



**PUZOLANİK MALZEMELERİN REAKTİF PUDRA
BETONUNUN DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYSEMİN YÖRENÇ

Danışman

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PUZOLANİK MALZEMELERİN REAKTİF PUDRA BETONUNUN
DAVRANIŞINA ETKİSİ

Aysemin YÖRENÇ

Danışman

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2024

TEZ ONAY SAYFASI

AYSEMİN YÖRENÇ tarafından hazırlanan “Puzolanik Malzemelerin Reaktif Pudra Betonunun Davranışına Etkisi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 01/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İsmail DEMİR

Başkan : Prof. Dr. İsmail DEMİR
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof Dr. Mehmet Uğur TOPRAK
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç Dr. Ahmet Raif BOĞA
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/07/2024

AYSEMİN YÖRENÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PUZOLANİK MALZEMELERİN REAKTİF PUDRA BETONUNUN DAVRANIŞINA ETKİSİ

Aysemin YÖRENÇ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail DEMİR

Reaktif pudra betonu (RPB) normal betona göre yoğun homojen mikro yapısı ile gelişmiş fiziksel ve mekanik özelliklere sahip bir betondur. Bu çalışmada RPB’de iki farklı lif katkısının ve çeşitli mineral katkıların kullanımının, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmada lif katkısı olarak polipropilen ve çelik lif kullanılmıştır. Mineral katkı olarak ise uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanılarak serilerin karışım reçetesi oluşturulmuştur. Karışımlar 40x40x160 mm kalıplara dökülmüş ve 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak kür ortamına alınmıştır. Numunelere standart ve buhar kürü olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. Buhar kürü için seçilen numuneler 24 saat 80°C buhar kürü ardından 28 gün 20±2 °C’de standart kür havuzunda bekletilmiştir. Standart kür için seçilen numuneler ise 28 gün 20±2°C’de kirece doygun standart kür havuzunda bekletilmiştir. Kür işlemi biten numunelerde ağırlıkça su emme, porozite, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elektriksel özdirenç deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda farklı kür uygulamalarının, farklı mineral katkı ve lif kullanılmasının reaktif pudra betonunun özelliklerinin iyileştirilebileceği görülmüştür.

2024, xi + 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metakaolin, Yüksek Fırın Cürufu, Silis Dumanı, Uçucu Kül, Reaktif Pudra Betonu.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE EFFECT OF POZZOLANIC MATERIALS ON THE BEHAVIOR OF REACTIVE POWDER CONCRETE

Aysemin YÖRENÇ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail DEMİR

Reactive powder concrete (RPB) is a concrete with dense homogeneous microstructure and improved physical and mechanical properties compared to normal concrete. In this study, the effect of two different fiber admixtures and various mineral admixtures on the physical and mechanical properties of RPB was investigated. Polypropylene and steel fiber were used as fiber admixtures. Fly ash, blast furnace slag and metakaolin were used as mineral admixtures. The mixtures were poured into 40x40x160 mm molds and after 24 hours, they were removed from the mold and placed in a curing environment. Two different cures were applied to the specimens: standard and steam cure. The specimens selected for steam curing were steam cured at 80°C for 24 hours and then kept in the standard curing pool at 20±2°C for 28 days. The specimens selected for standard curing were kept in a standard curing pool saturated with lime at 20±2°C for 28 days. Water absorption by weight, porosity, ultrasonic transmission rate, compressive strength, flexural strength and electrical resistivity tests were performed on the cured specimens. As a result of the experiments, it was observed that different curing practices and the use of different mineral admixtures and fibers can improve the properties of reactive powder concrete.

2024, xi + 56 pages

Keywords: Metakaoline, Blast Furnace Slag, Silica Fume, Flay Ash, Reactive Powder Concrete.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR ve çalışmalarım boyunca her türlü desteğini ve yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA, tüm aşamalarda öneri ve eleştirileriyle beni yönlendiren hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve nişanlıma teşekkür ederim.

Aysemin YÖRENÇ

Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ.....	1
2.GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Reaktif Pudra Betonu Tanımı.....	4
2.2 Reaktif Pudra Betonunun Üretim Teknikleri	4
2.2.1 Çimento	6
2.2.2 Mineral Katkılar	7
2.2.3 Su İçeriği	9
2.3.4 Agrega	9
2.3.5 Süper Akışkanlaştırıcı	9
2.3.6 Lif Katkılar	10
2.3 Reaktif Pudra Betonu İle İlgili Yapılan Çalışmalar	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	24
3.1 Kullanılan Malzemeler.....	24
3.1.1 Çimento	24
3.1.2 Uçucu Kül.....	25
3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	26

3.1.4 Silis Dumanı	26
3.1.5 Metakaolin	27
3.1.6 Kum	28
3.1.7 Hiper Akışkanlaştırıcı.....	28
3.1.8 Çelik Lif.....	29
3.1.9 Polipropilen Lif	29
3.2 Beton Karışım Oranları	30
3.3. Beton Dökümü ve Üretilen Numune Tipleri.....	30
3.4 Yapılan Deneyler.....	33
3.4.1 Ağırlıkça Su Emme Deneyi.....	33
3.4.2 Porozite Deneyi	34
3.4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	35
3.4.4. Eğilme Dayanımı Deneyi	35
3.4.5 Basınç Dayanımı Deneyi.....	36
3.4.6 Elektriksel Özdirenç Deneyi.....	37
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	38
4.1 Ağırlıkça Su Emme Deneyi Sonuçları	38
4.2 Porozite Deneyi Sonuçları.....	39
4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları.....	41
4.4 Basınç Dayanımı Sonuçları	43
4.5 Eğilme Dayanımı.....	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
6. KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	57

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
ρ	Elektriksel özdirenç
cm	Santimetre
k Ω .cm	Kilo ohm santim
L	Mesafe
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
R	Direnç
t	Zaman
V	Volt

Kısaltmalar

CEM	Çimento
ÇL	Çelik Lif
EN	European Norm
HA	Hiper Akışkanlaştırıcı
RPB	Reaktif pudra betonu
MK	Metakaolin
SD	Silis dumanı
TS	Türk Standardı
UK	Uçucu kül
PPL	Polipropilen Lif
XRD	X-Ray Difraksiyonu
YFC	Yüksek fırın cürufu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1	Ağırlıkça su emme yüzdelerinin beton serilerine göre değişimi.....	39
Şekil 4.2	Porozite değerlerinin beton serilerine göre değişimi.	40
Şekil 4.3	Porozite ve ağırlıkça su emme arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.	40
Şekil 4.4	Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarının beton serilerine göre değişimi.	42
Şekil 4.5	Porozite ve ultrases geçiş hızı arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.	42
Şekil 4.6	Basınç dayanımı değerlerinin beton serilerine göre değişimi.	44
Şekil 4.7	Porozite ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.	44
Şekil 4.8	Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.	45
Şekil 4.11	Elektriksel özdirenç değerlerinin beton serilerine göre değişimi.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Çimentonun Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri.	24
Çizelge 3.1 (Devam) Çimentonun Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri.	25
Çizelge 3.2 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri.	25
Çizelge 3.3 Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri.	26
Çizelge 3.4 Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri.	27
Çizelge 3.5 Metakaolinin Kimyasal Özellikleri.	27
Çizelge 3.6 Kuvars kumunun granülometrik analizi.	28
Çizelge 3.7 Hiper Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesinin Özellikleri.	28
Çizelge 3.8 RPB karışım oranları, kg/m ³	30

RESİMLER DİZİNİ

Resim 3.1 Çelik lif.	29
Resim 3.2 Polipropilen lif.	29
Resim 3.3 RPB serilerine karışım sırasında eklenen çelik lif.	31
Resim 3.4 RPB serilerine karışım sırasında eklenen polipropilen lif.	31
Resim 3.5 Reaktif pudra betonu kontrol numune serisi.	32
Resim 3.6 Buhar kürü uygulanan numuneler.	32
Resim 3.7 Standart kür uygulanan numuneler.	33
Resim 3.8 Etüv kurusu halindeki numuneler.	34
Resim 3.9 Numunelerin su içerisindeki ağırlığının ölçümü.	34
Resim 3.10 Ultrases geçiş hızı deneyi.	35
Resim 3.11 Eğilme dayanımı deneyi.	36
Resim 3.12 Basınç dayanımı deneyi.	36
Resim 3.13 Elektriksel öz direnç deneyi.	37

1.GİRİŞ

Son yıllarda nüfusun artışı, teknolojinin gelişmesi ve çeşitliliğin artmasıyla tüketim de artmıştır. Artan nüfus, kullanım alanlarının da genişlemesine sebep olmuştur. Bu artışlar daha fazla yapı ve daha dayanıklı, dayanımlı yapı ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Bu zincirde yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri çok büyük önem taşımaktadır. Yapısal özelliklerin artırılması ve iyileştirilmesi için hem ekonomik hem de sağlıklı yollar aranmaktadır.

Bu hızlı kentleşme aynı zamanda inşaat yıkıntı atıklarının da çoğalmasına sebep olmaktadır. Bu atıkların geri dönüştürülmüş agrega olarak belirli oranlarda betonda kullanılması ile yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Çevre sağlığını olumlu etkileyen bu çalışmalarda incelemeler sonucunda betonun mikro özellik, dayanıklılık ve mekanik özelliklerinde azalmaya da sebep olduğu bulguları elde edilmiştir. (Tang vd. 2020, Sasui vd. 2024).

Beton özelliklerinin beklenenden daha iyi sonuçlar vermesi yapının dayanım ve durabilitesi için önem taşımaktadır. Son yıllarda artan depremler ve deprem hasarları göz önünde bulundurulduğunda yüksek dayanımlı ve dayanıklı beton ihtiyacı net bir şekilde anlaşılmıştır. Beton özelliklerinin olumlu sonuçlar vermesi için birçok çalışma yapılmıştır. Çeşitli türde lifler, mineral ve kimyasal katkıları, kürleme işlemleri denenmiştir.

Genel olarak çimento harcı ve kendiliğinden yerleşen beton gibi beton onarım malzemeleri, normal dayanımlı betonun eksiklikleri nedeniyle, bu onarım malzemelerinin hala düşük mekanik özelliklere ve zayıf dayanıklılığa sahip olduğunu belirlemektedir. Bu nedenle tamir malzemesi olarak; Reaktif pudra betonu (RPB) kullanılması düşünülmektedir (Ju vd. 2020). Lee vd. (2007) ve Deng vd. (2018), onarım malzemesi olarak RPB'yi kullanmışlar ve davranışını değerlendirdiklerinde RPB'nin mükemmel onarım ve güçlendirme sergilediği sonucuna varmışlardır.

En yeni ve yüksek performanslı beton çeşitlerinden biri olan; RPB, Richard, Cheyrezy ve Bouygues tarafından Fransa’da 1990’ların başında tanıtılan yüksek dayanıma, düşük kırılabilirliğe ve mükemmel dayanıklılığa sahip yenilikçi bir betondur. (Richard ve Cheyrezy 1995, Li vd. 2020).

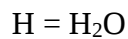
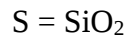
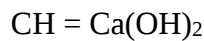
1997’de Kanada’daki Sherbrooke köprüsü, dünyanın ilk RPB dolgu paslanmaz çelik kompozit yaya köprüsü olarak inşa etmiştir (Blais ve Couture 1999). RPB; uygun oranda çimento, kum, silis dumanı, kuvars, süper akışkanlaştırıcı, çelik lifler ve su kullanılarak hazırlanan bir karışımdır (Richard ve Cheyrezy 1995). RPB, ultra yüksek performanslı betonlar sınıfına girmektedir (Richard ve Cheyrezy 1994, Sanchayan ve Foster 2016).

Sıradan betonla karşılaştırıldığında RPB'deki temel gelişmeler arasında daha yoğun mikro yapı, parçacık boyutu homojenliği ve daha az gözeneklilik yer almaktadır (Salahuddin vd. 2020).

Puzolanik malzemeler, sürdürülebilirlik kaygısıyla ve çimento üretiminde açığa çıkan zehirli gaz emisyonu ayrıca yüksek maliyetten dolayı çimentonun kısmi ikamesi olarak tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır (Mayhoub vd. 2020). Ayrıca silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi puzolanik malzemeler puzolanik reaksiyonla daha uzun sürede kalsiyum silikat hidrat (CSH) jelleri oluşumuna olumlu katkıda bulunur ve geç dayanımı artırmaktadır (Amer vd. 2020, 2021, Mayhoub vd. 2020). Nemli ortamda ve ince öğütülmüş yapıda, puzolanların silisi ile kalsiyum hidroksit arasında meydana gelen reaksiyon (1.1)’de verilmiştir. Bu yavaş bir reaksiyondur (Erdoğan, 2016).



Denklemden;



Meera ve Gupta (2024) yaptıkları çalışmada mermer tozunun da RPB içerisinde kullanımını araştırarak hem ekonomik hem de dayanımdan taviz verilmeyen beton üretiminin mümkün olduğunu göstermişlerdir. Yan vd. (2024) ise betonda atık cam tozu kullanarak betonun davranışını incelemişlerdir. Sonuçlar, atık cam tozunun dahil edilmesinin betonun akışkanlığını iyileştirdiğini ve erken mekanik özelliklerini azalttığını, ancak daha sonraki yani geç mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir.

RPB üretimi sonrasında uygulanacak kür yöntemi de betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etki etmektedir. Yüksek sıcaklık kürü ile daha yüksek dayanım kazandığı çeşitli çalışmalarda görülmüştür. Örneğin, Varolgüneş vd. (2020) yaptıkları çalışmanın sonucunda en yüksek dayanıma 8 saat otoklav +28 gün 25 derece su kürü uygulanan numunelerinden elde edilmiştir.

Bu çalışmada da RPB içerisindeki yüksek dozajda çimento gereksinimini azaltmak için çeşitli puzolanik malzemeler kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi puzolan katkıların betonun davranışına etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda iki farklı lif seçeneği ile farklı kür koşullarında RPB'nin davranışı incelenmiştir.

2.GENEL BİLGİLER

2.1 Reaktif Pudra Beton Tanımı

RPB, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) grubunda bulunmaktadır. İsimlendirilmesinde kullanılan pudra kelimesi, RPB üretiminde kullanılan malzemelerin tane boyutunun genel olarak çok küçük bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Boşluksuz bir yapı amaçlandığı için iri agrega karışım dizaynından çıkartılmıştır. Sıcak kür işlemleri ile çok yüksek dayanımlı betonlar elde edilmektedir. Malzeme içeriği çimento, kum ve silis dumanı (SD) şeklinde olup, süper akışkanlaştırıcılar ile dizayn edilerek oluşturulan ve aynı zamanda su/çimento oranı büyük oranda azaltılmış yüksek dayanımlı betonlara örneklerdir (Topçu vd. 2021).

Metalurji ve enerji endüstrisinin bir yan ürünleri olan, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül, çimentonun bir kısmını değiştirmek amacıyla karışımında uygun oranlarda kullanıldığında RPB hazırlığının karbon emisyonlarını ve RPB maliyetini azaltabilmektedir (Ju vd. 2024).

RPB üstün dayanıma, tokluğa, darbe direncine ve mükemmel dayanıklılığa sahip olup darbeye, nüfuza ve patlamaya karşı köprülerde, nükleer santrallerde ve askeri tesislerde geniş kullanıma sahiptir (Liu vd. 2024).

RPB, darbeler ve patlamalar gibi yüksek enerjili dinamik yük direnci için ideal bir malzeme olduğunu ispatlayan ultra yüksek mukavemet, gelişmiş enerji emilimi ve süneklik göstermektedir (Cao vd. 2020). Hou vd. (2018) yaptıkları çalışmada RPB'nin çelik lif içeriğinin artmasıyla artan enerji emiliminin, normal dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı betondan daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

2.2 Reaktif Pudra Betonunun Üretim Teknikleri

RPB genel terim olarak yapı mühendisliğinde mikro yaklaşımla oluşturulmuş bir malzemedir. İçeriği normal çimento olan kompozitler ile kıyaslandığında, RPB'deki

farklılıklar içerisinde, homojen tane dağılımı, boşluk oranı ve mikro yapı da bulunmaktadır. Normal betonlara kıyasla daha yüksek dayanım vermesinin sebepleri arasında düşük s/ç oranı ve iri agreganın karışım dizaynına dahil edilmemesi önemli rol oynamaktadır. Karışım matrisi tane boyutu açısından özenle tasarlanmaktadır. Bunun yanında karışım dizaynında kullanılan silis dumanı da puzolanik reaksiyon göstererek ileriki aşamada yani geç dayanım dediğimiz dayanımı artırmaktadır. Bu sayede mekanik özellikler iyileştirmektedir. Mekanik özellikler daha fazla iyileştirilmek istenirse buhar kürü veya otoklav kürü uygulamaları yapılmaktadır. Hiper akışkanlaştırıcı katkıların uygun dozajdaki etkisi de detaylı olarak incelenerek bu tür betonlarda kullanılabilir. Betonda süneklik dediğimiz özelliği artırmak için de çeşitli lif katkıları, genellikle de çelik lifler kullanılmaktadır. Çimento harcındaki boşluk oranının azaltılması koşulu ile betondaki dayanıklılığın ve dayanımın artırılması amaçlanmaktadır (Mayhoub vd. 2021).

Karışım dizaynında bulunan liflerin, puzolanik katkıların da etkisi ve buhar kürü gibi sıcaklık kürleri uygulanarak belirlenen dayanımların üzerine çıkmak da mümkündür. Agregada olarak genellikle ince öğütülmüş kuvars kumu kullanılmaktadır. RPB’de kullanılacak olan kum tane çapının çimentoya yakın olması, hidrate olmamış çimento tanelerinin de karışıma uygun olması ve malzeme dayanımına katkı sağlaması anlamına gelmektedir. Bu betonlarda s/ç oranı 0,15-0,19 gibi seviyeler arasındadır. Betonda kullanılan hiper akışkanlaştırıcı katkıları betonun işlenebilme özelliğini artırmaktadır. Bunların dışında betonun istenilen dayanım değerini karşılaması için karışım dizaynında kullanılan malzemelerin özelliklerini ve bunların karıştırma aşamasında hangi sıra ve süreyle karıştırılması gerektiğine dikkat edilmelidir. Karışım dizaynında bağlayıcı malzeme olarak çimento ve silis dumanı kullanılmaktadır, bunun yanında tercihen çeşitli mineral katkıları da eklenebilmektedir. Silis dumanı ile mikro boşlukların azaltılması amaçlanmıştır. Silis dumanı taze betonda işlenebilme özelliğine olumlu etki sağlar ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamurunun agregada ile arasındaki aderansın artmasında etki sağlar. Bu sayede betonun dayanımını da artırmış olmaktadır. Ancak silis dumanının yüksek maliyetli oluşu ve bulunmasının güç olması imalatlarda kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Karışım dizaynında kullanılan çelik lifler ile eğilme dayanımını artırmak amaçlanmıştır. Betonda çelik lif kullanımı betonun

çekme gerilmelerine karşı direncini artırmaktadır. Çelik liflerin çekme dayanımları ortalama 2600 MPa'dır. Betonun karıştırma aşamasında kuru malzemelerin homojen karışımı sağlandıktan sonra sıvı malzemelerin eklenmesi ile karıştırma işlemine devam edilmelidir. Karışıma ilave edilen karışım suyu miktarı önemlidir. Belirlenen s/ç oranı bozulmadan karışım suyu ilave edilmelidir. (Gereken 2019).

Üretilen beton numunelerine yapılacak olan kürleme yöntemleri de özelliklerin geliştirilmesinde etkilidir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde termal kürlemenin tüm RPC karışımlarının performansında iyi bir etki gösterdiği sonucuna varılmıştır (Mayhoub vd. 2021). Sertleşmeden önce betona basınç uygulamak ve kürlemek için buhar veya otoklav kullanmak mikro yapıyı iyileştirir (Savadkoohi ve Reisi 2020).

Yu vd. (2024) yaptıkları çalışmada prefabrik kolon kiriş üretiminde de RPB kullanmışlardır. Bu üretim aşamasında kolon ve kirişlerin birleşim yerlerinde özellikle RPB tercih etmelerinin sebebi, geçmiş deprem felaketlerinden elde edilen bilgilerde prefabrik çerçeve yapıların çökmesinin çoğunlukla sismik kuvvetler altında düğüm bölgesindeki hasarlardan kaynaklanmasıdır. Prefabrik beton yapılar bağlamında düğüm bağlantılarının kalitesi genel bina güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Bu sorunu çözmek için de RPB kullanılmıştır.

2.2.1 Çimento

Çimento matrisine sahip bir karışım olan RPB, kimyasal içeriği incelendiğinde C₃A bileşimini daha az bulunduran çimentoların tercih edilmesi ile daha olumlu sonuçlar alındığı görülmüştür. Reolojik özellikler ve mekanik performans bakımından en iyi çimentonun yüksek silis içeriğine sahip çimento olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında sertleşme hızı yavaştır. Tane boyutu bakımından yüksek Blaine incelikli çimento, su gereksiniminin fazla olması su/bağlayıcı oranını bozacağından bu betonlar için uygun olmadığı düşünülmektedir. Normal hızlı sertleşen yüksek performanslı çimento ise yüksek su gereksinimi olmasına rağmen çok iyi mekanik özellikler gösterdiği için tercih edilmektedir. Genellikle bu betonlar için katkısız portland çimentosu yani Tip I ve 42,5 veya 52,5 MPa'lık basınç dayanıma sahip çimentolar tercih edilmektedir. Portland

çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit, uçucu kül veya silis dumanı gibi mineral katkıların varlığı durumunda puzolanik reaksiyon sebebiyle dayanıma katkıda bulunan bir kalsiyum silikat hidrat yapıya dönüşmektedir (Gereken 2019).

2.2.2 Mineral Katkılar

Doğal puzolanlar volkanik küller ve tüfler (traslar), pomza taşları olarak bilinmektedir. Yapay puzolanlar ise; pişmiş kil ve şeyller, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ve silika tozudur (silis dumanı) olarak bilinmektedir (Baradan 2000). Eklenen puzolanik malzemeler, özellikle silis dumanı, puzolanik reaksiyonlar yoluyla çimento hidrasyonu ile üretilen zayıf $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'yi tüketerek ek güçlü hidratlanmış kalsiyum silikat (CSH) zincirleri oluşturur. Ayrıca silika dumanı CSH zincirleri arasındaki boşlukları doldurur. Bu iki fonksiyon betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını arttırmaktadır (Savadkoobi ve Reisi 2020). Silis dumanı, silikon veya silikon içeren alaşımların üretiminin bir yan ürünü olarak elektrik ark fırınlarında üretilen çok ince kristal olmayan silikadır. Uçucu kül, pulverize kömür ile çalışan termik santrallerde bir yan ürün olarak elde edilen çok ince kalıntılardır. Küresel uçucu kül parçacıkları, çimentolu malzemelerin ve alkaliyle aktifleştirilen malzemelerin işlenebilirliğini ve reolojik özelliklerini geliştirmektedir (Han vd. 2020). F ve C sınıfı olarak iki sınıfa ayrılır. F sınıfı dediğimiz uçucu kül sınıfında $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %70 üzerindeyken C sınıfı uçucu küllerde bu sınır %50'ye kadar düşmektedir. Bunun yanında C sınıfı uçucu küllerde kireç (CaO) miktarı %10 üzerinde olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da bilinmektedir. Yüksek Fırın Cürufu (YFC), demir üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ham demir üretimi aşamasında atık malzeme olarak elde edilmektedir (Karabulut 2006).

Bilindiği üzere uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı beton üretiminde ve dizaynında olduğu gibi, çimento üretiminde de kullanılmaktadır. Beton ve çimento teknolojisinde mineral katkı kullanımı, kazandırdığı tüm özelliklerin yanında CO_2 emisyonunu azalmasında ve atıkların kullanımı ile de birçok katkı da sağlamaktadır. RPB üretiminde ve yapılan çalışmalarda genellikle silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın

cürufu kullanılmaktadır. Bazı makale yayınları incelendiğinde metakaolinin de etkilerinin araştırıldığı görülmektedir. mineral katkıları beton üretiminde geç dayanımı arttırmakla birlikte işlenebilirliği de artırmaktadır. Mineral katkıları yüksek inceliğe sahip olmaları sebebi ile betondaki boşlukları doldurarak dayanım ve geçirimsizlik özelliklerini de iyileştirirler (Karabulut 2006).

Çimento bileşenlerinden olan C_3S ve C_2S hidratasyonu sonucunda C-S-H jelleri oluşmaktadır. Aynı zamanda bu oluşumla birlikte CH ($Ca(OH)_2$) ile belirtilen kalsiyum hidroksit oluşmaktadır. Mineral katkıları kalsiyum hidroksit ile birleşerek 2. Aşama dediğimiz reaksiyon sonucunda bağlayıcı özelliği artırarak beton özelliklerini iyileştirmektedir. Bu oluşan reaksiyon 2. Aşamada olduğu için 28.günden sonraki dayanıma katkısı büyüktür. Katkı çeşidinin ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi önemlidir. Mineral katkılarda priz süresi uzadığı için işlenebilirlik artmaktadır. Erken dayanımda da azalma ihtimali bulunmaktadır. Kür süresinde uzamaya da sebep olabileceği için mineral katkıların kimyasal özellikleri bilinmelidir. Örneğin silis dumanı hızlı reaksiyona girmekte fakat çok ince yapıya sahip olduğu için su ihtiyacını artırmaktadır. Uçucu kül ise küresel yapıya sahip olduğu için silis dumanının duyduğu su ihtiyacını azaltabilir (Gereken 2019).

Amer vd. (2021) yaptıkları çalışmada alkali aktif beton üretmeyi amaçlamışlardır. Bu üretim esnasında da puzolan katkıların önemi araştırılmıştır. Alkali aktif betonun ana bileşenleri alüminosilikat malzeme kaynağı ve bir alkali aktivatör olmak üzere iki adettir. Alüminosilikat kaynağı cüruf, uçucu kül ve silis dumanı ve metakaolin gibi yan ürünler olabilmektedir. Alüminosilikat kaynağının belirlenmesi, uygulama türü, bulunabilirlik ve maliyet gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Çalışma sonucunda en yüksek dayanımı veren numunenin dizaynı incelendiğinde, çimentonun yerine tamamen yüksek fırın cürufu kullanılmıştır ve uygun oranlarda sodyum silikat, sodyum hidroksit, su ve agrega kullanılmıştır.

2.2.3 Su İçeriği

RPB retiminde işlenebilirlik ve betonun kalitesini en uygun şekilde sağlayan en düşük su/bağlayıcı oranı seçilir. Su içeriği bu açıdan en önemli parametrelerden biridir. Karışımdaki su/bağlayıcı oranı ne kadar düşük olursa boşluk oranı o kadar az olmaktadır (Gereken 2019).

2.3.4 Agreg a

Uygun olarak seçilmiş agrega granülometrisi beton içerisinde boşluk miktarını en aza indirmektedir. RPB retiminde agrega dizaynında iri agrega dediğimiz sınıf çıkarılmaktadır. RPB retiminde kullanılan agrega boyutları imentonunkine yakındır (Baradan 2000).

2.3.5 Süper Akışkanlaştırıcı

Süper akışkanlaştırıcılar yüksek performanslı betonların gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. RPB retiminde kullanılan mineral katkılar sebebiyle ince malzeme miktarı artmaktadır. Bu sebeple su ihtiyacı da artmaktadır. RPB su/bağlayıcı oranının da mümkün olduğunca düşük tutmak (% 15 civarı) amacıyla karışımda akışkanlaştırıcı kullanılması gerekmektedir. Süper akışkanlaştırıcılar, karışım suyunun daha fazla imento tanelerine ulaşıp ıslatmasını sağlamaktadır. Bunun yanında beton karışımına kazandırdıkları akışkanlık özellikleriyle de kalıba yerleştirilmesinde ve işlenmesinde kolaylık sağlamaktadır (Karabulut 2006).

Su azaltıcı da denilen akışkanlaştırıcı katkılarının kullanımı imento tanelerinin topaklaşmasını önleyerek karışımda homojen şekilde dağılması sağlamaktadır. Bu durumda, imento topaklarında var olan su serbest kalır ve karışımın işlenebilirliği artar (Gereken 2019).

2.3.6 Lif Katkılar

2.3.6.1 Çelik Lifler

Beton içerisine katılan çelik lifler, betonun içyapısını düzenleyen ve betonun gevreklik özelliği yerine sünek özellik kazandıran bir malzeme olarak kullanılabilir. Çelik lif ilave edilmiş bir betonun özelliği, plastik davranış ve enerji absorbe yeteneğinin gelişmiş olmasıdır (Şimşek 2004).

Çelik lifler TS 10513'e göre kontrol edildiğinde, pas, yağ ve petrolden arındırılmış ve temiz olmalıdır. Çelik lifler düşük karbonlu çelikten soğuk çekme işlemi ile elde edilmiş olmalıdır. Çekme-kopma gerilmesi ortalaması 345 N/mm^2 , her bir lif ise 310 N/mm^2 den az olmamalıdır (Yerlikaya 2003).

RPC, kısa çelik fiber takviyesinin dahil edilmesi yoluyla hem ultra yüksek mukavemet hem de mükemmel dayanıklılık ile karakterize edilebilecek olağanüstü bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Al.Khuzaie ve Atea 2019).

Lif kullanılan betonun kalitesi, çelik liflerin narinlik oranı (uzunluk/çap) ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yapılacak olan deneyler göz önüne alınarak çelik lifli beton performansının belirlenmesi gerekmektedir. Bu seçimde yapı güvenliği ve sünekliği önemli rol oynamaktadır. Çelik lifler, taze betonda rötre nedeniyle oluşmaya başlayan mikro çatlaklarda köprü gibi çalışarak, iç gerilmeleri bütün yapı içine dağıtır ve bazı yükler altında çatlakların ilerlemesini ve büyümesini engellemek üzerine çalışmaktadır. Bu yükler içerisinde ani olarak ortaya çıkan deprem gibi dinamik yüklemelere karşı enerji yutma kapasitelerinden dolayı betonun dağılmasını engellerler (Yerlikaya 2003, TS 10513).

Uygunoğlu vd. (2006) yaptıkları çalışmada farklı narinlik oranlarına sahip iki lif tipinin basınç ve eğilme altındaki mekanik özelliklerinin araştırılması kapsamında lif katkısının çökme değerini azalttığını aktarmışlardır. Taze betonda karıştırma ve yerleştirme işlemlerinde güçlük yaşadıklarını da belirtmektedirler. Bunun yanında narinlik oranı 60

ve 80 olan liflerin betona eklenmesi dahilinde lif miktarının artışıyla betonların gerilme-şekil değiştirme yeteneğinde de artış görülmüştür. Yapılmış olan karışımlar içerisinde seçilen bir karışımın kontrol numunesine göre yani lifsiz numuneye göre 5 kat daha fazla şekil değiştirme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür. Betona eklenen liflerin narinliği arttıkça eğilme dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir. Lif miktarının ve narinliğinin artmasıyla betondaki çatlakların genişliğinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu etkiler ile birlikte lifler, betonların basınç dayanımlarını yönelim ve dağılımları sebebiyle hem olumlu hem de olumsuz yönde etki etmişlerdir.

2.3.6.2 Polipropilen Lifler

Polipropilen elyaflar çatlamaya karşı kullanılan fakat taşıyıcı olmayan lifler olarak düşünülebilir. Aynı zamanda taze betonda su tutma kapasitesini, beton geçirimsizliğini, zemin betonunda kullanıldığında ise mukavemeti arttırmaktadır. Rötire sebebiyle oluşan çatlakları azaltmaktadır (Caf 2012). Bu lifler nispeten düşük bir elastikiyet modülüne sahiptir ve sertleşmiş RPB'de çatlakların oluşumunu ve yayılmasını önleyemezler ancak taze hal sırasında büzülmeden kaynaklanan çatlakları etkili bir şekilde önleyebilirler (Abdul-Rahman vd. 2020).

Bahadır (2010) tarafından yapılan çalışmada, betonda polipropilen liflerin kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada 300 kg olarak belirlenmiş olan çimento dozajına göre s/ç oranı 0,4, 0,5, 0,6 olacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu oranlara göre hazırlanan karışımlara 0,9 kg/m³ ve 1,8 kg/m³ oranlarında 3 farklı polipropilen lif dahil edilmiştir. Sonuç olarak, kullanılan polipropilen liflerin betonun çekme dayanımına önemli ölçüde olumlu etki sağladığı, polipropilen liflerin ise betonun dayanıklılığına katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir.

Abdul-Rahman vd. (2020) yaptıkları çalışmada beton içerisinde kullanılan polipropilen lif içeriğindeki artışın, kirişin çökmesini ve oluşabilecek dökülmeleri azalttığını aktarmışlardır. Yangın sonrasında soğutulan kirişlerin kalan mukavemetini ve nihai mukavemetini geliştirdiği sonucuna ulaşmışlardır.

2.3 Reaktif Pudra Betonu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Varolgüneş vd. (2020) yaptıkları çalışmada çimento, kuvars kumu, kuvars tozu, silis dumanı, çelik lif, su ve süper akışkanlaştırıcı malzemelerini kullanılmışlardır. Homojen bir karışım oluşması için öncelikle kuru (katı) malzemeler karıştırıcıya dökülmüş ve 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyunun ve süper akışkanlaştırıcının yarısı karışıma eklenerek 4 dakika daha karıştırılmıştır. Bu uygulamanın ardından su ve süper akışkanlaştırıcının diğer yarısı ilave edilip 4 dakika daha karıştırılmıştır. Sonrasında çelik lifler karışıma eklenerek 2 dakika kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra taze beton yağlanmış olan kalıplara doldurulmuştur. Oda koşullarında 24 saat bekleyen RPB numuneleri kalıplarından çıkarılıp mevcut numunelerin bir kısmı yüksek basınçlı kür için otoklav kürüne bırakılmıştır. 4, 8 ve 12 saat sonunda otoklavdan alınan numuneler 28 gün boyunca 25°C sıcaklıktaki su içerisinde bekletilmiştir. Geriye kalan diğer numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 3 gün boyunca farklı sıcaklıklardaki (50°C, 70°C, 90°C) suda kür edildikten sonra 25°C sıcaklıkta 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak en yüksek dayanıma 8saat otoklav +28 gün 25 derece su kürü uygulamasında ulaşılmıştır. Lifli numunelerin eğilme dayanımları 7 ve 28 günlük uygulanan kürün sonunda lifsiz numunelerden daha fazladır. En iyi kür şartı sağlandığında lif kullanılan numunelerin lifsiz numunelere kıyasla eğilme mukavemetinde %77 artış gösterdiği incelenmiştir. Aynı kür uygulaması altında aynı numunenin basınç dayanımındaki artış %13,7 'dir. Çıkan sonuç ile birlikte liflerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin basınç dayanımına olan etkisine göre daha fazla olduğu görülmektedir. 28 günlük kür uygulaması sonunda en yüksek basınç dayanım değerleri lifli ve lifsiz numuneler için sırasıyla 166,94 MPa ve 146,81 MPa'dır.

Liang vd. (2018) yaptıkları çalışmada toplam altı karışım kullanılmıştır. 1000 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra test edilmiştir. Agregat tipinin, elyaf tipinin ve ısıtma hızının etkileri araştırılmıştır. Sonuçlarda dayanımları ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri incelenmiştir. Numuneler kompakt olduğundan patlayıcı parçalanmaya dikkat edilmiştir. Sebep olarak, yapısı nedeniyle patlamaya karşı diğer betonlara göre daha hassas olduğu belirtilmiştir. Farklı sıcaklıklar altında numunelerin

iç yapısının değişim mekanizmasının anlaşılmasına yardımcı olmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. Çalışma da portland 42,5 çimento kullanılmıştır. Bunun yanında silis dumanı, uçucu kül, kuvars kumu ve çelik cürufu kullanılmıştır. Su/ bağlayıcı oranı 0,16 olarak ayarlanırken kum/bağlayıcı oranı ise 1,0 olarak hesaplanmıştır. Çelik ve polipropilen olmak üzere iki çeşit lif katkı kullanılmıştır. Numuneler 50mm/50mm ölçülerinde küp numune kalıplarına alınmıştır. 24 saat sonra numuneler kalıptan çıkarılarak termostatik kontrollü su tankına bırakılmış ve puzolanik reaksiyonun hızlandırılması amacıyla bir gün boyunca 90 °C sabit sıcak suya alınmıştır. Daha sonra standart kür koşulları altında 28 gün süreyle kür edilmiştir. Isıtmadan önce, patlamayı kontrol etmek için bir kurutma işlemine ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışmada numuneler, 24 saat süreyle 90 °C sıcaklıkta kurutma işlemi için elektrikli fırına konulmuştur. Daha sonra numuneler 1400 °C ısıtma kapasiteli elektrikli fırında dakikada 4°C hızda ısıtılmıştır. Numunelere 20, 200, 400, 600, 800 ve 1000 derece sıcaklık kürü uygulanmıştır. Fırının zarar görmesini önlemek ve güvenliği sağlamak amacıyla fırının iç duvarlarına silikon levhalar monte edilmiştir. Ayrıca ısıtılan numunelerin korunması için fırının içine çelik bir kafes yerleştirilmiştir. Bir seferde dört numune, hedef sıcaklıklara ulaşana kadar 4 C/dk hızında ısıtılmış ve daha sonra numune boyunca eşit şekilde dağılmış sıcaklıklar elde etmek için başka bir süre boyunca sabit hedef sıcaklıklarda tutulmuşlardır. Daha sonra numunelerin oda sıcaklığına soğuması için fırın kapısı açılmıştır. Numuneler basınç dayanımı ölçülmesi için yükleme plakaları arasına yerleştirilmiştir. Yükleme hız 0,2 mm/dak olarak kontrol edilmiştir. Bu çalışmada basınç dayanımı dört numunenin ortalama değeri olarak hesaplanmıştır. Bazı numuneler de şiddetli patlama nedeniyle ölçümler kaydedilememiştir. Oda sıcaklığı kürü altında en yüksek dayanımı kuvars kumu ve çelik lif kullanılan karışım 187,5 MPa olarak bulunmuştur. Aynı zamanda 200 derece sıcaklık kürü uygulanan numunelerde de en yüksek basınç dayanımını kuvars kumlu ve çelik lifli karışıma sahip numune sağlamıştır. Yüksek sıcaklık kürlerinde polipropilen lifler eridiği için dayanımlar da sıcaklık arttıkça düşme gözlemlenmiştir. Genel anlamda en yüksek dayanımı 400 derece sıcaklık kürü uygulanmış olan kuvars kumu, çelik ve polipropilen elyaf hibrit olarak bünyesinde bulunduran numune 230,1 MPa olarak sağlamıştır. Çelik cürufu ve hibrit elyaf içeren karışımın iyi bir yangın direncine sahip olduğu bulunmuştur.

Ren vd. (2018) yaptıkları çalışmada altı hacim fraksiyonunun (%0, %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %2,5) ve iki tip çelik lifin (düz ve kancalı) kullanıldığı ultra yüksek performanslı çimentolu kompozit (UHPCC) numuneleri üzerinde bir dizi kübik/eksenel basınç, doğrudan çekme, dört noktalı ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada portland 52,5 çimento, su ve su azaltıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Aynı zamanda öğütülmüş ince kuvars kumu (boyutu 0,6 mm'den küçüktür), kolay elde edilen doğal nehir kumu (maksimum çap 2,5 mm) ile yer değiştirilmiştir. Ayrıca kısmi silis dumanının yerini uçucu kül ve ultra ince cüruf içeren mineral karışımı almıştır. Çimento ve ince kuvars kumu üretimi çok daha fazla enerji ve kaynak tükettiğinden ve sınırlı üretimi nedeniyle silis dumanı uçucu kül ve ultra ince cüruftan daha pahalı olduğundan, mevcut UHPCC nispeten düşük maliyetlidir ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Numuneler kalıplara döküldükten sonra nem kaybını önlemek amacıyla plastik örtülerle kapatılarak oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra sökülerek 17,7-21,7 derece sıcaklıkta ve %98,4 bağıl neme sahip standart bir kür odasında 28 gün daha kürlenmiştir. Daha sonra numuneler standart kür odasından çıkarılarak test zamanına kadar oda sıcaklığında saklanmıştır. Numunenin dar kesitinin boyutu maksimum fiber uzunluğunun (25 mm) iki katıdır, bu da homojen fiber yönelimi ve dağılımını garanti etmektedir. UHPCC numunelerine 5,0 kN/s hızında yük kontrolü uygulanmıştır. Kübik basınç dayanımları ölçülmüş ve her bir parti için üç paralel numunenin ortalamaları test sonuçları olarak rapor edilmiştir. Karışımda düz veya kancalı çelik fiberli UHPCC için kübik basınç dayanımının, çelik fiber içeriğinin artmasıyla birlikte kademeli olarak arttığını göstermektedir. Örneğin, %2,5 mikro-düz çelik fiberli UHPCC'nin kübik basınç dayanımı 143,9 MPa olup, %2,5 kancalı çelik fiberli 139,9 MPa bulunmuştur. Bunun nedeni, artan çelik fiber içeriğinin, yükü taşıyacak daha fazla fiber üretebilmesi ve çoklu çatlaklara yol açabilmesidir. Ayrıca aynı çelik fiber içeriği ile, mevcut iki tipik fiberin farklı boyutları nedeniyle, nispeten daha fazla miktarda mikro düz çelik fiber içeriği oluşmaktadır. UHPCC'nin üç noktalı eğilme özellikleri açısından, çelik fiberlerin eklenmesiyle kırılma tokluğunda önemli bir iyileşme sağlanırken, çelik fiber tipinin bu üzerinde çok az etkisi vardır. Çelik fiber içeriğinin artmasıyla kırılma enerjisi istikrarlı bir şekilde artar ve mikro düz çelik fiberin etkisi daha dikkat çekicidir. UHPCC'nin eksenel basınç davranışı için eksenel basınç dayanımı, çelik fiber içeriğinin artmasıyla artar, ancak çelik fiber içeriği %1,0'dan büyük olduğunda neredeyse

değişmeden kalır ve çelik fiber tipinin neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Çelik fiberlerin eklenmesinin basınç elastik modülü, Poisson oranı ve basınç gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin zirve öncesi davranışı üzerinde çok az etkisi vardır, ancak çatlama sonrası sünek davranışı önemli ölçüde etkiler. UHPCC'nin doğrudan çekme mukavemeti için, çelik fiberlerin eklenmesi, çekme mukavemetini etkili bir şekilde arttırabilir ve mevcut mikro-düz çelik fiber, kancalı çelik fiberden daha büyük bir etkiye sahiptir. UHPCC'nin dört noktalı eğilme özellikleri açısından, çelik fiberlerin eklenmesinin ilk çatlak eğilme mukavemeti ve buna karşılık gelen sapma üzerinde çok az etkisi vardır; ancak eğilme mukavemeti, yük taşıma kapasitesi ve enerji emme kapasitesi üzerinde olumlu etkisi vardır. Çelik fiber içeriği %1,5'tan fazla olduğunda, mevcut mikro düz çelik fiberin eklenmesi, kancalı çelik fiberden daha verimlidir.

Özalp (2006) yaptığı çalışmada lif dayanımının ve hibrit lif kullanımının karışımların mekanik özelliklerine ve kırılma özelliklerine etkisini gözlemlemek amacıyla, kanca uçlu olan veya düz olan üç farklı çelik lifi karışımlara eklenmiştir. Kanca uçlu olmayan kısa lifler; düz, yüksek dayanımlı, pirinç kaplı, 6 mm uzunluğunda ve 0,16 mm çapındadırlar. Çimento, silis dumanı, su, silis kumu (0,5-2 mm), silis unu (0-0,5 mm) ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,17'de sabit tutulmuştur. Agreganın çelik lif ile kısmi yer değiştirmesi, hesaplanan hacim esasına göre yapılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı, yaklaşık olarak aynı işlenebilirliğin sağlanabilmesi için, karışımlarda değişik miktarlarda kullanılmıştır.

Bütün numuneler, 48 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır, sonra normal su kürü uygulanmıştır. Bu kür rejimi, numunelerin 20°C'de kür havuzunda deney tarihine kadar tutulmasını öngörmektedir. Karma lifli olan veya olmayan yüksek performanslı betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, net eğilme dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve kırılma enerjileri kontrol numunesi ile kıyaslanmıştır. Kısa liflerin, mikro çatlakların önlenmesini sağladığı ve bunun sonucunda numunelerin çekme dayanımının iyileştiği ve makro çatlakların oluşmasından sonra sıyrıldıkları sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, kısa liflerin, kiriş ortasından elde edilen yük-sehim eğrilerinin, maksimum yük sonrası inen kısmında etkileri azdır. Uzun liflerin, mikro çatlakların önlenmesinde önemli katkıları oluşmamıştır, fakat kirişlerden elde edilen

yük-sehim eğrilerinin maksimum yük sonrası kısmında süneklik açısından önemli etkileri vardır. Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, çelik tel donatılı karışımların net eğilme dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve özellikle kırılma enerjisi ve süneklikleri önemli derecede geliştirilmiştir. Yüksek dayanımlı çelik tel içeren betonların kırılma enerjisinde kontrol numunesine göre 119 kata varan artış gözlemlenirken, normal dayanımlı çelik lif içeren betonların kırılma enerjisinde kontrol numunesine kıyasla 79 kat artış olmuştur.

Grzeszczyk ve Janus (2020) yaptıkları çalışmada RPB’de hafif agrega kullanımı sonucu ile beton davranışını incelemiştir. RPB karışımına hacimce %30 ila hacimce %60 arasında Pollytag (uçucu külün sinterlenmesiyle elde edilen hafif agrega), genişletilmiş kil agregası ve genişletilmiş polistiren boncuklar (EPS) eklemiştir. Genişletilmiş kil agregasının eklenmesinin, sırasıyla 75,2 MPa’dan 64,5 MPa’ya kadar basınç dayanımına ve 12,4 MPa’dan 12,9 MPa’ya kadar eğilme dayanımına ve hacimce %30’dan hacimce %60’a kadar agrega içeriğine sahip hafif RPC’nin elde edilmesine olanak sağladığı gösterilmiştir. Pollytag eklenmesi durumunda basınç dayanımı 67,9 MPa’dan 52,9 MPa’ya, eğilme dayanımı ise 11,4 MPa’dan 9,4 MPa’ya çıkmıştır. Genleştirilmiş polistiren boncukların eklendiği betonların basınç dayanımları sırasıyla 50,1 MPa’dan 32,8 MPa’ya, eğilme dayanımları ise 9,7 MPa’dan 7,2 MPa’ya gerilemiştir. Elde edilen hafif betonların su emmesi, genişletilmiş kil agrega katkılı RPB için yaklaşık %3,0 (ve hafif agregasız RPC ile karşılaştırılabilir), Pollytag’lı RPB için yaklaşık %4,0 ve EPS’li RPB için %4,8’e ulaşmıştır. Genişletilmiş kil agregalı RPC’nin en yüksek dayanıma ve en düşük su emme değerine sahip olması, beton karışımının agrega yüzeyindeki geniş gözeneklere yerleştirilmesi ve böylece hafif agrega ile RPC matrisi arasındaki temasın güçlendirilmesi ile açıklanmıştır.

Hasan vd. (2021) yaptıkları çalışmada çimentonun %50’sinin metakaolin (MK) ve uçucu kül (UK) kombinasyonları ile değiştirildiği çevre dostu RPB üretmeyi amaçlamıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,19 olarak belirlemiştir. Çalışmanın amacına ulaşmak için üç RPC karışımı; 10MK + 40UK, 15MK + 35UK ve kontrol karışımı (değiştirilmeden) dökülmüştür. Taze ve mekanik özellik testleri yapılmıştır. Sonuçlar, MK ve UA kombinasyonunun RPB’ nin taze beton özelliklerini iyileştirdiğini,

sertleşmiş betondaki mekanik özelliklerinin ise azaldığını göstermiştir. Mukavemetteki azalma, uçucu kül içeriğinin artmasıyla birlikte ortaya çıkmıştır. Basınç dayanımı, kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında 15MK:35UK ve 10MK:40UK için sırasıyla %38,3 ve %43 oranında azalmıştır. Bu azalma, uçucu külün seyreltme etkisine ek olarak metakaolin ve uçucu külün düşük pozolanik aktivite indeksine (%85) bağlı olabileceği düşünülmüştür. Ayrıca çevresel amaçlar için, RPB üretiminde yalnızca standart (hızlandırılmış değil) kür yöntemi uygulanmıştır. Bu uygulamalar sonucunda kontrol numunesine kıyasla düşük dayanım değerleri elde edilmiştir.

Ge vd. (2023) yaptıkları çalışmada farklı kür uygulamalarının mikro çelik fiber takviyeli RPB'nin mekanik özellikleri ve hidrasyon ürünleri üzerindeki etkilerini araştırmak için üç kür yöntemi belirlenmiştir. Püskürtme kürü, standart kür ve 90 derece sıcak su ile birlikte sprey kürleme yapılmıştır. Mikro çelik lif içeriğinin ve yaşının, RPB'nin basınç ve yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Lif güçlendirme mekanizması ve mikroskobik morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınım mikroskobu teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra mikro çelik fiber takviyeli RPB'nin 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımı için tahmin modelleri geliştirilmiştir. Deney sonuçları, RPB'nin mekanik özelliklerinin, lif katkısının dahil edilmesi sebebiyle önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Üç kürleme yöntemi altında, mikro çelik fiber takviyeli RPB'nin optimum lif hacmi içeriği %1,65 olup mikro çelik fiber takviyeli RPB'nin püskürtme kürü, standart kür ve 90 derece sıcak su ile birlikte sprey kürleme altında 28 günlük basınç dayanımındaki iyileşme oranları kontrol numunesi olan RPB ile karşılaştırıldığında, sırasıyla %33,38, %32,22, %30,65 olmuştur. Yarmada çekme mukavemetinde ise karşılaşılan iyileşme oranları %236,24, %211,29 ve %238,66 olarak belirlenmiştir. 90 derece sıcak su ile birlikte sprey kürleme altında elde edilen mukavemet, standart kür altında elde edilen değerden biraz daha yüksek olmuştur, sonraki büyüme oranı ise standart kür veya püskürtme kürü altında elde edilenden daha düşük olmuştur. Her ne kadar püskürtme kürü altında elde edilen dayanım, standart kür altında elde edilenden biraz daha düşük olsa da, mühendislik gereksinimleri temel olarak karşılanmıştır ve püskürtme kürü, mühendislik uygulamalarında kolaylıkla desteklenebilir denilmiştir.

Samani ve Heidari (2023) yaptıkları çalışmada RPB içerisinde kum/çimento oranlarını 4.5, 4.75, 5, 5.25, 5.5, 5.75, 6, 6.25, 6.5, 6.75 ve 7 şeklinde belirleyerek 11 tasarım ile kum/çimento oranının arttırılmasının etkisini araştırmışlardır. Laboratuvar sonuçları, kum/çimento oranındaki artış sebebiyle basınç ve eğilme dayanımında azalma olduğunu göstermektedir. Kum/çimento oranının en yüksek olduğu S7 numunesi 1, 7, 14, 28, 42 ve 56 günlük yaşlarda en düşük eğilme ve basınç dayanımını göstermiştir. İkinci işlemde, birinci aşamadaki kum/çimento oranına %1 oranında polimer reçine ilave edilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde %1 oranında polimer reçine ilavesinin 1 günlükken basınç dayanımında %40,8 oranında bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Bir günlük en büyük basınç düşüşü %68,1 düşüşle S6,75 olmuştur. Numuneler yaşlandıkça %1 polimer reçine ilavesi tüm kum-çimento oranlarında basınç dayanımını arttırmıştır, böylece S4.75 numunesinin 90 günlük basınç dayanımı 59,7 MPa'ya ulaşmıştır. %1 polimer reçine ilavesi de eğilme mukavemetini %9,1 oranında arttırmıştır. Çalışmanın birinci ve ikinci adımlarının sonuçları incelendikten sonra kum/çimento oranları 5,5, 6, 6,25, 6,5 ve 7 olan kum/çimento oranları optimal ve uygun numuneler olarak seçilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında seçilen numunelere yüzde 10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında kaba agrega eklenmiştir. Sonuçlar, kaba agrega ilavesinin RPB'nin 1 günlük basınç dayanımında kontrol numunesine göre %41,1 oranında bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Üçüncü aşamada kum-çimento oranları 5,5, 6, 6,25, 6,5 ve 7 olan numunelerin 28, 42, 56 ve 90 günlük yaşlarındaki maksimum basınç dayanımı %50 kaba agrega içeren numuneye karşılık gelmektedir. Eğilme mukavemetinde üçüncü aşamanın en iyi örnekleri kum çimento oranı arttıkça eğilme mukavemetini artıran %50 çakıllı olanlardır. Diğer taraftan iri agrega ilavesi ile RPB'nin kontrol numunesine göre eğilme mukavemetinde artış gözlenmiştir. Çalışmanın dördüncü aşamasında üçüncü aşamadaki numunelere %1 oranında polimer reçine ilave edilmiştir. Bu adımın sonuçları, üçüncü adımdaki gibi, %50' kaba agrega numune için 5,5, 6, 6,25, 6,5 ve 7 kum-çimento oranları için 28, 42, 56 ve 90 günlük yaşların maksimum basınç dayanımını göstermektedir. Dördüncü adımda kum/çimento oranı arttırılarak kum oranı daha düşük olan numunelerin eğilme mukavemeti daha yüksek olmuştur.

Ramalingam vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada doğal ince agrega ve çelik lif kalitesinin RPB'nin çekme ve basınç dayanımını nasıl etkilediğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Malzemelerin özellikleri, matristeki ilgili reaksiyonlarıyla birlikte açık bir şekilde incelenmiştir. RPB ile ilgili daha önceki teknik çalışmalara dayanarak, betondaki standart mekanik davranış değişikliklerini gözlemlemek için bağlayıcı bileşimleri türetilmiştir. Doğal ince agregalarda üç farklı gradasyonla dört farklı lif oranındaki beton numuneleri 13 farklı karışım dizaynında 50x50x50mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Literatür tasarımı için 135 küp ve 45 silindir dökülmüş ve sırasıyla 7, 28 ve 56 gün boyunca test edilmiştir. RPB'nin davranışını analiz etmek bu çalışmanın temel amacıdır; yapı üzerinde stabiliteyi artırmanın gerekli olduğu durumlarda binanın yıkım faaliyetini en aza indirmek için hasarlı binalarda fiili kullanım için optimum uygulamasını eklemektir. Üç farklı derecelendirme için %2 ve %1,5 lif içeren numunelerin isimleri A, B, C ve D olarak adlandırılmıştır. B ve C numuneleri geri kalan iki numune kimliklerinden daha yüksek mekanik özelliğe sahip olduğu bulunmuştur. Numune C esas olarak kürlenmenin 28. gününde 39,4 MPa değerine ile daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olmuştur. Üç farklı derecelendirme için %1 fiber içeren numunelerin isimlendirilmesi E, F, ve G şeklindedir. Numune G, otoklav kürünün 28. gününde 41,2 MPa ile en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. Üç farklı derecelendirme için %0 fiber içeren numunelerin isimlendirilmesi H, J ve K şeklindedir. K numunesi 28. gün kür gününde söz konusu segmentte 49,5 MPa değerinde yüksek bir basınç dayanımı kaydetmiştir. Üç farklı derecelendirme için %0,5 fiber içeren numunelerin isimlendirilmesi L, M ve N şeklindedir. Numune N, 28. kürlenme gününde söz konusu segmentte 46,1 MPa ile en yüksek basınç dayanımı göstermiştir.

Chan ve Chu (2004) yaptıkları çalışmada silika dumanının, RPB matrisindeki çelik fiberin bağ mukavemeti, çekme enerjisi dahil olmak üzere bağ özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı koşullardaki çelik fiber çekme testinin deneysel sonuçları rapor edilmiştir. Karışım oranlarında %0 ila %40 arasında değişen çeşitli silis dumanı içerikleri kullanılmıştır. Çelik fiberin RPB matrisinden bağlanma özelliklerini ölçmek için fiber çekme testleri yapılmıştır. Silis dumanının eklenmesinin, özellikle fiber çekme enerjisinde, fiber-matris ara yüzey özelliklerini etkili bir şekilde artırdığı görülmüştür. Ayrıca deney programının koşulları göz önüne alındığında, bağ özellikleri açısından

optimal silis dumanı içeriğinin %20 ile %30 arasında olduğu sonucuna varılmıştır. Mikro yapısal inceleme, fiber çekme testi sonuçlarından elde edilen ara yüzey sertleştirme mekanizmasına ilişkin sonuçları doğrulamaktadır.

Jianzhong ve Wei (2008) yaptıkları çalışmada, ultra yüksek performanslı fiber takviyeli betonlar çimentonun %60'ının ultra ince endüstriyel atık tozu ile değiştirilmesiyle hazırlanmıştır. Farklı fiber hacim fraksiyonlarına sahip betonun dinamik mekanik davranışı, bölünmüş Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) aracılığıyla dört çeşit darbe modunda tekrarlanan sıkıştırma etkisi ve aynı zamanda iri agrega olmadan ve değişken lif içeriğiyle betonun davranışı üzerinde çalışmışlardır. Karışımın hazırlanmasında portland çimentosu, silika dumanı, ultra ince uçucu kül ve ultra ince cüruf kullanılmıştır. İri agregalı ve iri agregasız olmak üzere iki grup yapılmıştır. Toplamda altı adet karışım dizaynı yapılmıştır. Kullanılan çelik liflerin hacim oranı %0 ile %4 arasında değişmektedir. Numuneler çelik kalıplara yerleştirildikten sonra titreşimli tablada sıkıştırılmıştır. Normal şartlarda ve 60 gün kürleme yapılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımdaki sonuçlara göre iri agregasız ve %4 oranın lif içeriğine sahip olan numunenin en yüksek dayanımı verdiği görülmektedir. Sonuçlarda fiber hacim oranının artmasıyla statik mukavemetin, elastisite modülünün ve dayanıklılığın arttığı görülmüştür. Deneysel sonuçlar, darbe sürelerinin artmasıyla birlikte tepe gerilme ve elastik modülün azaldığını göstermektedir.

Ngo, Mendis ve Whittaker (2013) yaptıkları çalışmada beton silindirlerin yüksek hızlı darbe yüklemesi altındaki mukavemetini ve deformasyon kapasitesini Split Hopkinson Basınç Çubuğu test düzeneği kullanılarak araştırmak için yürütülen kapsamlı bir deneysel çalışmanın sonuçları rapor edilmektedir. Normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı beton ve ultra yüksek dayanımlı RPB dahil olmak üzere üç grubun beton numuneleri hazırlanmıştır. Beton numunelerin boyutları 50 mm uzunluğunda ve çapındadır. Numuneler %97 nemde ve 20 derece sıcaklıkta kür uygulanmıştır. Ultra yüksek dayanımlar elde etmek için ultra yüksek dayanımlı RPB'ye ısıyla kürleme uygulanmıştır. Isı kürü, betonun düzgün bir şekilde sertleştikten sonra normal basınçta ısıtılmasıyla (yaklaşık 90 °C) gerçekleştirilmiştir. Normal dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı beton için maksimum iri agrega boyutu 8 mm olarak tasarlanmıştır. Normal

dayanımlı beton için çimento, agrega, kum ve su kullanılmış ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılmamıştır. Yüksek dayanımlı beton dizaynında ise çimento, silis dumanı, agrega, kum, su ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Ultra yüksek dayanımlı RPB’de homojenliği arttırmak için kaba agregalar karışımdan kaldırılmıştır. Karışımda çimento, silis dumanı, silis tozu, agrega, kum, su ve akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada ultra yüksek dayanımlı RPB, çelik fiberler eklenmeden test edilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı RPB için su/ bağlayıcı oranı 0,25 olarak uygulanmıştır. Normal dayanımlı beton 32 MPa dayanım gösterirken yüksek dayanımlı beton 100 MPa değerinde kalmıştır. Bunun yanında RPB 160 MPa dayanıma sahip olmuştur. Gerilme hızı arttıkça tepe gerilme de artmaktadır. Daha düşük statik dayanıma sahip beton, daha yüksek statik dayanıma sahip betona göre daha yüksek gerilme oranı duyarlılığı sergilemektedir.

Alkhaly vd. (2022) yaptıkları araştırmada sentezlenmiş pirinç kabuğu külünün, düz RPB üretiminde dolgu maddesi olarak silis dumanı ve kuvarsit tozunun yerine alternatif puzolanik malzeme olarak kullanımını araştırmaktadır. Bu kapsamda basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, doğrudan çekme dayanımı, otojen büzülme ve su emme oranı değerlendirilmiştir. Ayrıca numunelerin dökümü sonrasında iki farklı kür yöntemi uygulanmıştır. Karışımda su/ bağlayıcı oranı 0,19 olarak kabul edilmiştir. Bağlayıcı ağırlığının %2,4ü olarak süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tip 1 portland çimentosu kullanılmıştır. Kuvars tozu ve kuvars kumu da karışım dizaynında uygun oranlarda kullanılmıştır. Sentezlenmiş pirinç kabuğu külünün içeriği %15, %20, %25, %30 ve %35 oranında kullanılmıştır. Silis dumanı içeriği ise sentezlenmiş pirinç kabuğu külünün oranına eş değerdir. Numuneler hazırlanırken sadece silis dumanı, silis dumanı ile sentezlenmiş pirinç kabuğu külü birlikte ve sadece sentezlenmiş pirinç kabuğu külünün kullanılması ile dizayn edilmiştir. Sonuçlar, sentezlenmiş pirinç kabuğu külünün ve kuvarsit tozunun 636 kg/m³’lük düşük çimento ağırlığına sahip kombinasyonunun, 28. günde 100 MPa’nın üzerinde bir RPB basınç dayanımı üretebildiğini göstermiştir. Ayrıca optimum %30 sentezlenmiş pirinç kabuğu külü ve %61 kuvarsit tozu oranının RPB özelliklerini diğer testlere göre daha fazla iyileştirdiği, RPB üretmek için uygulanan %35 sentezlenmiş pirinç kabuğu külünün ise yüksek basınç dayanımına sahip olduğu keşfedilmiştir.

Al-Tikrite ve Hadi (2018) yaptıkları çalışmada üç çeşit çelik lif (mikro düz çelik fiber, makro deforme çelik fiber ve atılmış lastiklerden geri kazanılmış çelik fiber) kullanarak bunların hibrit karışımını da ayrıca reçetelendirerek yirmi adet RPB kolon numunesi hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneleri eksenel eş merkezli, eksantrik ve eğilme yüklemeleri altında test etmişlerdir. Test sonuçları, nihai eksenel yükün ve buna karşılık gelen eksenel deformasyonun, özellikle mikro düz çelik fiber varlığında çelik fiberlerin eklenmesiyle etkili bir şekilde arttığını göstermiştir. Eğilme yüklemesi için makro deforme çelik fiber ve hibrit karışımın dahil edilmesi ile karşılık gelen referans numunelerle karşılaştırıldığında numunelerin enerji emilimini sırasıyla %470 ve %453 artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Test sonuçları, makro deforme çelik fiberlerin farklı yükleme koşulları altında RPB'nin davranışını geliştirmek için umut verici bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Sultan ve Alyaseri (2020) yaptıkları çalışmada RPB, yüksek basınç dayanımı oranlarına ulaşan iyi bilinen bir kompozit olmasına rağmen, yangın sırasındaki davranışı hala sorgulanabilir durumda olduğunu düşünmüşlerdir ve bu çalışma ile, RPB'lerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki mekanik özelliklerini araştırmışlardır. RPB'ler yüksek miktarlarda çimento, silika, kuvars ve ince agregalar ile çok az miktarlarda su (su/çimento oranı 0,25'ten az) kullanılarak hazırlanmıştır. Test, kontrol karışımı ve dört test karışımı (cam, çelik, polipropilen içeren RPB ve çelik ve polipropilen fiberlerden oluşan bir hibrit) üzerinde gerçekleştirilmiştir. RPB'ler, 25 ila 800 derece arasındaki farklı sıcaklıklarda orijinal ve artık mekanik davranışı ve parçalanmayı açıklamak için analiz edilmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra numuneler basınç, eğilme ve dolaylı çekme mukavemetleri açısından test edilmiştir. Görünüm ve renk değişimi, dökülme, kütle kaybı oranı ve ultrases geçiş hızı da incelenmiştir. RPB karışımları için basınç ve çekme mukavemetleri ve çelik fiberli RPP ve hibrit RPB için eğilme mukavemeti, numuneler 200 dereceye ısıtıldığında kademeli olarak artmıştır. Ancak sıcaklık yükseldikçe tüm karışımların dayanımı düşmeye başlamıştır. Hibrit elyafı RPB, 800 derecede orijinal basınç, çekme ve eğilme mukavemetinde yüksek bir kayba sahip olmasına rağmen, bu RPB, diğer RPB türleriyle karşılaştırıldığında dağılma direnci ve mekanik özellikler açısından en iyi performansı göstermiştir. Ayrıca tüm

RPB karışımları, sıcaklık artışıyla birlikte parçalanma veya şüpheli hale gelinceye kadar kütle kaybında artış ve ultrases geçiş hızında azalma göstermiştir.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında farklı mineral katkılarla birlikte iki farklı lif tipinin belirli oranlarda karıştırılması ile RPB davranışı incelenmiştir. Çalışmada oluşturulan on altı serinin yarısı standart su küründe yarısı ise 80°C buhar küründe 24 saat, standart su küründe 28 gün bekletilmiştir. Sertleşmiş beton deneyleri, ultrases geçiş hızı deneyleri ve elektriksel özdirenç deneyleri yapılmıştır. Kullanılan malzemeler ve yapılan deneyler hakkında ayrıntılı bilgiler bu bölümde verilmiştir.

3.1 Kullanılan Malzemeler

Normal betonlarda kullanılan çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin, kum, hiper akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Çalışma içerisinde yapılan tüm karışımlarda ÇİMSA Afyon Çimento Fabrikası'nın ürettiği olduğu TS EN 197-1 (2012)'e uygun CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Beton üretimlerinde kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerine ait sonuçlar Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Çimentonun Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri.

Özellik	Değer
Özgül Ağırlık	3,11 g/cm ³
Özgül Yüzey	3600 – 3900 cm ² /g
Priz Başlangıcı	150 – 180 dakika
Priz Sonu	190 – 220 dakika
Hacim Sabitliği	1,0 mm
Kıvamlılık Suyu (%)	% 26 - 27
2 Günlük Basınç Dayanımı	27 - 29 MPa
28 Günlük Basınç Dayanımı	51 - 53 MPa

Çizelge 3.1 (Devam) Çimentonun Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal Bileşim	Değer, %
SiO ₂	19,0 – 20,0
Al ₂ O ₃	4,0 – 5,0
Fe ₂ O ₃	3,0 – 3,5
CaO	62,0 – 64,0
MgO	1,0 – 2,0
SO ₃	3,20 – 3,80
Na ₂ O	0,2 – 0,4
K ₂ O	0,5 – 0,7
Cl ⁻	0,02 – 0,05
Kızdırma Kaybı	3,0 – 4,5
Çözünmeyen Kalıntı	0,3 – 0,6

3.1.2 Uçucu Kül

Beton üretimlerinde Çayırhan Termik Santraline ait uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu külün özgül ağırlık değeri 2.1 g/cm³ ve özgül yüzeyi 2935 cm²/g olarak belirlenmiştir. UK'nin XRF analiz sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir. Buna göre UK'nin (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) toplamı %89,1 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 3.2 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal Bileşim	Değer, %
SiO ₂	58,30
Al ₂ O ₃	19,80
Fe ₂ O ₃	11,00
CaO	2,26
MgO	3,54
SO ₃	0,644
Na ₂ O	0,199
K ₂ O	1,82
Cl ⁻	0,0105
Kızdırma Kaybı	1,95

3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Beton üretimlerinde Karadeniz Ereğli Demir Çelik Fabrikası'na ait öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu Bolu Çimento'nun Ereğli öğütme tesisinden temin edilmiştir. Özgül ağırlık değeri 2,86 g/cm³, özgül yüzeyi 4521 cm²/g olarak belirlenmiştir. YFC'nin XRF analizi sonuçları Çizelge 3.3'te verilmiştir. Buna göre YFC'nin (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ + CaO) toplamı %87,98 olarak elde edilmiştir. TS 802-2016'ya göre (%70) puzolanik özellik göstermektedir.

Çizelge 3.3 Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal Bileşim	Değer, %
SiO ₂	35,60
Al ₂ O ₃	11,70
Fe ₂ O ₃	0,88
CaO	39,80
MgO	5,23
MnO	0,91
Na ₂ O	0,41
K ₂ O	1,21
TiO ₂	1,35
Cl ⁻	0,009
S	0,55

3.1.4 Silis Dumanı

Beton üretimlerinde Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. firmasının atığı olan silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanının özgül ağırlığı 2,2 g/cm³, BET değeri 13,02 m²/g olarak belirlenmiştir. Silis dumanına (SD) ait kimyasal özellik deney sonuçları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Buna göre SD'nin (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) toplamı %81,52 olarak elde edilmiştir. TS 802-2016'ya göre (%70) puzolanik özellik göstermektedir.

Çizelge 3.4 Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal Bileşim	Değer, %
SiO ₂	80,22
Al ₂ O ₃	0,84
Fe ₂ O ₃	0,46
CaO	1,39
MgO	6,55
Na ₂ O	1,45
K ₂ O	2,23
SO ₃	1,04
ZnO	0,26
Cr ₂ O ₃	1,69
F	0,27
Cl ⁻	0,027
Kızdırma Kaybı	3,35

3.1.5 Metakaolin

Beton üretimlerinde kullanılan metakaolinin özgül ağırlığı 2,54 g/cm³ ve özgül yüzeyi 12882 cm²/g olarak belirlenmiştir. Metakaoline ait XRD sonuçları çizelge 3.5'te verilmiştir. Buna göre MK'nın (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) toplamı %96,5 olarak elde edilmiştir. TS 802-2016'ya göre (%70) puzolanik özellik göstermektedir.

Çizelge 3.5 Metakaolinin Kimyasal Özellikleri.

Kimyasal Bileşim	Değer, %
SiO ₂	53,00
Al ₂ O ₃	43,00
Fe ₂ O ₃	0,50
CaO	0,50
MgO	0,40
Na ₂ O + K ₂ O	0,55
TiO ₂	1,00
Kızdırma Kaybı	2,00

3.1.6 Kum

Beton üretimlerinde kullanılan kum Afyon'da yerel bir firmadan temin edilmiştir. İncelik modülü 3,16 ve su emme değeri %1,235 olarak belirlenmiştir. Özgül ağırlığı ise $2,65\text{g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Kuvars kumunun granülometrik analizi Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Kuvars kumunun granülometrik analizi.

Elek boyutları (mm)	Elekten geçen malzeme miktarı, %
	Kırma Kum (0-4 mm)
1	100
0.5	60,4
0.25	19,6
0.125	3,9
0.063	0

3.1.7 Hiper Akışkanlaştırıcı

Beton üretimlerinde hiper akışkanlaştırıcı (HA) beton katkısı kullanılmıştır. Bu katkının kimyasal yapısı polikarboksilik eter esaslı yeni nesil beton katkısıdır. Yaklaşık %25-30 oranında su azaltırken aynı zamanda gerekli işlenebilirliği de sağlamaktadır. Beton üretimlerinde kullanılan HA katkısının özellikleri Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 Hiper Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesinin Özellikleri.

Özellik	Değer
Yoğunluk	$1,083 \pm 0,02 \text{ kg/L}$
pH	4,0 – 5,0
Alkali Miktarı (Na_2O ile eşdeğer)	Maks. %3
Klor Miktarı	<0,1 %

3.1.8 Çelik Lif

Karışımında kullanılan çelik lifin özgül ağırlığı $7,8 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Çelik lifler 0,75mm kalınlığında ve 3cm boyundadır. İki ucu da kıvrılmış çelik lif kullanılmıştır. Yapılan karışım hacmine göre kullanılan lif Resim 3.1'de verilmiştir.



Resim 3.1 Çelik lif.

3.1.9 Polipropilen Lif

Fiber sınıfı EN 14889-2 Sınıf II olan polipropilen lifin özgül ağırlığı 0.91 g/cm^3 'tür. Çapı 0.72 mm olan lifin uzunluğu 25 mm olarak ölçülmüştür. Çekme gerilmesi 550 MPa, Elastisite modülü 8,5 GPa ve erime sıcaklığı 160 derecedir. Yapılan karışım hacmine göre kullanılan lif Resim 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.2 Polipropilen lif.

3.2 Beton Karışım Oranları

Yapılan tez çalışmasında polipropilen ve çelik lifli RPB olmak üzere iki farklı tipte beton üretilmiştir. Üretilen beton serilerinin hepsinde aynı miktarda silis dumanı kullanılmıştır. Mutlak hacim hesabına göre birim hacim ağırlıkları bilinen malzemelerin karışım dizaynı Çizelge 3.8’de verilmiştir. Polipropilen ve çelik lif içeren betonlarda kontrol numunesi olarak silis dumanının yanında farklı bir mineral katkı kullanılmamıştır. Polipropilen lif katkılı RPB serilerinde kullanılan mineral katkılar uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin olarak belirlenmiş ve isimlendirmeler sırasıyla PPL-K, PPL-UK, PPL-YFC, PPL-MK olarak adlandırılmıştır. Çelik lif için de aynı seriler üretilmiş ve üretilen seriler ÇL ile adlandırılırken yapılan bütün RPB serilerine iki farklı kür işlemi de uygulanmıştır. Buhar kürü ve standart kür olarak uygulanan kür işlemi isimlendirmede sırasıyla B ve S olarak belirtilmiştir. RPB serilerinin her birinde toplam 1080 gram bağlayıcı toz malzeme kullanılmıştır. Tüm serilerin su/bağlayıcı oranı 0,2 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.8 RPB karışım oranları, kg/m³.

Karışımlar	Çimento	Su	SD	UK	YFC	MK	HA	ÇL	PPL	Kum
PPL-K	920	216	160	-	-	-	37,80	-	4,55	1002,25
PPL-UK	800	216	160	120	-	-	37,80	-	4,55	951,78
PPL-YFC	800	216	160	-	120	-	37,80	-	4,55	992,02
PPL-MK	800	216	160	-	-	120	37,80	-	4,55	978,01
ÇL-K	920	216	160	-	-	-	37,80	156	-	962,50
ÇL-UK	800	216	160	120	-	-	37,80	156	-	912,03
ÇL-YFC	800	216	160	-	120	-	37,80	156	-	952,27
ÇL-MK	800	216	160	-	-	120	37,80	156	-	938,26

3.3. Beton Dökümü ve Üretilen Numune Tipleri

RPB serileri olarak üretilen iki farklı lif üzerine dizayn edilmiş reçeteler hazırlanırken hassas ölçümler yapılmıştır. Karışımın hazırlanması aşamasında mikser kullanılmıştır. Karıştırma kabına öncelikle kuru malzemeler tartılıp eklenmiş ve 62,5 dev/min ayarında 90 saniye karıştırılmıştır. Homojen karışım elde edildiğinde ise karışım suyunun belirli kısmı ile karıştırılan hiper akışkanlaştırıcı katkı eklenerek 60 saniye aynı ayarda karıştırılmaya devam edilmiştir. Kalan karışım suyu da karışıma eklenerek 150 saniye

boyunca 125 dev/min ayarında karıştırılmıştır. En son lif katkıları eklenerek 60 saniye daha karıştırılmıştır. Eklenen çelik lif katkıları Resim 3.3'te, polipropilen lif ise Resim 3.4'te gösterilmiştir.



Resim 3.3 RPB serilerine karışım sırasında eklenen çelik lif.



Resim 3.4 RPB serilerine karışım sırasında eklenen polipropilen lif.

Homojen karışım elde edildiğinde karışım yağlanan 40x40x160 mm kalıplara yerleştirilmiştir (Resim 3.5).



Resim 3.5 Reaktif pudra betonu kontrol numune serisi.

Her reçeteden 6 adet numune üretilmiştir. Kalıplara yerleştirilen numuneler oda koşullarında 24 saat beklediği kalıptan çıkarılmıştır. Numunelerin 3'er tanesi 24 saat 80°C buhar küründe beklemiştir (Resim 3.6).



Resim 3.6 Buhar kürü uygulanan numuneler.

24 saat sonra alınarak 28 gün standart su kürüne alınmıştır. Diğer 3'er numune ise 28 gün boyunca standart kür havuzunda bekletilmiştir (Resim 3.7).



Resim 3.7 Standart kür uygulanan numuneler.

Bu şekilde üretilen 24 numuneye 1 gün buhar kürü ve ardından 28 gün standart kür, diğer 24 numuneye ise sadece standart kür uygulanmıştır. Kür işlemi sonunda alınan numuneler yapılacak olan deneyler için hazırlanmıştır.

3.4 Yapılan Deneyler

Üretilen RPB serileri üzerinde fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneyleri yapılmıştır ve bu deneyler ile ilgili bilgiler ayrıntılı olarak bu bölümde sunulmuştur.

3.4.1 Ağırlıkça Su Emme Deneyi

Ağırlıkça su emme deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelere gerekli kür işlemleri uygulandıktan sonra ağırlıkça su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerde ağırlıkça su emme miktarları hesaplanırken numunelerin suya doymun ağırlıkları ve etüv kurusu ağırlıkları tespit edilmiştir. RPB serilerinde ağırlıkça su emme miktarları, suya doymun ağırlık ile etüv kurusu ağırlığın farkının etüv kurusu ağırlığa oranını belirleyerek bulunmaktadır. Bu oranın da yüzdesi ağırlıkça su emme miktarlarını vermektedir. Numunelerin etüv kurusu hali Resim 3.8’de verilmiştir.



Resim 3.8 Etüv kurusu halindeki numuneler.

3.4.2 Porozite Deneyi

Porozite tayini için gerekli deneyler 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır (Resim 3.9). RPB numunelerine kür işlemi uygulandıktan sonra numunelerin suya doygun ağırlıkları alınmıştır. Daha sonra suda içindeki ağırlıkları ve etüv kurusu ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin suya doygun ve etüv kurusu ağırlıklarının farkının, yine suya doygun ağırlıkları ve su içindeki ağırlıkları farkına oranı bulunmuştur. Bu oranın yüzdesi bize porozite değerini vermektedir.



Resim 3.9 Numunelerin su içerisindeki ağırlığının ölçümü.

3.4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. RPB numunelerine kür işlemleri uygulandıktan sonra ultrases geçiş hızı deneyleri TS EN 12504-4'ye (2021) göre gerçekleştirilmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı Resim 3.10'da gösterilmiştir. Deneyin daha hassas şekilde yapılabilmesi ve numunelerin yüzeyindeki boşlukların kapatılması amacıyla numune yüzeyine gres yağı sürülmüştür. Geçiş hızının tayini için gerekli olan numunelerin kenar uzunlukları da yine hassas ölçüm yapılabilmesi amacıyla kumpas ile ölçülmüştür. Ultrases cihazından alınan mikro saniye cinsinden zaman ifadesi, numunelerin kenar uzunluğuna bölünerek ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir.



Resim 3.10 Ultrases geçiş hızı deneyi.

3.4.4. Eğilme Dayanımı Deneyi

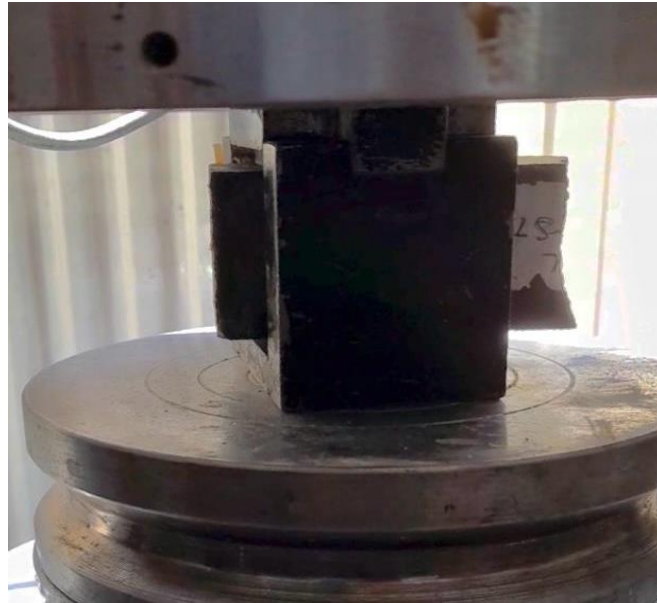
Eğilme dayanımı deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. RPB numunelerine kür işlemleri uygulandıktan sonra eğilme dayanımı deneyleri TS EN 12372'e göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyinin yapılışı Resim 3.11'de gösterilmiştir.



Resim 3.11 Eğilme dayanımı deneyi.

3.4.5 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. RPB numunelerine kür işlemi uygulandıktan sonra basınç dayanımı deneyleri TS EN 12390-3 (2021)'e göre gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyinin yapılışı Resim 3.12'de gösterilmiştir.



Resim 3.12 Basınç dayanımı deneyi.

3.4.6 Elektriksel Özdirenç Deneyi

Elektriksel özdirenç deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. RPB numunelerine kür işlemi uygulandıktan sonra ve numunelerin suya doygun olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde iki adet bakır levha, numunelerin sabitlenmesini sağlayan mekanik kelepçe, iki adet sabitleme takozu, akım ve voltaj değerlerini gösteren bir güç kaynağı bulunmaktadır. Numuneler bakır levhalara arada nemli ince bir bez kullanılarak yerleştirilmiştir. Levhalara bağlanan bakır çubukların biri artı kutba diğeri de eksi kutba bağlanarak güç kaynağı çalıştırılmış ve sisteme 60 V verilerek numunelerin çektiği akım değerleri tespit edilmiştir. Deneyin yapılışına ait görüntüler Resim 3.13'te gösterilmiştir.



Resim 3.13 Elektriksel özdirenç deneyi.

Deney sonucu elde edilen verilere göre Denklem 3.1 yardımıyla numunelerin özdirenç (ρ) değerleri hesaplanmıştır.

$$\rho = R \times \frac{S}{L} \quad (3.1)$$

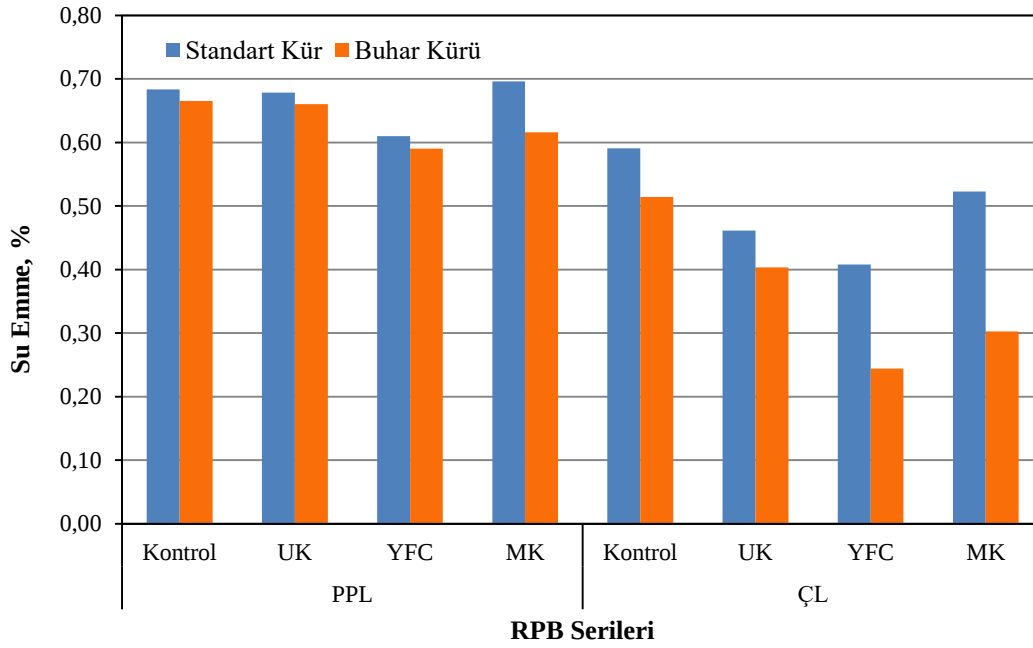
Denklemden ρ : elektriksel özdirenci (Ωcm), L : bakır levhalar arası mesafeyi (cm), R : ölçülen direnci (Ω) ve S : elektrot iletken alanını (cm^2) ifade etmektedir (Boğa ve Gürer 2017).

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Ağırlıkça Su Emme Deneyi Sonuçları

RPB betonu serilerine uygulanan ağırlıkça su emme deneyi sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir. Buna göre RPB serilerinde kür farkı gözetmeden bakıldığında ağırlıkça su emme yüzdeleri en yüksek %0,68 ile standart kür uygulanmış olan PPL-Kontrol serisinden, en düşük %0,24 ile buhar kürü uygulanmış olan ÇL-YFC serisinden elde edilmiştir. Standart kürde ağırlıkça su emme yüzdeleri en yüksek %0,7 ile PPL-MK serisinden, en düşük %0,41 ile ÇL-YFC serisinden elde edilmiştir. Buhar küründe ise ağırlıkça su emme yüzdeleri en yüksek %0,67 ile PPL-Kontrol serisinden, en düşük %0,24 ile ÇL-YFC serisinden elde edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında buhar kürü uygulaması ile ağırlıkça su emme yüzdelerinde düşüş gözlemlenmiştir. Buhar kürü su geçirgenliğini azaltmakta önemli rol oynamıştır. PPL ve ÇL serileri karşılaştırıldığında ise ÇL katkılı betonların su geçirgenliği daha düşüktür. Çelik lifler, polipropilen liflere göre betonla daha iyi bir bağ kurmuştur. Yüksek fırın cürufu kullanımının ağırlıkça su emme yüzdesinde, diğer mineral katkılara kıyasla önemli ölçüde azalmaya sebep olduğu da görülmektedir. Bu durum yüksek fırın cürufunun pozolanik aktivitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir.

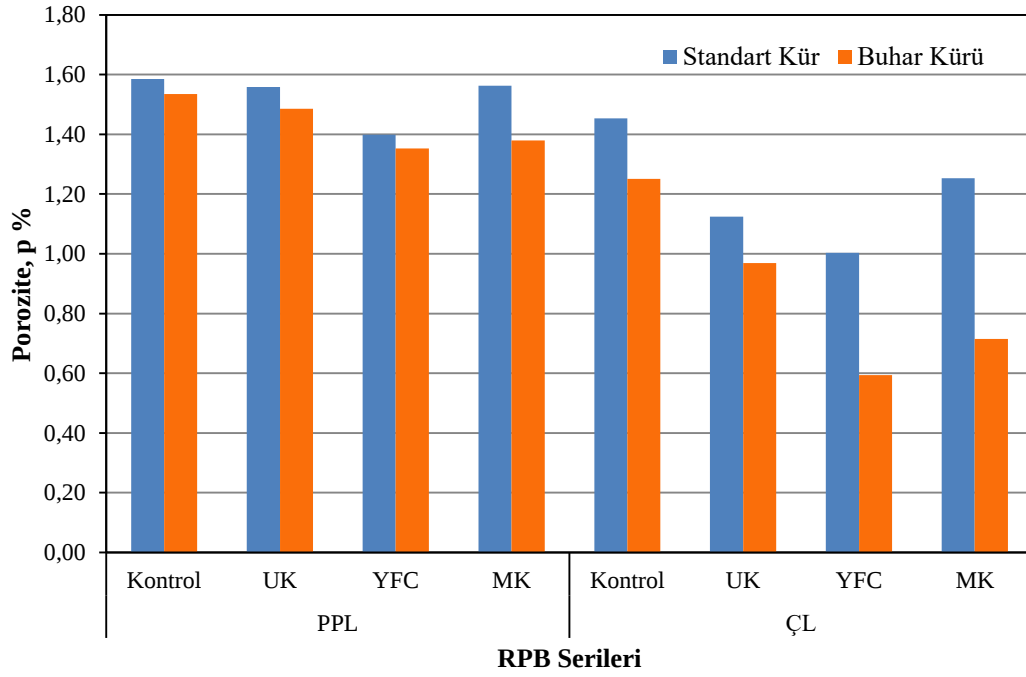
Wang vd. (2023) yaptıkları çalışmada buhar kür uygulamasının betonda dayanıklılığı ve mekanik özellikleri iyileştirdiği, bu yöntemin yaygın olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile kullanıldığı belirtilmiştir. Özellikle, mineral katkı maddeleri kullanılarak elde edilen numunelerde buhar kürünün betonun mikro yapısını ve basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Mineral katkıların kullanımı betondaki geçirimsizliği azaltmaktadır.



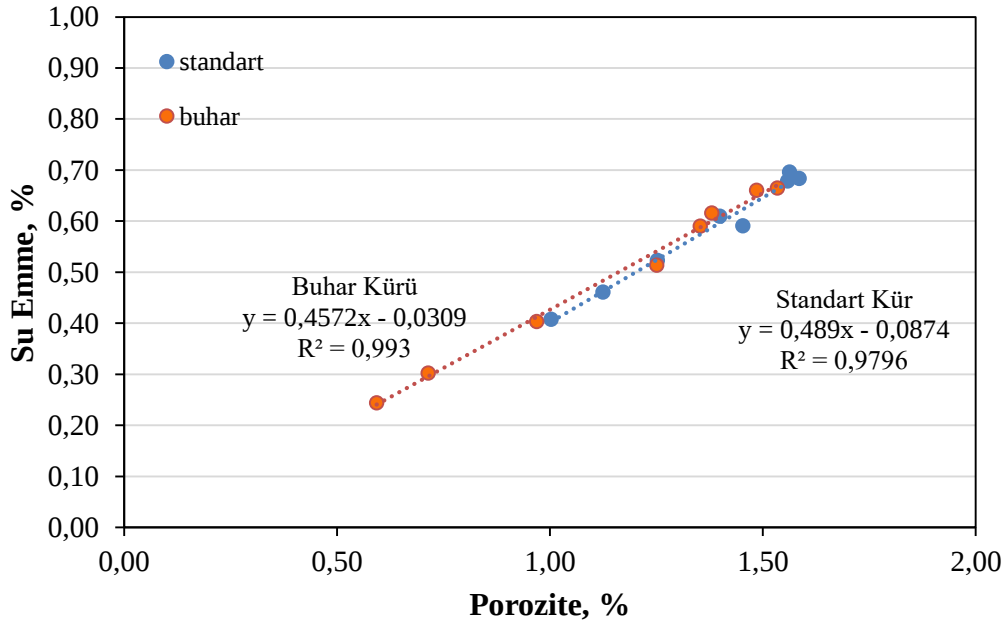
Şekil 4.1 Ağırlıkça su emme yüzdelerinin beton serilerine göre değişimi.

4.2 Porozite Deneyi Sonuçları

RPB betonu serilerine uygulanan porozite deneyi sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de görülebileceği gibi RPB serilerinde kür farkı gözetmeden bakıldığında porozite değerleri en yüksek %1,59 ile standart kür uygulanmış olan PPL-Kontrol serisinden, en düşük %0,59 ile buhar kürü uygulanmış olan ÇL-YFC serisinden elde edilmiştir. Standart kürde porozite değerleri en yüksek %1,59 ile PPL-Kontrol serisinden, en düşük %1,0 ile ÇL-YFC serisinden elde edilmiştir. Buhar küründe ise porozite değerleri en yüksek %1,53 ile PPL-Kontrol serisinden, en düşük %0,59 ile ÇL-YFC serisinden elde edilmiştir. Uygulanan buhar kürü ile porozite yüzdesindeki değerlerin azaldığı görülmektedir. Buhar kürü betonun mikro yapısını daha yoğun bir hale getirerek poroziteyi azaltmaktadır ve beton dayanıklılığını da artırmaktadır. Buhar kürünün betonun mikro yapısını yoğunlaştırdığı ve poroziteyi azalttığı birçok çalışmada belirtilmiştir. Setiawan vd. (2023) yaptıkları çalışma incelendiğinde bu yöntemin kullanılmasıyla yüksek sıcaklık ve nem ortamında betonun daha hızlı hidrasyon gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu sebeple daha dayanıklı ve düşük poroziteli bir yapı olduğu da anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2 Porozite değerlerinin beton serilerine göre değişimi.



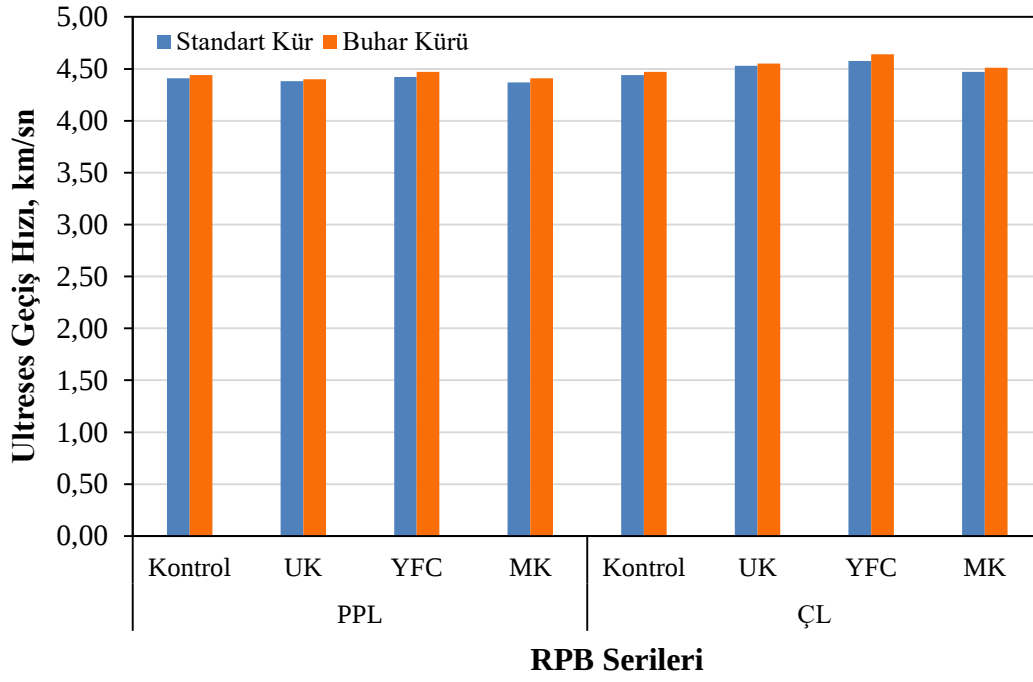
Şekil 4.3 Porozite ve ağırlıkça su emme arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.

Porozite değerleri genel olarak incelendiğinde ağırlıkça su emme değerleri ile aralarında bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Porozite değerleri ve ağırlıkça su emme deneyi sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir. Beton numunelerinde ağırlıkça su emme değerleri

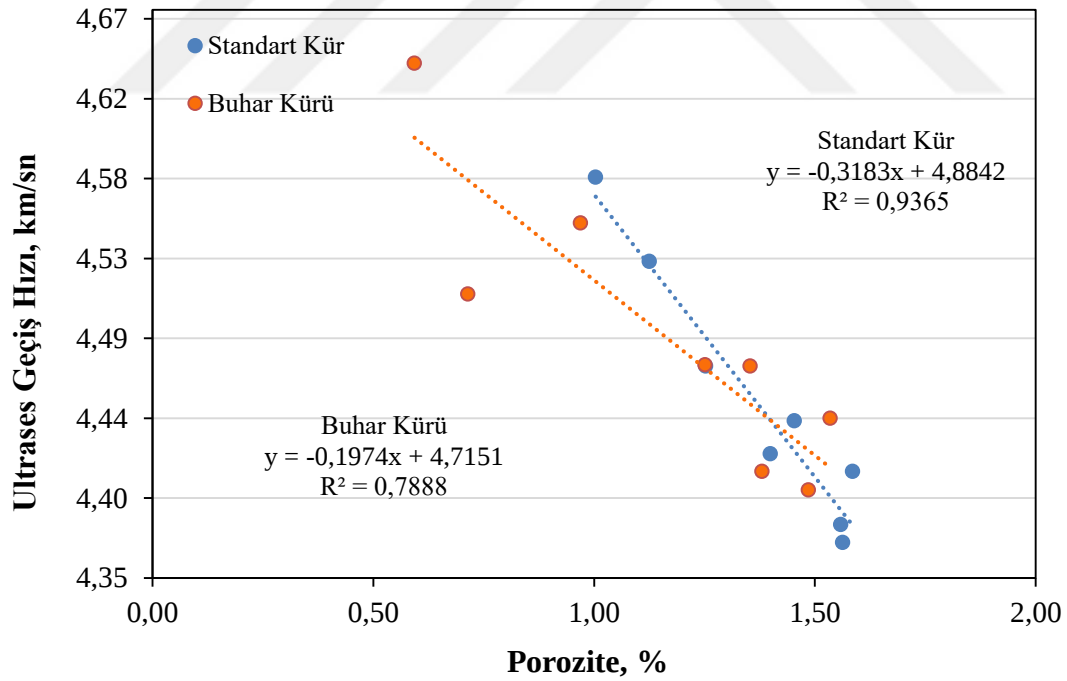
artış gösterdikçe porozite değerleri de artmaktadır. Porozite ve su emme değerleri arasında doğrusal bir ilişki vardır.

4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

RPB betonu serilerine uygulanan ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'te görülebileceği gibi RPB serilerinde kür farkı gözetmeden bakıldığında ultrases geçiş hızı değerleri en yüksek 4,64 ile buhar kürü uygulanmış olan ÇL-YFC serisinden, en düşük 4,37 ile standart kür uygulanmış olan PPL-MK serisinden elde edilmiştir. Standart kürde ultrases geçiş hızı değerleri en yüksek %4,58 ile ÇL-YFC serisinden, en düşük 4,37 ile PPL-MK serisinden elde edilmiştir. Buhar küründe ise ultrases geçiş hızı değerleri en yüksek 4,64 ile ÇL-YFC serisinden, en düşük 4,40 ile PPL-UK serisinden elde edilmiştir. Standart kür ve buhar kür yöntemlerinin ultrases geçiş hızları arasında büyük bir fark görülmemektedir. Bu durum literatürdeki bazı çalışmalarda belirtilen, buhar kürünün erken yaş dayanımını artırmasına rağmen uzun vadede mikroyapısal özelliklerde belirgin bir fark yaratmamasıyla uyumludur. İyiliksever (2014) yaptığı çalışmada boşluk oranı artan betonlarda dayanımın düşeceğini, ses dalgalarının geçişinde engel oluşturarak geçiş yolunun uzaması ile birlikte ultra ses geçiş hızının da düşmesine sebep olduğunu ortaya koymuştur. Daha detaylı yorum yapabilmek için ultrases geçiş hızı ve porozite deneyleri sonuçları arasındaki ilişki incelenmiştir. Ultrases geçiş hızı ve porozite deneyinin ilişkisi Şekil 4,5'te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi porozite değeri arttıkça ultrases geçiş hızında azalma olmaktadır.



Şekil 4.4 Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarının beton serilerine göre değişimi.

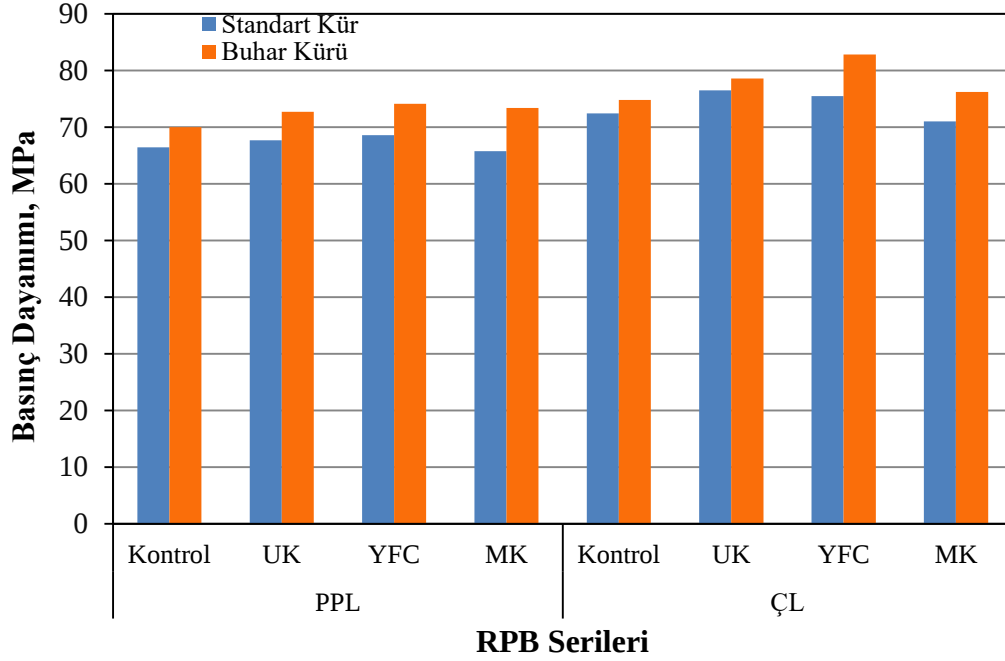


Şekil 4.5 Porozite ve ultrases geçiş hızı arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.

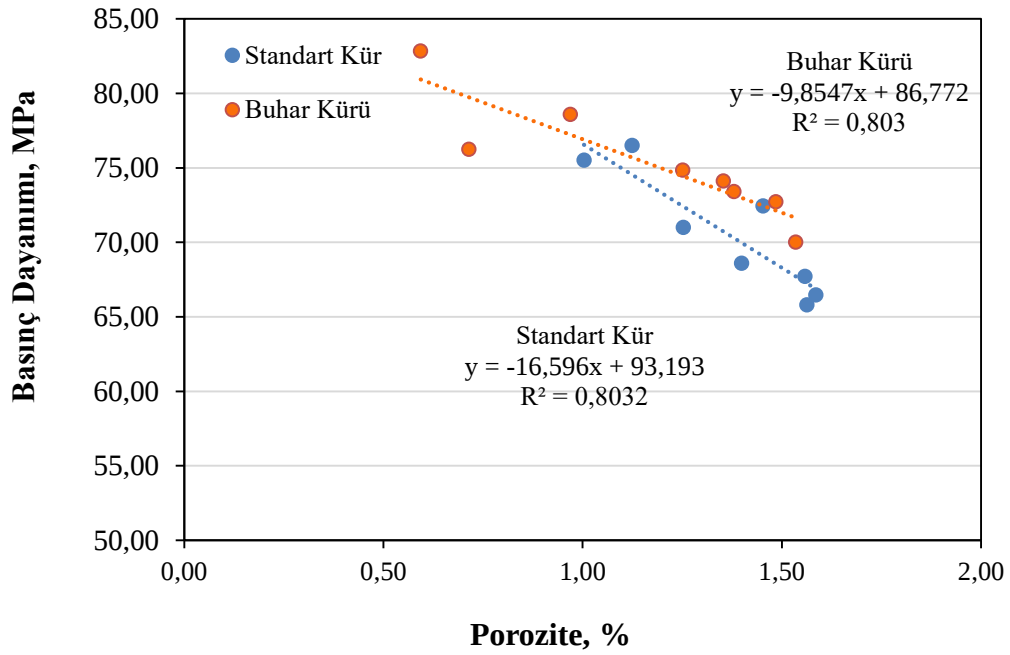
4.4 Basınç Dayanımı Sonuçları

RPB betonu serilerine uygulanan basınç dayanımı deneyi sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir. Buna göre standart kür uygulanan numunelerden 65 ile 75 MPa değerleri arasında basınç dayanımları elde edilmiştir. Buhar kürü uygulanan numunelerden ise 70 ile 83 MPa arasında basınç dayanımları elde edilmiştir. Standart kür işleminde 76,50 MPa ile en yüksek basınç dayanımı değeri ÇL-UK numunesinden, en düşük basınç dayanımı değeri 65,79 MPa ile PPL-MK numunesinden elde edilmiştir. Buhar kürü işleminde 82,84 MPa ile en yüksek basınç dayanımı değeri ÇL-YFC numunesinden, en düşük basınç dayanım değeri 70,02 MPa ile PPL-Kontrol numunesinden elde edilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde standart kür uygulanan numunelerin buhar kürü uygulanan numunelerden düşük değerlerde basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Buhar kürü uygulamasının mineral katkıların pozolanik aktivitesini artırdığı ve mikro yapıda gelişen faz yapısının mukavemet değerlerini artırdığı değerlendirilmektedir. Erdoğan ve Erdem (2002) yaptıkları çalışmada normal betonda buhar kürünün basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelenmiş ve buhar kürünün betonun dayanımını artırdığı bulunmuştur. Standart kür numunelerinde ise mineral katkıları karşılaştırıldığında uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun basınç dayanımına etkisi hemen hemen yakındır. Buhar kürü uygulanan numunelerde ise yüksek fırın cürufunun kullanıldığı karışım serisi en yüksek basınç dayanımını sağlamıştır. İki farklı kürde de mineral katkı kullanılan numuneler kontrol numunesinden yüksek dayanım göstermiştir. Çimentonun belli miktarının yerine kullanılmış olan mineral katkıları basınç dayanımında olumlu sonuç vermiştir. Lif katkıları karşılaştırıldığında ise çelik lifli numuneler polipropilen lifli numunelere göre daha yüksek basınç dayanımı sağlamışlardır (Şekil 4.7). Buna göre porozite arttıkça basınç dayanımı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Betonun porozite değeri ne kadar düşük olursa dayanım da o kadar yüksek olacaktır. Şekil 4.3 incelendiğinde porozite ve ağırlıkça su emme değerleri arasındaki doğru orantı görülmektedir. Bu sebeple basınç dayanımı ve porozite arasındaki ilişki, basınç dayanımı ve ağırlıkça su emme deneyi sonuçları arasındaki ilişki ile benzerlik göstermektedir. Şekil 4.8’de ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buna göre ultrases geçiş hızı arttıkça basınç dayanımının da artış gösterdiği görülmektedir. Dayanımı yüksek olan numunenin boşluk oranı azdır. Boşluk

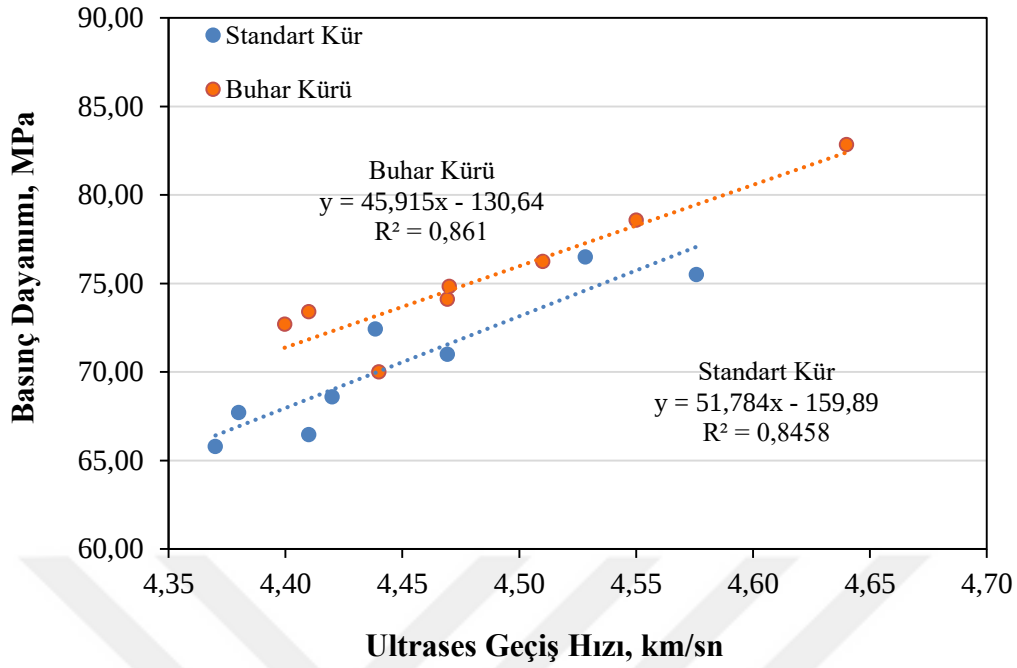
oranının az olduğu ve daha yoğun bir yapı olduğu takdirde ultrases geçiş hızı da artmaktadır.



Şekil 4.6 Basınç dayanımı değerlerinin beton serilerine göre değişimi.



Şekil 4.7 Porozite ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.

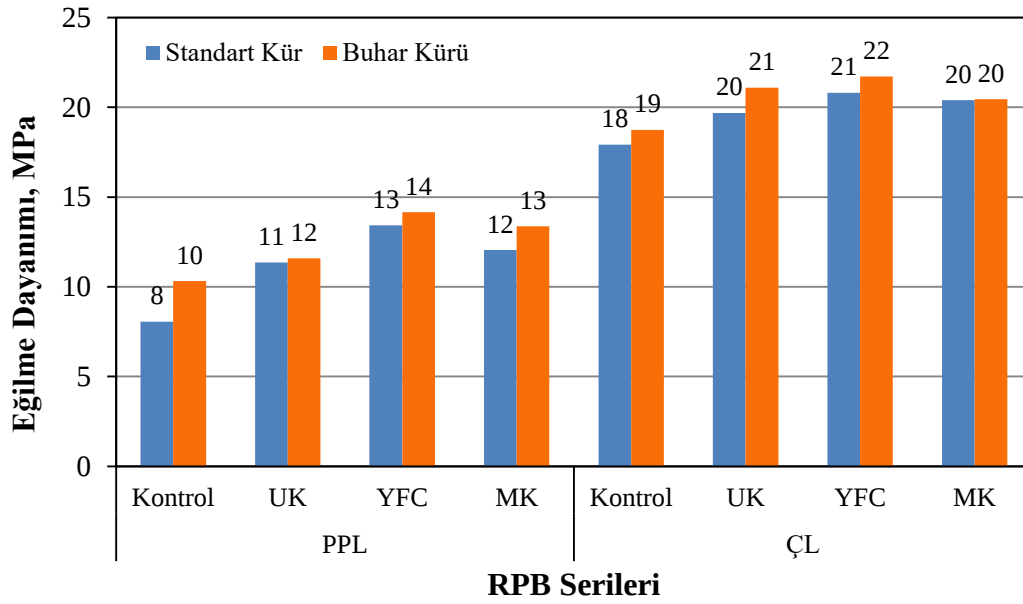


Şekil 4.8 Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.

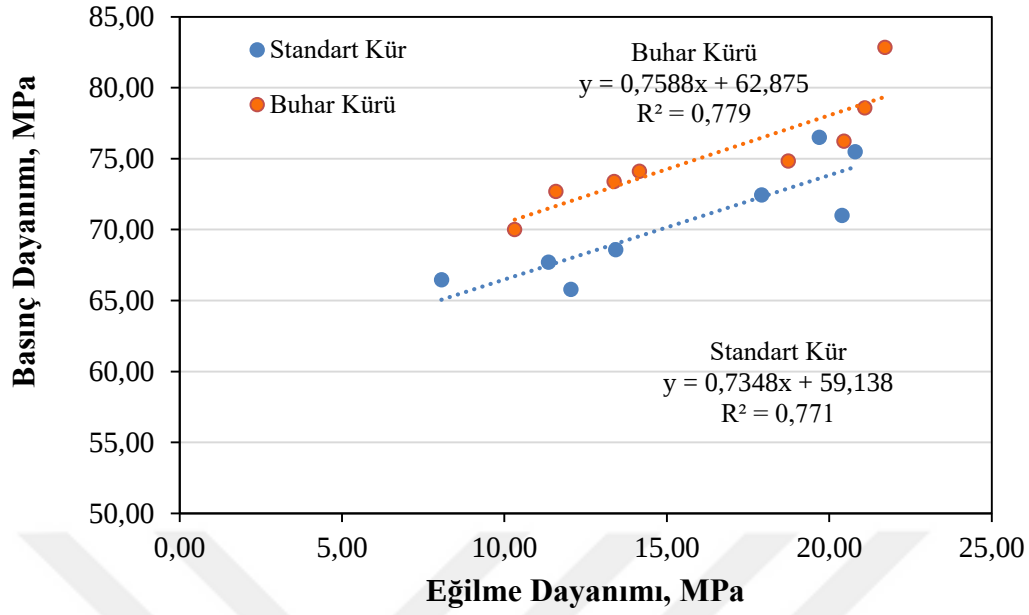
4.5 Eğilme Dayanımı

RPB betonu serilerine uygulanan eğilme dayanımı deneyi sonuçları Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde standart kür uygulanan numunelerden 8 ile 21 MPa değerleri arasında eğilme dayanımları elde edilmiştir. Bu sonuçlar genel olarak basınç dayanımı değerleri ile uyum göstermektedir. Buhar kürü uygulanan numunelerden ise 11 ile 22 MPa arasında eğilme dayanımları elde edilmiştir. Standart kür işleminde 20,80 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı değeri ÇL-YFC numunesinden, en düşük eğilme dayanımı değeri 8,06 MPa ile PPL-Kontrol numunesinden elde edilmiştir. Buhar kürü işleminde 21,71 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı değeri ÇL-YFC numunesinden, en düşük eğilme dayanım değeri 10,31 MPa ile PPL-Kontrol numunesinden elde edilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde standart kür uygulanan numunelerin buhar kürü uygulanan numunelerden düşük değerlerde eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Uygulanan buhar kürü mineral katkıların puzolanik aktivitesini arttırmış ve yüksek eğilme dayanımı sağlamıştır. Standart kür numunelerinde ise mineral katkılar karşılaştırıldığında uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufunun basınç dayanımına etkisi hemen hemen yakındır. Buhar kürü uygulanan numunelerde ise yüksek fırın

cürufunun kullanıldığı karışım serisi en yüksek basınç dayanımını sağlamıştır. İki farklı kürde de mineral katkı kullanılan numuneler kontrol numunesinden yüksek dayanım göstermiştir. Çimentonun belli miktarının yerine kullanılmış olan mineral katkılar basınç dayanımda olumlu sonuç vermiştir. Çelik lif numuneleri, polipropilen lifli numunelerle karşılaştırıldığında ise genel olarak çelik lif numuneleri yüksek değerler göstermiştir. Şekil 4.10'da basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde eğilme dayanımı değerleri arttıkça basınç dayanımı değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir. Bunun yanında çelik lif ve polipropilen lif serileri karşılaştırıldığında eğilme dayanımında çelik lifin etkisi gözle görülür şekilde fark yaratmıştır. Fakat basınç dayanımında aynı performansı gösterememiştir. Bunun sebebi ise çelik liflerin yüksek kapasitedeki çekme mukavemetidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde de bu sonuç doğrulanmaktadır.



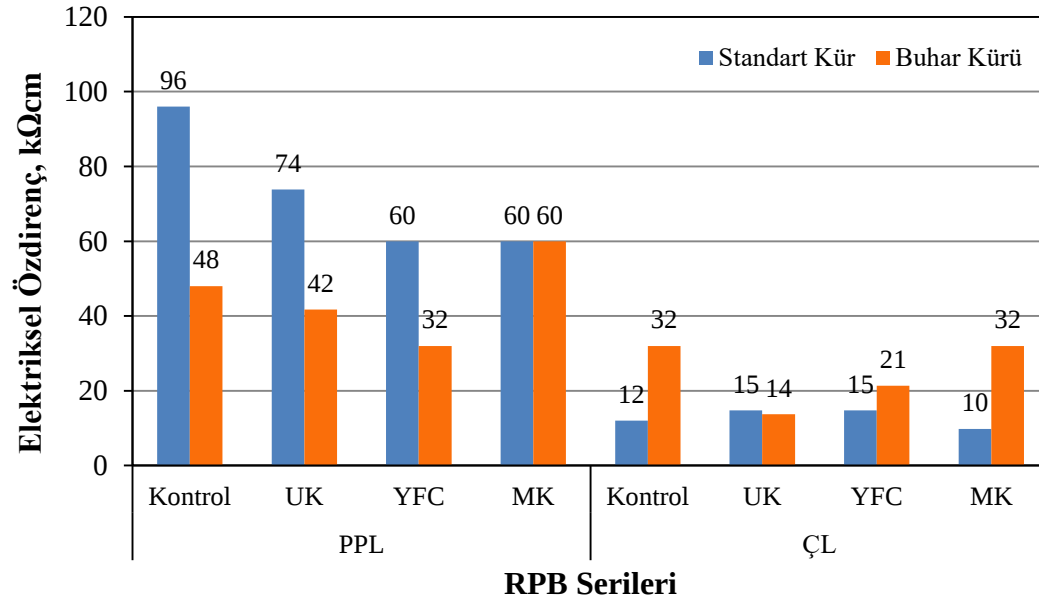
Şekil 4.9 Eğilme dayanımı değerlerinin beton serilerine göre değişimi.



Şekil 4.10 Eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin beton serilerine göre değişimi.

4.6 Elektriksel Özdirenç Deneyi Sonuçları

RPB betonu serilerine uygulanan elektriksel özdirenç deneyi sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde standart kür uygulanan numunelerden 10 ile 96 kΩcm değerleri arasında özdirenç değerleri elde edilmiştir. Buhar kürü uygulanan numunelerden ise 14 ile 60 kΩcm arasında özdirenç değerleri elde edilmiştir. Standart kür işleminde 96 kΩcm ile en yüksek özdirenç değeri PPL-Kontrol numunesinden, en düşük özdirenç değeri 10 kΩcm ile ÇL-MK numunesinden elde edilmiştir. Buhar kürü işleminde 60 kΩcm ile en yüksek özdirenç değeri PPL-MK numunesinden, en düşük özdirenç değeri 14 kΩcm ile ÇL-UK numunesinden elde edilmiştir. Genel anlamda ise en yüksek özdirenç değeri standart kür uygulanmış olan PPL-Kontrol numunesine aittir. En düşük özdirenç değeri ise yine standart kür uygulanmış olan ÇL-MK numunesine aittir. Topçu vd. (2016) yaptıkları çalışmada elektriksel direnç değeri hidratasyonun bir göstergesi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Çelik lifler iletkenlik özelliğine sahip olduğu için daha düşük özdirenç göstermiştir.



Şekil 4.11 Elektriksel özdirenç değerlerinin beton serilerine göre değişimi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Reaktif pudra betonunda çelik lif ve polipropilen lif ayrı seriler oluşturularak kullanılmıştır. Bu serilerde mineral katkı olarak ayrı ayrı dizayn edilecek şekilde uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanılmıştır. Karışımlar sonunda elde edilen numunelere standart ve buhar kürü uygulanmıştır. Kür işlemi sonunda numunelere yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Farklı değişkenlerin betonun ağırlıkça su emme kapasitesi üzerindeki etkileri incelendiğinde buhar kürünün su emme oranlarını azaltmada daha etkili olduğu belirlenmiştir. Polipropilen katkılı serilerin çelik lif katkılı serilere göre daha yüksek su emme oranlarına sahip olması, çelik lif katkısının beton ile bağlanmasının daha iyi olduğunu göstermektedir. Mineral katkılar karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufunun diğer mineral katkılara göre daha az su emme değerine sahip olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerin porozite değerleri incelendiğinde buhar kürünün porozite oranlarını azaltmada daha etkili olduğu belirlenmiştir. Polipropilen lif katkılı serilerin çelik lif katkılı serilere göre daha yüksek porozite değerlerine sahiptir. Mineral katkılar karşılaştırıldığında ise yüksek fırın cürufunun daha boşluksuz bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Ağırlıkça su emme oranı ile benzer sonuçlar vardır. İki deney sonuçları da iki özelliğin doğrusal bir ilişkisi olduğunu ortaya koymuştur.
- Farklı kürleme yöntemlerinin ve farklı katkıların ultrases geçiş hızlarının üzerindeki etkileri incelendiğinde buhar kürünün ultrases geçiş hızını artırdığı görülmektedir. Polipropilen katkılı serilerin çelik lif katkılı serilere göre daha düşük ultrases geçiş hızı değerlerine sahip olduğu ve mineral katkılar karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufu kullanılan betonların daha boşluksuz yapıya sahip olduğu da görülmektedir.
- Numunelerin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde buhar kürünün basınç

dayanımını artırdığı görülmektedir. Polipropilen lif katkılı serilerin çelik lif katkılı serilere göre daha düşük basınç dayanımına sahip olması, lif katkılarının mukavemetlerinin farklı olmasından kaynaklıdır. Mineral katkıları karşılaştırıldığında ise yüksek fırın cürufu kullanılan betonların daha yüksek dayanım gösterdiği de görülmektedir.

- Numunelerin eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde buhar kürünün eğilme dayanımını artırdığı görülmektedir. Polipropilen lif katkılı serilerin çelik lif katkılı serilere göre daha düşük eğilme dayanımına sahip olması, çelik lif katkısının çekme mukavemetinin polipropilen lif katkısına göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Mineral katkıları karşılaştırıldığında ise yüksek fırın cürufu kullanılan betonların daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği de görülmektedir.
- Numunelerin elektriksel özdirenç değerleri incelendiğinde buhar kürünün standart küre kıyasla daha düşük özdirence sahip olduğu görülmektedir. Polipropilen lif katkılı serilerin çelik lif katkılı serilere göre daha yüksek özdirence sahip olması, çelik lifin iletkenliğinin etkisi ile farklı lif katkıların özdirenç değerlerine nasıl etki ettiğini göstermektedir.

Reaktif pudra betonu karışımlarında çelik lif serilerinin polipropilen lif serilerine göre fiziksel ve mekanik özellikleri daha iyi geliştirdiği belirlenmiştir. Kür koşullarında ise buhar kürünün hidratasyonu hızlandırması sebebiyle daha olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Mineral katkılarda karşılaştırma yapılırken yüksek fırın cürufunun çoğu fiziksel ve mekanik özellikte en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir. Kür süresi 28 gün olarak uygulanmıştır. Puzolan katkıların erken dayanıma göre, geç dayanıma etkisinin daha belirgin olduğu bilinmektedir. Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda kür süresinin uzatılması uygun olacaktır. Örneklerin mikro yapıları SEM ve XRD teknikleri ile bünyede gelişen faz yapılarının belirlenerek fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin değerlendirilmesi uygun olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abdul- Rahman M, Al-Attar A A, Hamada H M, Tayeh B, 2020, Microstructure and Structural Analysis of Polypropylene Fibre Reinforced Reactive Powder Concrete Beams Exposed to Elevated Temperature, Journal of Building Engineering, 29, 101167.
- Amer I, Kohail M, El-Feky M S, Rashad A, Khalaf M A, 2020, Evaluation of using cement in alkaliactivated slag concrete, International Journal of Scientific & Technology Research, Vol: 9, 245–248s.
- Amer I, Kohail M, El-Feky M S, Rashad A, Khalaf M A, 2021, Characterization of Alkali-Activated Hybrid Slag/Cement Concrete, Ain Shams Engineering Journal, 12, 135-144s.
- Alkhaly Y R, Abdullah, Husaini, Hasan M, 2022, Characteristics of Reactive Powder Concrete Comprising Synthesized Rice Husk Ash and Quartzite Powder, Journal of Cleaner Production, 375, 134154.
- Al-Khuzai H M A, Atea R S, 2019, Investigation of Torsional Behavior and Capacity of Reactive Powder Concrete (RPC) of Hollow T-Beam, Journal of Materials Research and Technology, 8 (1), 199-207s.
- Al-Tikrite A, Hadi M N S, 2018, Influence of Steel Fibres on the Behaviour of RPC Circular Columns Under Different Loading Conditions, Structures, 14, 111-123s.
- Bahadır F, 2010, Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özellikleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, Eskişehir.
- Baradan B, 2000, Yapı malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, 4.baskı, 221s, İzmir.
- Blais P Y, Couture M, 1999, Precast, Prestressed Pedestrian Bridge – World's First Reactive Powder Concrete Structure, PCI Journal, 44, 60–71s.

- Boğa A R, Gürer C, 2017, Investigation of using carbon fiber in production of conductive mortar, AC-EITAI 2017, 146.
- Caf M, 2012, Polipropilen Ve Çelik Lifli Betonların Darbe Dayanımı, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s, Erzurum.
- Cao S, Hou X, Rong Q, 2020, Dynamic Compressive Properties of Reactive Powder Concrete at High Temperature: A review, Cement and Concrete Composites, 110, 103568.
- Chan Y, Chu S, 2004, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, Cement and Concrete Research, 34, 1167-1172.
- Deng M, Ma F, Ye W, Li F, 2018, Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by HDC and RPC, Construction and Building Materials, 188, 995-1006s.
- Erdoğan T Y, 2016, Beton, 4. Baskı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları, 757s, Ankara.
- Erdoğan T Y, Erdem T K, 2002, Buhar Kürü Uygulamasında Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörlerden “Bekleme Süresi”nin Önemi, ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 485-491, Ankara.
- Ge L, Zhang Y, Feng Z, Li H, 2023, Study on the mechanical and microscopic properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete under different curing methods, Journal of Building Engineering, 76, 107436.
- Gereken G E, 2019, Yerel Mineral Katkılarla Reaktif Pudra Betonu Geliştirilmesi Ve Alkali-Silis Reaktivitesinin İncelenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 103s, İzmir.
- Grzeszczyk S, Janus G, 2020, Reactive powder concrete with lightweight aggregates, Construction and Building Materials, 263, 120164.
- Han F, Luo A, Liu J, Zhang Z, 2020, Properties of High-Volume Iron Tailing Powder Concrete Under Different Curing Conditions, Construction and Building Materials, 241, 118108.

- Hasan Z A, Nasr M S, Abed M K, 2021, Properties of reactive powder concrete containing different combinations of fly ash and metakaolin, *Materials Today: Proceedings*, 42, 2436-2440.
- Hou X, Cao S, Zheng W, Rong Q, Li G, 2018, Experimental Study on Dynamic Compressive Properties of Fiber-Reinforced Reactive Powder Concrete at High Strain Rates, *Engineering Structures*, 169, 119-130s.
- İyiliksever R, 2014, Atık Mermer Bulamacının Reaktif Pudra Betonunun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s, Sakarya.
- Jianzhong L, Wei S, 2008, Dynamic Mechanical Behaviour of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concretes, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, Vol 23, 938-945s.
- Ju Y, Shen T, Wang D, 2020, Bonding Behavior Between Reactive Powder Concrete and Normal Strength Concrete, *Construction and Building Materials*, 242, 118024.
- Ju Y, Zhang H, Wang D, Kong X, Ma Y, Zhang X, 2024, Effect of Mineral Admixtures on The Resistance to Sulfate Attack of Reactive Powder Concrete, *Journal of Cleaner Production*, 440, 140769.
- Karabulut A B, 2006, Reaktif Pudra Betonunun (Rpb) Özelliklerinin Mineral Katkılarla Geliştirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 170s, İzmir.
- Lee M G, Wang Y C, Chiu C T, 2007, A Preliminary Study of Reactive Powder Concrete as A New Repair Material, *Construction and Building Materials*, 21, 182-189s.
- Li X, Li J, Lu Z, Hou L, Chen J, 2020, Preparation and Properties of Reactive Powder Concrete By Using Titanium Slag Aggregates, *Construction and Building Materials*, 234, 117342.
- Liang X, Wu C, Su Y, Chen Z, Li Z, 2018, Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance, *Construction and Building Materials*, 179, 400-412s.

- Liu J, Dai X, Yu X, Yao C, Zhao X, Kong D, 2024, Tensile Behaviour and Full-Field Strain of Reactive Powder Concrete Under Dynamic Loading: Effects of Fibre Length and Content, *Construction and Building Materials*, 416, 135008
- Mayhoub O A, Nasr E A R, Ali Y, Kohail M, 2020, Behavior of RPC based Alkali Activated Material Compared with Conventional RPC, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2278-3075, Vol:9, 602-609s.
- Mayhoub O A, Nasr E S, Ali Y, Kohail M, 2020, Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete, *Ain Shams Engineering Journal*, 12, 99-105s.
- Meera M, Gupta S, 2024, Performance Evaluation of Marble Powder and Fly Ash Concrete for Non-Structural Applications, 84, 108499.
- Ngo T, Mendis P, Whittaker A, 2013, A Rate Dependent Stress-Strain Relationship Model for Normal, High and Ultra-High Strength Concrete, *International Journal of Protective Structures*, Vol 4, Number 3, 451-466s.
- Özalp F, 2006, Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86s, İstanbul.
- Ramalingam M, Dhamotharan D, Narayanan K, Rajalinggam D, 2023, Study on mechanical properties of silica fume based reactive powder concrete, *Materials Today: Proceedings*, 09062.
- Ren G M, Wu H, Fang Q, Liu J Z, 2018, Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC, *Construction and Building Materials*, 163, 826-839s.
- Richard P, Cheyrezy M, 1995, Composition of reactive powder concrete, *Cem. Concr. Res.* 5 (7) 1501–1511.
- Richard P, Cheyrezy M, 1994, Reactive powder concretes with high ductility and 200–800 MPa compressive strength, *ACI SP144-24* 144, 507–518s.
- Salahuddin H, Qureshi L A, Nawaz A, Raza S S, 2020, Effect of Recycled Fine Aggregates on Performance of Reactive Powder Concrete, *Construction and Building Materials*, 243, 118223.

- Samani E G, Heidari A, 2023, Investigation of the effect of different grading on the mechanical properties of reactive powder concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02168.
- Sanchayan S, Foster S J, 2016, High Temperature Behaviour of Hybrid Steel–PVA Fibre Reinforced Reactive Powder Concrete, *Mater. Struct.* 49 (3), 769–782s.
- Sasui S, Kim G, Riessen A V, Alam S F, Nam J, Ishak S, Eu H, 2024, Influence of Elevated Temperature on Waste Concrete Powder and its Application in Alkali Activated Materials, *Journal of Cleaner Production*, 434, 140423.
- Savadkoobi M S, Reisi M, 2020, Environmental Protection Based Sustainable Development by Utilization of Granite Waste in Reactive Powder Concrete, *Journal of Cleaner Production*, 266, 121973.
- Setiawan A A, Soegiarso R, Hardjasaputra H, 2023, The Effect of Steam Curing Method to The Compressive Strength of Geopolymer Concrete With Different Molarity, *Jurnal Teknologi*, 85 (2), 133-139s.
- Sultan H, Alyaseri I, 2020, Effects of Elevated Temperatures on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Elements, *Construction and Building Materials*, 261, 120555.
- Şimşek O, 2004, *Beton ve Beton Teknolojisi*, Seçkin Yayıncılık, 247s, Ankara.
- Tang Q, Ma Z, Wu H, Wang W, 2020, The Utilization of Eco-Friendly Recycled Powder From Concrete and Brick Waste in New Concrete: A Critical Review, *Cement and Concrete Composites*, 114, 103807.
- Topçu İ B, Uygunoğlu T, Hocaoglu İ, 2016, Electrical Resistivity of Fly Ash Blended Cement Paste at Hardening Stage, *Materials Science*, 22 (3), 458-462s.
- Topçu İ B, Sarıkaya E, Akkan E, 2021, Reaktif Pudra Betonlarındaki Gelişmeler, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 440-449s.
- TS 10513, 1992, *Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

- Uygunoğlu T, Ünal O, Gençel O, 2006, Çelik Liflerin Beton Basınç Ve Eğilme Özelliklerine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 23-30.
- Varolgüneş S, Yadollahi M M, 2020, Farklı Kür Koşullarının Reaktif Pudra Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, DÜMF Mühendislik Dergisi, 11-1, 353-361s.
- Wang L, Wei W, Zhang J, Hu Y, Zhang L, 2023, Effect of Curing Regime on the Mechanical Properties and Durability of Steam Cured-Concrete, Buildings, 13, 1697.
- Yerlikaya M, 2003, Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları, Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 302-304s, Kocaeli.
- Yan P, Chen B, Zhu M, Meng X, 2024, Study on Mechanical Properties and Microstructure of Green Ultra-High Performance Concrete Prepared by Recycling Waste Glass Powder, Journal of Building Engineering, 82, 108206.
- Yu J, Xia Y, Guo Z, Guo X, 2024, Experimental Study on The Structural Behavior of Exterior Precast Concrete Beam-Column Joints With High-Strength Steel Bars in Field-Cast RPC, Engineering Structures, 299, 117128.