9.2. X-şekilli ön baskılı kirişler.....	35
2.9.3. Kanada'daki Sherbrooke Yaya Köprüsü.....	36
2.9.4. Kore'deki Sunyudo Yaya Köprüsü.....	36
2.9.5. Japonya'daki Sakata-Mirai Yaya Köprüsü.....	37
2.9.6. Avustralya'daki Shepherds Creek Yolu Köprüsü.....	37
3. MALZEMELER VE DENEYSEL PROGRAM.....	39
3.1. Giriş.....	39
3.2. Malzemeler.....	39
3.2.1. Çimento (Ç).....	39
3.2.2. Silis Dumanı (SD).....	40
3.2.3. Kum.....	41
3.2.4. Uçucu Kül (UK).....	41
3.2.5. Pomza Tozu (PT).....	42
3.2.6. Su (S).....	43
3.2.7. Süperakışkanlaştırıcı (SA).....	43
3.3. Deneysel Program.....	44
3.4. Malzemelerin hazırlanması.....	45
3.5. Karışım Oranları.....	47

3.6. Karıştırma Dizileri	48
3.7. Numunelerin Hazırlanması	49
3.8. Kütleme Yöntemi	49
3.9. Test Prosedürü	50
3.9.1. Taze Harç Testi	51
3.9.2. RPB'nin Sertleştirilmiş Özellikleri	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
4.1. RPB'nin Fiziksel Özellikleri	55
4.1.1. Taze Harç (Yayıma) Özellikleri	55
4.1.2. Birim Ağırlık Sonuçları	56
4.2. Sertleştirilmiş Beton Özellikleri	57
4.2.1. Basınç Dayanımı	57
4.2.1.1. 3 Günlük basınç dayanımı sonuçları	57
4.2.1.2. 7 Günlük basınç dayanımı sonuçları	59
4.2.1.3. 28 Günlük basınç dayanımı sonuçları	60
4.2.1.4. Su kürünün basınç dayanımı üzerine etkisi	61
4.2.1.5. Laboratuvar kürünün basınç dayanımı üzerine etkisi	62
4.2.1.6. Sıcak su kürünün basınç dayanımı üzerine etkisi	63
4.2.2. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları	64
4.2.3. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki	66
4.3. RPB mikro yapısı	68
4.3.1. Kontrol karışımlarının mikro yapısı	69
4.3.2. Mineral katkı maddeli karışımların mikro yapısı	70
5. SONUÇLAR ve Öneriler	75
5.1. SONUÇLAR	75
5.2. Gelecekteki Araştırmalar İçin Öneriler	76
KAYNAKLAR	77

SEMBOLLER VE KISALTMA

Kisaltmalar

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
B	Bağlayıcı
C-S-H	Kalsiyum-Silikat-Hidrat
Ç	Çimento
ÇCT	Çelik cüruf tozunun
HRPB	Hafif reaktif pudra betonu
KYB	Kendiliğinden yerleşen beton
LTB	Lif takviyeli beton
ÖGYFC	Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
RPB	Reaktif pudra betonu
SD	Silis dumanı
SK	Normal su kürlenme
UIUK	Ultra ince uçucu kül
UK	Uçucu kül
UYDB	Ultra yüksek dayanımlı beton
YDB	Yüksek dayanımlı betonun
YSD	Yoğunlaştırılmış silis dumanı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Basınç dayanımı ve hidrasyon derecesi ilişkisi	10
Şekil 2.2 Apollonian dizilim konsepti	24
Şekil 2.3 Su/çimento oranı ve basınç dayanımı ilişkisi	26
Şekil 2.4 İşlenebilirlik ve betonun su/çimento oranı arasındaki ilişki	27
Şekil 3.1 Uçucu külün partikül boyutu dağılımı	42
Şekil 3.2 Pomza tozunun partikül büyüklüğü dağılımı	46
Şekil 3.3 Deneysel program	49
Şekil 3.4 Kontrol ve diğer karışımlar için deneysel kür şeması	50
Şekil 3.5 Harç yayılma testi	51
Şekil 3.6 Eğilme testinin şematik görünümü	52
Şekil 4.1 Yayılma Tablası testi sonuçları	55
Şekil 4.2 28 Günlük birim ağırlık değerleri.....	57
Şekil 4.3 3 Günlük basınç dayanımı değerleri	58
Şekil 4.4 7 Günlük basınç dayanımı değerleri	59
Şekil 4.5 28 Günlük basınç dayanımı değerleri	60
Şekil 4.6 Su kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerleri	61
Şekil 4.7 (LK) kürlenme altında farklı karışımların basınç dayanımı.....	62
Şekil 4.7 (SSK) kürlenmesi altında farklı karışımlar için basınç dayanımı.....	63
Şekil 4.9 Normal su kürlenmesi (SK) altında eğilme dayanımı	65
Şekil 4.10 Laboratuvar odası kürlenme (LK) altında eğilme dayanımı	65
Şekil 4.11 Sıcak su kürlenme (SSK) altında eğilme dayanımı	66
Şekil 4.12 (SK) altında basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki	67
Şekil 4.13 (LK) altında basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki	67
Şekil 4.14 (SSK) altında basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki	67
Şekil 4.15 Normal su kürlenme kontrol karışımının SEM görüntüleri	69
Şekil 4.16 Laboratuvar odası kürlenmesinde kontrol karışımının SEM görüntüleri	69
Şekil 4.17 Sıcak su kürlenmesinde referans karışımının SEM görüntüleri	70
Şekil 4.18 Normal su kürlenmesinde kürlenmiş P0-UK50 karışımının SEM görüntüleri	71
Şekil 4.19 Sıcak su kürlenmesinde kürlenmiş P10-UK30 karışımının SEM görüntüleri.....	71
Şekil 4.20 Laboratuvar odası kürlenmesinde kürlenmiş P10-UK40'ın SEM görüntüleri	72
Şekil 4.21 Normal su kürlenmesinde kürlenmiş P15-UK30'un SEM görüntüleri	73
Şekil 4.22 Laboratuvar odası kürlenmesinde kürlenmiş P0-UK40'ın SEM görüntüleri	73

FOTOĞRAF DİZİNİ

	Sayfa
Fotoğraf 2.1. Kanada'daki Sherbrooke Yaya Köprüsü	36
Fotoğraf 2.2. Kore'deki Sunyudo Yaya Köprüsü	37
Fotoğraf 2.3. Japonya'daki Sakata-Mirai Yaya Köprüsü	37
Fotoğraf 3.1. RPB karışımlarında kullanılan çimento	39
Fotoğraf 3.2. RPB karışımlarında kullanılan Silis dumanı	41
Fotoğraf 3.3. (0-0.6) mm ve (0.6-2) mm karışımlarında kullanılan kum	41
Fotoğraf 3.4. Karışımlarında kullanılan uçucu kül (F sınıfı)	42
Fotoğraf 3.5. Karışımlarında kullanılan Pomza tozu	42
Fotoğraf 3.6. Malzemeleri öğütmeden önce kurutmak için kullanılan fırın	45
Fotoğraf 3.7. Öğütme için CHRYSO- Cem ADM	46
Fotoğraf 3.8. Bilyalı Değirmen ve Kırıcı Makine	47
Fotoğraf 3.9. RPB karışımlarını karıştırmak için kullanılan karıştırıcı	49
Fotoğraf 3.10. Sıcak su kür tankı	50
Fotoğraf 3.11. Eğilme dayanımı testi	52
Fotoğraf 3.12. Basınç dayanımı testi	53
Fotoğraf 3.13. Quanta FEG 450 (SEM testi)	54

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Birim ağırlığa göre beton sınıflandırması	4
Tablo 2.2 Basınç dayanımına göre beton sınıflandırması	5
Tablo 2.3 (ASTM C618)'ya göre, uçucu küller kimyasal bileşimi (%)	17
Tablo 3.1 Çimentonun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri	40
Tablo 3.2 Silis dumanının teknik özellikleri	44
Tablo 3.3 Uçucu külün kimyasal analizi	43
Tablo 3.4 CHRYSO Lab Bet 8109 teknik detayları ve özeti	46
Tablo 3.5 RPB'nin kontrol karışımının (K) karışım oranları	47
Tablo 3.6 RPB'nun farklı karışım oranları	47
Tablo 3.7 RPB karışımının bileşenleri (kg/m ³).....	48
Tablo 4.1 Mikro yapı testi için seçilmiş örnekler	68

1. GİRİŞ

Beton; bina, köprü ve baraj gibi çok farklı yapılarda kullanılan ana malzemelerden biridir. İnşaat mühendisliğinde beton teknolojisinin gelişimi, özellikle mekanik performansı ile ilişkilidir ve yapılan araştırmaların önemli bir bölümü, betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak yapılmıştır. 1930'larda, Eugene Freyssinet, priz sırasında betonu basınca maruz bırakmanın beton dayanımını artırdığını belirtmiş ve 1960 yılında yüksek sıcaklık kürü ile 650 MPa beton basınç dayanımı kaydedilmiştir (Washer vd., 2004; Richard ve Cheyrezy, 1995; Feyllsoufi vd., 1996).

Yüksek performanslı bir beton elde edilebilmesi önemli miktarda çimentonun kullanılmasını gerektirmektedir. Yüksek çimento içeriği ise hidrasyon ısısını olumsuz yönde etkilemekte ve rötne problemlerine yol açmaktadır. Hidrasyon problemlerinin yanı sıra yüksek hacimde çimento kullanımı, maliyetleri artırmakta, ayrıca çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu nedeniyle daha fazla çevre sorunu yaratmaktadır. Bilindiği gibi çimento üretimi, üretilen her ton çimento başına, atmosfere yaklaşık bir ton CO₂ yaymaktadır. Ayrıca çimento endüstrisi tarafından tüketilen enerjinin, küresel temel enerji tüketiminin yaklaşık %2'si olduğu tahmin edilmektedir. Dolayısıyla çimentolu kompozit tasarım ve üretiminde karışımda kullanılan çimentonun, mineral katkı maddeleri ile değiştirilmesi bu sorunları çözenin uygun bir yoldur. Buna ilaveten, mineral katkı maddelerinin kullanımı, çimentolu kompozitlerin dürabilitesinin iyileştirilmesine ve beton endüstrisine de daha ekonomik çözümler sunar. Önceki çalışmalarda, ultra yüksek performanslı beton üretimlerinde; silis dumanı dışında, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), uçucu kül (UK), kalker mikro dolgu maddesi ve metakaolin vb. çoğu endüstriyel atık niteliğindeki malzemelerin dâhil edilmesiyle ulaşılabileceği ifade edilmiştir (Aydin ve Baradan, 2013; Zulu, 2017).

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü ve metakaolin gibi endüstriyel ve tarımsal atık niteliğindeki puzolanik özellik gösteren malzemeler, Portland çimentosunun yerine kısmi olarak kullanılabilir (Grădinaru, 2017). Uçucu külün betonda ikame malzemesi olarak kullanımı, ileriki dönem dayanım değerlerine

olumlu etki etmekte ve çimentolu kompozitlerin maruz kaldığı zararlı ortam koşullarında dürabiliteyi artırmakta, buna ek olarak, uçucu kül partiküllerinin küresel formu sayesinde taze betonun işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesine ve dolayısıyla da yerleştirilme ve sıkıştırılmasına da katkı sağlamaktadır. Tüm bunlara ilave olarak; çimento betonun en pahalı bileşeni olup, çimentonun bir kısmının uçucu kül ile değiştirilmesi, beton karışımlarının maliyetlerinin düşürülmesine de katkı sağlayacaktır (Yaprak, 2017).

1990'ların ortasında Fransa'da, Bouygues olarak adlandırılan bir şirket, beton özelliklerinin geliştirilmesi üzerine çalışmış ve basınç dayanımı geleneksel betonun dört katına eşit, 150-200 MPa dayanıma sahip (bazı test sonuçları 810 MPa kadar çıkabilen) yeni nesil, yüksek performanslı bir beton üretmiş, üretilen bu yeni nesil beton, reaktif pudra betonu (RPB) olarak tanımlanmıştır. RPB, kısa çelik tel liflerin de karışıma eklenmesiyle, ileri derecede ultra yüksek dayanım, mükemmel dürabilite ve aynı zamanda yüksek süneklik sağlayan o dönem için devrim sayılabilecek, çimentolu kompozit bir yapı malzemesi niteliği kazanmıştır (Cyr ve Shah, 2002).

RPB terimi, bileşimini oluşturan bileşenlerinin kompozisyonunun yanı sıra bileşenlerinin her birinin kimyasal reaksiyonlarının niteliğini de ifade eder. Geleneksel hidrasyon işlemi ile çimento, kalsiyum hidroksitle oluşan puzolanik reaksiyon işlemi ile silis dumanı, daha fazla C-S-H oluşumu için çözülmüş silis sağlayan rolü ile kuvars kumu, ayrıca ısı işlem veya priz etkisine maruz kaldığında tobermorit ve ksonotlit oluşumu ile CaO/SiO_2 oranını değiştirmek için kuvars tozu (Lee, N.P. ve Chisholm, 2006; Sarika ve John, 2015).

Geleneksel çimentolu kompozitlerle karşılaştırıldığında, RPB parçacık boyutlu homojenlik, gözeneklilik ve mikroyapılarının yanı sıra temel iyileştirmeleri de dikkate almıştır. Erişilmiş mekanik özelliklere ek olarak, 200 ila 800 MPa aralığında basınç dayanımı, 1200-40.000 J/m² aralığında (kırılma enerjisi) ve %1 nihai gerilim dayanımı sağlamaktadır (Yazici vd., 2010). Richard ve Cheyrezy (1995)'ye göre aşağıdaki tanımlanan ilkeler uygulanarak RPB'ları geliştirmek için önemlidir.

a. Karışımın homojenliğini arttırmak için iri agregaların eliminasyonu,

- b.** Tane boyutu dağılımının optimizasyonu ve taze karışımın kalıplanmasında iyi bir sıkıştırma işlemi,
- c.** Priz sonrası ısıl kütleme ile mikro yapının iyileştirilmesi,
- d.** Kısa boyutlu çelik liflerin karışıma eklenerek kompozitin sünekliğinin artırılması. Karıştırma ve döküm işlemlerini mümkün olduğunca mevcut uygulamaya yakın hale getirmek.

Tez çalışmasında; %30, 40, 50 oranında yüksek incelikte uçucu kül çimento yerine, %0, 10, 15 oranında pomza tozu ince agrega yerine ikame ederek lifli olmayan RPB harç numuneleri üretilmiş, sertleşen harç numuneler su, laboratuvar ve sıcak su+laboratuvar olmak üzere, test aşamasına kadar üç farkı kür ortamında olgunlaştırılmış, numunelerin eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. Harç karışımlarında %20 sabit oranında silis dumanı, harçların işlenebilirliğini arttırmak için de süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Harç bileşenleri ve kür koşullarının RPB harçlarının mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Yapılan deneysel tez çalışması;

- i. Endüstriyel atık niteliğindeki uçucu kül ve atık pomzanın geri dönüşümünün sağlanarak, ekonomiye kazandırılması ile çimentolu kompozitin maliyetinin düşürülmesi,
- ii. Hammadde kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir gelişme,
- iii. CO₂ emisyonlarının ve atıkların çevreye etkilerinin azaltılması açısından önemlidir.
- iv. Ayrıca uçucu kül ve pomza tozunun oluşturacağı puzolanik aktivite ile çimentolu kompozitin mekanik dayanım ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesine de katkı sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölüm, beton teknolojisinin gelişimine genel bir bakışla başlamaktadır; ardından, önceki çalışmalardan yola çıkarak, reaktif pudra betonunun tanımı, açıklaması ve özellikleri; bunlara ek olarak reaktif pudra betonunun üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve beton performansına etkisi dâhil olmak üzere betonun karakteristiğini ve performansını etkileyen tüm faktörler; ayrıca kütleme rejimleri, dizilim yoğunluğu ve su/bağlayıcı oranı gibi diğer faktörler sunulmaktadır. Son olarak bu bölümde, avantajlar ve reaktif pudra betonu uygulamaları sunulacaktır.

2.1. Beton Teknolojisindeki Gelişmeler (Genel Bakış)

Li (2011) kaynağına göre, beton aşağıdaki kategorilere ayrılabilir:

Birim ağırlığına göre sınıflandırma; Tablo 2.1’de gösterildiği gibi dört beton kategorisi vardır, agrega, beton birim ağırlığındaki farklılık faktörünü oluşturan ana bileşendir.

Tablo 2.1. Birim ağırlığa göre beton sınıflandırması

Tasnif	Birim ağırlık (kg/m ³)
Ultra Hafif beton	<1200
Hafif Beton	1200 < UW < 1800
Normal Ağırlıklı Beton	~2400
Ağır Beton	>3200

Beton katkı maddelerine göre sınıflandırma; agregalar, çimento ve su gibi temel beton elemanlarına katkı maddesi olarak kullanılan malzemelere dayanarak farklı gruplarda sınıflandırılabilir. Bu tiplerden Lif takviyeli beton (LTB), bu kategorideki çelik, cam, polimerikler ve karbon gibi birçok lif türünün, lif takviyeli beton üretmesi için kullanılır. Liflerin eklenmesinin temel amacı, toklukta artış elde etmek, gerilme özelliğinin iyileştirilmesi, dekorasyon ve rötre kontrolüdür. Ayrıca, geniş miktarda suda çözünür Polimer içeren beton tiplerinden biri olan makro hatası olmayan (MHO) beton, çift merdaneli karıştırma işlemi ile üretilmiştir; bu tip beton, beton geriliminin ve eğilme performansının iyileştirilmesi amacıyla geliştirilmiştir. (DSP), bir başka tip

betondur, bu beton büyük miktarda silis dumanı ve diğer mineral katkı maddelerinin ufak parçacıklarla dâhil edilmesiyle, küçük parçacıklar ile yoğunlaştırılmıştır. Bu tip beton, makine ve endüstriyel kalıpların araçlarını üretmek için kullanılmıştır. Polimerlerin bağlayıcı olarak kullanıldığı polimer beton, Portland çimento beton elemanlarına polimeri emdirme yöntemiyle ve sıradan Portland betonuna katkı maddesi olarak polimerin dâhil edilmesiyle oluşturulmaktadır (Li, 2011).

Beton basınç dayanımına göre sınıflandırma; basınç dayanımına göre beton, Tablo 2.2.'de gösterildiği gibi 4 ana tip olarak sınıflandırılabilir. Düşük dayanımlı betonun kullanımı, yol yer altı katmanlarına ve bölümlerine uygulanabilir. Orta dayanımlı betonlar; kolonlar, köprü ve benzeri bölümler gibi bina elemanlarında kullanılan en yaygın betondur. Yüksek dayanıma sahip betonlar, kesme duvarlarında, yüksek bina sütunlarında ve köprü kulelerinde kullanılabilir. Ultra yüksek dayanımlı betonlar, yapı projelerinde yaygın olarak kullanılmamaktadır, köprü kirişleri gibi sınırlı yapısal parçalarda kullanılmaktadır (Li, 2011).

Tablo 2.2. *Basınç dayanımına göre beton sınıflandırması*

Tasnif	Basınç Dayanımı (MPa)
Düşük dayanımlı beton	< 20
Orta dayanımlı beton	20–50
Yüksek dayanımlı beton	50–150
Ultra yüksek dayanımlı beton	> 150

Bir betondan, 200 MPa'dan fazla bir basınç dayanımı elde etmek mümkündür (Man, 2009). Bu gibi durumlarda, özel yüksek dayanımlı agreganın dâhil edilmesi, uygun basınç ve ısı ile kürleme yöntemlerinin uygulanması ve çelik agregaların karıştırılması ile 810 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir (Richard ve Cheyrezy, 1995). Yıllar içinde, çimento esaslı malzemeler kullanarak yüksek mekanik performansa sahip kompozit malzemelerin üretilmesi için birçok çalışma yapılmıştır, yüksek dayanımlı betonun (YDB) ilk Uygulanışı, 1970 yılında yüksek çatılı inşa binalarındaki sütunlardır (Cyr ve Shah, 2002). Bununla birlikte, yüksek dayanımlı betonun dezavantajı kısaca, genelde zamanla artan zor işlenebilirliği ve betonun erken dönemindeki termal çatlamayı önlemek için, düşük ısı bağlayıcılarının ve soğutma işlemlerinin kullanılması ihtiyacıdır (Man, 2009).

Son zamanlarda, daha yüksek basınç dayanımına sahip beton üretimi, belirli tekniklerin işlenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Ultra yüksek dayanımlı beton (UYDB), 200 MPa basınç dayanımı sağlayabilir. İki normal tip ultra yüksek dayanımlı beton üretilmiştir: makro hatası olmayan çimento (MHO) ve reaktif pudra beton (RPB). Makro hatası olmayan çimento, suda çözünür polimerler ile çimentoyu karıştırarak üretilir. Polimer ve çimento arasındaki yüksek kesme karışımının neden olduğu mekanik-kimyasal reaksiyon, 200 MPa'ya kadar gerilim dayanımı oluşturur, ancak bu betonun ana kusuru, su ile temas ettikten sonra mekanik özelliklerinin azalmasıdır (Wille, Naaman ve Montesinos, 2011; Cwirzen, Penttala ve Vornanen, 2008; Cyr ve Shah, 2002).

Reaktif pudra betonu (RPB), yüksek dayanımlı bir betondur ve bu beton, sadece kalın agregaları olmamasından değil, aynı zamanda RPB'nin düşük gözenekliliğinin, dizilim işlemi parçacıklarını artırıp beton karışımının suyunu azaltarak üretmesinden kaynaklanır; bu karışımın hiçbir kalın agregası yoktur ve silis dumanı, kum, ezilmiş kuvars gibi ince tozlar 0,02-300 µm arası parçacık boyutu ile uygulanmaktadır. Tane boyutu dağılımını optimize etmek, kalıp yoğunluğunu geliştirip su-bağlayıcı oranı 0,4-0,5 olan sıradan betona kıyasla, su-bağlayıcı oranını 0,2'ye kadar düşürmektedir (Cyr ve Shah, 2002; Li, 2011).

2.2. Reaktif Pudra Betonu (Tanım ve Açıklama)

RPB ismi, malzemedeki yüksek miktardaki hidrolik reaktif bileşenleri ve içinde kullanılan parçacıkların boyutunu ifade etmektedir (Aİtcin vd., 1998).

Liu, Song ve Wang (2009); Cwirzen (2007), reaktif pudra betonunu, çok yüksek performanslı ve ultra yüksek basınç dayanımına sahip çimento esaslı yeni bir bileşik malzeme olarak tanımlamıştır, bu en iyi açıklamadır ve ultra yüksek performansın en yaygın kullanımınıdır.

Sarika ve John (2015) kaynağına göre, reaktif pudra betonu beton değildir çünkü çimento karışımında kalın agrega yoktur. Reaktif pudra betonu terimi; çimento, silis dumanı, Süperakışkanlaştırıcı bileşiğinden oluşan, lif takviyeli ve çok düşük su-

çimento oranlı, ayrıca sıradan agrega yerine çok ince agrega sunumu içeren malzemeyi tanımlamak için kullanılmıştır.

Bu beton tipi, mikro çimento malzemelerinin entegrasyonu ile üretilmektedir ve bu tip beton ile ilgili temel ilkeler Richard ve Cheyrezy tarafından yürütülmüştür (Mostofinejad, Nikoo ve Hosseini, 2016). Reaktif pudra betonu; tipik su-bağlayıcı oranı ile priz sonrası ısıyla kürlenme, yüksek basınç ayarlama işlemi ve makro kusurların dahil olmamasıyla; pudra karışım bileşiklerini geliştirmenin ve mikro yapının homojenliğini artırmanın (0,6 mm agreganın maksimum çapını en aza indirerek) uygulandığı, ileri bir beton üretme teknolojisidir (Helmi , Matthew R. Hall ve Lee A. Stevens , 2016).

Wang vd. (2013), yüksek performanslı sahip yeşil bir beton tipi olarak tarif edilen reaktif pudra betonunun, yüksek dürabiliteye sahip olduğunu açıklamıştır. Beton olarak adlandırılmış olmasına rağmen RPB, geleneksel betondan pek çok açıdan farklıdır ve bu farklılıklar; eşsiz karışım tasarımı faktörü, üretim teknikleri, yüksek miktarda silisli malzeme katkısı, yüksek miktarda yeni nesil su azaltıcı kullanımı, dolayısıyla su/bağlayıcı oranının azalması, ön ayar basıncının uygulanması, ısıtma işlemler, yüksek basınçla buhar kürlenmesi, kalın agreganın giderilmesi, sert agrega tiplerinin kullanımı ve bu katkılardan ve özel tekniklerden biri olan mikro çelik lif olarak özetlenebilir (Akir, 2017).

2.3. RPB'nin Temel Özellikleri

2.3.1. Fiziksel Özellikler

2.3.1.1. Birim Ağırlık

Genellikle, RPB'nin yoğunluğu (1760–2410) kg/m³ arasında değişmektedir (Shaheen ve Shrive, 2006). Yüksek kalite, yüksek yoğunluklu agrega ve düşük su içeriği ile karakterize olduğundan, RPB yüksek bir yoğunluğa sahip olabilir. Ayrıca, beton sertleşmesinin erken dönemlerindeki ön ayar basıncı, karışım yoğunluğunun artmasına ön ayak olabilir (Sadrekarimi, 2007). Richard ve Cheyrezy (1995), basınç dayanımının yoğunluk ile arttığını bildirmiştir. Ayrıca beton harçları üzerine basınç uygulamanın,

yoğunluğu artırmak için etkili bir yöntem olduğunu belirtmiştir ve bu uygulamanın, beton yoğunluğunu artıracak üç etkisi vardır, bu etkiler; sıkışmış havanın azaltılması, fazla suyun çıkarılması ve kimyasal rötrenin telafi edilmesi şeklinde özetlenebilir.

Sadrekarimi (2007), 240°C'deki yüksek sıcaklık seviyesi ile kürlenmenin, yoğunluğu, 90°C'de kürlenmeden daha çok azalttığını belirtmiştir. Yoğunluktaki bu azalmanın, 240°C'lik numunelerin hidrasyonunun daha yüksek olması ve ksonotlit oluşumuyla sonuçlanmasından kaynaklandığını açıklamıştır, ayrıca bu oluşumun, diğer özgün elementlerden (C-S-H) daha hafif olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, silis dumanı içeriğindeki artışın, yoğunluğun azalmasına neden olduğunu da gözlemlemiştir; çünkü çimento parçacıkları tarafından işgal edilen boşluklar, kısmen silis dumanı tozunun daha hafif parçacıklarıyla dolmuştur.

2.3.1.2.İşlenebilirlik

ASTM C125'te tanımlandığı gibi, işlenebilirlik, homojenlikteki minimum kaybetme ile taze karışımı yönlendirmek için gereken çabaları ifade eden özelliktir. Ayrıca bu terim, betonun erken dönemlerindeki yerleştirme, sıkıştırma ve bitirme gibi işlemleri de içerir (Li, 2011). Mineral katkı maddeleri kullanması, RPB'nun mekanik özelliklerine ek olarak işlenebilirliğin iyileştirilmesi üzerinde etkilidir. Yapılmış birçok araştırma, küresel şekle sahip uçucu kül kullanımının ve uçucu külün aşırı inceliğinin, beton işlenebilirliği için faydalı bir gelişme olduğunu göstermektedir (Wang vd. 2018;Zulu, 2017).

Bani Ardalani, Joshaghani ve Hooton (2017), uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının, diğer karışımlara kıyasla önemli ölçüde işlenebilirlik kaybı ve artan değişim seviyeleri gösterdiğini bildirmiştir; ayrıca daha fazla çökme kaybı gözlenmiştir. Pomza ve cüruf karışımları, kontrol karışımlarına kıyasla daha düşük çökme kaybı sergilemiştir ve kendiliğinden yerleşen beton içeren pomza tozu, ilk çökme değerlerinin korunması açısından en iyi performansı önemli ölçüde göstermektedir.

Güneyisi vd. (2014), çimento yerine volkanik pomza tozunun, herhangi bir ayrışma ve akma olmaksızın, kendiliğinden yerleşen beton üretiminde uygulanabilir olduğunu

kanıtlandığını bildirmiştir. En aşırı değişim seviyesinde (%20) bile homojenlik ve stabilite kaybı olmaksızın, kendiliğinden yerleşen beton üretilmiştir.

Reaktif pudra betonunun işlenebilirliği hakkında daha fazla ayrıntı ve onun uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemeler ile ayrıca su/bağlayıcı veya su-çimento oranları gibi diğer faktörler ile ilişkisi, (reaktif pudra betonu, etkileyen faktörler) bölümünde açıklanmıştır.

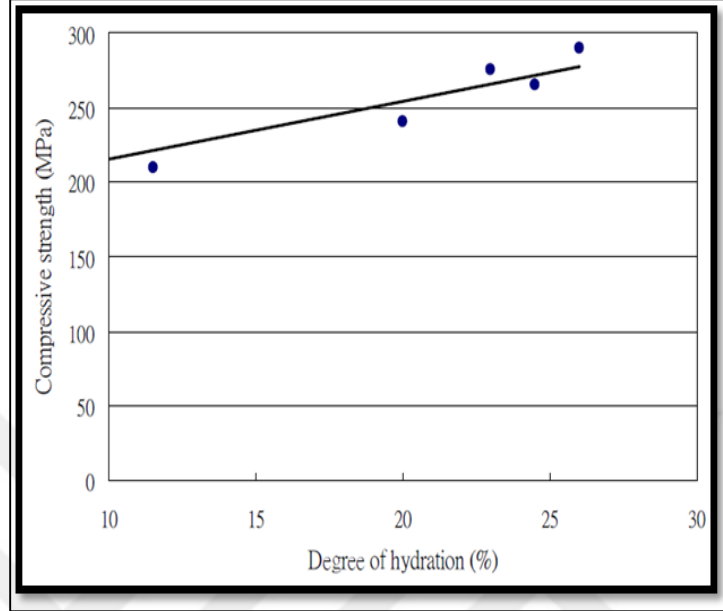
2.3.2. Mekanik Özellikler

2.3.2.1. Basınç dayanımı

Ultra yüksek basınç dayanımı, reaktif pudra betonunun niteliklerinden biri olarak kabul edilmektedir (Zheng, Li ve Wang, 2012). RPB, 150 ila 800 MPa arasında değişen basınç dayanımı değerine sahiptir. Basınç dayanımlı (50-100) MPa, yüksek performanslı beton ile karşılaştırıldığında çok yüksek basınca karşı çok dayanıklıdır. Bunun nedeni: kalın agregaları ayırıp homojenliği artırma uygulamasıyla üretilen RPB kalıbı ve sıkıştırılmış yoğunluğun iyileştirilmesi, priz zamanından önce ve priz sırasında basınç uygulanması ve sıkıştırılmış yoğunluğun iyileşmesi için granül karışımın optimize edilmesi, karışım mikro yapısının artırılması için gereken priz sonrası ısı ile kürlenme uygulaması, su-bağlayıcı oranının azaltılmasıyla silis dumanı gibi puzolanik reaksiyonları olan malzemeler dâhil edilerek kalıp özelliklerinin geliştirilmesidir. Ayrıca basınç dayanımının artması ile yoğunluğun da arttığı görülmüştür (Richard ve Cheyrezy, 1995; Zheng, Luo ve Wang, 2013).

Kamen, A. Denarie, E. ve Bruhwiler (2007), ultra yüksek performanslı betonun basınç dayanımının artması ile hidrasyon işleminin neredeyse ilişkili olduğunu rapor etmiştir, Şekil 2.1 bu ilişkiyi göstermektedir. Malzemenin içerdiği su-bağlayıcı oranının düşük seviye olması nedeniyle, belirli bir hidrasyon derecesine göre yüksek dayanım elde edilmektedir. Etkiler, hidratlı parçacıkların hızla bağlanması için gerekli olan az miktarda jel oluşturan çimento parçacıklarının, ilk yoğunluk dizilimine atfedilebilir. Çimento ve silis dumanı parçacıkları olarak hidrate olmamış parçacıklar (dolgu maddesi olarak davranan), mikro seviyedeki matrisin sıkışıklığını artırmaya

katılmakta ve mekanik performansın gelişmesini sağlamaktadır (Kamen, A. Denarie, E. ve Bruhwiler, 2007).



Şekil 2.1. Basınç dayanımı ve hidratasyon derecesi ilişkisi (Kamen, A. Denarie ve Bruhwiler, 2007)

Sana Taha Abdul-Hussain (2013), yüksek sıcaklıkların RPB'nin mekanik özellikleri ve esas olarak basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, sıcaklık 400°C'yi aştığında basınç dayanımındaki azalmanın daha büyük olduğunu bildirmiştir ve tüm karışımların 200°C'deki basınç dayanımı, 20°C'deki çapraz bağlanma kuvvetlerinden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca çalışma, (20-200)°C sıcaklık aralığındaki basınç dayanımının artmasını üç noktaya bağlamıştır; beton karışımındaki çimento kalıntılarının daha fazla hidratasyonu, mineraller (silis dumanı gibi) ve kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyonlar ya da RPB'nin normal kütleme işlemi.

P. N. Hiremath ve Yaragal (2017), erken dönemdeki dayanım gelişimi üzerinde dört kür rejiminin etkilerini incelemiştir; bu kütleme rejimleri, sıcak hava kütleme, ortam havası ile kütleme, sıcak su banyosu ile kütleme ve hızlandırılmış kütleme içerir. Dört kütleme rejimi arasında şunu bulmuştur; kombine rejim (aynı zamanda iki kür rejiminin kullanılması) ile kütleme, RPB'nun basınç dayanımı üzerinde % 63 daha etkili bir artışa sahiptir ve basınç dayanımını 110 MPa'dan 180 MPa'ya yükseltmiştir. İlk değere standart kütleme ile ikinci değere kombine uygulama rejimleri ile ulaşılmıştır.

Akir (2017), pomza agregası ile normal agreganın değişiminden ötürü, normal betonun basınç dayanımının düştüğünü bildirmiştir, ancak, ön ayarlı basınç uygulaması ve diğer kürleme rejimi (20°C’de standart su kürlemesi; 200, 235 ve 270°C’de otoklav uygulamaları) nedeniyle basınç dayanımının 179 MPa’ya çıktığını da raporlamıştır.

2.3.2.2. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı, Kırılma modülü olarak da adlandırılır. RPB’de eğilme dayanımı 30 MPa ve 60 MPa arasında değişmektedir (Li, 2011; Kushartomo, Bali ve Sulaiman, 2015).

Dugat, Roux ve Bernier (1996) kaynağının, sıradan beton, yüksek dayanımlı beton, reaktif pudra betonu için eğilme dayanımı elde eden karşılaştırmalı çalışmasında, RPB’de, iki karışım oranı RPB200 ve RPB800 olan farklı oranlı malzeme bileşimi kullanılmaktadır. Kuvars kumu olmayan ve çelik lif karışımlı RPB 200’de ve çelik lif olmayan RPB800’de, bu koşullar altındaki en yüksek eğilme dayanımı 6.57 MPa olarak ölçülmektedir.

Meleka, Bashandy ve Arab (2013), ultra yüksek dayanımlı betonu (UYDB) ekonomik malzemeler kullanarak araştırmıştır. Betonun mekanik özellikleri, farklı çimento ve silis dumanı içeriklerinin ve yeni çelik lifinin boyut oranının, bu beton için takviye olarak kullanılmasının etkilerini çalışılarak incelenmiş ve değerlendirmiştir. 800 kg/m³ çimento içeriği ve çimento ağırlığının %30’u kadar silis dumanı içeriği olan takviyeli RPB’de, 30MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. Test sonuçları, çimento ve silis dumanı içeriğini arttırmanın yanı sıra çelik lif eklemenin; basınç dayanımı, elastisite modülü ve dolaylı çekme dayanımı üzerinde yeterli iyileştirmeler gerçekteştirdiğini göstermiştir. Eğilme dayanımı üzerinde de büyük olumlu bir etkisi vardır.

2.3.2.3. Elastisite modülü

Yüksek dayanımlı beton gerekliliği sadece kendisi için değil, aynı zamanda yüksek bir elastisite modülü sahip olması ve yapısal elemanların deformasyonu açısından da önemlidir; böylece tasarımcı, beton sınıfını ve ilgili elastisite modülünün arttırarak elemanlara daha az sapma ile ulaşabilir (Adam Neville, 1998, P. Bamforth, D.Chisholm JGibbs ve T.Harrison, 2008).

Richard ve Cheyrezy (1995), RPB'nin Young modülünün 50 GPa'dan fazla olduğunu ve en yüksek yoğunluğa sahip RPB için 75 GPa olabileceğini bildirmiştir.

Meleka, Bashandy ve Arab (2013), silis dumanı dozajının yüzdesinin, 7 ve 28 günlük numune döneminde, RPB elastisite modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur ve aynı çimento içeriği için, silis dumanı yerleştirmesi ile RPB elastisite modülünün arttığını gözlemiştir.

2.4. RPB'nin Performansı (Etkileyen Faktörler)

2.4.1. Malzeme Seçimi

RPB karışımlarında kullanılan malzemeler, büyük bir bağlayıcı içeriği (yani çimento), kuvars tozları ve silis dumanı vb. içermektedir. Bunlar, RPB'nin mekanik özelliklerini geliştirmek için liflerin eklenmesiyle dolgu elemanları olarak kullanılırlar, ve süperakışkanlaştırıcılar, kendi kendine sıkışmayı artırmak, yüksek işlenebilirlik seviyeleri kazanmak ve ayrışmayı önlemek için büyük miktarlarda kullanılmalıdır. 20. yüzyılda, beton endüstrilerinde katkı maddelerinin kullanımı artmıştır ve daha fazla artış olması beklenmektedir. Çimentonun farklı malzemelerle değiştirilmesi, çimento ve beton taleplerinin artmasıyla karşılanmıştır ve mineral katkı maddelerinin betona dâhil edilmesi, beton işlenebilirliğinde ve dürabilitesinde etkili bir iyileşme sağlamıştır (Türkmen, 2003).

Çimentoyu, çevre dostu çimento esaslı malzemelerle değiştirme konusu temel hedefdir ve ekonomik hususlar beton endüstrisinde önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Bu nedenle, alternatif malzemelerin aranması ve bunların çimento yerleşimi için bağlayıcı olarak kullanılması, pek çok yayının konusu olmuştur; diğer bir deyişle betonun bileşenleri, işlenebilirlik ve mekanik performans gibi diğer beton özelliklerinin yanı sıra, çevresel ve ekonomik faydalar da sunmalıdır (Kabay vd., 2015).

Türkiye, resmi verilere göre, tahmini 155000 km² püskürük kaya alanına sahiptir. Dünya çapında 18 milyar m³ pomza kaynağı vardır ve sadece Türkiye, dünya pomza rezervinin %15,8'ine eşit olan 2,8 milyar m³'e sahiptir (Bakış vd., 2017).

2.4.1.1. Çimento

Çok düşük su-çimento oranları ile ultra yüksek dayanım elde etmek için, reaktif pudra betonunda çimento kullanımı genel olarak 800-1000 kg/m³'e kadar ulaşmaktadır (Yazici vd., 2009). Ancak yüksek miktarda çimento dozu, RPB'nin yüksek performansını ters yönde etkileyebilir. Artmış rötre özellikleri ve yüksek duyarlı mikro çatlamlar, betonun erken dönem ve sertleşme performanslarını azaltabilir (Yigiter vd., 2012). Lee ve Chisholm (2006) kaynağına göre, RPB için çimento seçimi, ultra performans elde etmekte önemli bir faktördür. Yayınlanmış deneylere ve araştırmalara göre, RPB için ideal çimento, yüksek C₃S ve C₂S (bi- ve tri-kalsiyum silikat) oranına ve çok düşük (tri-kalsiyum alüminat) C₃A oranına sahiptir. Bu anlaşılabilir bir şeydir; çünkü C₃A, düşük bir gerçek bağlama değerine sahiptir ve ilk olarak, kalsinasyon işlemi sırasında akı işlevi nedeniyle çimentoda bulunmaktadır. Mevcut tip ticari çimento kullanılarak yapılan en reaktif pudra betonunda, ASTM TİPİ V''sülfat-direnci'' karışımı kullanılmaktadır.

Kwan, Cai ve Chan (1995), beton dayanımının, çok fazla çimento kullanımıyla azalması gerektiğini belirtmiştir, çünkü yüksek çimento içeriğinin kullanılması, kütleme sırasında büyük miktarda hidrasyon ısı oluşmasına neden olmaktadır, bunun sonucu olarak da beton soğurken termal çatlaklar başlamaktadır. Diğer yandan çimento, hamur malzemesi olduğundan, çimentonun büyük miktarlarda kullanılması, betonun nem durumu değişmeye başladığında, rötre ve şişme gerinmelerine yol açmaktadır. Ayrıca bu yüksek miktarda çimento ve düşük seviyelerde su/çimento oranı kullanımı, RPB'nin düşük işlenebilirlik etkenidir. Bu nedenle, çimentonun uçucu kül ile kısmen değiştirilmesi, RPB'de çimento kullanımını azaltmanın kolay ve pahalı olmayan bir yoludur. (Yazici vd., 2009) ayrıca, RPB'deki bu sorunun üstesinden gelmek ve etkilerini azaltmak için, çimentonun kısmen mineral katkı maddeleri ile değiştirilmesini önermiştir.

42.5 ve 52.5 dayanım kategorileri ile karakterize edilen CEM I Portland çimentosu kullanılarak, RPB'deki olgun malzemenin mekanik performansı ve teknolojik standartları açısından en iyi sonuçlar alınmıştır (Zdeb, 2015).

Staquet ve Espion (2015), üç farklı normal dayanımlı Portland çimentosunun (CEM I 42.5 LA; CEM I 42.5 HSR LA ve CEM I 42.5 R) ve üç farklı yüksek dayanımlı Portland çimentosunun (CEM I 52.5 R LA; CEM I 52.5 HSR LA ve CEM I 52.5 R), reaktif pudra betonunun basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ayrıca, CEM I 42.5 LA, CEM I 42.5 HSR LA, CEM I 52.5 R LA, CEM I 52.5 HSR LA ve CEM I 52.5 R çimentoları ile elde edilen betonların basınç dayanımının, 180 MPa'ya etkili bir şekilde ulaştığını ve CEM I 42.5 R ve CEM I 52.5 R çimentoları ile yapılan betonların işlenebilirliğinin, diğer dört çimentoyla yapılan betonların işlenebilirliği kadar iyi olmadığını bildirmiştir. Çalışma ayrıca, CEM I 42.5 veya CEM I 52.5 çimento tipini seçerken, mekanik performans ve iyi bir beton işlenebilirliği elde etmek açısından üç kriterin önemli olduğunu belirtmiştir.

Salman, Al-Rumaithi ve Al-Sherrawi (2018), farklı çimento tipleri ile RPB'nun özelliklerini incelemiştir. Sonuçlar, sıradan Portland çimentolu (SPÇ) numunelerin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu, bunu %50 SPÇ + %50 PKÇ (Portland kalker çimentosu) numunelerinin takip ettiğini ve ardından Portland kalker çimentosu (PKÇ) numunelerinin geldiğini göstermektedir.

2.4.1.2. Silis Dumanı

Silis dumanı, en yeni ana puzolanlı malzemelerden biridir ve ilk kez 1969 yılında Norveç'te beton yapımında kullanılmıştır, ancak, asıl kullanımı 1980'lerin başında Avrupa ve Kuzey Amerika'da sistematik olarak başlamıştır (Toutanji ve Houssam A., 1995).

Silis dumanı, ferrosilikon üretiminin ikincil bir ürünüdür. Kimyasal içeriği, % 98 saf SiO₂ içermektedir. SD, endüstriyel malzemelerin bir atık ürünü olmasına karşın, yüksek puzolan performansı sayesinde, puzolan malzemeleri arasında en değerli yan ürün haline gelmiştir. Portland çimentosunun özgül yüzeyinden 80 kat daha fazla olan bir özgül yüzeye sahiptir; özgül yüzeyi 25 m²/g'dır. Ayrıca, Ca (OH)₂ kalsiyum hidrat oluşturmaktadır; bu, kararlı bir ek kalsiyum silikat hidrattır. Ve bu hidratlar, agrega taneleri ile çimento hamuru matrisi arasındaki temas bölgelerinde üretilmektedir; bu da temas bölgeleri daha güçlü ve daha az gözenekli beton macun kalıbı meydana getirmektedir. Ayrıca bu formlar (kalsiyum silikat hidratlar), silis dumanı ve kalsiyum

hidrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ arasındaki reaksiyonla sonuçlanıp, harcın daha güçlü ve sıkıştırılmış hale gelmesine neden olmaktadır; böylece çok homojen bir beton yapı oluşturmaktadır (Flaga, 2000; Türkmen, 2003).

Erken saatlerde silis dumanı eklemek, OH-iyonların ve alkalilerin gözenek sıvısında serbest kalmasına yol açmaktadır ve bu işlem, çimento hidrasyonu oranında artma sağlamaktadır. Silis dumanı, hem C_3S hem C_3A için hidrasyonu işlemini hızlandırır. İlk birkaç saat içinde, kireç, CSH ve etrenjit gibi hidrasyonu ürünleri için çekirdeklenme yerleri üretmeye izin verir (Rao, 2003).

Beton karışımında, çimento ağırlığınca yüzde 18 silis dumanı olması, çimento hidrasyonundan salınan kalsiyum $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'yi tüketmek için yeterlidir. Ve beton karışımındaki en uygun silis dumanı oranı, dolgu etkilerini dikkate alarak çimento ağırlığının yaklaşık %30'udur; bu nedenle RPB'deki silis dumanı içeriği normal olarak % (20-30) arasında değişmektedir (Richard ve Cheyrezy, 1995; Man, 2009)

Silis dumanının parçacık boyutu (0,1–1) μm arasındadır ve bu, silis dumanının çimento parçacık boyutundan 50-100 daha ince parçacık boyutuna sahip olduğu anlamına gelir; bu özellik, çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurmasına izin vermektedir. Parçacıkların dizilimini iyileştirmek için boşlukları genişletilmiş tane boyutlarıyla doldurma fikri, uzun bir geçmişe sahiptir (Scrivener ve Kirkpatrick, 2008; Man, 2009).

Gjorv (1996), silis dumanı içeren beton karışımlarının su penetrasyonunun, silis dumanı içemeyen karışımlardan daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca ek silis dumanı, beton mikro yapısını değiştirmektedir, bu değişiklikler iki nedenden dolayı meydana gelir: birinci neden, silis dumanı reaksiyonlarının fiziksel tarafı, ikincisi neden ise silis dumanının kimyasal katkısıdır; yukarıdaki unsurların her ikisi de önemlidir

Kronlof (1994); Richard ve Cheyrezy (1995); Lee ve Chisholm (2005); Yazici vd. (2010) kaynağına göre, silis dumanının etkileri aşağıdaki noktalarla özetlenebilir:

- Beton matrisinde daha büyük parçacık malzemesinde (çimento gibi) bulunan boşlukları doldurması.
- Temel parçacıkların kusursuz küreselliğinden kaynaklanan yağlama etkileriyle reolojik özelliklerin iyileştirilmesi.
- Birincil hidrasyon ile sonuçlanan kireç ile puzolanik reaksiyonlar aracılığıyla ikincil hidratların üretilmesi.

2.4.1.3. Uçucu Kül

Uçucu kül (UK), santraldeki bitümlü kömürler ve elektrik üretim istasyonlarındaki toz haline getirilmiş kömür yakılırken ortaya çıkan bir yan üründür. Daha doğrusu, baca gazları ile kazanların yakınındaki yanma alanından atılan yakılmış atıklardır; bu atıklar daha sonra mekanik veya elektrostatik ayırıcı ile toplanır ve ağır yüklenmemiş malzemeler fırının tabanına yerleşip “taban” olarak adlandırılır. Egzoz gazlarından toplanması nedeniyle uçucu kül, ince küresel silt bileşimidir ve parçacık boyutu 0,074-0,005 mm arasındadır. Genellikle bu malzemeler beton karışımları için çimentolu bir ajan olarak kullanıma uygun değildirler, ancak duvar bloklarına beton üretimi için kullanılabilirler (Thomas vd., 2010; Ankur Upadhyay, 2007; Yaprak, 2017).

İnce parçacıklar; elektrostatik filtreler, tül kapanlar ve ıslak fırçalarla yakalanmaktadır. Bu parçacıklar, (1-150) µm çapları olan küresel bir yapıdadır. Uçucu külün rengi kimyasal bileşiminden etkilenmektedir, rengi açık kahverengi veya krem renginden, koyu kahverengi veya griye değişmektedir. Bu fiziksel özellik (renk), içindeki organik ve kalsiyum oksit içeriğini tahmin etmeye yardımcı olur. Genellikle daha fazla kalsiyum oksit yüzdesi olduğunda rengi daha açıktır, diğer taraftan koyu renkler daha yüksek organik içeriğe işaret etmektedir (Ankur Upadhyay, 2007; Yaprak, 2017).

ASTM C618'e göre uçucu kül iki çeşit olarak sınıflandırılmıştır. Birincisi, bitümlü kömürün (antrasit) yakılmasından kaynaklanır ve uçucu kül (sınıf F) olarak adlandırılır; ikinci tür uçucu kül (sınıf C) olarak adlandırılır ve bu, linyit veya alt bitümlü kömürün yakılmasından kaynaklanır. Her iki uçucu kül sınıfının kimyasal bileşimi Tablo 2.3'te gösterilmiştir ve bu tabloya baktığımızda, F sınıfı uçucu külde, içeriğinden %10 daha az CaO bulunduğunu görmekteyiz. F sınıfı uçucu kül, düşük

kalsiyum uçucu kül olarak adlandırılırken; C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum uçucu kül olarak adlandırılır; C sınıfı uçucu kül %15-30 CaO içermektedir (Li, 2011).

ASTM C618 (2012), betonda kullanmak için, uçucu kül ve diğer doğal puzolan malzemeleriyle ilgili fiziksel ve kimyasal gereklilikleri içermektedir ve ASTM311 (2011), karışımlarda hidrolik çimento kullanılması ile uçucu kül veya doğal puzolan malzemelerinin, tatmin edici bir dayanım seviyesi oluşturup oluşturmadığını belirlemek adına bir dayanım aktivitesi tanımı sunmaktadır.

Beton karışımlarında, bir kısım çimentonun F sınıfı uçucu kül ile değiştirilmesi, ekstrüzyon reolojisini iyileştirebilir; küresel parçacıklarıyla uçucu kül, önceki telafileri kolaylaştırmaktadır. Çimento ile karşılaştırıldığında uçucu kül, daha ucuz ve çevre dostudur. Ayrıca onun dâhil olması, lif takviyeli betonun eğilme performansını artırmıştır (Cyr ve Shah, 2002). Portland çimentosu yaklaşık % 65 kireç içerir, çimentonun hidrasyon işlemleri sırasında bu kirecin bir kısmı serbest hale gelerek matrisinde bulunur. Bu serbest kireç uçucu kül ile ek bir çimento esaslı malzeme üretmek için kimyasal reaksiyona girer ve bu durum, işlenebilirliğin artması, su ihtiyacının azalması, hidrasyon işleminden kaynaklanan ısının azalması, erken dönemlerde (90 gün önce) eşdeğer dayanım üretimi, geçirgenliğin azalması ve betonun dürabilitesinin artması gibi, betonun birçok özelliğinin iyileşmesine yol açar (Ankur Upadhyay, 2007).

Tablo 2.3. (ASTM C618)'ya göre, uçucu küller kimyasal bileşiği (%) (Li, 2011)

Oksit Tipi	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
F sınıfı	49,1	16,25	22,31	1,09	4,48	1	0,05	1,42	0,73	2,55
C sınıfı	53,79	15,42	5	1,68	18	3,4	0,5	0,5	1,44	0,8

Öte yandan beton karışımlarında yüksek hacimli uçucu külün uygulanması, erken dönem mekanik performansının azalması, gecikmeli priz süreleri, artan su azaltıcı katkı maddesi talebi gibi bazı ters etkilere de neden olmaktadır (Yigiter vd., 2012). (Bentz, Hansen ve Guynn, 2011), betonun erken ve geç dönemini almak ve bu etkileri en aza indirmek için bir yaklaşım önermiştir. Karıştırma gereksinimlerini azaltan

yüksek orandaki suda gereksiz bir artışa yol açmayarak, toplam parçacık boyutu dağılımını koruduğu için, kalın uçucu kül ile ince çimentoyu karıştırmanın karışımın erken dönemlerindeki dayanıma temel bir destek sağladığı sonucuna varmıştır.

Peng, Hu ve Ding (2010), ultra ince uçucu kül (UIUK) ve çelik cüruf tozunun (ÇCT) çimento ile kısmi olarak yer değiştirerek kullanılmasını incelemiştir ve çalışma bunu raporlamıştır. Çalışma, RPB’de ultra ince uçucu kül ve çelik cüruf tozu kullanılmasının uygulanabilir olduğunu ve belirgin bir mekanik performansa sahip olduğunu öne sürmüştür. Ayrıca ultra ince uçucu kül ve çelik cüruf tozunun düşük puzolanik reaktivitesi nedeniyle buna başvurulduğunu göstermiştir; dolayısıyla ısı uygulama veya kürlenme rejiminin, ultra ince uçucu kül ve çelik cüruf tozunun puzolanik reaktivitesini arttırmak için uygulanması gerekmektedir. Sonuçlar, basınç dayanımı değerlerinin, %30 çelik cüruf tozu veya % 20 ultra ince uçucu kül değişiminde hala 90 MPa’nın üzerinde olduğunu belirtmektedir.

Yazici vd. (2008), silis dumanı (SD) cürufu ve uçucu kül (UK) ile değiştirilen çimento etkisini incelemiştir. Sonuçlar, yüksek hacimli ikili (SD-UK veya SD-ÖGYFC) veya üçlü karışımı (SD-UK-ÖGYFC) içeren reaktif pudra betonunun, tatmin edici bir mekanik performansa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Başka bir deyişle, RPB üretiminde UK ve/veya ÖGYFC kullanımı çok etkilidir. Mineral karışım maddeleri içeren RPB’nin basınç dayanımı, 281 MPa’ya kadar ulaşmıştır. Bu değer, priz sırasında ve sertleştirme döneminde dış basınç uygulaması ile 324 MPa’ya yükselmiştir. Ayrıca bu işlem, karışımlarda SA (süperakışkanlaştırıcı) talebini de belirgin bir şekilde % (22-63) azaltmaktadır.

2.4.1.4 Silis kumu

Kuvars, doğada saf silisin ana şeklidir. Mohs ölçeğinde 7 sertliğe ve 2,65 g/cm³ yoğunluğa sahiptir; yani çok sert bir malzemedir ve reaktif pudra betonunu yüksek sertlikte bir malzeme yapan odur (El-louh, 2014). Richard ve Cheyrezy (1995), geçmişte çatlak oluşumuna yol açmış en büyük boyutlu (80-100) µm çimento parçacıklarının sızıntısını önlemek için, 150 ila 600 µm aralığında parçacık boyutuna sahip kumun genel olarak kullanılmasını önermiştir ve bu parçacık boyutu, heterojenlik ile ilgili sorunları azaltmaktadır. Ayrıca Richard ve Cheyrezy (1995),

kumun mükemmel bir hamur-agrega arayüzü sağladığını da bildirmiştir. Bunların hepsine ek olarak, kullanılabilirliği ve düşük maliyeti vardır.

2.4.1.5 Süperakışkanlaştırıcı

Süperakışkanlaştırıcı terimi, çimento parçacıklarını betondaki eskiler ile dağıtan organik katkı maddelerini tanımlamak için kullanılır ve akışkanlığın artmasına neden olan şeydir (Yoshioka, 1997). Neville (2010) kaynağına göre süperakışkanlaştırıcı, su azaltıcı katkı maddesi tiplerinden biridir ve ASTM'de F Tipi olarak adlandırılmaktadır. ABD'de, yüksek oranlı su azaltıcı olarak bilinmektedir. Beton karışımlarında bir (su-azaltıcı) olarak Süperakışkanlaştırıcı kullanımı üç nokta ile özetlenebilir:

- Karışım katkı maddesi olarak, işlenebilirlik seviyesini aynı tutarak su-çimento oranının düşmesini azaltan özelliğiyle yüksek dayanımlı beton elde etmek.
- Kütle betonlarında daha az hidrasyon ısısına neden olacak şekilde betondaki çimento içeriğini azaltarak eşdeğer işlenebilirlik elde etmek.
- İşlenebilirliğin artırılması ve bu sayede betonun, erişilemeyen yerlere yerleştirilmesine yardımcı olmaktadır.

Eğer Süperakışkanlaştırıcı kullanmanın hedefi, aynı işlenebilirlik ile betonda yüksek dayanım elde etmekse süperakışkanlaştırıcı, su kullanımını (%25-35) oranında azaltabilir (geleneksel su azaltıcı katkı maddeleri kullanıldığında, suyun bir buçuk oranında azaldığı ile karşılaştırılırsa). Dolayısıyla bu kullanıldığında, su-çimento oranını düşük seviyelere indirilerek çok yüksek beton dayanımı elde edilebilir (Neville, 2010).

Süperakışkanlaştırıcılar, kullanımları beton teknolojisinde atılımlar yaratan güçlü organik polimerlerdir, çimento ve silis dumanı parçacıklarını verimli bir şekilde dağıtarak, ultra ince reaktif silis oluşturmaya öncülük ederler. Süperakışkanlaştırıcılar kullanıldığında, çimentoyu dağıtma etkileri sayesinde, su/çimento oranı ve su/bağlayıcı oranı 0,40'ın altına düşebilir; esasen su/çimento oranı ve su/bağlayıcı oranları, beton gözenekliliğini etkileyerek kontrol etmektedir ve bu da basınç dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle düşük su/bağlayıcı ve su/çimento oranları için, ultra yüksek performanslı betonda, optimum süperakışkanlaştırıcı

miktarı nispeten yüksektir ve katı madde içeriği yaklaşık yüzde 1,6'dır (Aitcin, 2000; Richard ve Cheyrezy, 1995).

Bu arada, süperakışkanlaştırıcının etkili bir uygulaması, optimum dozaj da dahil olmak üzere malzemelerin uygun ekleme süresi ve su ilaveli veya su ilavesiz dozaj yüzdesi, RPB üretiminde daha net bir anlayışa ihtiyaç duymaktadır. RPB üretiminde farklı karıştırma aşamalarında, süperakışkanlaştırıcı ilavesinin etkisi üzerine sınırlı çalışma yapılmıştır. RPB karışımının iyi bir akış kabiliyetine sahip olması için süperakışkanlaştırıcı eklemenin etkili yöntemlerine fazla dikkat edilmemiştir. Ayrıca, adım adım eklemenin, karıştırmanın erken döneminde Süperakışkanlaştırıcı eklemenin veya gecikmiş olarak Süperakışkanlaştırıcı eklemenin, RPB için gereken tazelik özellikleri üzerinde etkileri vardır. (Parameshwar N. Hiremath, 2017)

Collepari ve arkadaşları (1990), silis dumanı varlığı ile Süperakışkanlaştırıcı dozajını %2 ile %4 oranlarında değiştirmenin, basınç dayanımını önemli oranda artırdığına ulaşmıştır, yine de süperakışkanlaştırıcıların abartılı dozajında, kimyasal uyumsuzluk sorunları ve priz süresinde uygunsuz gecikme oluşabilir (Kwan, 2003).

Lee, N.P. ve Chisholm (2006), reaktif pudra betonunda çok düşük su/bağlayıcı (bağlayıcı = çimento ve silis dumanı) oranlarının, ancak süperakışkanlaştırıcılık güçleri ile süper plastikleştirici üçüncü nesil ajanlar kullanarak mümkün olabileceğini bildirmiştir.

Yazici vd. (2008), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun ve/veya uçucu külün ikamesinin, referans karışım ile karşılaştırıldığında, süperplastikleştiriciler (SP) için talebi azalttığını belirtmiştir. RPB karışımlarında, sürüklenmiş veya hapsolmuş hava gözenekleri fark edilmektedir. Yazici vd. (2008), bu küresel gözeneklerin çoğunun muhtemelen, süperplastikleştiricilerin kullanımının yan etkisi olarak oluştuğunu belirtmiştir.

2.4.1.6. Pomza tozu

Pomza, patlayıcı püskürmeler sırasında oluşan kabarcıklı, camsı volkanik bir kaya formudur. Beton karışımlarında hafif agrega olarak kullanılmaktadır. Dünyanın birçok

bölgesinde ortaya çıkmaktadır ve sadece parçacıkların boyutu küçük ve değişmemiş olduğunda yararlı özellikler sunmaktadır. Düşük yoğunluğu, gazların genleşme basıncının çapraz bağlanmayla serbest kalmasıyla oluşan, hücrelerindeki boşluklardan kaynaklanır. Pomza, düşük özgül ağırlığı ve yüksek gözenekliliği nedeniyle %55 yüksek su emilimine sahip hafif bir agregadır (Founie, 2004; Vasudevan, 2015).

Aynı zamanda yüksek erime derecesi ile ateşe dayanıklıdır (Vasudevan, 2015). Bu puzolanik çok ince toz hafif agrega (pomza), çimento esaslı özelliklere sahiptir ve aynı zamanda çimentodan belirli bir miktarda eritildiğinde, bağlanma performansı artmaktadır (Kabay vd., 2015). (Pomza tozu betonu) üretiminde pomza tozunu kullanmak için literatür araştırması yapılmamıştır (Bakış vd., 2017)

Bakış vd. (2017), RPB karıcımına pomza tozu dahil edilmesini çalışmıştır ve %25 silis dumani, süperplastikleştiriciler ve %100 kum için çimentonun, çelik lifli veya çelik lifsiz olarak bulunmasına, pomza tozu betonu (PTB) adını vermiştir. Bu çalışma, pomza tozu betonunu ve bu betonun, sert kaldırım beton yollar ve bina yapılarındaki uygunluğunu test etmiştir; lifsiz PTB20 ve lifli PTB20, PTB30, PTB40 ve PTB50 betonlarının, bina yapılarında ve sert kaldırımlarda kullanılabilceği bildirilmiştir. (PTB 20, su-bağlayıcı oranının %20 olduğu anlamına gelmektedir). Ama sert kaldırım yapılarında ve bina yapılarında lifli PTB20, PTB30 ve PTB40 betonlarının kullanılması durumunda, geleneksel karıştırma ekipmanını beton karışımlarında kullanmak gerekli olmayacaktır.

Akir (2017), hafif reaktif pudra betonu (HRPB) elde etmek için, %23 oranında silis dumani ile çimentonun değiştirilmesi yoluyla dört karışım sunarak, pomza tozunu (maksimum parçacık boyutu 1 mm) dahil etmeyi amaçlamıştır. 900 kg/m³ çimento dozajı ve pirinç kaplı çelik hacmine göre %3 oranı, üç karışım için kullanılmıştır. Ayrıca priz öncesi basınçları, 20 °C standart su kürleme ve ayrıca 200, 235 ve 270 °C otoklav kürleme dâhil, diğer iki işlem rejimlerine başvurma. %23,1 pomza agregası, 0,75 mm elekten geçerek karışımda ilave bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu çalışma, içinde priz öncesi basınç, kürleme rejimi ve karışım tasarımı gibi uygulamaların, priz öncesi uygulama ve yüksek miktarda bağlayıcı kullanımı ile 2430 kg/m³'e kadar

yoğunluk artışı sağlayarak, hafif reaktif pudra betonunun dayanımını 176MPa'ya kadar artırdığını ortaya koymuştur.

Kabay vd. (2015), çimentonun pomza ile doğal bir puzolan malzemesi olarak değiştirilmesini incelemiştir. Ayrıca uçucu kül varlığına ek olarak PT (pomza tozu) eklenmesinin, düşük su çekimiyle çökme test sonuçlarını azalttığını bildirmiştir, ayrıca bu, erken dönemde basınç dayanımını azaltmasına rağmen, geç dönemdeki (28, 90 ve 180) basınç dayanımı, pomza tozu veya uçucu kül ilavesi olmayan referans beton karışımlarının dayanımlarına yakındı.

Yigiter vd. (2012), kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlarında dolgu maddesi olarak pomza tozu kullanımını incelemiştir. Çalışma, pomza ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik, akış kabiliyeti, geçiş kabiliyeti ve ayrışma direncinde iyi özellikler gösterdiğini bildirmiştir. Taze halde en iyi sonuçlar, yüksek oranda pomza tozu (ana dolgu maddesi) ve düşük oranda silis dumanı içeren karışımlarla elde edilmiştir. Ve mekanik performans açısından, 28 gün kürlemeden sonra pomzalı karışımlar, diğer karışımların 60-65 MPa'sına kıyasla, 120 günde ortalama 85 MPa değerleri ile daha yüksek basınç dayanımına ulaşmaktadır. Ve bu, puzolanlığın karışımın mekanik özelliklerini geliştirdiğini doğrulamaktadır.

Granata (2015), pomza tozunun sertleştirilmiş durumlarda ve kendiliğinden yerleşen betonda dolgu maddesi olarak uygulanabilirliğini araştırmıştır ve puzolanlığı doğrulamıştır. Pomza içeren kendiliğinden sıkışan beton, iyi işlenebilirlik özellikleri sunmuştur ve 28 günlük kürlemeden sonra makul basınç dayanımını elde etmiştir.

2.4.2. Parçacıklar Dizilimi

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

(Apollonian) kavramı, parçacık dizilimi için klasik düşüncenin kaynağıdır. Bu düşünce, daha küçük boyutlara sahip parçacıkların, boşluk bölgelerine dolarak büyük

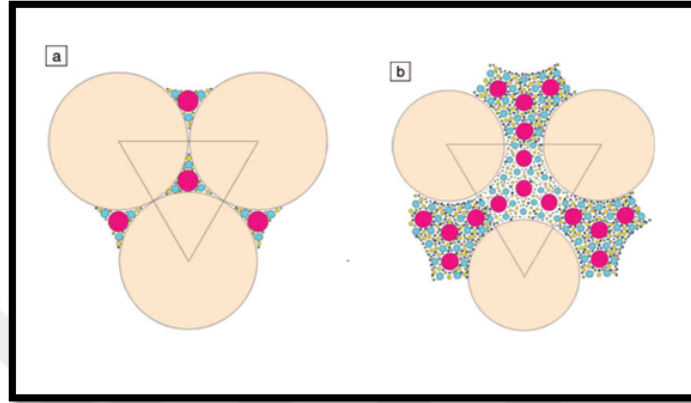
parçacıkları oluşturduğunu belirtmektedir. Agreganın ideal dağılımına (agrega derecelendirmesi) uyum, beton temel boşluklarının azaltılmasını sağlamaktadır ve bu durumun, çimento içeriği üzerinde olumlu etkisi vardır. Agreganın fiyatının genellikle çimentonun sadece onda biri olması, parçacık boyutlarının derecelendirilmesinin sadece betonun dayanımını ve düşük geçirgenliğini iyileştirmekle kalmadığı anlamına gelmektedir. Ayrıca agregaların sınıflandırılmasının, beton karışımının performansı üzerinde de önemli bir etkisi olabileceği bilinmektedir ama aynı zamanda beton üretim masrafı üzerindeki etkisi daha düşük maliyetli olacaktır (Li, 2011; Wong, Kwan ve Kong, 2005).

P. Vernet (2004), betondaki parçacık dizilimi durumunun “The Apollonian” olarak adlandırıldan farklı olduğunu belirtmiştir. Bu şu anlama gelmektedir. Beton durumunda her tane, başka tane boyutlu birden fazla tabaka ile çevrilidir, bu, gerilme iletimlerinin ve homojen yayılımın, eş büyüklük dağılımlı toplamalardan daha fazla dağılmasına neden olmaktadır. İki vaka arasındaki fark Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

(b) Bölümündeki aralıklı dizilimde bu şekle göre, belirli bir boyuttaki parçacıklar arasındaki boşluklarda yoğun dizilim anlamında bir artış vardır ve bu alan daha küçük parçacıklar tarafından doldurulmaktadır. Böylece popülasyondaki her tane parçacığı, diğer popülasyon tanelerinin birden fazla katmanı ile kuşatılacaktır

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

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



Şekil 2.2. Apollonian dizilim konsepti (P. Vernet, 2004)

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

2.4.3. Su - Bağlayıcı Oranı

Gerekli beton dayanımını elde etmek için, su/çimento oranlarını seçme zorunluluğu vardır ve ayrıca dürabilite gereksinimlerini karşılamak da memnun edicidir. Ayrıca dürabilite açısından su/çimento oranı, yapısal tasarım süreçlerinden önce belirtilmelidir; çünkü eğer su/çimento oranı yapısal kabullerin gerekli seviyelerinden daha azsa, tasarım hesaplamalarında beton dayanımından daha fazla yararlanmak düşünülebilir. Betonda tamamlayıcı çimento-esaslı malzemelerin (TÇM) kullanımı

sırasında, bu, su/bağlayıcı oranı ile değiştirilecektir ve kütle oranı dikkate alınacaktır. Bu durumda ACI 211.1-81, Portland çimentosu karışımlarının su/çimento oranıyla aynı olan su/bağlayıcı oranını iki yolla sunmuştur: hacim ve kütle yöntemleri (Li, 2011).

Aslında, süperakışkanlaştırıcının oluşmasından ve silis dumanının yoğunlaşmasından önce bile beton dayanımını artırmak için birçok girişimde bulunulmuştur. 1969 yılının başında Parrott, 28 günlük küpler döneminde 80 ila 110 MPa'ya sahip bir beton üretmiştir; bu, herhangi bir katkı maddesi yokluğunda, sadece sıradan Portland çimentosu, kaya agregaları ve su kullanımı ile yapılmıştır. Su/çimento oranları 0,20 ile 0,3 arasındaydı ve bu düşük su/çimento oranlarından dolayı işlenebilirlik çok düşüktü (25 mm'den daha az çökme), bu da tam sıkıştırma elde etmenin son derece zor olduğu anlamına gelmektedir (Kwan, Cai ve Chan, 1995).

Neville (2010), yüksek dayanımlı beton elde etmek için bir (tam sıkıştırma) durumu önermiştir. Ancak, tam yerleşenbetonda bile sıkışan hava boşluklarının bir kısmının kalacağını belirtmiştir. O normal sıcaklık altında tamamen sıkıştırılmış beton karışımı düşünmüştür ve bu, su/çimento oranının azaltılması ile yüksek dayanımlı beton elde etmek açısından önemlidir. Basınç dayanımı ile ilişkisini açıklamak için Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir diyagram çizmiştir. Basınç dayanımının, su/çimento oranları ile değiştiğini göstermektedir.

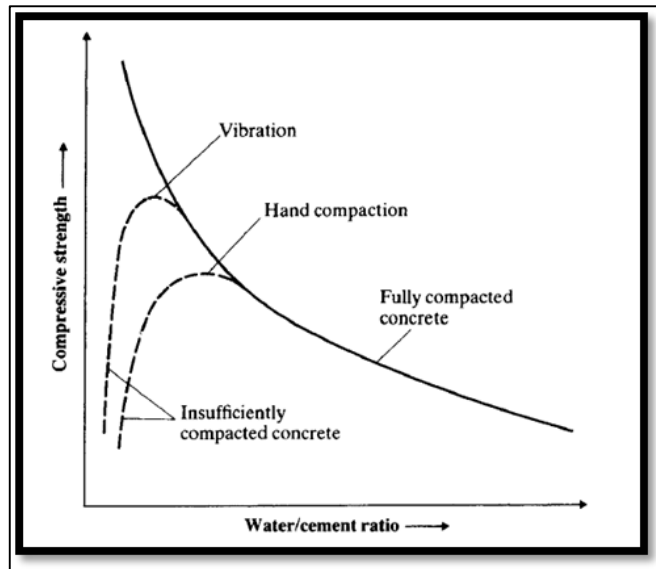
Reaktif pudra betonda, akışkanlaştırma elde etmek için karışımda kullanılacak minimum su içeriğinin elde edilmesi gereklidir. En yoğun karışımlardan elde edilen en düşük su-bağlayıcı oranı 0,08 olmuştur. Su-bağlayıcı oranlarının (0,2)'den düşük olması, yüksek kaliteli RPB elde etmek için ana işlemlerden biridir (Richard ve Cheyrezy, 1995; Ahmad, Zubair ve Maslehuddin, 2015). Ayrıca genel su içeriği muhtemelen, hamurun ve betonun rötresini etkileyen tek ana faktördür; bu nedenle, su-bağlayıcı oranları RPB'nin rötire davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır (Tam ve Ng, 2012).

Lee ve Chisholm (2006), kalıplarında yeterli su içeriği olmayan RPB karışımlarını sıkıştırmanın zorluğunu bildirmiştir,

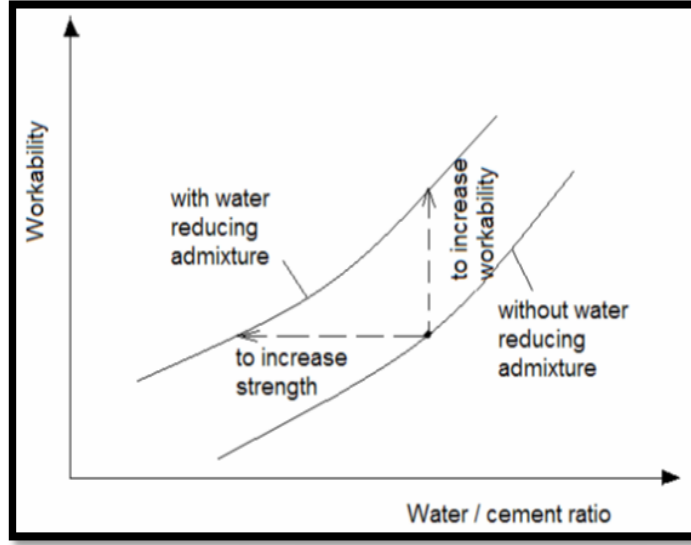
Bu durum, sıkışmış hava boşluklu bir karışıma neden olmaktadır. Bunun aksine, daha yüksek su/bağlayıcı oranlarına sahip karışımların, kendi kendine rötreye karşı daha duyarlı olduğu bulunmuştur ve bu durum boşlukların yayılmasına neden olabilmektedir çünkü C-S-H jeli (sertleştirilmiş çimento), aynı miktardaki kuru çimento ve sudan daha küçük bir hacim doldurmaktadır. Ayrıca, boşlukların küçük hava kabarcıklarını sürüklediğini ve böylece beton dayanımına etki ettiğini ve dayanımı azalttığını da bildirmişlerdir. Bu nedenle, optimal su-bağlayıcı oranının, betonda yüksek dayanım ve işlenebilirlik elde etmekte önemli etkileri vardır.

Kwan, Cai ve Chan (1995), daha yüksek su/bağlayıcı veya su/çimento oranının, daha yüksek işlenebilirlik sağladığını fakat aynı zamanda dayanımı azalttığını; buna karşın, daha düşük su/bağlayıcı veya su/çimento oranının, daha yüksek dayanım verdiğini ancak daha düşük işlenebilirlik sağladığını bildirmiştir; Taze beton karışımı işlenebilirliği üzerinde önemli etkileri olan Süperakışkanlaştırıcılar gibi su azaltıcı katkı maddelerinin kullanımı ile yüksek dayanımlı betonun daha işlenebilir olacağını belirtmiştir.

Şekil 2.4, su azaltıcı katkı maddesi varlığında, su/çimento oranı ile işlenebilirlik arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 2.3. Su/çimento oranı ve basınç dayanımı ilişkisi (Neville, 2010)



Şekil 2.4. İşlenebilirlik ve betonun s/ç oranı arasındaki ilişki (Kwan, Cai ve Chan, 1995)

2.4.4. Kür Yöntemleri

Beton dayanımındaki gelişme, kimyasal reaksiyonlara ihtiyaç duymaktadır ve bu reaksiyonların işlenmeye devam etmesi gerekir. Kürleme, betonun uygun ortamlar altında hidrasyonuna izin veren prosedürü ifade etmektedir. Bu basit bir işlemdir ama sık sık göz ardı edilmiştir. Betonda kürleme, hidrasyon işleminin durmasına izin vermemek için betonu nemli koşullar altında tutmaya yarayan kritik bir konudur. Suyun çevre bölgelere dağılması, mümkün olduğunca aza indirilmelidir. Portland çimento betonunu nemli kürleme için, 7 gün süre tavsiye edilmektedir (oda sıcaklığı koşulları altında), yüksek kürleme sıcaklığı ile beton kürlenmesini hızlandıracak başka yollar da vardır, mesela buharlı kürleme de beton dayanımını sürdürmek için kullanılabilir. Böylece 7 günlük beton dayanımına, buharlı kürleme yöntemi altında bir günde ulaşılabilir; söz konusu yol, ön üretimli imalat kalıplarında kullanılabilir, bu sayede beton çıkarılabilir ve kalıplar tekrar kullanılabilir. (Li, 2011).

Holland (1989), iyi kürlenmenin her türlü betonun dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir, ancak bir soru hala cevapsız kalmıştır, yapısal elemanlar için ne kadar süre kürleme gerekmektedir? ACI yasasına göre, normal beton kazanımı için gerekli kürleme süresi en az 7 gündür; bu kürleme seviyesini elde etmek için kürleme süresini etkileyen faktörler: belirli çimento malzemelerinin puzolanik reaksiyonlarının ve hidrasyonunun kinetikleri ve sıcaklığı.

(ACI 308), yapısal betonların çoğunluğu için 7 günlük; çimento katkı malzemeleri kullanımını içeren yapısal betonlar için, 14 günlük kürleme önermektedir. Ayrıca kürleme, beton endüstrisinde çok düzenli kullanılmaktadır; bu durumda, polietilen levhalar ve kürleme bileşikleri kullanmak suyun buharlaşmasını önlemek için yeterlidir (ACI, 1998).

Pek çok çalışma, reaktif pudra betonunun mekanik özellikleriyle, onu ultra yüksek performanslı bir beton türü olarak görerek ilgilenmiştir ve bu çalışmalar, 20°C'de standart ıslak ortamlar, düşük basınçlı buharlama ve otoklavlama gibi farklı hidrotermal kür koşulları ile yapılmıştır (Zdeb, 2017). Ayrıca daha önceki araştırmalar, reaktif pudra betonunun dayanım gelişiminin esas olarak, karışımın bileşimine, süresine, kürleme sıcaklığına ve derecesine, ek olarak kürleme yöntemine de bağlı olduğunu belirtmiştir (Richard ve Cheyrezy, 1995). 2012 yılına kadar, oda sıcaklığında kürlemede RPB'nin mekanik özellikleri ile ilgili birçok girişim olmuştur, ancak yüksek sıcaklıklardaki özellikleri üzerine çok az çalışma yapılmıştır (Zheng, Li ve Wang, 2012).

Şimdilerde RPB için birden fazla kür koşulu vardır ve bu kür koşulu 2 tane olup şunlardır: otoklav kürleme ve termal kürleme; bu yol buharlı kürleme veya sıcak su banyosu veya sıcak hava anlamına gelmektedir. (Otoklav) kürleme yöntemi, taze beton modellerine basınçla ısı uygulayarak yapılmaktadır. Su buharı ve sıcak su banyosu içeren termal kürlemenin, RPB'nin dayanım gelişimi üzerinde önemli etkisi vardır; bu kürleme, mekanik performansa etki eden kalsiyum silikat hidrat fazı oluşturarak, yoğun mikro yapı çapraz bağının gelişmesine yol açmaktadır. Silis dumanı hızlı eriyip portlanditlerle reaksiyona girer ve bu da, kalsiyum silikat hidrat (CSH) olan yeni hidrat üretilmesine yol açmaktadır (P. N. Hiremath ve Yaragal, 2017).

Bunun aksine Zdeb (2017), yüksek sıcaklıkta düzgün şekilde kontrol edilmeyen termal kürlemenin, beton dayanımında bir azalmaya yol açabileceğini belirtmiştir. Bu, doğal olarak oluşan kalsiyum silikat hidratasyonunun üretimine ve agrega taneleri elde etmek için yapışma dayanımı üzerindeki sıcaklık etkisinin artmasına atfedilebilir; çünkü bu hidratasyonun güçlü ve gelişmiş spesifik yüzeyi, sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır.

Türkmen (2003), silis dumanı ve yüksek fırın cürufu dahil edilmiş betonun, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki kürleme koşulları etkisini incelemiştir. Çalışma, aynı numuneler için farklı kür koşullarının uygulanmasını araştırmaktadır ve bu koşullar, klima altında 24 saat, kireç ile doymuş suda on üç gün ve ardından %75-80 nem ve 30°C atmosferde on dört gün koşullarını içermektedir; diğer deney numuneleri %5 (NaCl), %5 (MgSO₄) ve %5 (Na₂SO₄) solüsyonlarında işlemden geçirilirken, 28 günü geçtikten sonra numuneler, kireç ile doymuş su altında dört yüz güne kadar kürlenmiştir. Genel olarak basınç dayanımı, 40,94 MPa ile 7,8 MPa arasında değişmektedir. Daha kötü değer, 400 günde %5 NaCl solüsyonunda kürlenmiş numune setine aittir ve en yüksek değer, dört yüz gün içinde kirece doymuş suda işlem gören numuneler setindedir.

Yazıcı (2007), beton karışımlarına (standart su kürleme, buharlı kürleme ve otoklav) dâhil üç kür koşulu uygulamıştır. Öğütülmüş uçucu kül ve granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun, silis dumanı ile birleştirilmesi. (12 gün 90°C) buharlı kürleme ve (8 saat, 2MPa, 210 1C) yüksek basınçlı buharlı kürlemeden sonra, çimentonun uçucu kül, PS ve silis dumanı ile değiştirilmesiyle, buharlı kürleme altındaki basınç dayanımına atıfta bulunan sonuç, otoklavdan sonra dayanımın %89 ila %126 arasında değiştiğini göstermektedir. Başka bir deyişle çalışma, otoklav kürleme altındaki basınç dayanımının, 12 günlük buharlı kürleme numunelerinin basınç dayanımına eşdeğer olamayacağını bildirmiştir.

Cwirzen (2007), bu kürleme öncesi ve sonrası adımların yanı sıra, başlangıç zamanı ve süresi çeşitlemeleriyle, ısı işlemine bağlı dokuz farklı kürleme rejimi koşulunu araştırmıştır. Sonuçlar, ısı işlem zamanının uzamasıyla hidrasyon sürecinin arttığını ortaya koymuştur ve bu, mikro yapının inceliğiyle sonuçlanmaktadır. Ayrıca, ısı işlemin çok geç bir zaman sonra başladığını; bu durumda 168 saat olduğunu bulmuştur ve bu, daha az hidrasyon derecesine ve uzun vadedeki basınç dayanımında daha küçük bir artışa neden olmuştur.

Liu ve Song (2010), farklı kürleme rejimlerinin, hidrat oluşturarak yüksek hacimli ince mineral tozları içeren RPB özelliklerine uygulanmasının etkilerini incelemiştir. Çalışma, kuru ısıtma kürlemesinin, düşük çimento hacmi ve 0.2 su/bağlayıcı oranı

nedeniyle mineral tozun puzolanik reaktivitesinin ilerlemesini artırdığını bildirmiştir. Ayrıca sonuçlar, buharlı kürleme ve kuru ısıtma kürlemesinden sonra dayanımın yaklaşık %200 oranında arttığını göstermektedir. Farklı buhar kürleme yöntemleri benimsenmiştir ve 3 günlük buhar kürleme ile karşılaştırıldığında, 3 günlük buharlama ve 1 günlük yüksek sıcaklıkta kurutmanın basınç dayanımını hızla arttırdığı bildirilmiştir.

Gent (2012), geçmiş priz süresi deneyimlerinden nihai priz süresini bilerek, priz süresinin hemen ardından ve gözenek işleminden sonra, beton numunelerini bir fırına (100°C ile) koyarak, ultra yüksek performanslı beton dayanımı üzerindeki termal kürleme ve erken dönem etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, zamanla basınç dayanımının doğrusal olarak arttığını açıkça göstermiştir. Ayrıca erken dönemde termal işlemin uygulanmasının uzun vadeli etkisinin araştırılması ile yaklaşık yarım günlük, 2 günlük, 7 günlük, 14 günlük, 28 günlük ve 91 günlük gibi farklı dönemlerdeki örneklerin basınç dayanımı kontrol edilmiştir ve sonuçlar, 91 günlük dönemdeki dayanımın erken dönem uygulamalarından daha az etkilendiğini göstermekteydi. Aynı zamanda diğer sonuçlar, dayanım gelişiminde artan bir doğrusallık göstermiştir.

Mostofinejad, Nikoo ve Hosseini (2016), basınç dayanımının maksimum değerini elde etmeye neden olan faktörleri belirlemek için, karışım parametrelerinin ve farklı kür durumunun, RPB'nun basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Uygulama koşulları, 125°C'de otoklav ile üç günlük uygulamayı, ardından 220°C'de yedi günlük ısıtma işlemi içermekteydi ve böylece, minimum uygulama süresinde üstün mekanik özelliklerle daha etkili bir performans sergilenmekteydi. Bu çalışmada kullanılan 8 adım prosedürü, 85 MPa'dan (28 gün) 233 MPa'ya (13 gün) yükselme ile gösterildiği gibi, örneklerin basınç dayanımını yaklaşık %174 oranında, yani önemli ölçüde geliştirmiştir.

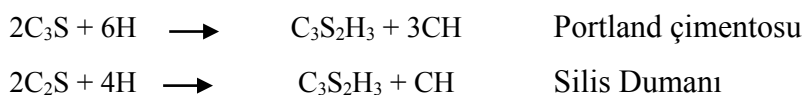
P. Hiremath ve Yaragal (2017), Normal Su kürleme, Hava Kürleme, 100°C'de Sıcak Hava Kürleme ve 90°C'de Buhar Kürlemeyi içeren dört kür koşulu altında RPB basınç dayanımını incelemiştir ve tüm kürleme rejimleri için kürleme süresi 34 saat olarak sabittir. Ayrıca, sıcak hava kürleme yönteminin etkisini belirlemek için bazı numuneler 1, 2 ve 3 gün boyunca 100°C'nin altında sıcak hava ile kürlenmiştir,

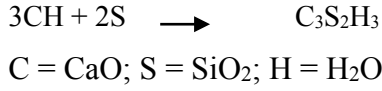
bunların hepsi 2 farklı su/çimento oranı (0,2 ve 0,18) ile yapılmaktadır. Sonuçlar, sıcak hava kürlenme rejimleri ile karışımın, dört kürlenme rejimi arasında daha iyi bir basınç dayanımı değerine sahip olduğunu göstermiştir ve sıcak hava uygulamaları altında basınç dayanımı artışı, diğer üç kürlenme rejimlerinden %36,95, %39,13 ve %5,21 daha fazladır. Ayrıca çalışma, bir günlük sıcak hava kürlenmesinden sonra basınç dayanımının, 28 günlük dayanımının yaklaşık 80,5'i olduğunu ortaya koymuştur. Dayanımdaki bu gelişme, 100°C'lik yüksek sıcaklıktaki puzolanik reaksiyonlara ve çimentonun hızlı hidrasyon sürecine atfedilmiştir. Basınç dayanımında en iyi gelişimi elde etmek adına sıcak kürlenme süresinin optimum zamanını bulmak için, numune, üç farklı kürlenme süresine maruz bırakılmıştır; sonuç olarak çalışma, iki günlük kür süresinin, bir ve üç günlük kürlenme arasında en iyi basınç dayanımı sürdürdüğünü bildirmiştir.

2.5. Hidrasyon ve Puzolanlı Reaksiyon (RPB)'de

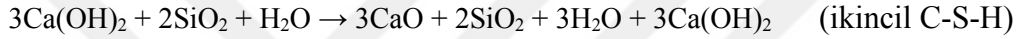
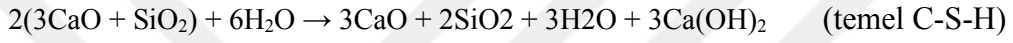
Kalsiyum silikat hidratları (CSH), RPB temelinde çift reaksiyonla üretilmektedir. Çimento hidrasyon işlemi ve suda silis dumanı çözünmesi ile üretilen silis iyonları arasında meydana gelen, puzolanik reaksiyonlar olarak adlandırılan süreç ve kullanılan orta çimento gösterimlerinde bulunan kalsiyum hidroksit (portlandit CH) sonucu oluşan diğer kalsiyum iyonları: CSH'nin (kalsiyum silikat hidratın) stokiyometrisi (C, CaO; S, SiO₂ ve H, H₂O anlamına gelmektedir) ve mikro yapıları tamamen hidrasyon işlemleri sırasında uygulanan çeşitli ısı işlemlere (20-250)°C bağlıdır. (Philippot vd., 1996).

C₃S ve C₂S çimento ile serbest kalmış kalsiyum hidroksit (CH) ile puzolanlı bir malzeme olarak silis dumanının reaksiyonları, CH, hidrasyon ürünleri hacminin yaklaşık %20-25'ine sahiptir ve CH kristalleri, çözelti içinde büyümektedir. Bunların morfolojileri, nispeten zayıf, gevrek ve çimento esaslı olmamalarıdır. Çünkü çatlaklar, özellikle çimento hamuru temeli ve agregalar arasındaki arayüzde, CH kristallerinin bulunduğu bölgeler boyunca kolayca artabilmektedir (Rao, 2003). Rao (2003) kaynağına göre, reaksiyon süreci aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:





Uçucu kül reaksiyonları açısından, hem C sınıfı hem de F sınıfı puzolanlardır. Uçucu külün puzolanik reaktivitesini etkileyen en önemli faktörler cam içeriği, inceliği ve asit oksit içeriğidir (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃). puzolanik aktivite sırasında uçucu kül, daha fazla C-S-H oluşturmak için serbest kireç ile kimyasal olarak reaksiyona girmektedir, çimento ve suyun hidratasyonu ile üretilen aynı “yapıştırıcı” böylece, nemin beton dan geçmesine izin veren ince boruları kapatır. Hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlar yoluyla C-S-H oluşumu aşağıdaki gibi olmaktadır (Zulu, 2017)



Reaksiyon, sistemde absorbe edilecek yeterli Ca(OH)₂ olduğunda oluşmaktadır. Uçucu kül içeriği artarsa, uçucu külün puzolanik reaksiyonu yavaşlamaktadır, çünkü çimento yükselmesi zayıflamaktadır (Wang, Zhang ve Sun, 2004).

Hidratasyon ısısı açısından, mineral çimento esaslı bileşenlerin eklenmesi 3 günlük hidratasyon ısını büyük ölçüde azaltmıştır; ekzotermik oran ve HPB'deki bağlayıcı macunun en yüksek sıcaklığının gecikmiş ortaya çıkma zamanı, özellikle de çift ve üçlü ekleme yaklaşımları için doğrudur (Kim, Yang ve Moon, 2015).

2.6. Eski Çalışmalardan RPB Karışım Tasarımı

RPB karışım tasarımlarının çoğunluğu, Richard ve Cheyrezy (1995) tarafından desteklendiği karışıma bağlıdır. Karışımları tasarlayan son çalışmalar incelendiğinde, çimento içeriği, karışımların toplam ağırlığının % (28-38)'idir; bu, kütle açısından metreküp başına 650 kilogramdan fazlasına eşittir. %10 ile çeşitlenen içerikteki çeşitlilik ve fark; silis dumanı, öğütülmüş kuvarsı ve uçucu kül gibi takviye malzemelerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır ve bu, çimento kullanımının azalmasına yol açmaktadır. Silis tozu veya diğer takviye malzemelerinin kullanımı, yerel malzemelerin kullanılabilirliğine bağlıdır. Genel olarak silis dumanının kullanımı, çimento ağırlığının toplam karışım ağırlığının %(20-30) 8 ila 10 yüzdesi

arasında değişmektedir. Ayrıca belirtildiği gibi, silis dumanı tipinde farklılıklar vardır, bu farklılıklar genellikle farklılaşan karbon, kükürt ve kalsiyum değeri nedeniyle oluşmaktadır. Ve ayrıca silis dumanlarının toplandığı fırındaki telafi seviyesi de söz konusudur. Yüksek dozaj seviyelerine sahip yüksek oran süperakışkanlaştırıcılar (polikarboksilik polimerler), RPB karışımlarında çimentonun % (4-7)'si kadar kullanılmaktadır (El-louh, 2014).

Literatür araştırmasından, bu parametrelerin aralıkları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Su-toplam bağlayıcı oranı: 0.15–0.24 (ağırlıkça); çimento içeriği: 800–1100 kg/m³; silis dumanı içeriği: 150–300 kg/m³; silis dumanı-çimento oranı: 0.15– 0.35 (ağırlıkça); çimento ve mikro silis (yani, bağlayıcı veya çimentolu malzemeler) içeriği: 950–1400 kg/m³; kum ve kuvars içeriği: 1000–1400 kg/m³; çelik lif içeriği: 190–250 kg/m³; ve çelik lif-toplam bağlayıcı oranı: 0.15–0.30 (ağırlıkça) (Ahmad, Zubair ve Maslehuddin, 2015).

2.7. RPB'nin Avantajları

Üstün performansı nedeniyle reaktif pudra betonu, sıradan inşaatlarda kullanımına ek olarak yerel nükleer enerji, marina, petrol ve askeri üs tesisleri gibi özel inşaat projelerinde de kullanılmıştır (Zheng, Luo ve Wang, 2013). Reaktif pudra betonunun, geleneksel betonlara kıyasla ultra yüksek dayanım avantajları aşağıda sunulmuştur.

- Reaktif pudra betonun ana avantajı, bireysel mekanik dirençtir (basınç dayanımı 150 MPa'dan yüksektir) (Ženíšek, Vlach ve Laiblová, 2016). RPB'nin ultra yüksek basınç dayanımı, ölü yüklerde önemli tasarruf sağlamaktadır, RPB bileşenleri, geleneksel sıradan beton tarafından uygulanan aynı bileşenlerin üçte biri veya yarısı ağırlığında olabilir. Ağırlık azaltma, daha ince ulaşım yapıları sağlamak açısından avantajlıdır. Genel olarak bu ağırlık azalması, maliyeti azaltmakta ve çok katlı binalarda zemin alanlarını ve açıklıkları artırmaktadır. Ayrıca ağırlık azalması, daha ince ulaşım yapıları üretmede, genel maliyetleri azaltmada ve yüksek katlı binalarda kullanılabilir zemin alanını arttırmakta iyidir (Dauriac, 1997; Tam ve Ng, 2012).
- Sıradan beton ile karşılaştırıldığında reaktif pudra betonu, yüksek seviye sünekliğe sahiptir (HPC ve bazı metallerle karşılaştırıldığında, 300 kat daha büyük tipik

değerler) ve süneklik göstergesi olan kırılma enerjisi emilimi, normal betonda yaklaşık (100-150) J/m² olduğunda, RPB200 için 40.000 J/m²'ye ulaşabilir ve bu durum, yapıları aşırı yüklerde ve depremlerde daha güvenilir hale getirmektedir. Süneklik özelliği, betonda kullanılan liflerin hacmine bağlıdır (Dugat, Roux ve Bernier, 1996b). RPB'nun yüksek enerji emme avantajları, sütunların post-elastik davranışını, kiriş-sütun kesişme noktalarını ve kesme duvarlarını geliştirebilir (Lee ve Chisholm, 2006;Dauriac, 1997; Tam ve Ng, 2012).

- Bileşenlerdeki takviye çelik miktarının ortadan kaldırılması, elemanların şekillerini seçme özgürlüğü ve ayrıca beton elemanlarının kalınlığında azalma sağlamaktadır, bunların hepsi işçilik maliyetlerinde malzeme ve masraf tasarrufu sağlamaktadır (Dauriac, 1997; Yazici vd., 2009; Tam ve Ng, 2012).
- RPB'nin yüksek dürabilitesi, uzun bir servis ömrü sağlar ve bu da bakım maliyetlerinde azalma yaratır. Reaktif pudra betonu neredeyse geçirimsiz bir malzemedir ve aşınmaya karşı direnci, köprü zeminleri ve endüstriyel tabanlar için uzun servis ömrü sağlamaktadır (Man, 2009). Ayrıca RPB'nun yüksek korozyon direnci, buz çözülmesinin kimyasallar etkilerinde ve ıslak ortamlara sürekli maruz kalma durumunda koruma sunmaktadır (Dauriac, 1997; Tam ve Ng, 2012).
- Reaktif pudra betonu, önemli miktarda hidrate olmamış Portland çimentosu nedeniyle, çatlama etkileri altında kendi kendini iyileştirme potansiyeli sunmaktadır (Dauriac, 1997; Tam ve Ng, 2012).
- RPB, inceliği nedeniyle mükemmel kalitede yüzey düzlemesi sağlamaktadır (Dauriac, 1997).
- Ultra yüksek dayanımı, malzeme kullanımını optimize ederek toplam çimento ve agrega miktarlarında önemli bir azalmaya neden olmaktadır (Dauriac, 1997; Tam ve Ng, 2012).

2.8. Reaktif Pudra Beton Dezavantajları

RPB’de ultra yüksek dayanım elde etmek için, içindeki çimento dozajı, genellikle çok düşük su-çimento oranı sayesinde yüksektir (800-1000) kg/m³ ve bu çimento miktarı, hidrasyon ısısı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir; rötre sorunlarına yol açar ve ancak mineral katkı maddelerinin kullanımı bu problemleri çözüp durumun üstesinden gelebilir (Yazici ve arkadaşları, 2009). RPB’nin maliyeti yüksektir ve geleneksel beton karışımlarının ekonomik olarak kullanılabilirdiği ve performans gerekliliklerini karşılayabildiği uygulamalarda, geleneksel beton karışımlarının yerini alamayacaktır (Dauriac, 1997; Tam ve Ng, 2012).

2.9. RPB’nin Uygulamaları

2.9.1. ABD’deki Wapello Ülke Köprüsü

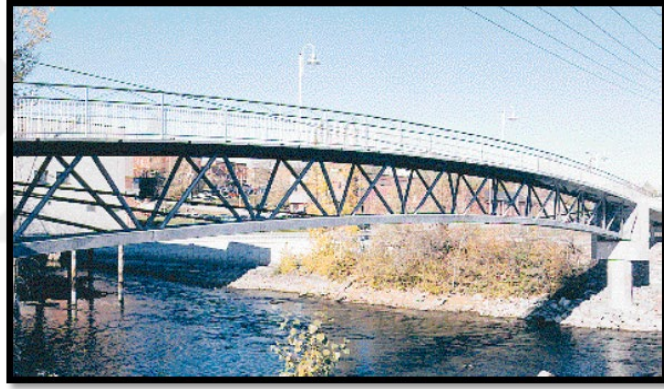
RPB ile yapılan ilk otoyol köprüsü, monolitik güverte ile kompozit uygulama sağlama dışında hafif çelik takviyesi olmaksızın, kiriş uzunluğu 35,6 m olan Wapello Ülke Köprüsü’dür (Man, 2009).

2.9.2. X-şekilli ön baskılı kirişler

Kirişler gibi köprü ve bina inşaatlarında ana eleman olarak kabul edilen farklı şekillerdeki ön dökümlü ve ön baskılı beton elemanları, çok daha düşük beton dayanımına orantılı hale getirilmiştir. Ve bu oranlar, RPB’nun yeteneklerindeki maksimum faydayı sağlamamaktadır. Şimdi, yeni şekilli yeni ön baskılı kiriş tasarımlarını tanıtmak için bir şans vardır. Bunlar, kum saati stiline yakın ve x-şekilli çapraz kesitleri olan, RPB’nin öngerme kirişleridir. Bu kirişler, herhangi bir ikincil takviye olmadan yapılmaktadır. Benzer derinliklere ve çok yakın ağırlıklara sahip çelikten yapılmış eşdeğer genişlikteki flanşlarına kıyasla, aynı moment kapasitesini taşımak için tasarlanmış ve test edilmiştir. RPB kullanımı, geleneksel ön baskılı betonla karşılaştırıldığında, derinlikte %50, ağırlıkta %75 oranında yararlı bir azalma sağlamaktadır (Dauriac, 1997).

2.9.3. Kanada'daki Sherbrooke Yaya Köprüsü

Sherbrooke Yaya ve Bisiklet Yolu Köprüsü (Fotoğraf 2.1), RPB ile inşa edilen dünyanın ilk büyük yapısıdır. Temmuz 1997'de yapılmıştır, köprünün üst yapısı açıktır, ağ boşluk desteği sonradan gerilimlidir, (6) prefabrik benzer döküm parçalarından oluşmaktadır ve bu parçalar dâhili ve harici direk gerginliği kullanılarak sahaya monte edilmiştir. Üst ve alt kafesler ve ayrıca döşeme (200 MPa) basınç dayanımına sahip RPB'den yapılmıştır ve çapsal ağ elemanları için RPB, paslanmaz çelik borular ile sınırlandırılmıştır ve (350 MPa) basınç dayanımına ulaşabilir. Kafes açıklıklarının, yürüyüş yolunu ve bisiklet trafiğini taşımak için, 3 m derinliği ve 197 dairesel bir eğri içinde Magog Nehri'ni geçen 326 m yarıçapı vardır (Blais ve Couture, 1999).



Fotoğraf 2.1. Kanada'daki Sherbrooke yaya köprüsü

2.9.4. Kore'deki Sunyudo Yaya Köprüsü

Kore'nin başkenti Seul'deki bu proje, 120 m yayılma uzunluğu ile dünyanın en büyük RPB Köprüsü olarak kabul edilmektedir (Rebentrost,1973). Fotoğraf 2.2'de gösterilmiştir. Bu köprü olağan takviye olmadan inşa edilmiştir. Ayrıca mikser tesisleri, çelik kalıp ve ısı kürleme odalarını içeren alandaki şantiyenin etrafındaki tüm elemanlar, önceden imal edilmiştir (P.Vernet, 2004).



Fotoğraf 2.2. Kore'deki Sunyudo Yaya Köprüsü (P.Vernet, 2004)

2.9.5. Japonya'daki Sakata-Mirai Yaya Köprüsü

Fotoğraf 2.3'te gösterilen Japonya'daki Sakata-Miari yaya köprüsü, 56 tonluk ölü yüküyle son derece hafiftir ve aynı eşdeğerdeki geleneksel bir ön baskılı beton yapının ölü yükünün, sadece yaklaşık beşte birine eşittir; bu da %10 civarında ekonomik avantaj sağlamaktadır. Bu yapı herhangi bir pasif takviye olmaksızın inşa edilmiştir (Jungwirth, 2005; Rebentrost ve Cavill, 2006). Bu projedeki RPB teknolojisi, yaya köprüsü inşacılarının malzeme kullanımını optimize etmesine, ekonomik avantajları kullanmasına ve çevre dostu bir yapı oluşturmasına yardımcı olmuştur (Dauriac, 1997; Sadrekarimi, 2004).



Fotoğraf 2.3. Japonya'daki Sakata-Mirai Yaya Köprüsü (Jungwirth, 2005)

2.9.6. Avustralya'daki Shepherds Creek Yolu Köprüsü

Bu proje, daha önce var olan ahşap köprü yerine inşa edilmiştir. RPB ile yapılmış kalıcı ön döküm ince çerçeve panelleri vardır ve kalıplar kirişlerle temas ettirilerek levhaları tutmaktadır. Kirişin ağırlığı sadece 4,2 ton, uzunluğu ise 15,1 m'dir. Bu kiriş, 9 tonluk

geleneksel ön baskılı kirişe kıyasla hafiftir. Zemindeki son derece hafif çerçeve plakaları, ek olarak yüksek dürabilite sağlamaktadır (Sadrekarimi, 2004).



3. MALZEMELER VE DENEYSEL PROGRAM

3.1. Giriş

Laboratuvar çalışması kapsamında lif içermeyen RPB harçların taze ve sertleşmiş özelliklerinin araştırılması için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın bu bölümde; harç bileşimini oluşturan malzemelerin belirlenmesi, bu malzemelerle ilgili ön karışım dizaynlarının yapılması, karışım serilerinin belirlenmesi, deney tasarımı, numune boyutları ve hazırlanması, kütleme yöntemleri, numunelere uygulanan testler ve testlerde kullanılan aparatlar ile ilgili ayrıntılar sunulmaktadır. Genel olarak, deneysel çalışma iki bölümde özetlenebilir;

- i. RPB üretimi için malzemelerin seçimi, karışım malzemelerinin hazırlanması, optimum malzeme karışımlarının belirlenmesi, harç numunelerin dökülmesi, sertleşmiş numunelere su kürü, laboratuvar kürü ve sıcak su kürü olmak üzere üç farklı kür uygulamasının gerçekleştirilmesi.
- ii. Sertleşmiş RPB’u numuneleri üzerinde eğilme ve basınç testlerinin gerçekleştirilmesi.

3.2. Malzemeler

3.2.1. Çimento (Ç)

Bu çalışmada reaktif pudra betonu üretmek için, bir tip CEM I 42,5 R (sıradan Portland çimentosu) kullanılmıştır (Fotoğraf 3.1). Çimento, EN 197-7:2011’in gereksinimini karşılamaktadır. Çimento’nun üretici firmadan alınan kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir.



Fotoğraf 3.1. RPB karışımlarında kullanılan çimento

Tablo 3.1. CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal bileşim, fiziksel ve mekanik özellikler

		TS EN 197-1 Standard Limit Değerleri		
		Ölçüm Sonuçları	Min.	Maks.
Kimyasal Özellikler				
Çözünmeyen Kalıntı	(%)	0.79	-	5
MgO	(%)	1.73	-	-
SO ₃	(%)	3.16	-	4
Kızdırma Kaybı	(%)	3.33	-	5
Cl ⁻	(%)	0.0485	-	0.1
Puzolanik Özellik	-	-	-	-
Fiziksel Özellikler				
Özgül Ağırlık	(gr/cm ³)	3.08	-	-
Özgül Yüzey	(cm ² /gr)	3560	-	-
Normal Kıvam Su İhtiyacı	(%)	28	-	-
Priz Başlangıcı	(dakika)	135	60	-
Priz Sonu	(dakika)	220	-	-
Hacim Genleşmesi	(mm)	0	-	10
2 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	31	20	-
7 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	42.1	-	-
28 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	53.1	42.5	62.5

3.2.2 Silis Dumanı (SD)

Mikro silis, Dost kimya firmasından (Fotoğraf 3.2) tedarik edilmiştir, amorf SiO₂ parçacıklarının iki formunda yoğunlaştırılmış ve yoğunlaştırılmamış formdadır ve Tablo 3.2'de gösterildiği gibi teknik özelliklere sahiptir, ASTM C-1240 gereksinimlerini karşılamaktadır; şirket web sitesine göre (URL-1,2019).

Tablo 3.2. Silis dumanının teknik özellikleri (URL-1, 2019).

Şekilsiz SiO ₂	Min % 93 (gerçek 96,1%)
H ₂ O (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/dm ³ (D)
BET (dk)	15-28 m ² /gr (gerçek 23,36 m ² /gr)



Fotoğraf 3.2. RPB karışımlarında kullanılan Silis dumanı

3.2.3. Kum

Harç karışımlarının hazırlanmasında ince agrega olarak 0 - 2 mm arasında değişen partikül büyüklüğüne sahip silis kumu kullanılmıştır. Kum elenerek 0-0,6 ve 0,6-2 mm olmak üzere iki farklı grup oluşturulmuş, ideal agrega granülometrisi için 0-0,6 mm kum %60, 0,6-2 mm boyutlarındaki kum %40 oranlarında kullanılmıştır. Su talebini artırma etkilerine ek olarak, bir silt veya kil tabakalarının varlığında, çimento ve agrega arasındaki bağlanma dayanımının azalmasını önlemek için, agregaların temiz olmasını sağlamak önemlidir, bu kapsamda agrega içerisindeki ince maddeler uzaklaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kum (Fotoğraf 3.3.)'te gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.3. (0-0.6) mm ve (0.6-2) mm karışımlarında kullanılan kum

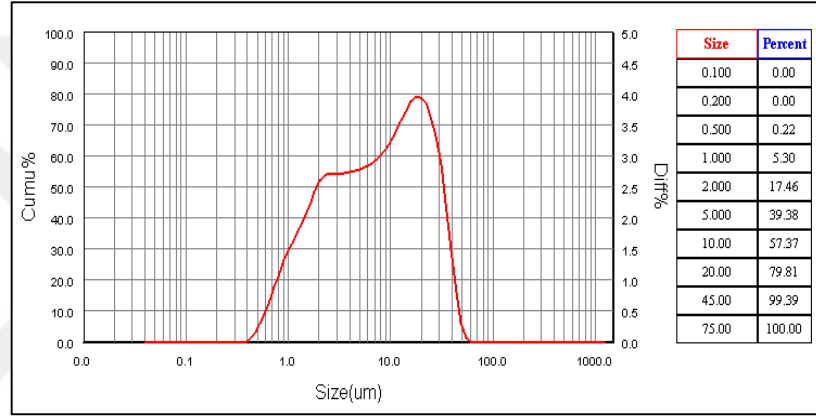
3.2.4. Uçucu Kül (UK)

Harç numunelerinin üretiminde kullanılan çimento harcında çimento ikame malzemesi olarak Çatalağzı Termik Santrali atığı UK kullanılmıştır. UK etüvde öğütme işleminde toplama oluşturmaması için 105 ± 5 °C de 24 saat süreyle kurutulmuş, daha sonra öğütücüde öğütülerek $6590 \text{ cm}^2/\text{g}$ blaine inceliğine getirilmiştir. UK F sınıfı olup, S+A+F toplamı %82,55 değerindedir. UK'ün özgül ağırlığı $2,71 \text{ g/cm}^3$, inceliği 6590

cm²/g dır, partikül boyutu dağılımı Şekil 3.1, kimyasal özellikleri Tablo 3.3'de tanımlanmıştır.



Fotoğraf 3.4. Karışımlarında kullanılan uçucu kül (F sınıfı)



Şekil 3.1. Uçucu külün partikül boyutu dağılımı

3.2.5. Pomza Tozu (PT)

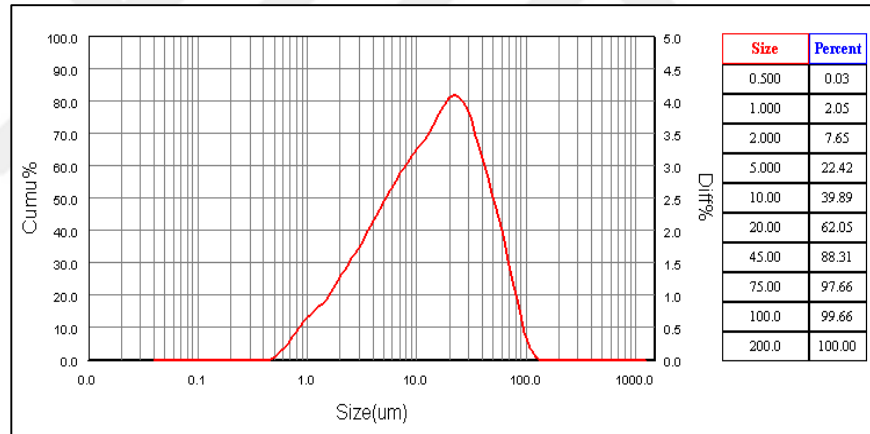
Bu çalışmada Nevşehir'de bulunan üretici firmadan temin edilen atık niteliğindeki pomza kullanılmıştır. Pomza kırma ve öğütme işlemlerinden geçirilmiş olup, özgül ağırlığı 2.4 ve özgül yüzey alanı 308,6 m²/kg olarak belirlenmiştir. Pomza tozu (PT) Fotoğraf 3.5'de gösterilmektedir. PT, kumun 0-0.6 mm boyutundaki kısmı yerine %0, 10 ve 15 oranlarında kullanılmış, partikül boyutu dağılımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.5. Karışımlarında kullanılan Pomza tozu

Tablo 3.3. Uçucu külün kimyasal analizi

Oxide	%	EN 450 - 1	ASTM C618	
			F	C
SiO ₂	61,81			
Al ₂ O ₃	9,54			
Fe ₂ O ₃	7,01			
CaO	1,77			
MgO	2,56			
SO ₃	0,31	<3	<5	<5
K ₂ O	0,99			
Na ₂ O	2,43			
S +A+F	88,36		>70	>50
Ignition loss	2,2	< 5	< 12	< 6



Şekil 3.2. Pomza tozunun partikül büyüklüğü dağılımı

3.2.6. Su (S)

Bu çalışmada, tüm karışımlarda üretim ve kütleme işlemi sırasında, içilebilir şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2.7. Süperakışkanlaştırıcı (SA)

RPB'lerinde, çok düşük su/bağlayıcı oranında uygun işlenebilirlik değerleri elde etmek, sadece süperakışkanlaştırıcı (SA) kullanımı ile mümkündür. Bu çalışmada SA olarak, CHRYSO Lab Bet 8109 kullanılmıştır. TS EN 934-2 Ç.3.1/3.2 gereksinimini

karşıllayan yüksek oranda su azaltıcı beton katkısidir. Yeni nesil polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı, kıvam arttırıcı özelliği sayesinde düşük su/çimento oranlarında harç üretimine imkân sağlamaktadır. Tedarikçi firmadan alınan, CHRYSO Lab Bet 8109'un özellikleri, Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Kendiliğinden yerleşen beton için tavsiye edilir (URL-2, 2019). Tedarikçi web sitesine göre CHRYSO Lab Bet 8109 tanımının teknik detayları ve özeti Tablo 3.5'de gösterilmektedir.

Tablo 3.4. CHRYSO Lab Bet 8109 teknik detayları ve özeti (URL-2, 2019)

SüperAkışkanlaştırıcı Türü	CHRYSO Lab Bet 8109
Temel	polycarboxylate
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1.075±0.02 gm/cm ³

3.3. Deneysel Program

Bu çalışmadaki deneysel program, kontrol karışımına ek olarak hazırlanan dokuz deneme karışımını içermektedir. Testler için toplam 450 numune hazırlanmıştır.

Kontrol karışımı, çimentonun %20'sinin silis dumanı ile değiştirilmesini içermektedir, referans karışımında uçucu kül veya pomza tozu kullanılmamıştır.

Dokuz seri karışımın geri kalanı için, ince agrega olarak eleme işlemi ile elde edilen 0-0,6 ve 0,6-2 mm olmak üzere iki farklı agrega serisi ile ideal agrega gradasyonun oluşturulması amacıyla 0-0,6 mm kum %60, 0,6-2 mm kum ise %40 oranlarında kullanılmıştır.

0-0,6 mm lik ince agrega yerine %0, %10 ve %15 oranında PT ikame edilmiştir. Harç karışımlarında UK, %30, % 40 ve 50 oranında çimento yerine karışıma eklenmiştir.

Tüm deneme karışımları için silis dumanı içeriği %20 oranında, su-bağlayıcı oranları %20 oranında ve süperakışkanlaştırıcı oranları 0,03 oranında sabitlenmiştir. Deneysel program Şekil.3.3.'te özetlenmiştir.

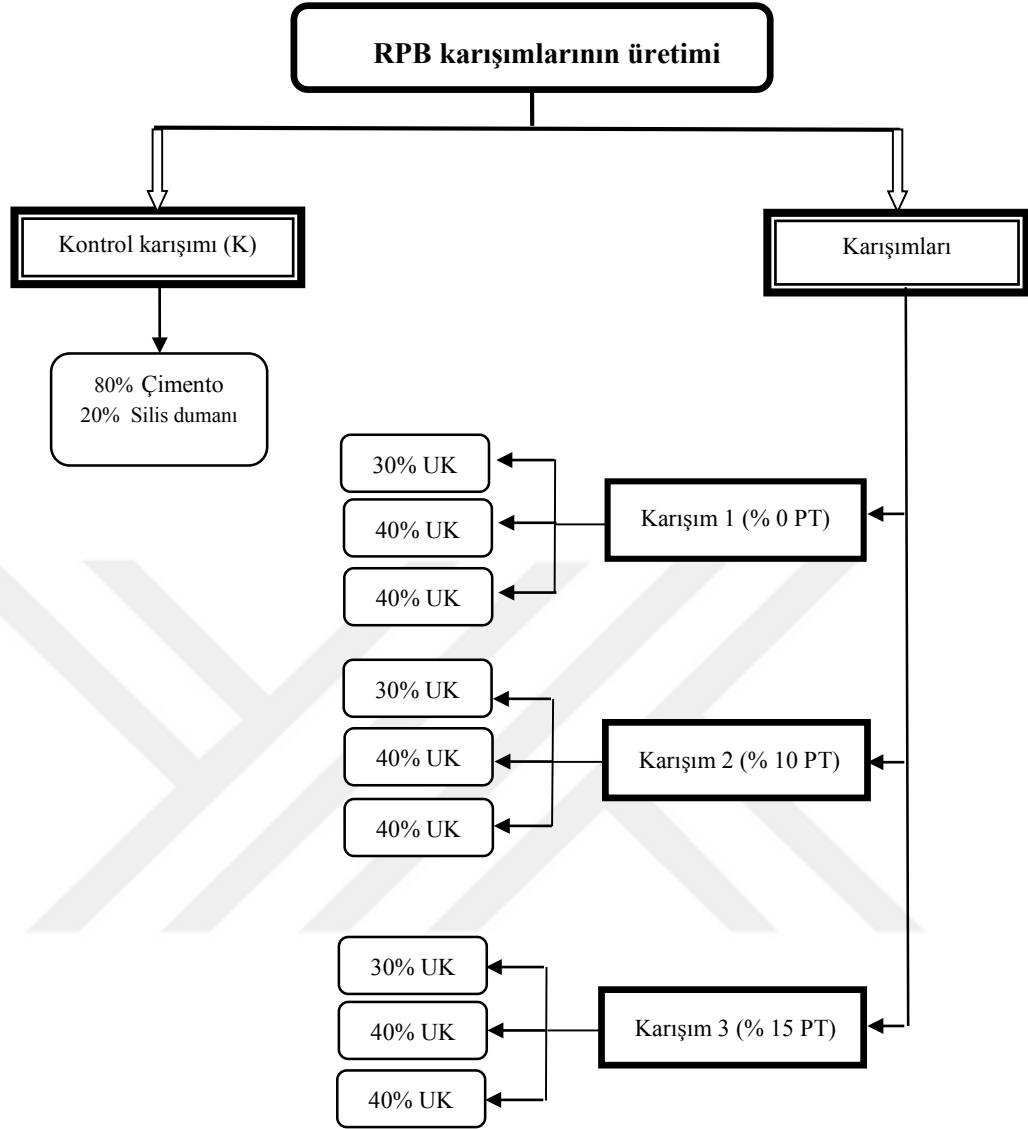
3.4. Malzemelerin hazırlanması

Uçucu kül ve pomza tozu ve kum malzemeleri aşağıda belirtilen işlemlerden geçirilerek hazırlanmıştır.

- **Uçucu kül:** Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla UK önce 24 saat boyunca 105 ± 5 °C'de etüvde kurutulmuş, daha sonra 100 dakika süreyle katkısız, ikinci aşamada da CHRYSO - Cem ADM 3 katkı maddesi ilavesi 100 dakika süreyle öğütme işlemine devam edilmiştir. Fotoğraf 3.7'de CHRYSO - Cem ADM verilmiştir. CHRYSO - Cem ADM özellikle minerallerin öğütme işlemini arttırmak için formüle edilmiş bir katkı maddesidir. Harç karışımlarında UK, %30, %40 ve 50 oranında çimento yerine karışıma eklenmiştir. Kurutma amaçlı etüv Fotoğraf 3.6'da, öğütme işleminde kullanılan bilyalı değirmen Fotoğraf 3.8'de verilmiştir.
- **Pomza tozu:** Pomza kırıcı ile kırılmış, 24 saat boyunca 105 ± 5 °C'de etüvde kurutulmuştur. Pomza çelik bilyalı öğütücüde önce 30 dakika katkısız, daha sonra CHRYSO - Cem ADM 3 ilave edilerek 30 dakika daha öğütme işlemine devam edilmiştir. 0-0,6 mm lik ince agrega yerine %0, %10 ve %15 oranında PT ikame edilmiştir.
- **Kum:** Karışımda kullanılacak ince agregada ideal bir gradasyon elde etmek silis kumu etüvde 24 saat ve 105 ± 5 °C'de kurutulmuş, 2 mm lik elekten elenmiş daha sonra, 0-0,6 ve 0,6-2 iki bölüme ayrılmıştır. Kurutma amaçlı etüv Fotoğraf 3.6'da, öğütme işleminde kullanılan bilyalı değirmen Fotoğraf 3.8'de verilmiştir.



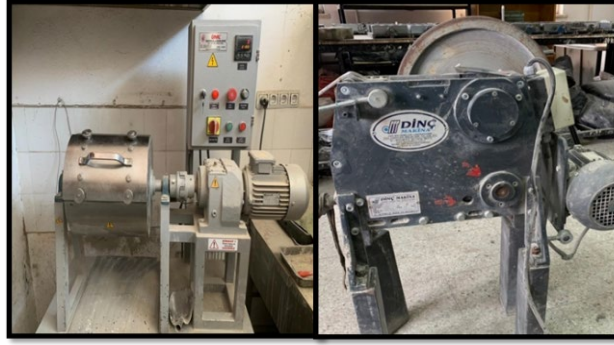
Fotoğraf 3.6. Malzemeleri öğütmeden önce kurutmak için kullanılan fırın



Şekil 3.3. Deneysel program



Fotoğraf 3.7. Öğütme için CHRYSO- Cem ADM



Fotoğraf 3.8. Bilyalı değirmen ve kırıcı makine

3.5. Karışım Oranları

Tablo 3.6, karışım oranını ve kontrol karışımının bir metreküp bileşenini sunmaktadır.

Tablo 3.6. RPB'nin kontrol karışımının (K) karışım oranları

Malzeme	Bileşen / çimento içeriği (%)	Miktar (kg/m ³)
Çimento CEM 42.5 R	1	720
Silis dumanı	0.2	180
Kum (0-0,6) mm	0.6	540
Kum (0,6-2) mm	0.4	360
s/b oranı	0.2	180
SA	0.03	27

Diğer karışımlarda, 0-0,6 mm lik ince agrega yerine %0, %10 ve %15 oranında PT, %30, % 40 ve 50 oranında çimento yerine UK, karışıma eklenmiş, bağlayıcı miktarı 900 kg/m³, su-bağlayıcı oranı 0,2, SA dozajı 0,03 ve kum/bağlayıcı oranı 1:1 olarak sabitlenmiştir. Tablo 3.7'de karışım oranlarının ayrıntıları göstermiştir. Tablo 3.8 farklı karışımlar için kullanılan malzeme miktarlarını göstermektedir.

Tablo 3.7. RPB'nin farklı karışım oranları

Karışım Kodu	B (%)			Kum / B (%)	PT / ince kum (0-0.6) mm (%)	S / B	SA/ B
	PÇ	SD	UK				
P0-UK30	50	20	30	1	0	0.2	0.03
P0-UK40	40	20	40	1		0.2	0.03
P0-UK40	30	20	50	1		0.2	0.03
P10-UK30	50	20	30	1	10	0.2	0.03
P10-UK40	40	20	40	1		0.2	0.03
P10-UK40	30	20	50	1		0.2	0.03
P15-UK30	50	20	30	1	15	0.2	0.03
P15-UK40	40	20	40	1		0.2	0.03
P15-UK40	30	20	50	1		0.2	0.03

Tablo 3.8. RPB karışımının bileşenleri (kg/m³)

Karışım kodu	B (kg)			Kum (kg)		PT	Su	SA
	Ç	SD	UK	0-0.6 (mm)	0.6- 2 (mm)			
P0-UK30	450	180	270	540	360	0	180	27
P0-UK40	360	180	360	540	360		180	27
P0-UK40	270	180	450	540	360		180	27
P10-UK30	450	180	270	486	360	54	180	27
P10-UK40	360	180	360	486	360		180	27
P10-UK40	270	180	450	486	360		180	27
P15-UK30	450	180	270	559	360	81	180	27
P15-UK40	360	180	360	559	360		180	27
P15-UK40	270	180	450	559	360		180	27

3.6. Karıştırma Dizileri

Bu çalışmada, karışımın kuru bileşenlerinin yüksek su emilimini önlemek için aşağıdaki karıştırma yöntemi benimsenmiştir:

- Mikserde önce iki farklı grup ince agrega ve PT'nun kuru olarak bir dak. Karıştırılması,
- Su/bağlayıcı oranı ile belirlenen su içeriğinin yüzde 30'unun eklenmesi ve karıştırmaya 5 dak. devam edilmesi,
- Çimento, silis dumanı, uçucu külün mikserde eklenerek 5 dakika karıştırılması,
- %50 SA ve %30 su karışımının mikserde yavaş yavaş eklenerek, karıştırmaya 5 dak. devam edilmesi,
- Son olarak kalan su miktarının ve SA'nın eklenerek 10 dakika karıştırmaya devam edilmesi,

Harçların karıştırmasında kullanılan mikser Fotoğraf 3.9'da gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.9. RPB karışımlarını karıştırmak için kullanılan karıştırıcı

3.7. Numunelerin Hazırlanması

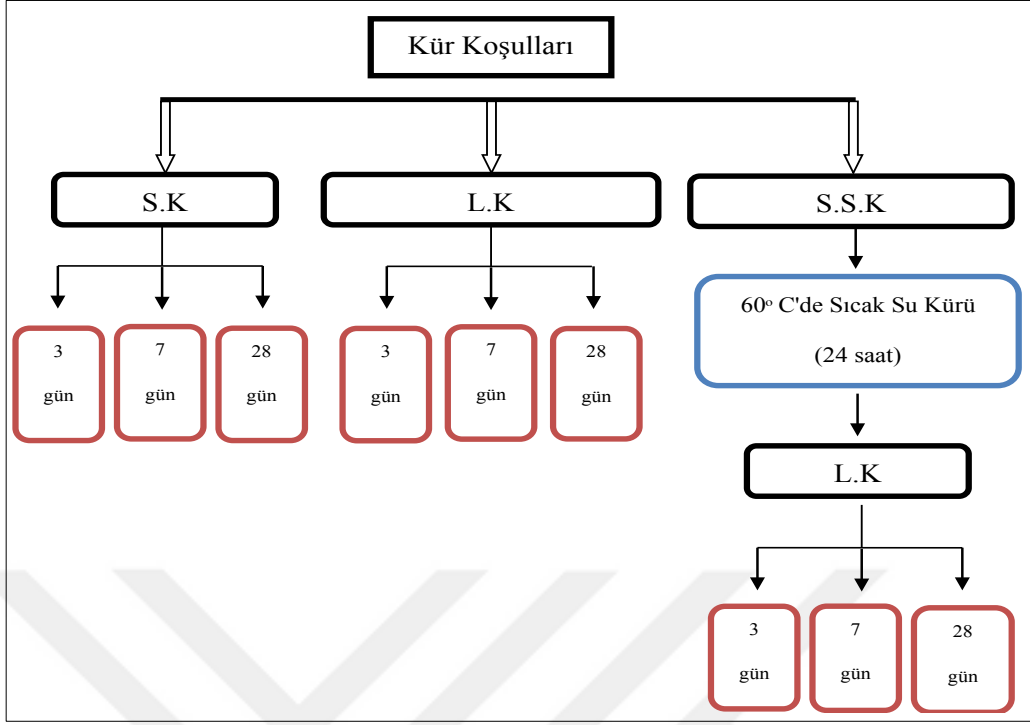
Bu çalışmada, her bir karışım için 40x40x160 mm boyutunda 45, toplam 450 prizmatik numune hazırlanmıştır. Harç karışımları kalıplara herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan kendiliğinden yayılarak doldurulmuş, numunelerin döküm işleminin tamamlanmasından sonra, kalıplar nem kaybını önlemek için 24 saat cam panel ile kapatılarak laboratuvar ortamında bekletilmiş, ertesi gün kalıplardan çıkartılmıştır.

3.8. Kürleme Yöntemi

Kalıptan çıkartılan numunelere, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi üç farklı kür yöntemi uygulanmıştır detayları aşağıda açıklanmıştır.

1. SK: Test gününe kadar numunelerin 20 ± 5 °C 'de su içinde bekletilerek yapılan kür,
2. LK: Numunelerin, 30 ± 5 °C ve bağıl nem seviyesi $\%70\pm 5$ olan kür odasında bekletilerek kürlenmesi,
3. SSK + LK: Kademeli bir sıcaklık artışı ile 60°C 'de 24 saat sıcak su kürü, daha sonra numuneler oda sıcaklığına geldiğinde, 30 ± 5 °C ve bağıl nem seviyesi $\%70\pm 5$ olan kür odasında yapılan kür.

Sıcak su kürü yapılan kür tankı Fotoğraf 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Kontrol ve diğer karışımlar için deneysel kür şeması



Fotoğraf 3.10. Sıcak su kür tankı

3.9. Test Prosedürü

Laboratuvar testleri, hem taze hem de sertleştirilmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için yapılan testlerden oluşmaktadır. Taze betonun yayılması akış testi ile test edilmiştir. Sertleşmiş beton numunelere eğilme ve basınç testi uygulanmıştır. Ayrıca, reaktif pudra betonun mikro yapı özelliklerini belirlemek SEM görüntüleri alınmıştır.

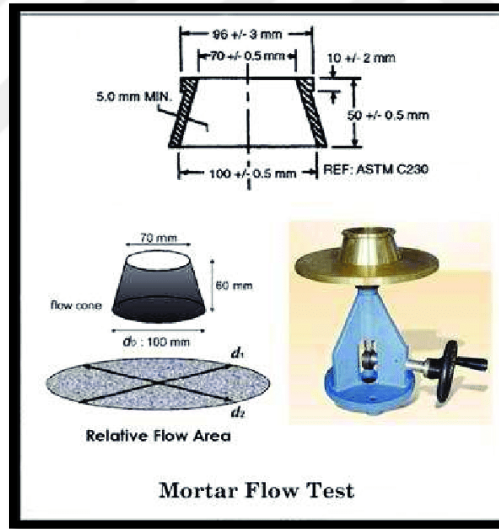
3.9.1. Taze Harç Testi

Taze harç karışımlarına ASTM C1437'ye göre yayılma test uygulanarak, elde edilen yayılma çapları Şekil 3.5'de verilmiştir.

Bu test yönteminde, ucu kesilmiş bir koni harç ile doldurulmuş ve dairesel akış tablasının ortasına yerleştirilmiş, dikkatlice kaldırılmış, harç numunenin çapı ölçülmüş, daha sonra numune 15 saniyede 25 kez düşürülmüştür. Numunelerin yayılma değerleri eşitlik 3.1'de tanımlandığı gibi belirlenmiştir. %105 ila %115 arasında değişen akış, numunenin işlenebilirliğini göstermektedir.

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

$$D_0 \text{ (mm)} = 100,5 \text{ mm (test konisinin alt kenarının çapı)}$$



Şekil 3.5. Harç akış testi (ASTM C1437)

3.9.2. RPB'nin Sertleştirilmiş Özellikleri

3.9.2.1. Birim Ağırlık

Sertleşmiş harç numunelerini önce etüvde 105±5 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş daha sonra numuneler 0,1 g hassasiyetinde dijital terazide tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Boyutları kumpasla ölçülen numunelerin daha sonra birim ağırlıkları

hesaplanmıştır. Numuneleri birim ağırlıkları ASTM C642-2004'e uygun olarak yapılmıştır.

3.9.2.2. Eğilme Dayanımı

Prizmatik harç numunelere ASTM C293-1994'e uygun olarak test presi kullanılarak, numunelere üç noktadan yüklemeli olarak yapılmış, test sonucu numunelerin eğilme dayanımı Eşitlik 3.2 yardımı ile belirlenmiştir. Eğilme dayanımı testi Şekil 3.6 ve Fotoğraf 3.11'de gösterilmiştir.

$$F_r = 1.5PL / bd^2 \quad (3.2)$$

Eşitlikte;

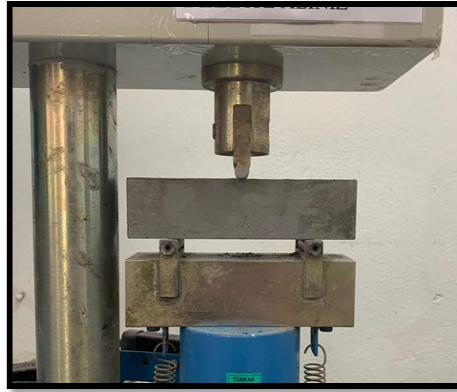
F_r

P = Test makinesi tarafından belirtilen maksimum uygulanan kırılma yükü (kN)

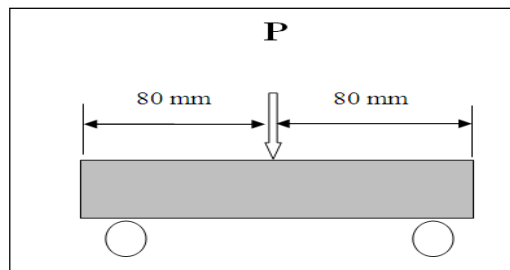
L = Mesnet açıklığı (mm)

B = Numune eni (mm)

D = Numune yüksekliği (mm)



Fotoğraf 3.11. Eğilme dayanımı testi

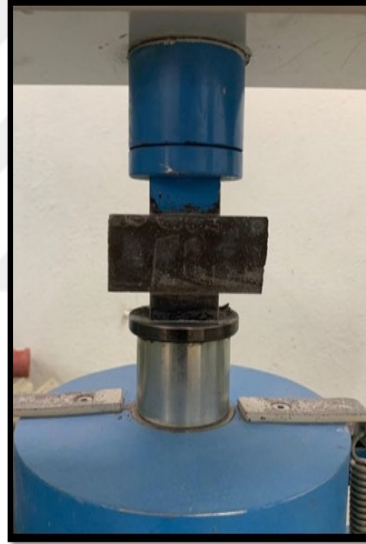


Şekil 3.6. Eğilme testinin şematik görünümü

3.9.2.3. Basınç Dayanımı

Bu çalışma özellikle, karışım malzemelerinin ve kür koşullarının RPB harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımına etkilerini araştırmaya odaklanmıştır. Basınç testi, sertleşmiş çimentolu kompozite uygulanan testlerin en yaygın olanıdır, kompozitin potansiyel dayanımını belirlemek için kullanılır, basınç testi, TS-EN196-1'e göre yapılmıştır.

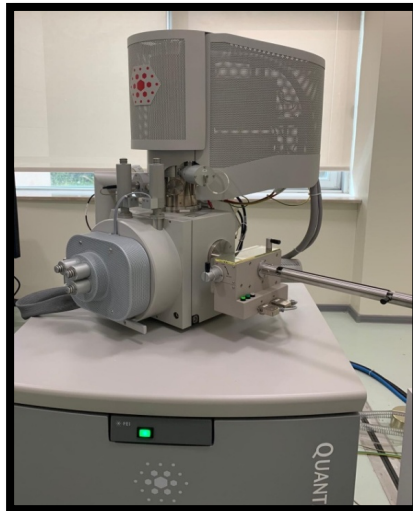
Eğilme testi sonucu elde edilen iki numune parçasına ayrı ayrı basınç testi uygulanmış, daha sonra ortalamaları alınmıştır. Basınç dayanımı testi, Fotoğraf 3.12'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.12. Basınç dayanımı testi

3.9.3. RPB'nin Mikro Yapısı

RPB harçların mikro yapısı, Quanta FEG 450 marka elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Yüksek çözünürlüklü elektron mikroskobu, üç farklı moda çalışabilir ve yüzey topografyasının yüksek çözünürlüklü olarak görüntülenmesine izin verir (1000000x'e kadar büyütme). Cihaz, Fotoğraf 3.13'te gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.13. Quanta FEG 450 (SEM testi)

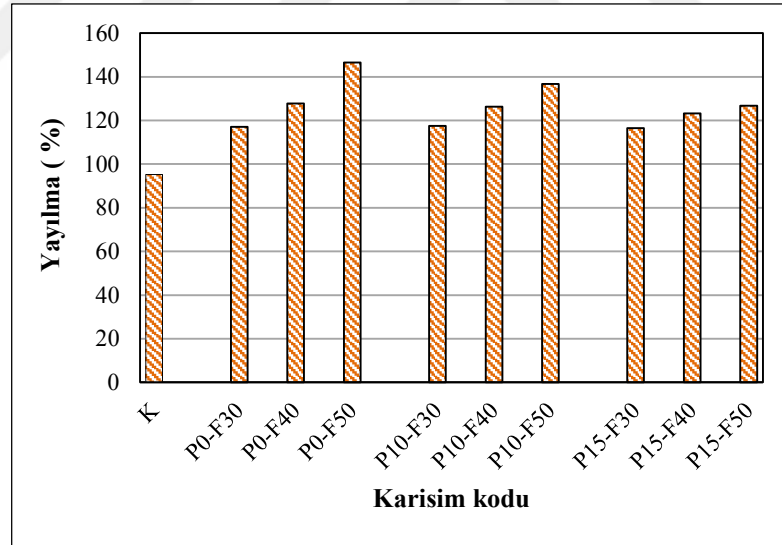
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

RPB harçlarının bileşimini oluşturan malzemelerin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkileri, ayrıca kür koşullarının da sertleşmiş numunelerin mekanik özellikleri üzerinde oluşturduğu etkiler değerlendirilerek, test sonuçları grafiksel olarak özetlenmiştir.

4.1. RPB'nin Fiziksel Özellikleri

4.1.1. Taze Harç (Yayılma) Özellikleri

RPB karışımlarındaki mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkisini belirlemek için yayılma tablası deneyi kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı 0.003 olarak sabit tutulmuştur. Yayılma testi sonuçlarını Şekil 4.1'de verilmiştir



Şekil 4.1. Yayılma tablası testi sonuçları

Şekil 4.1'de karışımlarda kullanılan uçucu kül oranında ki artışa bağlı olarak yayılma oranlarının arttığı görülmektedir, K dışındaki tüm karışımların yayılma değerleri 110 ± 5 standart değer üzerinde gerçekleşmiştir. Bu değerler, uçucu külün işlenebilirlik üzerindeki etkisi ile açıklanabilir. Uçucu kül, küresel formdaki partiküllerden oluşur, uçucu külün geometrik yapısı yüksek düzeyde işlenebilirlik verecek şekilde su

ihtiyacını azaltmaya yardımcı olmakta ve ince agregalar arasındaki sürtünmeyi de azaltmaktadır (NTPC, 2012).

Uçucu kül partiküllerinin küresel şeklinin betonun işlenebilirliği üzerinde olumlu bir etki oluşturmakta, çimento hamurundaki uçucu kül yüzdesi ne kadar büyük olursa, agregalar arasında oluşturduğu yağlanma etkisi de artmakta ve uçucu kül parçacıklarının oluşturduğu “rulman etkisi” nedeniyle beton akışı daha iyi olmaktadır (Zulu, 2017).

Pomza tozunun %0’dan %10’a ve daha sonra %15’e kadar artırılmasının, tüm karışımlarda akış düşüşüne neden olduğu fark edilebilir. Ardalan, Joshaghani ve Hooton (2017), istenen çökme değerlerine ulaşmak için, pomza tozu içeren karışımların, uçucu külden daha yüksek SA dozajına ihtiyaç duyduğunu, bu durumun, PT’nun yapısındaki gözeneklerin büyük miktarda olmasından kaynaklandığını açıklanmıştır. Pomzanın yüksek yüzey alanı artan su talebine yol açmaktadır. Bu nedenle, daha büyük yüzey alanına sahip bir bağlayıcı, belirli bir çökme akışı elde etmek için daha fazla su gerektirmektedir ve dolayısıyla, su içeriğini sabit tutmak için daha fazla SP gerekmektedir. Öte yandan, karışımlarda uçucu kül ve cüruf kullanımının, istenen yayılma değerini elde etmek için gerekli SA’yı azalttığı da bildirilmiştir.

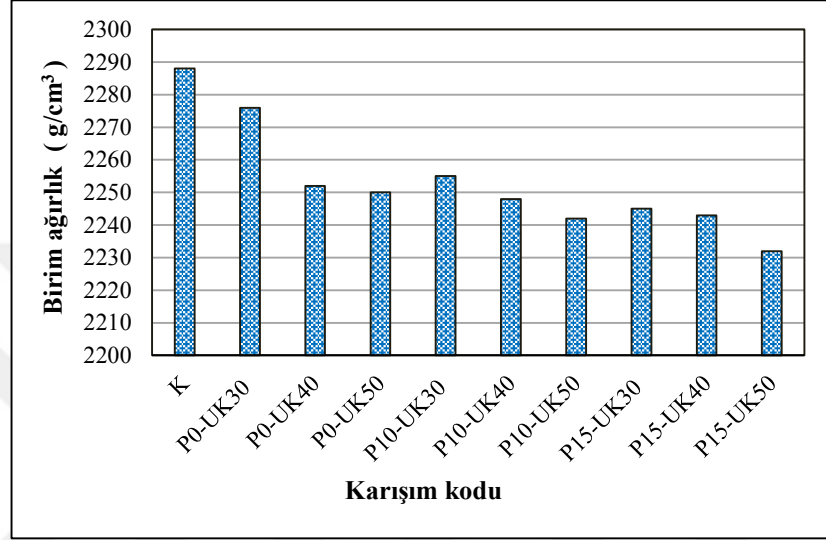
Genel olarak, tüm kalıpların titreşime gerek kalmadan dolduğu ve akma olmadığı gözlenmiştir. En yüksek yayılma oranı P0-F50’de %146,71 olarak belirlenmiştir.

4.1.2. Birim Ağırlık Sonuçları

28 Gün süreyle kür işlemi uygulanan numunelerin her serden üç adet olmak üzere birim ağırlık değerleri belirlenmiş, daha sonra ortalama birim ağırlık değerleri elde edilerek, Şekil 4.2’de değişken birim ağırlık değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Grafikten de görüleceği gibi en yüksek birim ağırlık 2288 g/cm^3 olarak K’da elde edilmiş, daha sonra birim ağırlık değerlerinin artan UK, PT oranına bağlı olarak düştüğü gözlenmiştir. P0 serisi numunelerde P0-UK30’un birim ağırlığı 2276 g/cm^3 , P10 serisi numunelerde P10-UK30’un 2255 g/cm^3 , P15 serisi numunelerde P15-

UK30'un 2245 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Bu, uçucu külün çimentonun özgül ağırlığından daha düşük özgül ağırlığa sahip olması ile açıklanabilir (Sunil vd., 2015). Ayrıca, Kabay vd. (2015)'de pomza tozu ve uçucu kül ilavesi ile betonun birim ağırlığının kontrol karışımından daha düşük değerler gösterdiğini yaptığı çalışma sonucunda ifade etmişlerdir.



Şekil 4.2. 28 Günlük birim ağırlık değerleri

4.2. Sertleştirilmiş Beton Özellikleri

Bu çalışmanın temel amacı, RPB deneme karışımlarının mekanik performansını belirlemek ve uçucu kül ve pomza tozu kullanılmadan üretilen referans numune sonuçlarıyla karşılaştırmaktır.

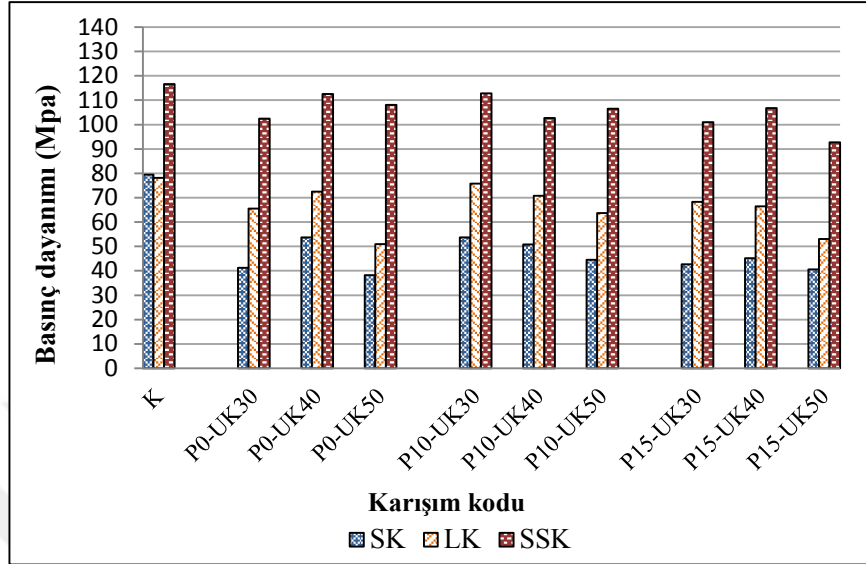
4.2.1. Basınç Dayanımı

RPB harç numunelerin 3, 7 ve 28 günlük mekanik dayanımları üzerine UK, PT, SD ve kür koşullarının etkileri test edilmiş, test sonuçları K numunesi ile karşılaştırmalı şekilde grafiksel olarak verilmiştir.

4.2.1.1. 3 Günlük basınç dayanımı sonuçları

Tüm kurlenme koşulları için 3 günlük basınç dayanımı test sonuçları, Şekil 4.3'te verilmiştir.

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, sıcak su altında kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı diğer kürlenme koşullarından (SK ve LK) daha yüksek gerçekleşmiştir.



Şekil 4.3. 3 Günlük basınç dayanımı değerleri

Üç farklı kür koşulu dikkate alındığında 3 günlük basınç dayanımları üzerinde SSK'nün etkili olduğu görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı K'da 117 MPa elde edilmiştir. P0-UK40 ve P10-UK30 kodlu numelerde kontrol betonuna çok yakın basınç dayanımı değerleri (yaklaşık 113,0 MPa) elde edilmiştir. SSK'de P0, P10 ve P15 serisi numunelerde genelde birbirine yakın basınç dayanımları gerçekleşmiştir. En düşük dayanım değerleri SK uygulanan, daha sonra da LK uygulanan numunelerde gerçekleşmiştir. Tüm kür koşulları katkı oranları dikkate alınarak değerlendirildiğinde UK, özellikle de %10 ve %15 PT katkısının basınç dayanımları üzerinde olumsuz etkisine rastlanmamıştır. En düşük basınç dayanımı P0-UK50 kodlu numunede (SK) belirlenmiştir.

Hiremath ve Yaragal (2017)' ısıllı kürün RPB'nin erken dayanım gelişimi üzerinde önemli etki gösterdiğini ve tüm termal kürlenme rejimlerinin (hızlandırılmış, sıcak hava ve sıcak su banyosu), geleneksel kürlenme (normal su/hava) rejimlerine kıyasla daha fazla dayanım gösterdiğini bildirmiş, aynı anda oluşan ısı ve basınç etkisiyle, puzolanik aktivitenin hızla artıp jel gözeneklerinin ve boşluklarının hidrate ürünler tarafından doldurulduğunu açıklamışlardır. Bu nedenle yüksek erken dayanım değerlerine, hızlandırılmış kür koşulu kullanılarak ulaşılabilir. Böylece, çimentolu

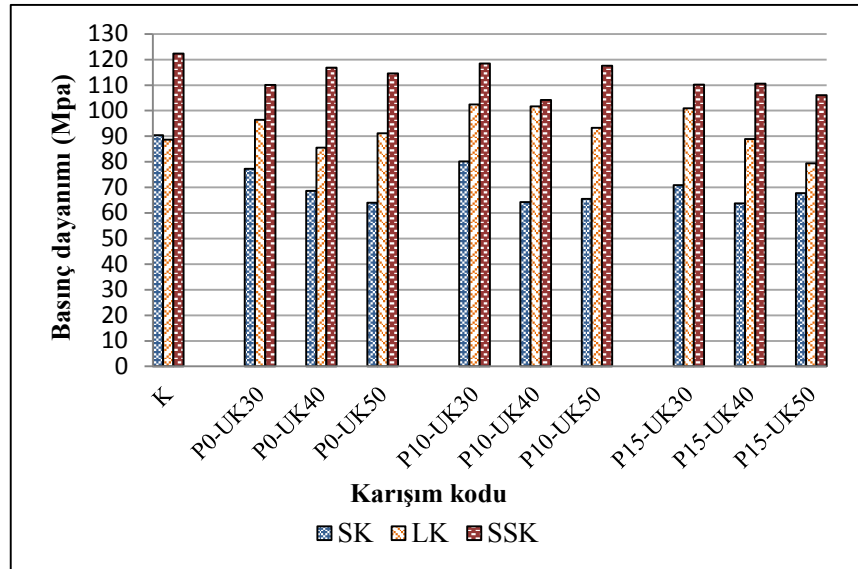
bileşiklerin yüksek oranda olması RPB’da, ısı kürleme etkisiyle gelişen hızlı hidrasyon sonucu hidrate ürün miktarları artış göstermektedir.

SK uygulamasında K numunesi dışında ki tüm karışımlarda, en düşük basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.3, 24 saat sıcak su altında basınç dayanımının artışının, en kötü durumda, normal su kürlemesi altında elde edilen basınç dayanımının %202’si olduğunu göstermektedir, ve bu, laboratuvar odası kürlemesi altında elde edilen basınç dayanımının %145’idir. Genel olarak hiçbir deneme karışımı 3 günde ve tüm kürleme rejimleri için, kontrol karışımının basınç dayanımına ulaşmamıştır.

Elde edilen sonuçlar, 28 güne kadar betonun erken dönemlerinde dayanımın azalmasına neden olan uçucu kül kullanımından kaynaklanabilir (Zulu, 2017).

4.2.1.2. 7 Günlük basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.4’de verilen 7 günlük basınç dayanımı değerleri, farklı kür koşulları dikkate alınarak incelendiğinde, SSK’nın tüm numunelerin basınç dayanımları üzerinde etkili olduğu ve basınç dayanımlarını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Bu, hidrasyon sürecini iyileştirmeye yol açan kürleme sıcaklığındaki fark ile açıklanabilir.



Şekil 4.4. 7 Günlük basınç dayanımı değerleri

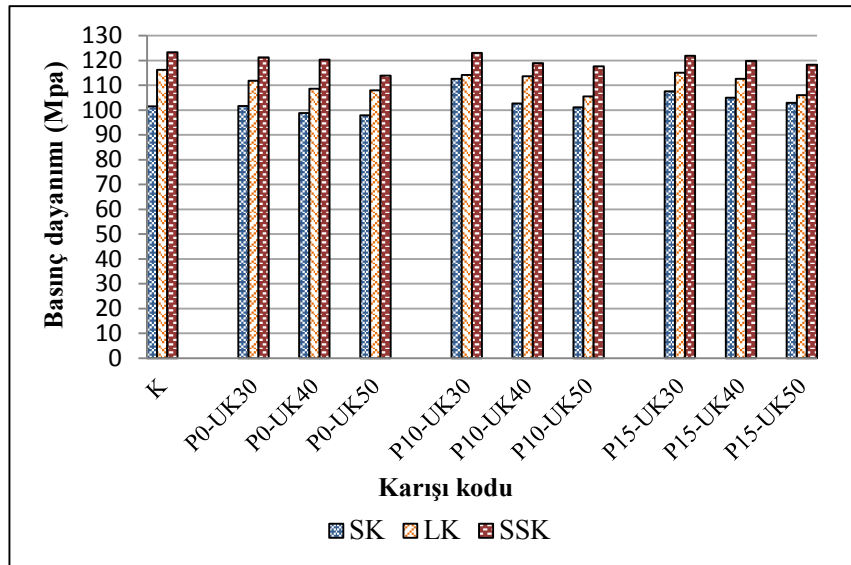
Ayrıca SSK ve LK arasında daha yakın değerlerin gerçekleştiği, P10-UK30, P10-UK40, P15-UK30 serisi numunelerde LK ve SSK değerlerinin çok yakın değerler

aldığı gözlenmektedir. Yine, SK ve LK arasında da basınç dayanımı farklılıklarının azaldığı görülmektedir. LK uygulamasında P10 ve P15 serisi numunelerde %30 ve %40 UK katkılı numunelerde P0 serisi numunelerden daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu etkinin hem PT'nun puzolanik etkisinden hemde PT'nun numunelerde oluşturduğu içsel kürlenme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 7 günlük basınç dayanımlarında en yüksek basınç dayanımı, 118,5 MPa ile sıcak su kürlenmesi altındaki karışım P10-U30'a aittir, en düşük sonuç, 64,31 MPa ile normal su kürlenmesi altındaki P10-UK40'da gerçekleşmiştir.

SSK'nün 7 günlük basınç dayanımı üzerinde sonraki dönemlere oranla daha fazla etkisi olduğunu ifade eden, Abed, Nasr ve Hasan (2018) tarafından yapılan araştırma sonuçlarıyla da örtüşmekte olup, hidrasyon ve puzolanik reaksiyonları hızlandıran sıcaklık artışının ve dolayısıyla hidrasyon ürünleri oluşumunun sonucu olarak açıklanmıştır.

4.2.1.3. 28 Günlük basınç dayanımı sonuçları

Tüm kürlenme rejimleri ve tüm deneme karışımları için 28 günlük basınç dayanımının sonuçları, Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



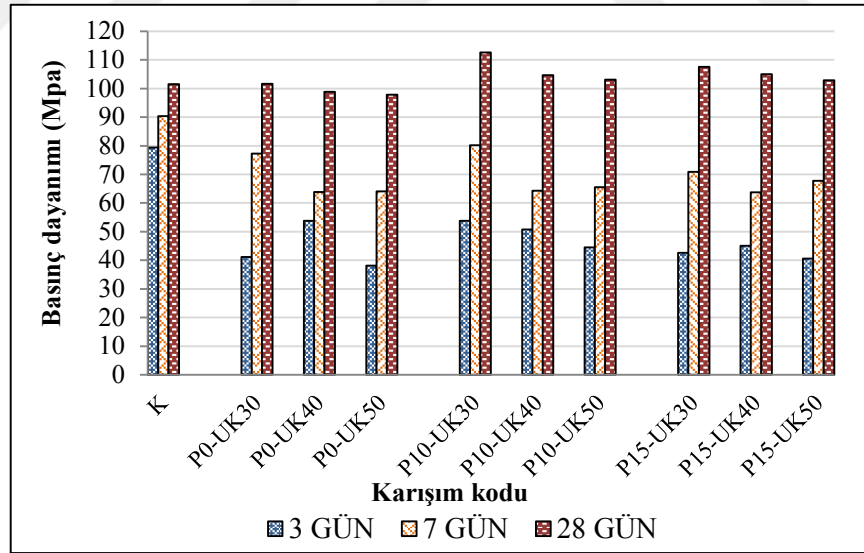
Şekil 4.5. 28 Günlük basınç dayanımı değerleri

Tüm kür koşulları dikkate alınarak Şekil 4.5 irdelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı SSK uygulanan numunelerde gerçekleşmiş, ancak LK ve SK uygulanan

numunelerde seri ölçeğinde basınç dayanımı farklılıklarının son derece düşük değerler aldığı görülmüştür. Benzer şekilde LK ile SSK arasında da çok belirgin olmayan basınç farklılıklarının olduğu belirlenmiştir. K betonu ile diğer serilerde elde edilen basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında, genel olarak P0, P10 ve P15 serisindeki tüm numunelerin basınç dayanımlarının SSK için, K serisi ile hemen hemen aynı basınç dayanımlarını sergilediği görülmüştür. Gerek UK, gerekse PT'nun ısı kütleme sonucu oluşturduğu hidrate ve puzolanik reaksiyon ürünleri basınç dayanımı artışında etkili olmuştur. 28. günün sonunda SK, LK ve SSK koşullarında kontrol betonuna eşdeğer basınç dayanımları eşdeğer basınç dayanımları elde edilmiştir. %30, %40, %50 UK, %10, %15 PT katkısı dikkate alındığında sonuçlar, puzolanik katkıların basınç dayanımları üzerindeki çarpıcı etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

4.2.1.4. Su kürünün basınç dayanımı üzerine etkisi

Su kürü uygulanan RPB harç numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları grafik olarak Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Su kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerleri

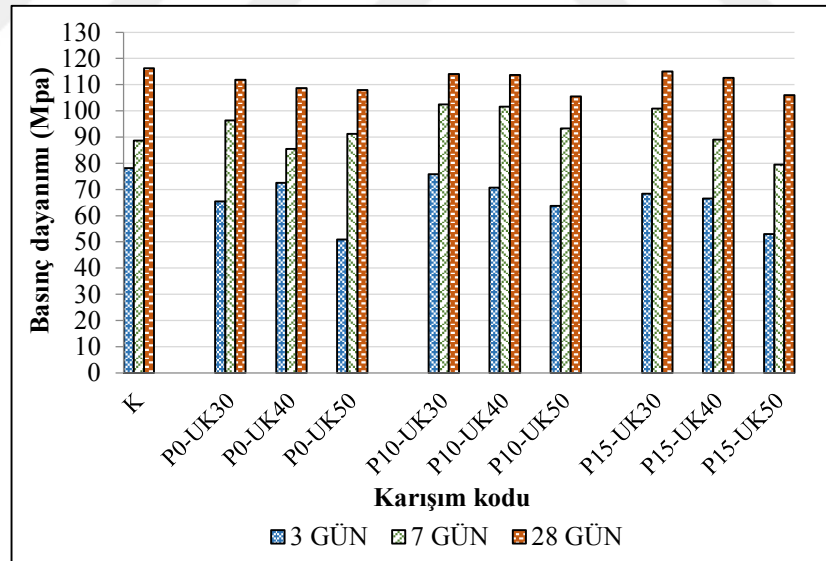
Kontrol betonu esas alındığında 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir, tüm serilerde 28 günlük basınç dayanımlarının arttığı, P10 ve P15 serilerindeki numunelerin basınç dayanımlarının kontrol betonunun üzerine çıktığı, P10-UK30 serisinde 113 MPa değerinde maksimum basınç dayanımı değerinin

oluştugu, P0 serisi numunelerin basınç dayanımı değerlerinin de kontrol betonu ile eşdeğer özellikler gösterdiği görülmüştür.

Kabay vd. (2015), 7 günlük pomza tozu ve uçucu kül katkıli karışımların dayanımının, referans karışımı ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğunun fark edilebileceğini belirtmiştir. Genellikle 28 günden sonraki dönemlerde, normal standart su altında kürlenmiş çimento sistemlerindeki uçucu külün puzolanik reaksiyonları baskın olmaktadır (Gonen ve Yazicioglu, 2007). Wang, Zhang ve Sun (2004)'a göre de uçucu külün aktivitesi 365 günden sonrada devam etmektedir.

4.2.1.5. Laboratuvar kürünün basınç dayanımı üzerine etkisi

LK uygulanan UK ve PT katkıli harç numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu kür koşulu 30 °C sıcaklık ve %50'nin üzerinde bağıl nem koşullarının RPB'larının özelliklerine etkilerini ortaya koymak için uygulanmıştır.



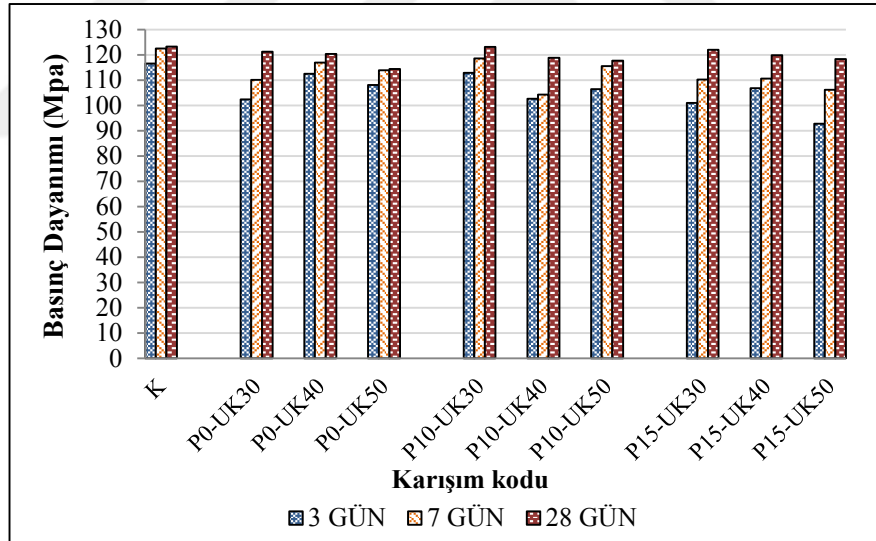
Şekil 4.7. (LK) kürlenme altında farklı karışımların basınç dayanımı

P0, P10 serisi numunelerin 3 günlük basınç dayanımlarının genellikle kontrol betonuna yakın değerler aldığı görülmektedir. P0, P10 ve P15 serisi numunelerde %50 UK katkıli numunelerin 3 günlük basınç dayanımlarının diğerlerinden daha düşük gerçekleştiği görülmektedir. Bunun artan UK oranına bağlı olarak, puzolanik aktivitenin yeterli düzeyde gelişmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 3 ve 7

günlük basınç dayanımları arasında daha belirgin farklılıkların olduğu, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine yaklaştığı, özellikle P10 serisinde ise kısmen eşdeğer olduğu belirlenmiştir. P10 ve P15 serisi numunelerin %30 ve %40 UK katkılı numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol betonuna eşdeğer mekanik dayanım gösterdiği görülmektedir. 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında belirgin farklılıkların oluşmamasında ortam sıcaklığına bağlı olarak artan reaksiyon hızı ve PT'nun oluşturduğu içsel kürlenme etkisinin etkili olduğu düşünülmektedir.

4.2.1.6. Sıcak su kürünün basınç dayanımı üzerine etkisi

Bu kür yönteminde kombine kür koşulları kullanılmıştır, numuneler 24 saat 60°C'nin altında sıcak suda tutulmuş ve daha sonra test tarihine kadar 31°C ve %70 nem ile özel ortam bir kürlenme odasına aktarılmıştır. Bu kür koşulu altında basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. (SSK) kürlenmesi altında farklı karışımlar için basınç dayanımı

LK uygulanan numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının hemen hemen tüm serilerde birbirine çok yakın değerler göstermiştir. P0 serisinde %40, P10 serisinde %30, P15 serisinde %40 UK katkılı numunelerin 3 günlük basınç dayanımları maksimum değerler olarak, kontrol betonuna çok yaklaşmıştır. 7 günlük basınç dayanımları P0, P10 ve P15 serilerinde genellikle eşdeğer dayanımlar göstermiş, bu durum 28 günlük değerlerde de benzer şekilde gerçekleşmiştir. %30, %40 ve %50 oranında UK, % 10, %15 oranında PT katkılı kompozitlerde 120 MPa ve

üzeri basınç dayanım değerlerinin gerçekleşmiş olması, ayrıca elde edilen basınç dayanımlarının kontrol harcı ile eşdeğer olması araştırma açısından son derece önemlidir. Test sonuçları ile sağlanan basınç dayanımları Narmluk ve Nawa, (2011)'nin araştırma sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

Maltais ve Marchve (1997), uçucu kül türüne bağlı olarak 20°C'de kür uygulanan uçucu kül harçlarının basınç dayanımının, referans karışımın basınç dayanımına ulaşabilmesi için 25 ila 50 günlük kür süresine ihtiyaç duyulduğunu, 40 °C kür de bu sürenin 5 ila 10 gün arasında değiştiğini ifade etmiştir.

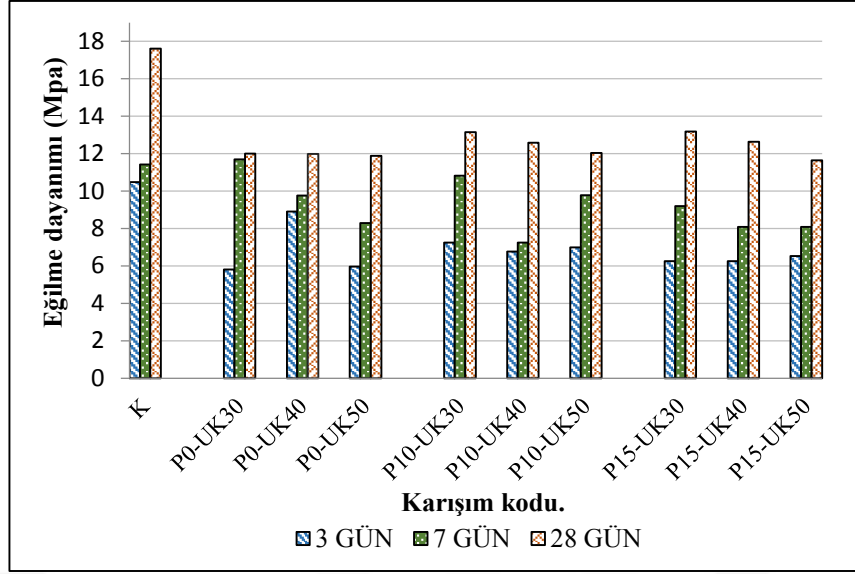
Hiremath ve Yaragal (2017), kür rejiminde sıcaklığın, dayanımı artırmada hayati bir role sahip olduğunu, sıcaklığın hidrasyon ürünlerinin oluşumuna arttırarak dayanımı arttırdığını belirtmiştir.

4.2.2.Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Farklı kür koşulları ve bileşenlerinin RPB harç numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları üzerindeki etkileri grafiksel olarak, Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de sunulmuştur. Test sonucu elde edilen eğilme dayanımı sonuçları, RPB'nun tipik eğilme dayanımlarından daha düşük gerçekleşmiştir. Bunun nedeni, yüksek basınç ve/veya yüksek ısı işlem altında sıkıştırma gibi özel tekniklerin kullanılmaması ve karışım içerisinde lif kullanılmamasıdır, test sonuçları Ženíšek, Vlach ve Laiblová (2016)'nin araştırma sonuçları ile eşleşmektedir.

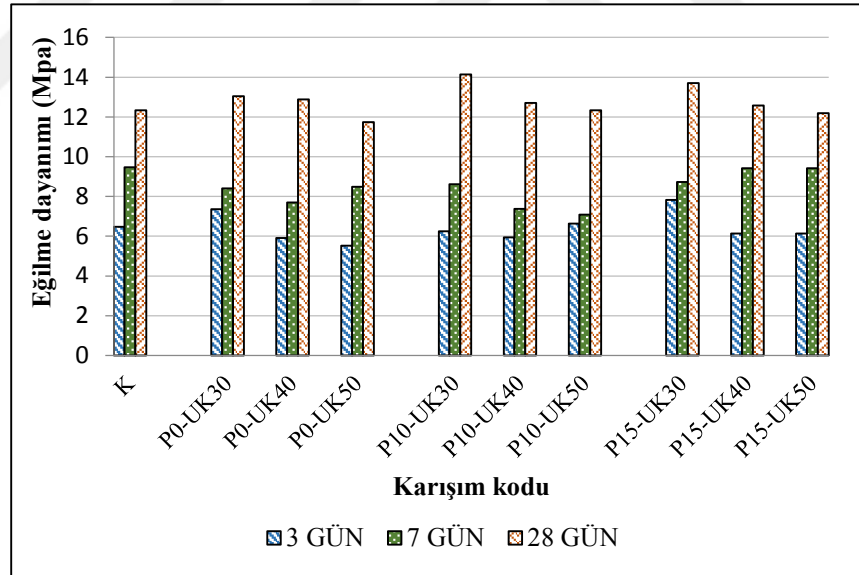
SK uygulanan numunelerin 3 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.9'da gösterilmiştir. 3 günlük eğilme dayanımları kontrol harcına göre düşme eğilimi göstermiştir. UK ve PT oranlarındaki değişim P serisi numunelerin eğilme dayanımları üzerinde önemli bir etki oluşturmamıştır.

P0 ve P10 seri numunelerde genel olarak 7 günlük eğilme dayanımları K serisine eşdeğer gerçekleşmiştir. %15 PT katkılı numunelerin eğilme dayanımlarının düştüğü gözlenmiştir. 28 günlük numunelerde en yüksek eğilme dayanımı K'da gerçekleşmiş, P serisi numunelerde yaklaşık olarak eşdeğer eğilme dayanımları elde edilmiştir. PT oranındaki artış %30 ve %40 UK katkılı harçların eğilme dayanımlarında sınırlı bir artış oluşturmuştur.



Şekil 4.9. Normal su kürlemesi (SK) altında eğilme dayanımı

LK koşullarında kürlenmiş numunelerin 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.10'da verilmiştir.

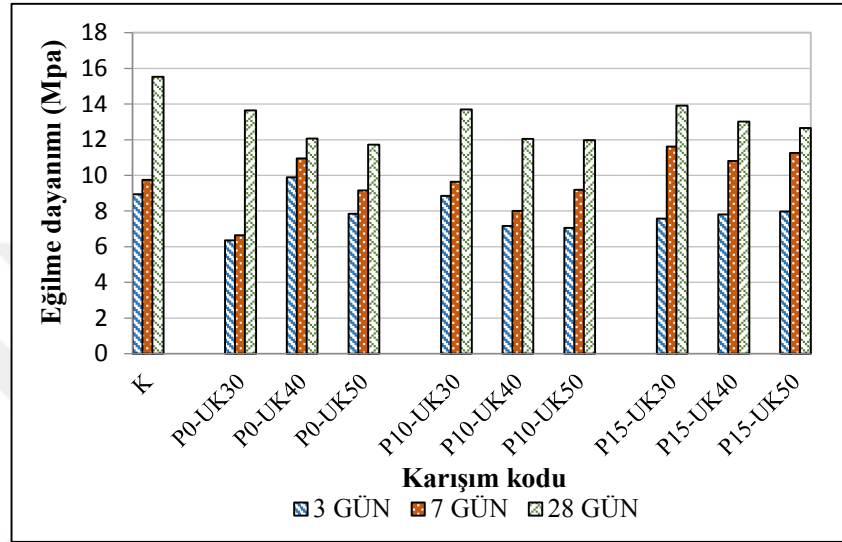


Şekil 4.10. Laboratuvar odası kürlenmesi (LK) altında eğilme dayanımı

K ve P serisi numunelerin 3 günlük eğilme dayanımları önemli oranda eşdeğer ölçüde gerçekleşmiştir. P15 serisi numunelerin 7 günlük eğilme dayanımları K ile aynı değerleri almıştır. UK ve PT oranındaki artış eğilme dayanımlarını çok fazla etkilememiştir. 28 günlük eğilme dayanımlarında da benzer sonuçlar elde edilmiş, ancak %30 ve %40 UK katkılı numunelerin eğilme dayanımları P0, P10 ve P15 serisi

numunelerde, K'dan 1-2 MPa yüksek çıkmıştır. En yüksek eğilme dayanımı yaklaşık 14,0 MPa olarak, P10-UK30 ve P15-UK30 numunelerde elde edilmiştir.

Sıcak su koşullarında kürlenmiş numuneler için eğilme dayanımı sonuçları, Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

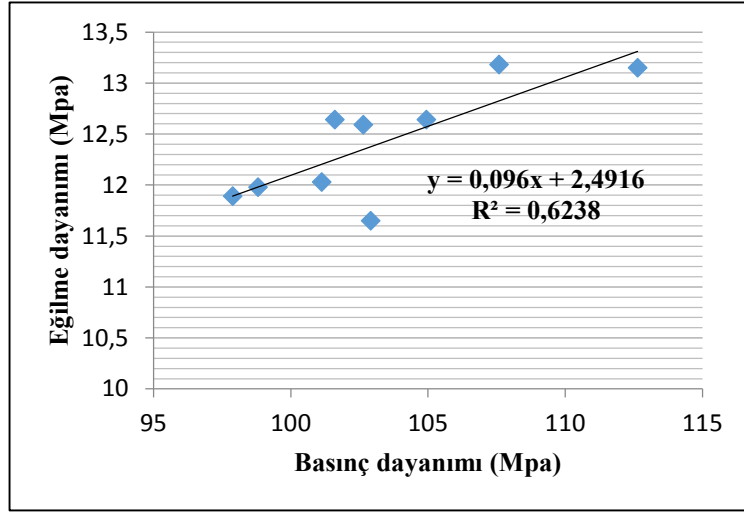


Şekil 4.11. Sıcak su kürlenme (SSK) altında eğilme dayanımı

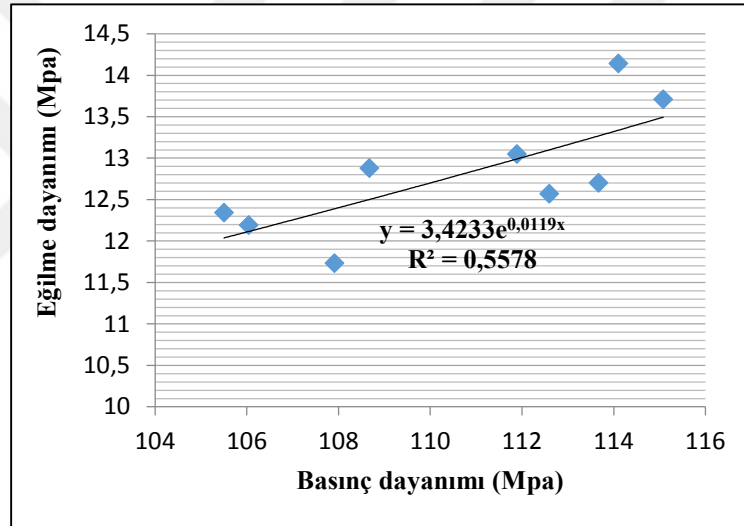
Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, basınç dayanımı değerlerinin aksine 3 ve 7 günlük, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları arasında farklılıkların olduğu gözlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı 3 günlük numunelerde P0-UK40 kodlu numunede 9,9 MPa olarak, 7 günlük numunelerde P15-UK30 kodlu numunede 11,96 MPa, 28 günlük numunelerde 15,53 MPa olarak kontrol harcında elde edilmiştir. P15 serisi numunelerin eğilme dayanımlarının, 7 günlük numunelerde, K dâhil olmak üzere diğer P serilerinden daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. UK ve PT oranlarındaki artışın eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir. UK ve PT oranlarının artması 28 günlük eğilme dayanımlarını olumsuz etkilememiştir.

4.2.3. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki

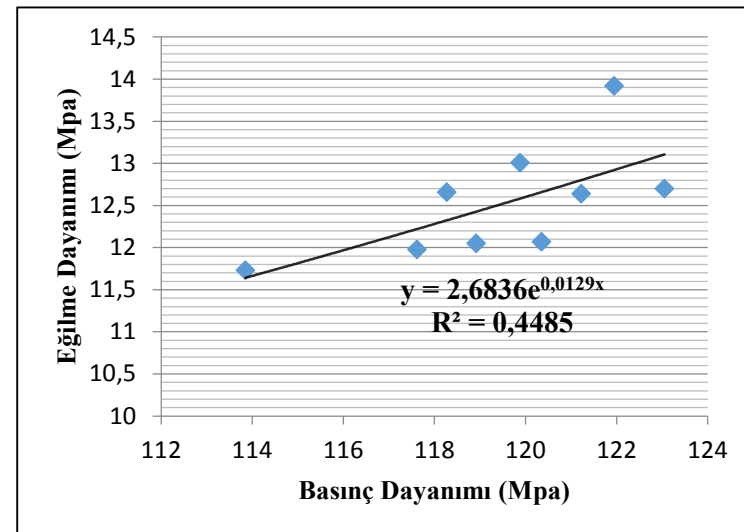
Basınç dayanımları ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki su kürü (SK) labortuvar kürü (LK) ve sıcak su sürü (SSK) için Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.12 Basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki (SK)



Şekil 4.13 Basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki (LK)



Şekil 4.14 Basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki (SSK)

Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde kür şartlarına bağlı olarak üç ilişki arasında; eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasında istatistiksel açıdan en kuvvetli ilişkinin su kürü uygulanan numunelerde olduğu, en zayıf ilişkinin ise sıcak su küründe gerçekleştiği belirlenmiştir. Ancak bu durum kür şartlarına bağlı olarak eğilme dayanımlarında meydana gelen değişim oranının, basınç dayanımlarındaki değişim oranına göre daha az kaynaklı olması ile açıklanabilir. SSK uygulanan numunelerde en düşük dayanımın 114 MPa, en yüksek dayanımın ise yaklaşık 123 MPa arasında değişimi gerçekleşmişken, S kürü uygulanan numunelerde yaklaşık 97 MPa ile 114 MPa arasında gerçekleşmiş olması eğilme dayanımlarının ise bu değişimlere kıyasla her kür şartında yaklaşık 11,5 MPa ile 14 MPa arasındaki değişimi bu durumu açıklamaktadır. LK'nün bahsedilen iki kür arasında bir ilişkiye sahip olması ise basınç dayanımlarının yaklaşık 105 ile 115 MPa dayanımları arasındaki değişiminden kaynaklıdır. Bu değişimlerdeki en önemli değişimin eğilme dayanımları olduğu görülmüştür ve istatistiksel açıdan incelendiğinde dayanımlar arası %5 önem seviyesine kıyasla önemli bir ilişkinin bulunmayışı ve regreasyonel ilişkilerin az olması numunelerde özellikle eğilme dayanımlarının gelişimini sağlayacak lif katkısının bu çalışmada bulunmaması önemli bir parametre olduğu düşünülmektedir.

4.3. RPB mikro yapısı

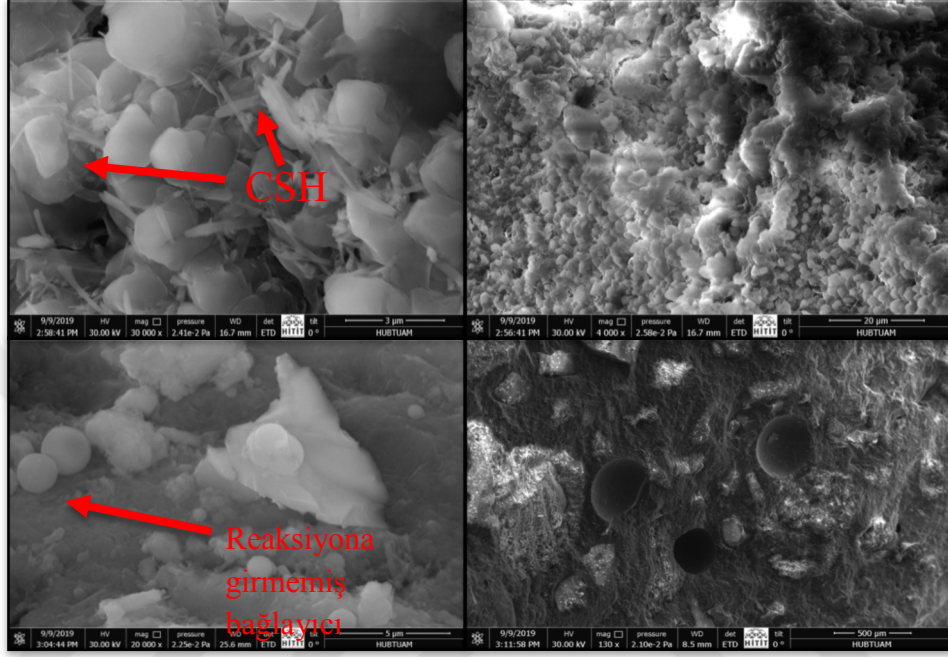
28 Gün içindeki basınç dayanımı sonuçlarına bağlı olarak, mikro yapısı araştırılacak farklı karışımlar ve tüm kürlenme koşulları altında SEM testi uygulanacak olan seçilmiş örnekler, Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Mikro yapı testi için seçilmiş örnekler

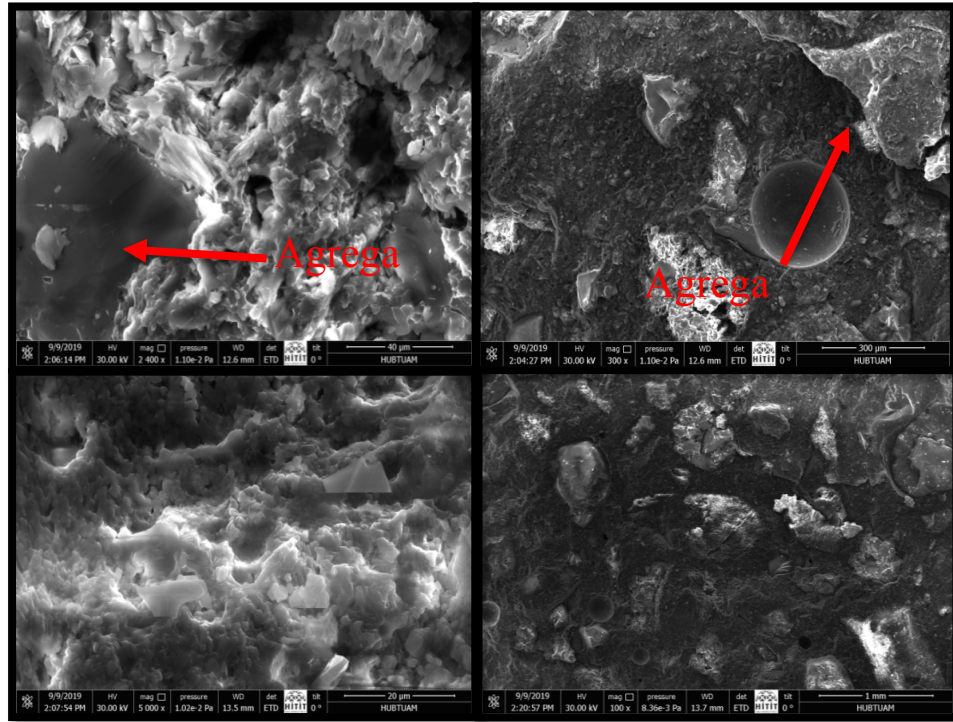
28 gün içindeki basınç dayanımı (MPa)			
Kür durumu	SK	LK	SSK
Karışım kodu			
K	101,49	116,24	122,26
P0-UK50	97,17		
P10-UK30			123,05
P10-UK40		113,67	
P10-UK50			
P15-UK30	107,58		
P15-UK40		112,59	

4.3.1. Kontrol karışımlarının mikro yapısı

Tüm kürlenme koşulları (SK, LK ve SSK) için referans karışımının mikro yapısı, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de SEM görüntüleri olarak sunulmaktadır.



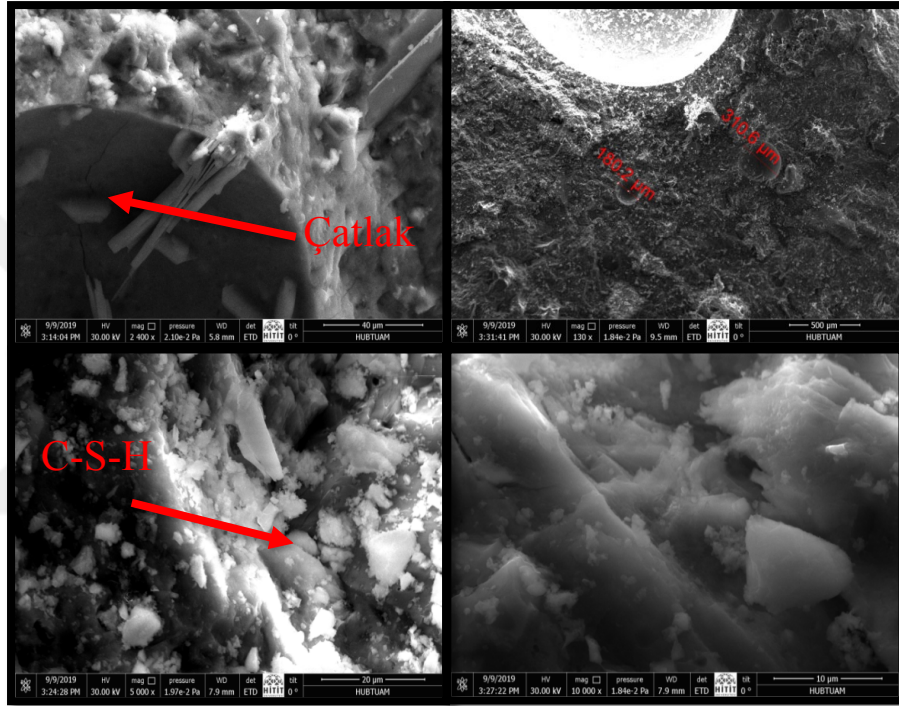
Şekil 4.15. Normal su kürlenme kontrol karışımının SEM görüntüleri



Şekil 4.16. Laboratuvar odası kürlenmesinde kontrol karışımının SEM görüntüleri

Şekil 4.15 incelendiğinde, CSH jellerinin oluşmaya başladığı (sol üst görüntü) görülmektedir. Ayrıca kür süresine bağlı olarak reaksiyona girmemiş katı parçaların da bulunduğu gözlenebilmektedir.

Şekil 4.16 incelendiğinde, Kuru ortamda kürlenmiş kontrol örneklerde C-S-H jellerine rastlanamamış olup bunun sebebinin kuru ortamdaki kürün reaksiyon hızının su küründekinden daha yavaş olmasından kaynaklanabilir.



Şekil 4.17. Sıcak su kürlenmesinde kontrol karışımının SEM görüntüleri

Şekil 4.17 incelendiğinde mikro çatlakların varlığı göze çarpmaktadır. Ayrıca sol alttaki görüntüde C-S-H oluşumları da gözlenebilmektedir.

4.3.2. Mineral katkı maddeli karışımların mikro yapısı

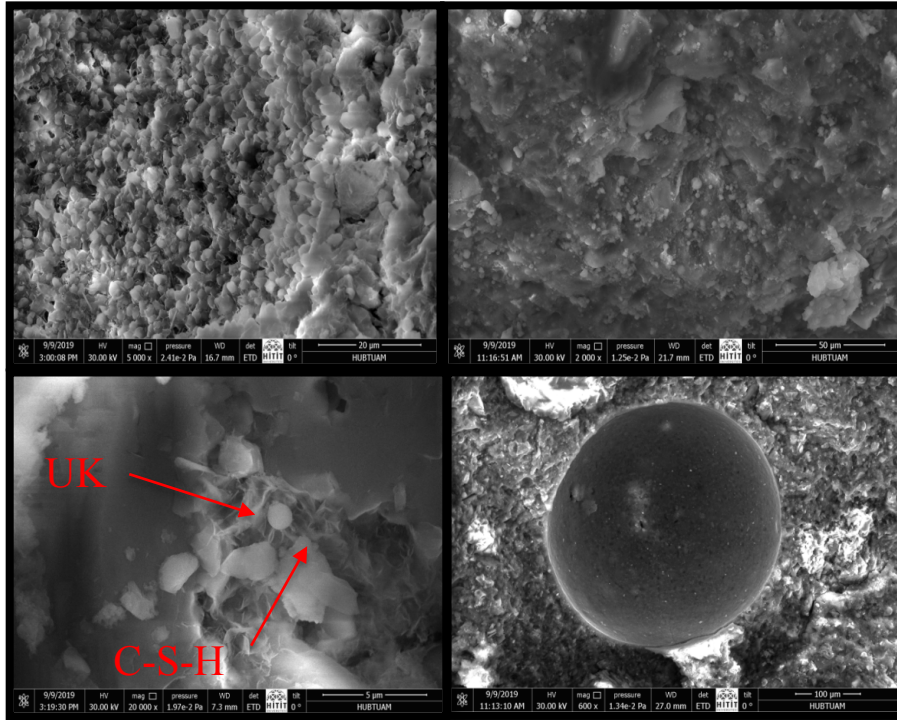
- **P0-UK50**

SEM testi için seçilen örnek. Şekil 4.18, bu karışımın mikro yapısını SEM görüntüleri ile göstermektedir.



Şekil 4.18. Normal su kürlemesinde kürlenen P0-UK50 karışımının SEM görüntüleri

Şekil 4.18 de kür süresine bağlı olarak reaksiyona girmemiş katı parçaların (UK) bulunduğu gözlenebilmektedir.



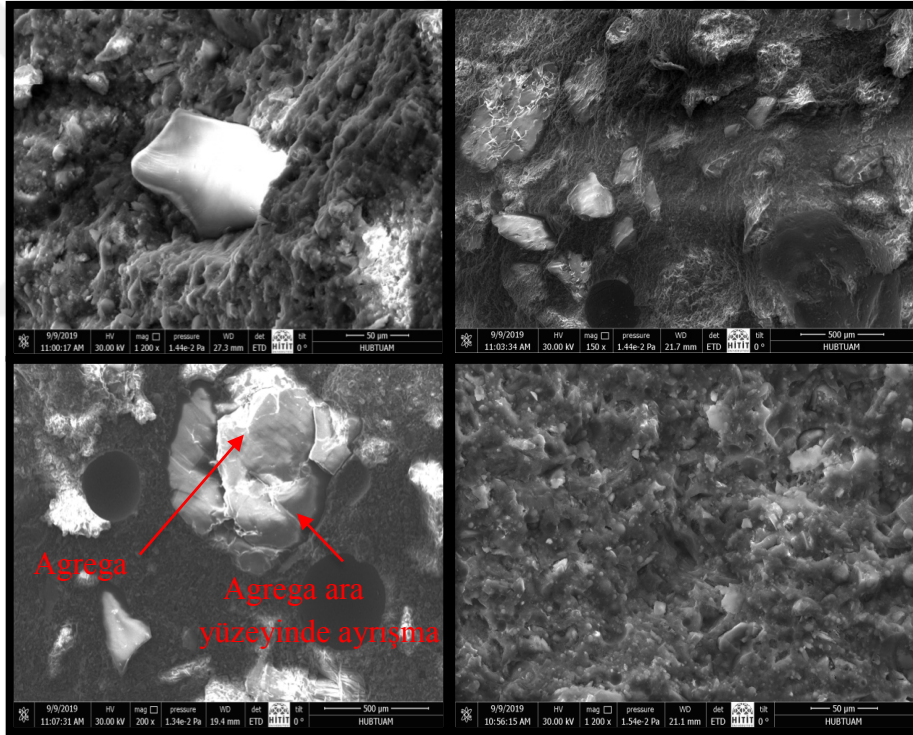
Şekil 4.19. Sıcak su kürlemesinde kürlenen P10-UK30 karışımının SEM görüntüleri

- **P10-UK30**

Bu deneme karışımı, kumla değiştirilmek üzere %10 pomza tozu ve çimento yerine %30 uçucu kül içermektedir. Şekil 4.19, bu karışımın mikro yapısını SEM görüntüleri ile göstermektedir.

- **P10-UK40**

Bu deneme karışımı, kumla değiştirilmek üzere %10 pomza tozu ve çimento yerine %40 uçucu kül içerir. Şekil 4.20, bu karışımın mikro yapısını SEM görüntüleri ile göstermektedir.

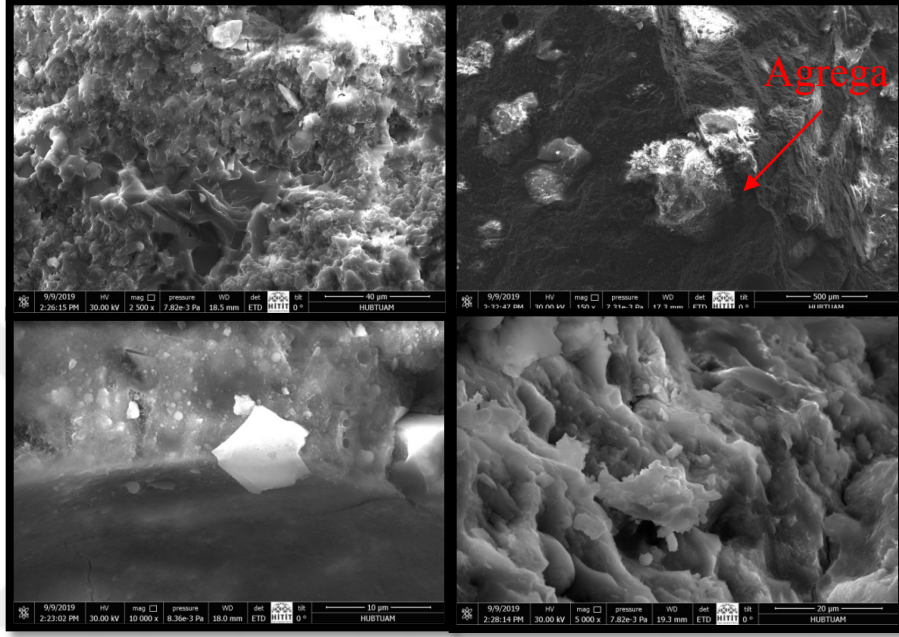


Şekil 4.20. Laboratuvar odası kürlenmesinde kürlenmiş P10-UK40'nin SEM görüntüleri

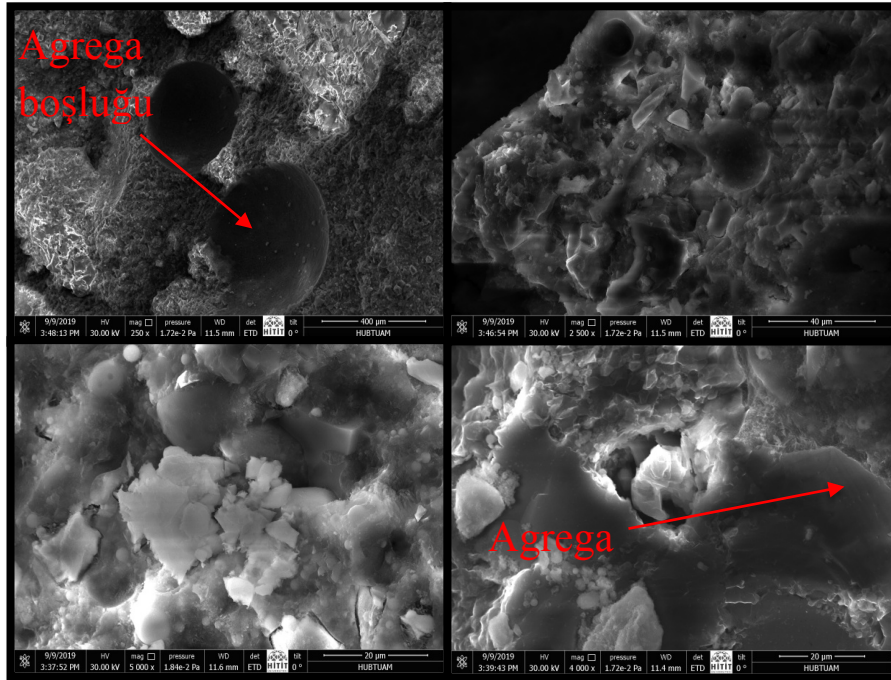
CSH jellerinin oluşmaya başladığı (sağ üst görüntü) görülmektedir. Ayrıca kür süresine bağlı olarak reaksiyona girmemiş katı parçaların da (UK) bulunduğu gözlemlenebilmektedir.

- **P15-UK30**

Bu deneme karışımı, kumla değiştirilmek üzere %15 pomza tozu ve çimento yerine %30 uçucu kül içermektedir. Şekil 4.21, bu karışımın mikro yapısını SEM görüntüleri ile göstermektedir.



Şekil 4.21. Normal su kürlemesinde kürlenmiş P15-UK30'un SEM görüntüleri



Şekil 4.22. Laboratuvar odası kürlemesinde kürlenmiş P0-UK40'un SEM görüntüleri

- *P15-UK40*

Şekil 4.22 de sol üstte bulunan görüntüde SEM görüntüleri için hazırlanan numunelerin agrega kopması sonucu oluşan düzgün şekilli boşlukları görülmektedir.



5. SONUÇLAR ve Öneriler

5.1. SONUÇLAR

SK, LK ve SSK olmak üzere üç farklı kür ortamında olgunlaştırılan, farklı oranlarda UK, SD ve PT katkılı RPB harç numuneler üzerinde yapılan test sonuçları değerlendirilerek özet olarak aşağıda sunulmuştur.

- Kontrol numunesi dışındaki tüm karışımların yayılma değerleri 110 ± 5 standart değer üzerinde gerçekleşmiştir.
- UK oranındaki artışa bağlı olarak, yayılma değerlerinin arttığı belirlenmiştir.
- PT oranındaki artış, yayılma değerlerini olumsuz etkilemiştir.
- UK ve PT katkı oranlarındaki artış, numunelerin birim ağırlıklarının düşmesinde etkili olmuştur.
- SSK'nun 3 günlük numunelerin basınç dayanımları üzerinde oldukça etkili olduğu, SSK uygulamasında numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının yakın değerler aldığı görülmüştür. SSK, UK ve PT'nun puzolanik aktivitenin yavaş gelişimi nedeniyle, erken yaş dayanımları üzerindeki olumsuz etkisini azaltmada etkili olmuştur.
- Tüm kür koşulları dikkate alındığında, UK ikame oranları ve PT oranlarındaki artışın, 28 günlük basınç dayanımları üzerinde önemli sayılabilecek basınç kayıpları oluşturmadığı gözlenmiş, SSK uygulamasında, UK ve PT katkılı numunelerin basınç dayanımlarında, kontrol harcının basınç dayanımına eşdeğer sonuçlar elde edilmiştir.
- SSK uygulaması eğilme dayanımları üzerinde basınç dayanımları kadar etkili olmamıştır.
- UK ve PT'ü eğilme dayanımları üzerinde önemli sayılabilecek olumsuz bir etki oluşturmamıştır.
- Etkin bir kür uygulaması ile %30-50 aralığında UK, %10-15 aralığında PT'nun çimentolu kompozitlerin üretiminde kullanılabileceği görülmüştür.
- Sıcak iklim koşullarında PT'nun çimentolu kompozitlerde içsel kürlenme etkisi oluşturmak amacıyla kullanılabilmesi mümkün görünmektedir.

İleri ki dönemlerde yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir;

- Çimento bileşenleri, oranları ve inceliğinin, RPB'nun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır.
- UK ve PT katkılı harçlar üzerine lif kullanımının etkisi araştırılmalıdır.
- UK ve PT katkılı RPB harçların dürabilitesinin ayrıca araştırılması gerekmektedir.
- UK ve PT katkılı RPB harçların rötre üzerine etkisi araştırılmalıdır.

5.2. Gelecekteki Araştırmalar İçin Öneriler

Daha fazla araştırma için birkaç öneri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çimento tipinin, RPB'nin mekanik özelliği üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır.
- Pomza tozu ve uçucu kül varlığında lif kullanımının etkisi araştırılmalıdır.
- Aynı malzemelerle (pomza tozu ve uçucu kül), RPB'nin dürabilitesinin (yüksek sıcaklık altındaki performans, geçirgenlik, dayanım geliştirme mekanizması, kimyasal direnç ve yangına dayanıklılık) çalışılması gereklidir.
- RPB'nin kısa süreli mekanik özellikleri (rötre kurutması, sürünme, basınç altında baskı–gerilme davranışı, gerilimde baskı–zorlanma davranışı ve statik ve dinamik modülü) araştırılmalıdır.
- RPB için diğer kürlenme yöntemleri çalışılabilir.
- Başka bir puzolanlı malzeme pomza tozu ve uçucu kül ile birleştirilebilir. Ve bunların RPB performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Pomza tozu ve uçucu küle ek olarak, silis dumanı oranının RPB'nin mekanik özelliği üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdul-Hussain, S. T. (2013). Effect of Elevated Temperatures on Compressive and Tensile Strengths of Reactive Powder Concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 17(4), 259-278.
- Abed, M., Nasr, M. & Hasan, Z. (2018) 'Effect of silica fume/binder ratio on compressive strength development of reactive powder concrete under two curing systems', *MATEC Web of Conferences*, 162(May), pp. 8–12. doi: 10.1051/mateconf/201816202022.
- ACI. (1998) 'Standard Specification for Curing Concrete. American Concrete Institute.'
- 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.
- Aitcin, P. C. Richard, P., & Lachemi, M. (1998). The sherbrooke reactive powder concrete footbridge. *Structural Engineering International*. France, 155-160.
- Aitcin, Y. D. & R. B. (2000) 'A 100-m High Prefabricated Concrete Pole : Why not?', pp. 365–374.
- ASTM C618 (2012), (American Society for Testing and Materials): 'ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined 2012., pozzolan for used in concrete';
- ASTM311 (2011), (American Society for Testing and Materials) 'ASTM 311. Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland-cement concrete; 2011'.
- Aydin, S., Yazici, H., Yardimci, M. Y., & Yiğiter, H. (2010). Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete. *ACI Materials Journal*, 107(5). Aydin, S. and Baradan, B. (2013) 'Engineering properties of reactive powder concrete without portland cement', *ACI Materials Journal*, 110(6), pp. 619–627.
- Bakış, A., Işık, E., El, A. A., & Ülker, M. (2017). A Study on the Mixture Ratio of Pumice Powder Concrete on the Concrete Pavement and the Construction of Building [J]. *IOSR J. Mec. Civ. Eng*, 14(3), 83-90.
- Ardalan, R. B., Joshaghani, A., & Hooton, R. D. (2017). Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, 134, 116-122.
- Bamforth, P., Chisholm, D., Gibbs, J., & Harrison, T. (2008). Properties of concrete for use in Eurocode 2.

- Bentz, D. P., Hansen, A. S., & Guynn, J. M. (2011). Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 824-831.
- Blais, P. Y., & Couture, M. (1999). PRECAST, PRESTRESSED PEDESTRIAN BRIDGE-WORLD'S FIRST REACTIVE POWDER CONCRETE BRIDGE. *PCI journal*, 44(5). Cătălina Mihaela Grădinaru (2017) 'The Environmental Impact of Concrete Production and the Necessity of its Greening', (June).
- Connan, H., Klimesch, D., Ray, A., & Thomas, P. (2006). Thermal characterisation of autoclaved cement made with alumina-silica rich industrial waste. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 84(2), 521-525.
- Cwirzen, A. (2007). The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete. *Advances in Cement Research*, 19(1), 25-34.
- 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), 1217-1226.
- Cyr, M. F., & Shah, S. P. (2002). Advances in concrete technology. In *Advances in Building Technology* (pp. 17-27). Elsevier.
- Dauriac, C. (1997). Special concrete may give steel stiff competition. *The seattle daily journal of commerce*, 1997, 15-17.
- Dugat, J., Roux, N., & Bernier, G. (1996). Mechanical properties of reactive powder concretes. *Materials and structures*, 29(4), 233-240.
- El-Louh, O. M. (2014). Fresh and hardened properties of locally produced reactive powder concrete.
- Flaga, K. (2000). Advances in materials applied in civil engineering. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 173-183.
- F. Alan. (2004) 'Pumice and Pumicite',
- Gent, U. (2012) 'MASTER OF SCIENCE IN Effects of Early Age Thermal Curing on the Strength Properties of Ultra High Performance Concrete'.
- Ghazali, N., Muthusamy, K., & Ahmad, S. W. (2019, August). Utilization of Fly Ash in Construction. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 601, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- Gonen, T., & Yazicioglu, S. (2007). The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Building and Environment*, 42(8), 3080-3085.
- Gökçe, H. S., Sürmelioglu, S., & Andiç-Çakir, Ö. (2017). A new approach for production of reactive powder concrete: lightweight reactive powder concrete

(LRPC). *Materials and Structures*, 50(1), 58.

- 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.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Al-Rawi, S., & Mermerdaş, K. (2014). Effect of volcanic pumice powder on the fresh properties of self-compacting concretes with and without silica fume. *Materials and structures*, 47(11), 1857-1865.
- Helmi, M., Hall, M. R., Stevens, L. A., & Rigby, S. P. (2016). Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation. *Construction and Building Materials*, 105, 554-562.
- Hiremath, P. N., & Yaragal, S. C. (2017). Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 154, 72-87.
- Hiremath, P., & Yaragal, S. C. (2017). Investigation on mechanical properties of reactive powder concrete under different curing regimes. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 9758-9762.
- Hiremath, P. N., & Yaragal, S. C. (2017). Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete. *Construction and Building Materials*, 141, 271-288.
- Holland, T. C. (1989) 'Working With Silica Fume in Ready-Mixed Concrete-USA Experience', *CANMET/ACI Third International Conference. Trondheim, Norway, Proceedings, V.2, pp.*, pp. 763–781.
- Kabay, N., Tufekci, M. M., Kizilkanat, A. B., & Oktay, D. (2015). Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials. *Construction and Building Materials*, 85, 1-8.
- Kamen, A., Denarie, E. & Bruhwiler, E. (2007) 'Thermal Effects on Physic Mechanical Properties of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete'. *ACI Materials Journal*.
- Kim, S. J., Yang, K. H. & Moon, G. D. (2015) 'Hydration characteristics of low-heat cement substituted by fly ash and limestone powder', *Materials*, 8(9), pp. 5847–5861. doi: 10.3390/ma8095277.
- Kronlöf, A. (1994). Effect of very fine aggregate on concrete strength. *Materials and Structures*, 27(1), 15-25.
- Kushartomo, W., Bali, I. & Sulaiman, B. (2015) 'Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 125, pp. 617–622. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.082.
- Kwan, A., Cai, Y. B. & Chan, H. C. (1995) 'Development of very high strength concrete for hong kong', *HKIE Transactions Hong Kong Institution of*

- Engineers*, 2(2), pp. 9–16. doi: 10.1080/1023697X.1995.10667681.
- Lee, N. P., & Chisholm, D. H. (2006). *Reactive powder concrete*. Branz.
- Lee, N., & Chisholm, D. (2005). *Reactive Powder Concrete*, Study Report SR 146.
- Li, Z. (2011). Introduction to concrete. *Advanced Concrete Technology, John Wiley and Sons*.
- Liu, J., & Song, S. (2010). Effects of curing systems on properties of high volume fine mineral powder RPC and appearance of hydrates. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(4), 619-623.
- Liu, J., Song, S. & 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.
- Maltais, Y., & Marchand, J. (1997). Influence of curing temperature on cement hydration and mechanical strength development of fly ash mortars. *Cement and concrete research*, 27(7), 1009-1020.
- Man, N. K. (2009) ‘STUDYING THE PRODUCTION PROCESS AND MECHANICAL PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE MADE USING LOCAL AVAILABLE MATERIALS’, *thesis*, p. 269. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.09.003.
- Meleka, N. N., Bashandy, A. A., & Arab, M. A. (2013). Economical reactive powder concrete cast using available materials in North Sinai, Egypt. *Archives of Civil Engineering*, 59(2), 175-195.
- 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.
- Narmluk, M., & Nawa, T. (2011). Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41(6), 579-589.
- Neville, (2010) ‘Concrete Technology.pdf’, p. 460. *John Wiley and Sons*.
- Neville, A., & Aitcin, P. C. (1998). High performance concrete—an overview. *Materials and structures*, 31(2), 111-117.
- NTPC. (2012): National Thermal Power Corporation Ltd: ‘*Fly Ash For Cement Concrete*’.
- Peng, Y., Hu, S., & Ding, Q. (2010). Preparation of reactive powder concrete using fly ash and steel slag powder. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(2), 349-354.

- Peng, Y., Zhang, J., Liu, J., Ke, J., & Wang, F. (2015). Properties and microstructure of reactive powder concrete having a high content of phosphorous slag powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, 101, 482-487.
- Philippot, S., Masse, S., Zanni, H., Nieto, P., Maret, V., & Cheyrezy, M. (1996). 29Si NMR study of hydration and pozzolanic reactions in reactive powder concrete (RPC). *Magnetic resonance imaging*, 14(7-8), 891-893.
- Ramasamy, V., & Muralitharan, R. (2015). Basic Properties of Pumice Aggregate. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 8(4), 256-258.
- 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.
- Rebentrost, M., & Cavill, B. (2006). Reactive powder concrete bridges. In *AUSTROADS BRIDGE CONFERENCE, 6TH, 2006, PERTH, WESTERN AUSTRALIA*.
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 25(7), 1501-1511.
- Sadrekarimi, A. (2007) 'Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete', *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), pp. 409–417. doi: 10.3151/jact.2.409.
- Salman, B. F., Al-Rumaithi, A., & Al-Sherrawi, M. H. PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF CEMENT.
- Sarika, S. & John, E. (2015) 'A Study on Properties of Reactive Powder Concrete', 4(11), pp. 110–113.
- Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, 38(2), 128-136.
- Shaheen, E., & Shrive, N. G. (2006). Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*, 103(6), 444.
- Staquet, S., & Espion, B. (2002, June). Influence of cement and silica fume type on compressive strength of reactive powder concrete. In *6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, Leipzig* (pp. 1421-1436).
- Sunil, B. M., Manjunatha, L. S., Lolitha, R., & Subhash, C. Y. (2015). Potential use of mine tailings and fly ash in concrete. *Adv. Concrete Constr*, 3(1), 55-69.
- Tam, C. M., Tam, V. W., & Ng, K. M. (2012). Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 26(1), 79-89.

- Tan, K., & Gjørsv, O. E. (1996). Performance of concrete under different curing conditions. *Cement and Concrete Research*, 26(3), 355-361.
- Toutanji, H. A., & El-Korchi, T. (1995). The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1591-1602.
- Türkmen, İ. (2003). Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag. *Materials Letters*, 57(29), 4560-4569.
- Upadhyay, A., & Kamal, M. (2007). *Characterization and utilization of fly ash* (Doctoral dissertation).
- URL-1, (2019): <https://www.dostkimya.com/tr/urunler/temel-kimyasallar/mikrosilika-silica-fume-silis-dumani> 10.06.2019 tarihinde alınmış.
- URL-2,(2019). <http://www.chryso.com.tr/is-alanlari> 13.06.2019 tarihinde alınmış.
- Vernet, C. P. (2004). Ultra-durable concretes: structure at the micro-and nanoscale. *MRS bulletin*, 29(5), 324-327.
- Wang, A., Zhang, C. & Sun, W. (2004) ‘Fly ash effects II. The active effect of fly ash Aiqin’, *Cement and Concrete Research*, 34(11), pp. 2057–2060. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.03.001.
- Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., & Jia, H. (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and building materials*, 192, 153-166.
- Wang, Y., An, M. Z., Yu, Z. R., & Hou, X. T. (2013). Durability of Green Reactive Powder Concrete. In *LTLGB 2012* (pp. 863-870). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wille, K., Naaman, A. E., & Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI materials journal*, 108(1).
- Wong, H. H., & Kwan, A. K. (2005, May). Packing density: a key concept for mix design of high performance concrete. In *Proceedings of the materials science and technology in engineering conference, HKIE materials division, Hong Kong* (pp. 1-15).
- Yaprak, H. (2017) ‘Utilization of industrial waste for green concrete Wykorzystanie odpadów przemysłowych w produkcji przyjaznego dla środowiska betonu Utilization of industrial waste for green concrete’, (July 2010).
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87(12), 2401-2407.

- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., & Karabulut, A. Ş. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1223-1231.
- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Yiğiter, H., Aydın, S., & Türkel, S. (2010). Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 639-648.
- Yazıcı, H. (2007). The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and environment*, 42(5), 2083-2089.
- Yiğiter, H., Aydın, S., Yazıcı, H., & Yardımcı, M. Y. (2012). Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC). *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 2907-2914.
- Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M., & Kitahara, A. (1997). Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(10), 2667-2671.
- Zanni, H., Cheyrezy, M., Maret, V., Philippot, S., & Nieto, P. (1996). Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using ²⁹Si NMR. *Cement and Concrete Research*, 26(1), 93-100.
- 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.
- Zdeb, T. (2017). An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concretes. *Construction and Building Materials*, 131, 758-766.
- Ženíšek, M., Vlach, T., & Laiblová, L. (2016). Flexural Strength of the Reactive Powder Concrete. In *Solid State Phenomena* (Vol. 249, pp. 108-111). Trans Tech Publications.
- Zheng, W., Li, H., & Wang, Y. (2012). Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature. *Materials & Design*, 41, 403-409.
- Zheng, W., Luo, B. & Wang, Y. (2013) 'Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures', *Construction and Building Materials*, 41, pp. 844–851. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.066.
- Zheng, W., Luo, B., & Wang, Y. (2014). Microstructure and mechanical properties of RPC containing PP fibres at elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 66(8), 397-408.
- Zulu, S. N. (2017). *Optimizing the usage of fly ash in concrete mixes* (Doctoral dissertation).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Bashar Qasem Taha AL-HITY
Doğum Yeri ve Yılı : 13.05. 1985 BABIL-IRAK
Medeni Hali : Bekar
Yabancı dil : Arapça, İngilizce ve Türkçe
E-posta : bashar.alhity1@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Babil high school / IRAQ
Lisans : University of Babylon-İnşaat mühendisliği / IRAQ