

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



**PUZOLANİK KATKI MALZEMELERİYLE ÜRETİLEN
ÇİMENTO HARÇLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Fadel Mohamed Ali FELLO

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

AĞUSTOS - 2020
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Fadel Mohamed Ali FELLO tarafından hazırlanan “**Puzolanik Katkı Malzemeleriyle Üretilen Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **11.08.2020** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz**
BAYRAKTAR
Kastamonu Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Hasbi YAPRAK**
Kastamonu Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN**
Erzurum Üniversitesi

.....

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

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. İzzet ŞENER

.....

TAAHHÜTNAME

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

Fadel Mohamed Ali FELLO

vekaleten

Bashar Qasem Taha

Al-hity

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PUZOLANİK KATKI MALZEMELERİYLE ÜRETİLEN ÇİMENTO HARÇLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fadel Mohamed Ali FELLO
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

Beton en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir ve çoğunlukla yenilemeyen doğal kaynaklar ve sera gazına neden olan kullanılarak üretilmektedir. Alternatif malzemelerin daha çok keşfedilmesi bu endüstrinin sürdürülebilirliğini arttırmak için iyi bir fırsat olmuştur. Bu çalışmada, puzolanik katkı malzemeleri ile üretilen yüksek performanslı harçların taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Ayrıca normal su kürü (NSK), sıcak su kürü (SSK) ve buhar kürü (BK) olmak üzere üç farklı kürleme koşulu ile erken kürleme koşullarının harcın mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çimentoya ikame yüzdesi pirinç kabuğu külünün (PK) %0, %5, %10 ve yüksek fırın cürufunun de (YFC) %0, %5, %10, %15'dir. Harçlar toplam 12 tip karışım olarak üretildikten sonra laboratuvarında TS EN 196-1 standardına göre 40x40x160 mm boyutlarında prizma örnekleri elde edilmiştir. Bu amaçlar için yayılma testi harç işlenebilirliğine bir gösterge olarak yapılmıştır, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı incelenmiştir ayrıca PK ve YFC'lerin porozite ve su emme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, YFC'lerin yayılma testi sonuçları üzerinde olumlu ancak PK'nin olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Basınç dayanımı açısından, PK ve YFC, 7. gün sonraki dönemlerde, basınç dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiğini, ayrıca su kürleme ve buhar kürünün, basınç dayanımı sonuçlarını erken dönemde önemli ölçüde arttırmasını sağlamıştır. 28 ve 90 günlük en yüksek sonuç sırasıyla 119,9 MPa ve 123,3 MPa'dır. Bu sonuçlar, buhar kürü yöntemi altında kürlenerek YFC'nin %15'i ve PK'nin %10'unun dahil edilmesiyle elde edilmiştir. Sonuçlar ayrıca YFC ve PK artışının tüm karışımlarda porozite ve su emme değerlerini düşürdüğünü göstermiştir. En yüksek porozite ve su emme değeri REF karışıma aittir ve tüm deneysel karışımların sonuçları REF karışımından daha düşük değerler elde etmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, porozite, su emme, yüksek performanslı harç

Ağustos 2020, 73 Sayfa

Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CEMENT MORTARS PRODUCED WITH PUZOLANIC ADDITIVE MATERIALS

Fadel Mohamed Ali FELLO

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

SUPERVISOR: Assist. Prof. Dr. Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

Concrete is the most widely used construction material and, for the most part, is produced using nonrenewable natural resources and energy intensive processes which emit greenhouse gasses. There exists an opportunity to improve the sustainability of this industry by further exploring the use of alternative materials. This study aimed to investigate the influence of cement replacement on the fresh and hardened of high performance mortar. also the influence of early curing condition on the mechanical properties of mortar was studied, three different curing conditions were applied; normal water curing (SK), hot water curing (SSK) and steam curing (BK). The percentage of cement replacement was 0%, 10% and 15% by RHA and 0%, 5%, 10% and 15% by GGBFS. According to TS EN 196-1, 12 different experimental mixes (with 40x40x160 cm) were prepared for these objectives. Flow test was conducted as an indicator for workability of mortar, compressive strength and flexural strength were examined, also the effect of RHA and GGBFS on the porosity and water absorption of mortar were studied. The results showed that the GGBFS has a positive effect on the flow test results, however RHA led to decrease the flow test results. In term of compressive strength, the RHA and GGBFS had improved the compressive strength significantly at later age, after 7 days, also how water curing and steam curing led to increase the compressive strength results significantly in early age. In 28 and 90 days, the highest result were 119,9 MPa and 123,3 MPa respectively. these results achieved by incorporation of 15% of GGBFS and 10% of RHA and cured under steam curing method. The results also indicated that the increasing of GGBFS and RHA decrease the porosity and water absorption values in all mixes. The highest value of porosity and water absorption was belonged to REF mix and all experimental mixes had results lower than REF mix.

KEYWORDS: High performance mortar, compressive strength, flexural strength, blast furnace slag, rice husk ash, porosity, high performance mortar

August 2020, 73 Page

Science Code: 91

TEŞEKKÜR

Bana bu çalışmayı bitirmek için sağlık, şans, sabır ve anlayış veren Allaha hamd ü senalar olsun. Onun tüm salat ve selamı Muhammed Mustafanın (SAV) üzerine olsun.

Tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR 'a bana verdiği ilham, teşvik, dikkat çekici yardım ve sürekli destek için, derin şükran ve takdirle teşekkürlerimi sunuyorum. Bu süreçte onunla çalışmak benim için mükemmel bir öğrenme ve tecrübe kazanma şansı oldu. Aynı zamanda Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN hocalarıma da araştırmalarımda yaptığı rehberlik, verdiği teknik destek ve önerileri için içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

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

Kariyerim boyunca sürekli duaları, yönlendirmeleri, teşvikleri ve destekleri için aileme, abilerime ve kız kardeşime teşekkür etmek istiyorum. Onlar bana güç, ilham ve güven kaynağı oldular.

Son olarak, tezimi hazırlamamda bana yardımcı olan herkese içten şükranlarımı sunarım.

Fadel Mohamed Ali FELLO

Kastamonu,2020

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Beton	1
1.2. Tez Amaçları	4
1.3. Tezin Özeti	4
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1. Beton Teknolojisinde Sürdürülebilir Kalkınma	6
2.2. Betonun Sınıflandırılması	6
2.3. Betonda Mineral Katkılar	8
2.4. Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörler	11
2.4.1. Malzeme Yönü	11
2.4.1.1. Çimento	11
2.4.1.2. Agregası (İnce)	12
2.4.1.3. Yüksek fırın cürufu (YFC)	12
2.4.1.4. Pirinç kabuğu külü (PK)	15
2.4.1.5. Kimyasal katkıları	21
2.4.2. S/Ç ve S/B Oranı	23
2.4.3. Kür Yöntemi	24
3. MATERYAL VE METOT	27
3.1. Malzemeler	27
3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ)	27
3.1.2. Pirinç Kabuğu Külü (PK)	29
3.1.3. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	30
3.1.4. Agregası	33
3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı	33
3.1.6. Su	34
3.2. Yöntem	34
3.2.1. Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları	34
3.2.2. Karıştırma Dizileri	35
3.2.3. Numune Hazırlama	36
3.2.3. Kür Yöntemleri	36
3.3. Test Prosedürü	38
3.3.1. Yayılma Testi	38
3.3.2. Su Emme, Porozite ve Birim Hacim Ağırlık Deneyleri	39
3.3.3. Eğilme Dayanımı Testi	40
3.3.4. Basınç Dayanımı Testi	41

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	42
4.1. Taze Harç Özellikleri	42
4.2. Sertleştirilmiş Özellikler	45
4.2.1. Birim Hacim Ağırlık (BHA)	45
4.2.2. Basınç Dayanımı	46
4.2.2.1. PK'nin basınç dayanımı üzerine etkisi	47
4.2.2.2. YFC'nin basınç dayanımı üzerine etkisi	49
4.2.2.3. Basınç dayanımı üzerine kürleme koşullarının etkisi	51
4.2.3. Eğilme Dayanımı	52
4.2.3.1. PK'nin eğilme dayanımına etkisi	53
4.2.3.2. YFC'nin eğilme dayanımına etkisi	55
4.2.3.3. Kür koşullarının eğilme dayanımına etkisi	56
4.3. Porozite ve Su Emme	58
4.3.1. PK Etkisi	59
4.3.2. YFC'nin Etkisi	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
5.1. Sonuçlar	65
5.2. Gelecekteki Araştırmalar İçin Öneriler	66
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1	Çalışmada kullanılan CEMI 42,5 R çimento	28
Şekil 3.2	PK üretmek için kullanılan yakılan soba	30
Şekil 3.3	PK taşlama için kullanılan Halkalı değirmen öğütücü.....	30
Şekil 3.4	PK'nın fotoğraflık görünümü.....	30
Şekil 3.5	YFC partikül boyutu dağılımı	31
Şekil 3.6	Kurutma amacıyla kullanılan fırın	32
Şekil 3.7	YFC öğütülmesinde kullanılan bilyalı değirmen	32
Şekil 3.8	Karışımlarında kullanılan YFC	32
Şekil 3.9	Harç karışımında kullanılan silis kumu.....	33
Şekil 3.10	Harçların karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı	36
Şekil 3.11	Numune hazırlama aşamaları.....	36
Şekil 3.12	Kür yöntemleri	37
Şekil 3.13	Sıcak su ve buhar kürlenme tankı	37
Şekil 3.14	Harç yayılma testi (ASTM C1437).....	38
Şekil 3.15	Arşimet test ekipmanı2	39
Şekil 3.16	Merkez nokta yükleme ile bükülme testinin şematik görünümü..	40
Şekil 3.17	Eğilme testinin fotoğraflık görünümü.....	41
Şekil 3.18	Basınç dayanımı testi	41
Şekil 4.1	YFC'nin yayılma testi sonuçlarına etkisi	43
Şekil 4.2	PK'nin yayılma testi sonuçlarına etkisi	43
Şekil 4.3	YFC ve PK ve yayılma sonuçlarının Optimum içeriği	44
Şekil 4.4	Deneyisel karışımların birim ağırlık Sonuçları	45
Şekil 4.5	PK'nin BHA üzerine etkisi	45
Şekil 4.6	YFC'nin BHA sonuçlarına etkisi.....	46
Şekil 4.7	PK'nin basınç dayanımı sonuçlarına etkisi	48
Şekil 4.8	YFC'nin basınç dayanımı sonuçlarına etkisi	50
Şekil 4.9	PK ve YFC'nin Optimum içeriği ve basınç dayanımı sonuçları.....	51
Şekil 4.10	kür rejiminin basınç dayanımı sonuçlarına etkisi	52
Şekil 4.11	PK'nin eğilme dayanımı üzerine etkisi.....	54
Şekil 4.12	YFC'nin eğilme dayanımı sonuçlarına etkisi	55
Şekil 4.13	Optimum PK ve YFC içeriği ve eğilme dayanımı sonuçları	56
Şekil 4.14	Kür koşullarının eğilme dayanımı sonuçlarına etkisi	57
Şekil 4.15	28 Günlük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi	58
Şekil 4.16	PK'nin porozite ve SE üzerine etkisi.....	59
Şekil 4.17	YFC'nin porozite ve SE üzerindeki etkisi	60
Şekil 4.18	Porozite sonuçları için PK ve YFC'nin Optimum içeriği	61
Şekil 4.19	SE sonuçları için PK ve YFC'nin Optimum içeriği	61
Şekil 4.20	Porozite ve SE arasındaki ilişki	62
Şekil 4.21	Porozite ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	62
Şekil 4.22	SE ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	63
Şekil 4.23	Eğilme dayanımı ve porozite arasındaki ilişki.....	63
Şekil 4.24	Eğilme dayanımı ve SE arasındaki ilişki	64

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Betonun basınç dayanımına göre sınıflandırılması (Li, 2011)	7
Tablo 2.2 YPB'de kullanılan farklı mineral katkıları (Patel ve Shah, 2013).....	10
Tablo 2.3 YPB'da kullanılan farklı kimyasal katkıları (Patel, ve Shah, 2013) ..	22
Tablo 3.1 CEM 1 42,5 R'nin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri	28
Tablo 3.2 PK kimyasal analizi	29
Tablo 3.3 YFC kimyasal ve fiziksel özellikleri	31
Tablo 3.4 CHRYSO Lab Bet 8109 teknik detayları ve Özeti	33
Tablo 3.5 Farklı karışım oranları	34
Tablo 3.6 Bir metreküp harç içindeki malzeme miktarları	35
Tablo 4.1 Yayılma testi Sonuçları	42
Tablo 4.2 Basınç dayanımı sonuçları	47
Tablo 4.3 Eğilme dayanımı sonuçları	53
Tablo 4.4 Porozite ve su emme (SE) sonuçları	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

B	: Bağlayıcı
BK	: Buhar kürü
Ç	: Çimento
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
ÖGYFC	: Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu
PÇ	: Portland çimento
PK	: Pirinç kabuğu külü
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
SD	: Silis Dumanı
SE	: Su emme
SK	: Su kürü
s/ç	: Su / çimento oranı
s/b	: Su / bağlayıcı oranı
UYPB	: Ultra yüksek performanslı beton
YPB	: Yüksek performanslı beton

1. GİRİŞ

1.1. Beton

Beton, dünyada en çok tüketilen yapı malzemesi ve aynı zamanda sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzemedir. Yılda milyarlarca ton beton üretildiğinden, buna bağlı olarak büyük miktarda doğal kaynak tüketilmektedir (Adesina, 2018). İnşaat mühendisliğinde birinci sınıf bir kompozit yapı malzemesi olarak beton hammaddelelerindeki hızlı artış, ekonomik dengesizlikler, kaynak sıkıntısı, biyoçeşitlilik kaybı, habitat yıkımı ve çölleşme gibi ciddi çevresel sorunlara yol açmıştır. Bu nedenle araştırmanın birincil amacı çevre kirliliğini kontrol etmektir. Çevre kirliliğinin başlıca faktörleri ise sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışıdır (Patel ve Shah, 2018; Asteray vd., 2017).

Betonda ana bağlayıcı olan Portland çimentosu (PÇ)'nin üretimi, dünyanın insan kaynaklı karbondioksitine neden olan en büyük etkenlerden biridir. Çimento üretimi, CO₂ emisyonları gibi ciddi çevre kirliliğine yol açmaktadır. Üretilen 1 ton çimento başına 1 ton CO₂ emisyon salınımına sebep olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca çimento üretiminin neden olduğu bu emisyon miktarının toplam küresel emisyonların %5-7'si olduğu tahmin edilmektedir. Buna ek olarak, çimento üretimi yüksek enerji ve maliyet gerektirir bu nedenle çimento, sürdürülebilir kalkınma için uygun değildir. Ayrıca üretilen çimento içeriğinin yüksek kütlesi, çimentonun su ile reaksiyonu sırasında betonda çatlamaya yol açabilecek önemli bir ısınin serbest kalmasına neden olabilmektedir (Alexvd., 2016; Zareei vd., 2017; Adesina, 2018).

Aynı zamanda, kontrolsüz bir şekilde atık veya yan ürün malzemelerinin boşaltılmasını önleyerek çevrenin korunması gerekmektedir. Bu tür yan ürünlerin alternatif bir çimento malzemesi olarak kullanılması, kaynakların sürdürülebilirliği, çevrenin korunması gibi birçok faydaya sahiptir ve bertaraf edilme sorununu çözmektedir (Patel ve Shah, 2018). Bu, çimento içeriğini en aza indirerek betonun çevresel etkisini azaltmak için umut verici bir çözümdür.

Endüstriyel yan ürünler Portland çimentosu için ikame malzemeleri olarak kullanıldığında önemli enerji ve maliyet tasarrufu sağlanabilmektedir. Ayrıca yan ürünlerin kullanımı, toprak, su ve havayı kirletecek büyük miktarlarda malzemelerin bertaraf edilmesi için çevre dostu bir yöntemdir. Çimento talebindeki artışın çoğu, endüstriyel atık malzemelerinin kullanılmasıyla karşılanacaktır (Rao vd., 2014).

Endüstriyel yan ürünler, doğal puzolanik malzemeler, tarımsal atıklar vb. birçok katı atık, çimento ikame malzemeleri olarak adlandırılır (Alex vd., 2016). Pirinç, özellikle Asya'da en önemli tarım ürünlerinden biridir. Üretimi son on yılda artmış ve 2017 yılında küresel çeltik üretiminin 760 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Küresel nüfusun 2050 yılına kadar artmaya devam etmesi ihtimali ile bu rakamın artması beklenmektedir. Pirinç kabuğu, çeltik ağırlığının yaklaşık %20-30'unu oluşturan pirinç öğütme işleminin bir yan ürünüdür, bu da 150 milyon ton yan ürünün yıllık olarak üretildiği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte bu miktarın yaklaşık %83'ü atık, kirli su ve toprak olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, bu problemleri çözmek için çeşitli endüstriyel alanlarda araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Yeşil teknoloji alanında, pirinç kabuğu, bir santralde elektrik ya da buhar üretmek için yakıt olarak kullanılan bir biyokütle kaynağı olarak kabul edilmektedir. Kabuk yakıldıktan sonra, yakıtın orijinal ağırlığının yaklaşık %20'si pirinç kabuğu külü olarak kalır (PK). Kül genellikle nehirlerde veya depolama alanlarına atılır ve çevreyi kirletebilir. Pirinç kabuğunun yakıt olarak kullanılması, atık PK'nın arıtılmasıyla ilgili başka bir çevresel soruna neden olur bu nedenle kül düzgün bir şekilde tamamen bertaraf edilmez ise, pirinç kabuğunun kullanımı “çevre dostu” olarak kabul edilemez. Bu nedenle, artan endüstriyel alanlarda bu sorunun çözümü ve PK'nın doğru kullanımı için çalışmalara dikkat çekilmiştir (Kang vd., 2019).

Uygun yanma koşulları altında, reaktif pirinç kabuğu külünün (PK) yüksek bir amorf SiO_2 içeriğine, yüksek gözenek hacmine ve özgül yüzey alanına sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle PK, silis dumanı (SD) ile karşılaştırılabilir çok yüksek bir puzolanik reaktiviteye sahiptir. Mineral katkıların fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi, pirinç kabuğunu kül haline getirerek yerine getirilebilir. Pirinç kabuğu külünün (PK) puzolanik aktivitesi, (i) silis içeriğine, (ii) silis amorf fazına ve (iii) kül

parçacıklarının boyut ve yüzey alanına bağlıdır. Ek olarak, kül içinde sadece az miktarda yanmamış karbon bulunabilir (Al-Khalaf ve Yousif, 2015).

Li vd. (2010), dünyada büyük miktarda bulunan diğer atık maddelerin, yüksek fırında demirin bir yan ürünü olan ve kalsiyum, magnezyum silikatlar ve alümin silikatlara sahip olan yüksek fırın cürufu (YFC) olduğunu bildirmişlerdir. Bir ton YFC üretimi sadece 70 kg CO₂ salmaktadır, bu da çimento CO₂ emisyonunun sadece %7'sidir. Türkiye yılda sadece 600 000 ton üretmektedir (Güneyisi vd., 2016).

YFC başka bir yapay puzolanadır ve çimento ikame malzeme olarak kullanılır. İnşaat endüstrilerinde birçok teknik fayda sağlayan dünyanın birçok ülkesinde başarıyla kullanılmıştır. Betonda, eşit bir çimento kütlesinin YFC ile değiştirilmesi, daha büyük bir pasta hacmine neden olur ve bu da betonun ayrışma direncini ve işlenebilirliğini arttırmaktadır (Dadsetan ve Bai, 2017). YFC gibi mineral katkılardan herhangi birinin kullanılması, normal olarak yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton üretimine dahil edilir. Ayrıca bunların kullanılması betonun akışkanlığını artırabilir ve sadece aynı beton içeren havalandırma ile karşılaştırıldığında benzer bir çökme akışı elde etmek için gerekli olan süperakışkanlaştırıcı gereksinimini azaltabilmektedir. YFC kullanımı; düşük hidrasyon ısı, yüksek sülfat ve asit direnci, daha iyi işlenebilirlik, daha düşük geçirgenlik ve daha yüksek korozyon direnci gibi birçok avantaj sunar (Boukenda dji vd., 2012).

Beton performansı açısından, betonun dayanıklılığını etkileyen birçok faktör vardır ve bu faktörlerden en önemlisi kür koşullarıdır. Hidratasyon sulu çimento pastası ve betonda iç kimyasal reaksiyonların seri tanıtımını açıklamak için kullanılan bir terimdir; bu işlem, zaman içinde yeterli su ve ısı ile sertleştirilmiş çimento pastasının özelliklerini geliştirmektedir (Al Saffar vd., 2019). Standart normal su kürünün yanı sıra, sertleşme sıcaklığının çimentolu malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi yaygın olarak bilinmektedir. Yüksek sıcaklık, erken safhalarda hızla artarken son safhalarda kür 20°C' den daha düşük değerlere ulaşan basınç dayanımının davranışını değiştirmektedir (Aparicio vd., 2016).

1.2. Tez Amaçları

Bu çalışmanın amaçları aşağıdaki noktalarla özetlenebilir:

- a) Genel olarak, yüksek performanslı harçtaki çimento ikamesinin iki farklı katkı maddesi ile etkisinin araştırılması, bunlardan biri katı atık malzemedir (pirinç kabuğu külü) ve ikincisi yan üründür (öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu).
- b) PK ve YFC harcının taze özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi.
- c) Çimento ikame malzemelerinin yüksek performanslı harçların mekanik performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi.
- d) Üç kür koşullunun harç özelliklerinin üzerindeki etkisinin araştırılması; standart su kürü, kombine kürü (normal su ve sıcak su) ve başka bir kombine kürleme (normal su ve buhar kürü).

1.3. Tezin Özeti

Bu tez 5 bölümden oluşmaktadır. Tezin bölümleri ve bu bölümlerin içeriği aşağıdaki gibidir:

Bölüm 1 (Giriş): Çalışmanın genel tanıtımı, beton, çimento ikamesi, mineral katkıları veya ek malzemeler ile ilgili genel bilgiler ayrıca bu çalışmada kullanılan PK ve YFC gibi malzemeler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Aynı zamanda tezin amacı ve hedefleri ilk bölümde, ilgili çalışmalar ile tanıtılmıştır.

Bölüm 2 (Literatür İncelemesi): PK ve YFC ile çimento ikamesinin etkisi ve betonun taze ve mekanik özelliklerine etkileri, beton malzemelerine genel bakış, kür yöntemleri, su-çimento veya bağlayıcı oranı ile ilgili ayrıntılı literatür bilgileri içermektedir.

Bölüm 3 (DeneySEL Çalışma): Bu bölüm, bu çalışmada kullanılan malzemeler hakkında bilgi içermektedir. Çimento, PK, YFC, agregalar, süperakışkanlaştırıcı özellikleri, ek olarak, oranların detayları ve uygulanan test yöntemleri verilmiştir.

Bölüm 4 (Test Sonuçları ve Tartışmalar): Yapılan testlerden elde edilen sonuçlarla ilgili ayrıntılar bu bölümde tartışılacaktır. Çalışmanın bu bölümünde yayılma tablası testi, basınç dayanımı testi, eğilme dayanımı testi, su emme testi sonuçları sunulmuştur. Ayrıca test sonuçlarının değerlendirilmesi ve tartışılması yapılmıştır.

Bölüm 5 (Sonuç ve Öneriler): Bu bölüm de bu tezde sunulan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların özeti içermektedir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Beton Teknolojisinde Sürdürülebilir Kalkınma

Beton, yaşam kalitesine ihtiyaç duyulan ekonominin doğrudan ilerlemesi ve istikrarının yürütülmesi için gerekli olan kapsamlı alt yapıyı sağlamaktadır. Beton, şantiyede yada başka bir yerde herhangi bir form ve yapısal sistemin tüm bakımında kolayca organize ve imal edilebilir. Betonun diğer yapı malzemelerine göre avantajı her yerde hazırlanabilir olmasıdır, bu avantajı ile örnek teşkil etmektedir (Hafizyar ve Dheyaaldin, 2019).

Sürdürülebilirlik açısından çimentonun, puzzolanik malzemelerle veya atık malzemelerle değiştirilmesi gibi günümüzdeki gelişmeleri kullanmaya katılan tüm tarafların hamleler yapmasıyla ve bunlar enerji santrallerine ve metalurji endüstrilerine uygun şekilde dahil edilebildiğinde, sürdürülebilirlik açısından beton ve çimento endüstrilerinde iyileştirmeler sağlanabilir. Beton, inşaat malzemelerinin önemli bir parçasıdır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonun ana kısmı, betonun belirli performans kriterlerine dayanan Portland çimentosu, agrega, su ve katkıların üç ana bileşenidir (Hafizyar ve Dheyaaldin, 2019).

2.2. Betonun Sınıflandırılması

Beton, Tablo 2.1'de görüldüğü gibi basınç dayanımına göre dört kategoride sınıflandırılabilir. Düşük dayanımlı beton, esas olarak kütle beton yapıları, yolların alt temelleri ve bölmeler oluşturmak için kullanılır. Orta dayanımlı betonlar, binalarda, köprülerde ve benzeri yapılarda en sık kullanılan betonlardır. Yüksek dayanımlı betonlar, yüksek bina elemanları, köprü kuleleri ve perde duvarları inşa etmek için kullanılmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonlar henüz yapısal yapılarda yaygın olarak kullanılmamıştır. Sadece birkaç yaya köprüsü ve kirişler gibi bazı yapısal segmentler, bu tür betonlar kullanılarak inşa edilmiştir (Li, 2011; Jixin ve Mileatone, 2012).

Tablo 2.1 Betonun basınç dayanımına göre sınıflandırılması (Li, 2011)

Sınıflandırma	Basınç dayanımı (Mpa)
Düşük Dayanımlı Beton	<20
Orta Dayanımlı Beton	20–50
Yüksek Dayanımlı Beton	50–150
Ultra Yüksek Dayanımlı Beton	>150

1950'lerde, Çin'de kullanılan betonun dayanımlılık derecesi genellikle C20 idi. Bu, 1960'larda C30'a yükselmiştir, ancak bu süre zarfında betona çok fazla su ilave edilmiştir ve böylece su/çimento oranı 0,5 ila 0,7'ye ulaşmıştır. 1980 ve 1990'lı yıllarda, daha yüksek performans elde etmek ve aynı zamanda beton karışımının iyi işlenebilirliğini korumak için, daha yüksek su azaltma kabiliyetine sahip süper akışkanlaştırıcılar kullanılmıştır ve su/çimento oranı yavaş yavaş 0,45 ila 0,30 veya daha az düşürülerek C100 sınıfı, yüksek performanslı beton elde edilmiştir. Uygulamada, en yaygın olarak kullanılan beton C50 ila C70 arasındadır, ancak C80, C90 ve C100 beton şu anda yaygın olmasa da kullanılmaktadır (Xincheng vd., 2012).

Yüksek dayanımlı beton, yüksek katlı binalarda, hem sayı hem de boyut olarak kolonların azaltılması, ortam alanı sağlamak, köprü inşaatlarında, deniz temellerinde ve ağır sanayi zeminlerinde kullanılması oldukça önemlidir. Yüksek dayanımlı beton, ayrışmayı önlemek için süper akışkanlaştırıcıların, s/ç ve s/b daha düşük oranları ve sertleştirilmiş durumda dayanımlılığın etkili dereceleri ile elde edilebilir. Minerallerin kombinasyonu, düşük geçirgenliğe yol açar (Zareei vd., 2017).

20 Yılı aşkın bir süredir, yüksek performanslı beton terimi dünya çapında kullanılmış ve bu terimi kullanan makalelerin sayısı hızla artmıştır. Bu terim beton mühendisliğinde gereklidir ve inşaatta, yüksek performanslı beton kullanımı ile yüksek dayanıklılık ve yüksek performans gibi yeni terimlerin türemesi sağlanmıştır. Bununla birlikte, yüksek performanslı beton teriminin tanımı ve yorumlanması, farklı mühendislik alanlarında, farklı ülkelerde ve farklı araştırmacılar tarafından değişiklik göstermektedir, bu nedenle gereksinimler net değildir (Jixin ve Milestone, 2012).

1990 Tarihli bir yayında Metha ve Aitcin, aşağıdaki üç özelliğe sahip beton karışımları için yüksek performanslı beton (YPB) terimini önerdi: yüksek işlenebilirlik, yüksek performans ve yüksek dayanıklılık. Bununla birlikte, daha sonra açıklandığı gibi ACI, bugün YPB olarak pazarlanan beton karışımlarının çoğunun zorlu çevresel koşullar altında dayanıklı olmayabileceği bir duruma neden olan farklı bir yaklaşım benimsemiştir (Mehta, 2001).

YPB, taze ve sertleşmiş beton arasında en çok talep edilen özelliklere sahip mühendislik betonudur. Her bir bileşenin performansı ve kalitesi, bileşiğin tam potansiyelinden yararlanmak için YPB için kritik öneme sahiptir. YPB, süper plastikleştirici, mikro dolgu maddeleri ve farklı lif türleri kullanılarak geliştirilmiştir. Temel bileşenlerin karıştırıldığı oranlar ve kullanılan katkıları, konvansiyonel beton ile YPB arasındaki temel farkı oluşturmaktadır (Alsalman vd., 2017).

YPB'nın gelişimi sadece s/ç oranını azaltarak değil aynı zamanda çimento ve agregaların, silis dumanı, demir tozu, cam tozu, YFC, metakaolin ve uçucu kül vb. gibi bazı mineral katkı maddeleri ve kimyasal katkıları ile değiştirilmesiyle de sağlanabilmektedir.

2.3. Betonda Mineral Katkılar

Portland çimentosu, inşaat uygulamalarında kullanılan en yaygın çimento türüdür, ancak üretim sürecinin kendisinin yüksek enerji gereksinimleri ile ilişkili yüksek üretim maliyeti nedeniyle pahalı bir bağlayıcıdır. Doğal puzolonlar gibi çimentolu özelliklere sahip diğer ucuz inorganik malzemeler, örneğin volkanik tüf, kil ve endüstriyel tesislerden atık ürünler, örneğin cüruf, uçucu kül ve silis dumanı, kompoze çimentolar için kullanılabilmektedir. Buna ek olarak, bağlayıcı maliyetini azaltmak için, beton uygulamalarında Portland çimentosu ile harmanlanmış olan puzolanik malzemelerin kullanımından potansiyel teknolojik faydalar sağlanmaktadır. Bunlar arasında işlenebilirliğin artması, geçirgenliğin azalması, sülfat saldırısına karşı direncin artması, termal çatlamaya karşı direncin artması ve betonun nihai performansının ve dayanıklılığının artmasıdır (Alp vd., 2009).

20.Yüzyılın ortalarından itibaren, çimento ve beton endüstrileri tarafından mineral katkı tüketiminde hızlı bir artış olmuştur. Çimento ve betona artan talep, kısmi çimento değişimi ile karşılanmaktadır. Endüstriyel yan ürünler, Portland çimentosu için ikame malzemesi olarak kullanıldığında önemli miktarda enerji ve maliyet tasarrufu sağlayabilmektedir. Aynı zamanda yan ürünlerin kullanımı, toprak, su ve havayı kirletecek büyük miktarlarda malzemelerin bertaraf edilmesi için çevre dostu bir yöntemdir. Çimento talebindeki artışın çoğu, ek çimentolama malzemelerinin kullanılmasıyla karşılanacaktır (Rao vd., 2014).

Puzolanlar, reaktif silis ve alümina içeren, kendi başlarına çok az yada hiç bağlayıcı özelliğine sahip olmayan, ancak su ile birlikte kireç ile karıştırıldığında çimento gibi sertleşen malzemelerdir. Ayrıca, puzolanlar Portland Çimentosuna (PÇ) alternatif çimentolama malzemelerinin üretiminde önemli bağımlılık yapan agregalardır. puzolanlar, PÇ'ye çok daha düşük bir maliyetle mükemmel bir teknik seçenek sunar ve düşük maliyetli yapı malzemeleri ve dolayısıyla uygun fiyatlı barınak sağlanmasına önemli bir katkı sağlama potansiyeline sahiptir (Emmanuel B. Ettah vd.,2018).

Betonun belirli özelliklerini iyileştirmek için betonda çimento yerine çok çeşitli mineral katkılar kullanılabilir. Puzolanlarda, parçacık boyutu dağılımı, özgül ağırlık, morfoloji ve parçacık arası kuvvetler reolojik davranışlarını etkileyen başlıca faktörlerdir. Bu nedenle mineral katkı maddelerinin seçimi, karışım tasarımı, çimentonun tipi ve inceliği ve agregaların paketleme yoğunluğu dikkate alınarak yapılmalıdır (Yahia vd., 2015).

Patel ve Shah (2013) tarafından belirtildiği gibi, yüksek performanslı beton karışımının önemli bir kısmı mineral katkılardan oluşmaktadır. Özelliklerine bağlı olarak çeşitli amaçlar için kullanılırlar. Ayrıca parçacık özellikleri ile farklı mineral katkı maddeleri sunmaktadır. Kimyasal bileşim, Tablo 2.2'deki gibi betonun özelliklerini arttırmada mineral katkıların rolünü belirler.

Tablo 2.2 YPB'de kullanılan farklı mineral katkıları (Patel ve Shah, 2013)

Mineral Katkılar	Sınıflandırma	Parçacık Özellikleri
Yüksek fırın Cürufu	Çimentolu ve puzolanik	İşlenmiş palzemeler kum gibi tanelerdir. 45 μm parçacıklarına kadar öğütülür ve iri bir dokuya sahiptir.
Uçucu Kül	Çimentolu ve puzolanik	Boyutları <45 μm , %10 ile %15'e 45 μm 'dan fazla, katı küreler ve pürüzsüz toz parçacıklarından oluşur
Silis dumanı	Son derece aktif puzolan	Ortalama çapı 0.1 μm katı kürelerden oluşan ince toz.
Pirinç kabuğu külü	Son derece aktif puzolan	Parçacıklar <45 μm boyutundadır ve hücre sel be gözenekli yapıya sahiptir.

Khan vd. (2014), işlenebilirlik, hidrasyon ısı, priz, kuma ve reaktiviteyi içeren taze betonun özelliklerinin mineral katkıları uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), metakaolin (MK) ve pirinç kabuğu külü (PK) kullanılarak incelenmiştir. Çimentonun mineral katkılarla kısmen desteklendiği normal ve yüksek dayanımlı betonun karşılaştırılması dikkate alınmıştır. Mineral katkıların: kimyasal olarak aktif mineral katkıları ve mikro dolgu mineral katkıları olarak iki gruba ayrılabilir. Kimyasal olarak aktif mineral katkıları, betonun işlenebilirliğini ve prizini kısaltır, ancak hidrasyon ve reaktivitenin ısını artırır. Öte yandan, mikro dolgu mineral katkıları, betonun işlenebilirliğini ve priz süresini uzatır, ancak hidrasyon ve reaktivitenin ısını azaltır. Genel olarak, küçük parçacık boyutu ve daha yüksek özgül alana sahip mineral katkı yüzey alanı, oldukça yoğun ve geçirimsiz beton üretmek için elverişlidir; bununla birlikte, düşük işlenebilirliğe neden olurlar ve etkili süperakışkanlaştırıcı eklenerek dengelenebilecekleri daha fazla suya gereksinim duyarlar.

2.4. Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörler

2.4.1. Malzeme Yönü

2.4.1.1.Çimento

Çimento, ana maddeler olarak kalsine kireç ve kil ile yapılan toz halindeki bir maddedir. Kullanılan kil silis, alümina ve demir oksit sağlarken, kalsine kireç temel olarak kalsiyum oksit sağlamaktadır. Portland çimentosu, silisli (ASTM C618 Sınıf F) uçucu kül, Kalkerli (ASTM C618 Sınıf C) uçucu kül, cüruf çimentosu ve silis dumanı ana tip olan birkaç farklı çimentolar vardır. Bu çimentolar kimyasal bileşimlerinden farklıdırlar. Tablo 2, yukarıdaki çimento tiplerinin bileşimlerini SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO ve SO_3 açısından verir ve geri kalanlar Na_2O ve K_2O gibi diğer malzemelerdir. SO_3 'ÜN, S'nin alçıtaşıdan ($\text{CASO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) türetildiği S oksitinin anlamına geldiği unutulmamalıdır. Özgül yüzey alanı (birim kütle başına yüzey alanı, SSA) ve bu farklı çimentoların özgül ağırlığı (ÖA) gibi önemli fiziksel özellikler de vardır (Dunuweera ve Rajapakse, 2018).

Çimento, su ile karıştırılan, plastik kütle oluşturan, şekillendirilmesi kolay (pasta), zamanla ayarlanan ve dayanım artışı ile yavaş yavaş sertleşen bir tozdur. Birçok standartlara daha kesin Portland çimentosu tanımları getirilmiştir. Çimento adı, örneğin anhidrit veya magnezyum oksiklorür gibi diğer bağlayıcı malzemelere isimler verildiği için gereklidir (S. Mindess vd., 2014).

Bir beton karışımına su eklendiğinde, çimento pastası oluşmaktadır. Çimento pastasının betonda üç işlevi vardır: bağlama, kaplama ve yağlama. Çimento pastası, bireysel agregalara, takviye çubuklarına ve liflere bağlanma sağlayarak, benzersiz bir malzeme oluşturarak bunları birbirine yapıştırır. Çimento pastası, betonun taze aşamasında agregaların ve liflerin yüzeyini de kaplar. Kaplamadan sonra pastanın geri kalanı, bir yağlama maddesi gibi agregaların veya liflerin hareketini daha kolay hale getirmektedir. Çimento içeriği, taze aşamada beton işlenebilirliğini, hızlı hidrasyon aşamasında ısı salınım oranını ve sertleştirilmiş aşamada hacim stabiliteelerini etkiler. Kütle betonundaki çimento içeriği miktarı $160\text{-}200 \text{ kg/m}^3$ tür, normal dayanımlı

betonda 400 kg/m³'ten daha azdır ve yüksek dayanımlı betonda 400-600 kg/m³'tür (Li, 2011).

2.4.1.2. Agregada (İnce)

No. 4 (4,75 mm) bir elek içinden geçen ve çoğunlukla No. 200 (75 µm) bir elek üzerinde tutulan agregalar ince agrega olarak sınıflandırılır. Dere kumu en çok kullanılan ince agregadır. Ek olarak, ezilmiş kırma taş, ince agrega olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, dere kumu ile yapılan beton, kırma taş ile yapılan betondan daha kolaydır (Li, 2011).

Betonda kırma kum varlığı, betonun işlenebilirliğini, dayanımını ve uzun vadeli performansını etkilemektedir (Yalley, 2018). Beton için kullanılan kum, iri kum (MX = 3,7 – 3,1), orta kum (MX = 3,0-2,3) ve ince kum (MX=2,2-1,6) olarak ayrılmaktadır. Ek olarak, bazen süper ince kum (MX = 1,5-0,7) ve $mx < 0,7$ ile toz kumu standardın ötesinde kullanılabilir (Xincheng vd., 2012).

Çok ince kumlar veya açısız kumlar belirli bir yoğunluk için daha fazla pasta gerektirecektir; alternatif olarak, iri yada çok yönlü parçacıklarla yeterli olabilecek su içeriklerinde, sert ve işlenemeyen karışımlar üreteceklerdir. Genel olarak, benzer bir beton kıvamı elde etmek için, doğal kumlar yerine öğütülmüş kum kullanıldığında daha fazla suya gereksinim duyulmaktadır (Li, 2011).

2.4.1.3. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Cüruflar; metalürjik işlemlerden, metallerin cevherde üretilmesinden ya da saf olmayan metallerin arıtılmasından kaynaklanan kalıntılardır. Soğutmada katılaştan metallerden yabancı maddeleri çıkarmak için kullanılan kireç bazlı inorganik akışlardan türetilirler. Betonda kullanılan cüruflar, demir cevherinin yüksek fırın üretiminden meydana gelmektedir. Demir cevheri, kok ve kireçtaşı ile fırında beslenir. Cüruf, sıvı demirin üstünde yüzen akışkan bir tabaka olarak 1 300-1 600 °C'lik bir sıcaklıkta oluşur. Daha sonra toplanır ve soğutulur. Soğutma hızı cürufun özelliklerini etkiler. Yavaşça soğumaya bırakılırsa, kristalleşir. 800 °C'nun altında yeterince hızlı soğutulursa, gizli hidrolik çimento olan bir cam oluşturur. Bu madde daha sonra en az

%80'in 45 mikrondan daha az olan çok ince bir toz haline getirilir (Rathi ve Modhera, 2007).

Amerikan Test ve Malzemeler Derneği' ne göre yüksek fırın cürufu (YFC), "yüksek fırında demir ile aynı anda erimiş halde elde edilen ve temel olarak kalsiyum ve diğer bazların silikat ve alümina silikatlarından oluşan, metalik olmayan bir ürün" olarak tanımlanmaktadır (Bapat, 2012).

YFC'nin faydalı etkileri, hidratlı çimento pastasının daha yoğun mikroyapısından kaynaklanır, gözenek alanının C-S-H ile doldurulması, Portland çimentosu pastasından daha fazladır. Portland çimentosu-YFC ile karışımının hidratlanmış pastanın geliştirilmiş gözenek yapısının bir sonucu olarak ve ayrıca düşük kalsiyum hidroksit içeriğinden dolayı sülfat saldırısına karşı direnci artar (Bapat, 2012).

Bapat'a göre (2012). YFC, çimento için kısmi bir yedek olarak aşağıdaki iki şekilde eklenebilir:

a) Çimento üretim ünitesinde

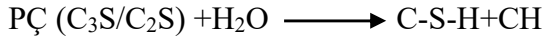
- Ayrı öğütme: YFC ve klinker (alçı ile birlikte) ayrı olarak öğütülür ve daha sonra mekanik bir karıştırma ünitesinde istenen oranda karıştırılır.
- Birleşik öğütme: YFC, klinker ve alçı istenen oranda karıştırılır ve daha sonra cüruf çimentosu yapmak için istenen inceliğe kadar birlikte öğütülür.

b) Beton yapım sahasında, çimentonun kısmen değiştirilmesi için betona istenen incelikte YFC eklenir.

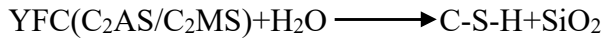
YFC, çimento ikamesi olarak kullanıldığında, hidratasyon işlemi üzerindeki etkisi; Portland çimentosunun hidratasyonu, portlandit kristali $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ve amorf kalsiyum silikat hidrat jeli $[\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3]$ (C-S-H) büyük miktarlarda üretilmesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Hidratlı çimento pastası yaklaşık %70 C-S-H, %20 $\text{Ca}(\text{OH})_2$; %7 sülfö-alüminatlar ve %3 ikincil fazları içerir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kısmen suda çözünür ve yeterli dayanımlılığa sahip olmadığı için boşluklar oluşturarak betonun kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. YFC

kullanımı, betonun kalitesini düşüren Ca(OH)_2 bileşiğinin bağlanması üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. YFC ve Ca(OH)_2 'nin reaksiyonunun sonunda, C-S-H jel gibi hidrasyon ürünleri oluşur (Oner ve Akyuz, 2007). Dash (2010) tarafından sunulduğu gibi, YFC ve çimentonun su varlığında etkileşimi aşağıda açıklanmıştır :

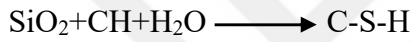
PÇ hidratasyon ürünü



YFC hidrasyon ürünü



Puzolanik malzemelerin reaksiyonu



İkincil jel üretimi, asıl bağlayıcı bir malzeme olan ek C-S-H oluşumuyla gerçekleşir. Bu, yapının performansına ve dayanıklılığına katkıda bulunan YFC'nin ana özelliğidir. İkincil jel oluşumunun şematik gösterimi yukarıda gösterilmiştir (Dash, 2010).

Guruvu ve Ratnam (2016) tarafından yapılan çalışmada, pirinç kabuğu külü ve YFC kullanılarak yüksek performanslı beton (YPB) gelişimi araştırılmıştır. Çimento, %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ağırlık oranlarına göre PK ve YFC ile ikame edilmiştir. Çalışma sonuçları, YFC'nin betona karıştırılmasının betonun dayanım parametrelerini önemli ölçüde etkilediğini, YFC'nin optimum ikamesinin %10 ikame olduğunu ve basınç dayanımının kontrol karışımı ve PK&YFC'nin diğer deneme karışımları ile karşılaştırıldığında 72 MPa olduğunu göstermiştir.

Korde (2018), prekast endüstrisi için YFC'nin kullanımını araştırdı; burada erken yaş öncesi dayanımlılık, kalıpların sökülmesi ve üretkenliğin optimize edilmesi için öne çıkmıştır. Bu çalışmada hızlı sertleşen bir çimento, %50 YFC ikamesi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, %50 YFC'li numunelerin erken yaş basınç dayanımlarının kontrol numunelerine göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu çalışma, harçların yaşının 1 ila 7 gün arasında artmasıyla, yüksek sıcaklık ve Katkı

1 (ECOCHEM katkı) ile birlikte %50 YFC numunelerinin sürekli olarak daha iyi bir dayanımlılık elde ettiğini göstermiştir. Yüksek sıcaklık ve Katkı 1 ile numuneler için 28 gün kombinesinde; kontrol numunesin yüksek sıcaklıkta yaklaşık %95 basınç dayanımı elde edilmiştir.

Karri vd. (2015) M20 ve M40 sınıfı betonun özelliklerini, çimentonun %30, %40, %50'sini YFC ile kısmen değiştirilerek incelediler. Çalışmada, betonun işlenebilirliğinin, YFC ikame seviyesindeki artışla birlikte arttığı ortaya koyulmuştur. Ayrıca, hem M20 hem de M40 sınıfı beton için çimentonun YFC ile değiştirildiğinde betonun basınç dayanımı artmıştır. YFC ile çimentonun %40 oranında değiştirilmesiyle beton, hem M20 hem de M40 sınıfı beton için maksimum basınç dayanımı elde etmiştir. Çimento YFC ile değiştirildiğinde betonun eğilme dayanımlılığı da artmaktadır. %40 değişimde, eğilme dayanımlılığı maksimumdur.

Öner ve Akyuz (2007), basınç dayanımı üzerine optimum YFC seviyesi üzerinde çalışmış, tüm karışımlara kısmi ikame yöntemine göre YFC eklenmiştir. Sonuçlarda, YFC içeren beton karışımlarının basınç dayanımının, YFC miktarı arttıkça arttığını kanıtlamıştır. Optimum bir noktadan sonra, toplam bağlayıcı içeriğinin yaklaşık %55'inde, YFC ilavesinin basınç dayanımını arttırmadığını, reaksiyona girmemiş YFC varlığının pasta içinde dolgu malzemesi olarak hareket ettiğini açıkladılar.

Dash (2010), istenen ihtiyaçları karşılamak için pirinç kabuğu külü, YFC, silis dumanı gibi farklı malzemeler üzerinde araştırmalar yapmıştır. Çalışmada, çimento yerine YFC'nin kullanılmasının yoğunluğu arttırdığı sonuçlanmıştır. İncelik, uygun puzzolanik reaksiyonu büyük ölçüde etkilese de hala 75 mikro elekten geçen YFC harç için iyi dayanım vermemektedir. Ayrıca Portland cüruf çimentosunda YFC'nin %10'dan fazla kullanılmasının dayanımlılığın hızla azalttığı gözlenmiştir.

2.4.1.4. Pirinç kabuğu külü (PK)

Pirinç kabuğu, pirinç üreten ülkelerde bol miktarda bulunan tarımsal bir kalıntıdır bulunur. 500-800 °C sıcaklıkta pirinç kabuğunun yakılması aktif SiO₂ oluşumuna neden olur. PK'deki silis içeriği %90-95 civarındadır (Sundep Inti vd., 2016).

PK'nın ek çimento malzemeleri olarak ardışık kullanımı birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir. PK'nın çimentonun kısmen değiştirilmesi için dikkate alınması gereken önemli faktörler, parçacığın inceliği, yanma işleminin sıcaklığı ve soğutma işlemi için gereken süredir (Alex vd., 2016).

PK'nın yapısı yakma ortamlarından etkilenmektedir. Başlangıçta, pirinç kabuğu yaklaşık %50 selüloz, %25-30 lignin ve %15-20 silis içerir. Yanma üzerine, selüloz ve lignin çıkarılır ve silis külü geride bırakılır. Sıcaklık aralığına ve kabuğun yanma süresine bağlı olarak, kristalin ve amorf silis formları elde edilir. Kristalin ve amorf silis formları farklı özelliklere sahiptir ve spesifik kullanım için doğru özelliklere sahip kül üretmek önemlidir. Yüksek Kristalli yapıya sahip silis formunun, düşük Reaktivite malzemesine neden olduğu bulunmuştur (Fapohunda vd., 2017).

Pirinç kabuğu külünün beton üretiminde uygulanması çevrenin olumlu etkilerini beraberinde getirir; bu nedenle bertaraf edilmeleriyle ilgili sorunları azaltır. Çimento katkı maddesi olarak kullanılmaları ile ilgili olarak, mineral katkıları hem fiziksel hem de kimyasal etkiler nedeniyle pasta, harç ve betonun performanslarını etkiler. Bu nedenle, kaliteyi artırmak ve puzolanik malzemesinin maliyetini azaltmak için çimento katkı maddesi ve yedek malzeme olarak pirinç kabuğu külü kullanmak mümkündür (Guruvu ve Ratnam, 2016).

PK ikamesi olan çimento harcı su gereksinimi, iç gözeneklilik, düzensiz şekil ve parçacıkların daha yüksek inceliği nedeniyle PK ikamesi olmayanlara kıyasla daha yüksektir. Parçacıkların şekli ve inceliği, taze betonun reolojik özelliklerinin, yani akma sertleşmiş ve plastik viskozitenin belirlenmesinde de kritik bir rol oynamaktadır. Parçacıkların küresel şeklinden herhangi bir sapma, aynı faz hacmi için plastik viskozitede karşılık gelen bir artış anlamına gelir (Bapat, 2012).

Betonun basınç dayanımı, betonun ana mekanik özellikleridir ve diğer tüm mekanik özellikler bununla ilgilidir. Daha önceki çalışmalar, PK'sız betonun, %20 ila 30 arasında değiştirme seviyelerinde, PK'lı olanlardan daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu bildirilmektedir (Adesina, 2018). Eğilme dayanımı, bir betonun bükülme sonucu deformasyona direnme kabiliyetidir. PC'nin kısmi değişimi olarak betonun PK

ile eğilme dayanımının, kopma dayanımı ile ilişkili olduğu bulunmuştur (Adesina, 2018).

Dash (2010), PK ile çimentonun değiştirilmesiyle tutarlılığın arttığı sonucuna varmıştır, ayrıca kontrollü sıcaklıkta düzgün bir şekilde yanmış olan PK kullanımı harçın dayanımı artırır. Ancak PK kullanımı tatmin edici bir dayanım sonucu vermez.

Oyetola ve Abdullahi (2006) bazı ticari kum beton bloklarının basınç dayanımı üzerinde araştırdılar. Odun yakılarak pirinç kabuğu külü (PK) hazırlandı. Taze hazırlanmış karışımın fiziksel testini yaptılar. Sonuçları incelediler ve PÇ/PK kum beton bloklarının basınç dayanımı, kürlenme sırasında yaşla birlikte arttığı ve PK içeriğinin yüzdesi arttıkça azaldığı görülmüştür. Kül içeriği arttıkça PÇ/PK pastasının prizın arttığı sonucuna vardılar.

Rao vd. (2014), PK tüm çimento değiştirme seviyelerinde; 3 günden 7 güne kadar basınç dayanımında kademeli bir artış olmuştur. Bununla birlikte, basınç dayanımında 7 günden 28 güne kadar belirgin bir artış, ardından 28 günden 56 güne kadar kademeli bir artış olmuştur. Her iki pirinç kabuğu külünün yüzde değişimindeki artışla birlikte, PK betonunun eğilme dayanımında %7,5'e kadar kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, PK betonunun, yaşı ilerledikçe eğilme dayanımında önemli bir azalma gerçekleşmiştir.

Al-Khalaf ve Yousif (2015), Portland çimentosu (PÇ) için kısmi yedek olarak kullanılacak beton üretimini araştırdı. Çimento, %5, %10 ve %15 oranında ağırlıklı olarak PK ile değiştirildi. Sonuçlar, PK ile NPC ikamesinin artmasıyla sertleşimin betonun basınç dayanımının azaldığı ortaya koyulmuştur. Ayrıca çalışma, %10 ikamesine sahip betonun basınç dayanımının diğer ikame seviyelerinden daha fazla olduğu bulunmuştur (yani. %0, %5, & %15).

Guruvu ve Ratnam (2016), PK'nın çimentonun değiştirilmesi için mineral katkı maddelerinin başarıyla kullanılabileceğini bildirdiler. Fakat basınç dayanımı değerlerinin kontrol karışımı betonu ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu ve PK'nın %10, %15, %20 & %25 ikame seviyeleri ile, 28 günlük kürlenme sonrasında

test edilen mineral katkının ikame yüzdesindeki artış ile basınç dayanımı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Zareei vd. (2017), %10 mikro silis (MS)'e ek olarak, çimento ağırlığına göre %5, 10, 15, 20 ve %25 PK oranlarına sahip 5 karışım planları ile beton özellikleri üzerindeki çeşitli oranlarda PK'nın etkisini inceledi, %100 Portland çimentosunu ile referans karışımı karşılaştırıldı. Sonuçlarda, PK'nın %15'lik ikamesi ile basınç dayanımlarında yaklaşık %20'lik bir artış arasındaki pozitif ilişkiyi göstermiştir. Optimum performans ve dayanıklılık özellikleri genellikle %20'ye kadar ilaveyle elde edilmiş, bunun haricinde dayanım parametrelerinde yaklaşık %4,5 oranında hafif bir azalma ile ilişkilidir.

Tiwari ve Pradhan'ın (2017) yaptığı bir çalışmada, PK'yı betonda farklı oranlarda değiştirirken geçirimli betonun davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada, (PÇ) çimento 0,30; 0,35 ve 0,40 su/çimento oranı için çimento ağırlığına göre %10 ve %20 aralığında PK ile değiştirilmiştir. Sonuçlar PK ile %20 PÇ ikame seviyesinde eğilme dayanımında bir artış göstermiştir. Vinothan (2015) tarafından yapılan bir başka çalışma, eğilme dayanımında sadece PK ile PÇ'nin %10 ikame seviyesinde bir artış gösterdiğini bildirmiştir.

Kang vd. (2019), ısıtıl işlem yapılmadan mekanik özellikleri iyileştirmek için ultra yüksek performanslı betonda (UYPB) dolgu maddesi olarak PK kullandı. Deneysel sonuçlar, ortam koşullarında (20 °C ve %60 bağıl nem) 91 gün sonra 200 MPa civarında olağanüstü bir dayanım göstermektedir. Çalışma, bu gelişmeyi, sırasıyla gözenekli (yani iç kütleme etkisi) ve reaktif dolgu maddesi tarafından sağlanan ilave su ve amorf silis ile puzzolanik reaksiyonun teşvik edilmesinden dolayı kaynaklandığını açıkladı; bu nedenle, kılcal gözeneklerin hacmi azaltıldı.

- Pirinç kabuğu külü üretimi ve yakma yöntemleri

Kaliteli kül elde etmek için pirinç kabuğunun yakılması ve öğütülmesi için uygun yakma fırını/fırının yanı sıra öğütme yöntemi gereklidir (Zain vd., 2011). Fapohunda, Akinbile ve Shittu (2017) tarafından belirtildiği gibi, PK üretmek için araştırmacılar

çeşitli yakma yöntemleri kullanmışlardır, bu çalışmada PK üretimi için yapılan yöntemler hakkında kısa bir bilgi sunmaktadır:

Van vd. (2013); Khan vd.(2015)' da ayrıntılı olarak değiştirilmiş yakma fırını tek bir partide iki günlük bir yanma süresi içinde yaklaşık 20-25 kg PK üretebilir. Bu yöntemle üretilen PK yaklaşık %97,4 oranında yüksek miktarda amorf SiO₂ içeriğinden oluşur.

Zain vd. (2011), 2 saat boyunca 500-700 °C'de sabit fırın yanma sıcaklığı ile amorf silis üretebilen basit bir ferroçimento kullandı. 30 dakika öğütme iyi sonuç vermesine rağmen, araştırmacılar tarafından 60 dakika veya daha fazla öğütme süresi, PK'nın standart inceliğini elde etmek için önerilmektedir.

Habeeb ve Mahmud (2010), havalandırma için üç küçük açıklıklı yakma fırını kullandılar. Havalandırma için üç küçük açıklığa ve 60 kg çiğ pirinç kabuğu kapasitesine sahiptir. Bu fırının tasarım konsepti, Loo vd. (1984) Kullandıkları fırının tasarımına hemen hemen benzemektedir.

Araştırmacılar, bu fırını kullanarak reaktif PK üretmek için, pirinç kabuğunun yanma sıcaklığının 690 °C'yi geçmemesi gerektiğini ve PK'nın parçacık boyutlarının öğütme süresi, 360 dakika boyunca 11,5 µm'den az olması gerektiğini bildirdi.

Nehdi vd. (2003), farklı bir teknik torbed reaktörüne dayanan akışkan yataklar kullanarak pirinç kabuğunu yaktılar. Torbed reaktör 3-12 M/s Gaz hızları ile çalışabilmektedir. PK üretim teknolojisi, daha ekonomik ve bakımı kolay olan daha küçük PK parçacıkları üretebilir.

- PK'nın puzzolanik ve hidrasyon süreçleri

Puzzolanik özellikler, puzzolan'nın aktif bileşenleri (bu durumda PK), kalsiyum hidroksit ve su arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonun derecesini ölçer. Bu özellik, betonda dayanımlılık oluşumuna yol açan reaksiyona katılma yeteneğinin bir göstergesidir. Dayanım gelişim yetenekleri, yapısal uygulamalar için dikkate alınması gereken herhangi bir materyal için gerekli bir koşuldur (Fapohunda vd., 2017).

Nguyen (2011), puzolanik faaliyetlerin amorf derecesindeki artış ile birlikte arttığını, ancak PK'nın parçacıklarının büyüklüğü ile azaldığını keşfettiler. Bununla birlikte, yüksek karbon içeriğine sahip (genellikle kontrolsüz yanma koşullarından elde edilen) PK'nın düşük puzolanik aktivite gösterdiği bulunmuştur (Cordeiro vd., 2009).

Birkaç araştırmacı, PK ile kullanmış çimentonun hidratasyon mekanizmalarını araştırdı. Genel sonuç, önemli miktarda SiO_2 içeren PK'nın CSH jelini üretmek için Ca(OH)_2 ile reaksiyona gireceğidir; ve puzolanik reaksiyonun kireç tüketen bir reaksiyon olması nedeniyle, PK içeren pasta, saf Portland çimentosu pastasında daha düşük bir Ca(OH)_2 içeriğine sahiptir. Bununla birlikte, PK'nın erken hidrasyon oranı üzerindeki etkisi konusunda çelişkili bir sonuç bulunmaktadır (Fapohunda vd., 2017).

Feng vd. (2004) PK ilavesinin erken yaşta çimentonun hidrasyonunu arttırdığını ve dolayısıyla PK kullanılmış çimento pastasında daha fazla ısı ve daha fazla CH üretildiğini gösterdi. Ancak, Van Tuan vd. (2011) PK ilavesinin erken yaşta çimentonun hidratasyonunu yavaşlattığı görüşündeydi. Sonuçlardaki fark, araştırmacılar tarafından farklı s/b oranlarının kullanıldığı gerçeğine atfedilebilir. Su bağlayıcı oranı muhtemelen PK ile macunun erken hidratasyon oranı üzerinde etkisi vardır. Ama Van Tuan ve ark. (2011), PK'nın gözenekli yapısının bundan sorumlu olduğu görüşündeydi. Ayrıca, PK'nın hem hidrolik hem de puzolanik özelliklere sahip olduğu, böylece PK'nın kendisinin su ile reaksiyonunun CSH oluşturduğu bulunmuştur (Fapohunda vd., 2017).

Yu vd. (1999) göre ek kanıtlar olduğu, suyun varlığında, PK'nın bir tür ince CSH jeli oluşturmak için Ca(OH)_2 ile reaksiyona girebileceğini düşündürmektedir (Cal. $5\text{SiO}_3 \cdot 5\text{X H}_2\text{O}$). Ayrıca, CSH jelinin morfolojide ve gözenekli bir yapıya sahip küçük yuvarlak tanelerin flokları olduğu sonucuna vardılar.

- PK'nın çimento ve beton mikroyapısına etkisi

PK'nın kısmi ikame olarak kullanılması, Puzolanik etki nedeniyle Portland çimentosu pastasının mikroyapı gelişimini değiştirir (Fapohunda, Akinbile ve Shittu, 2017). Ngyen (2011), PK macununun puzolanik faaliyetlerinin daha sonraki yaşların, daha önceki yaşlardan daha önemli olduğunu keşfetti. Daha sonraki dönemde PK

ilavesi ile çimentonun hidratasyonunun artması, parçacıkların gözenekli yapısı ile açıklanabilir.

PK parçacıklarındaki gözenekler, karıştırma sırasında gözeneklerine belirli miktarda serbest su emebilir. Bir yandan, bu adsorbe edilen su, çimentonun hidratasyon oranını erken bir aşamada azaltmaktadır. Bunun nedeni, özellikle düşük s/b oranlı karışımlarla, çimentonun hidratlanması için daha az miktarda su olmasıdır. Bununla birlikte, daha sonraki aşamada, çimento pastasındaki bağıl nem düşer ve bu emilen su gözenekli PK parçacıklarından salınır ve bu düşüşü telafi edebilir. Ek olarak, suyun serbest bırakılması da çimentonun hidratasyonunu teşvik etmektedir. Hidratasyon derecesinin PK içeriğinden de etkilendiğine dair bir gösterge vardır (Fapohunda, Akinbile ve Shittu, 2017). Gözenek büyüklüğü ve gözenek hacmi açısından tarif edilen gözenek yapısı PK, karıştırma suyunun bir kısmının gözeneklerinde emilmesi nedeniyle hidratasyon işleminde de önemli bir rol oynamaktadır (Le vd., 2015).

2.4.1.5. Kimyasal katkıları

Kimyasal katkı, taze ve sertleşmiş betonların özelliklerini iyileştirmek için bağlayıcı malzeme (çimento öğütülmüş mineral katkısı) kütlesinin %5'inden daha azında betona eklenen bileşiktir. Betonun karışım oranlarında, çimento yerine geçmez ve bu nedenle çimento kütlesine dahil değildir. Örneğin; su azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcılar, geciktiriciler, büzülme azaltıcı katkıları, dayanıklılık iyileştirici katkıları, hava sürükleyici katkıları, priz hızlandırıcılar, donma önleyici katkıları vb. Yüksek dayanımlı yüksek performanslı betonda kullanılanlar çoğunlukla süper akışkanlaştırıcılar ve geciktiricilerdir. Büyük miktarlarda ilave edilen bir genleşme katkısı bağlayıcıya dahil edilmelidir (Xincheng vd., 2012).

Çok düşük s/ç oranına sahip yüksek performanslı betonun geliştirilmesinde farklı kimyasal katkıları (Süperakışkanlaştırıcılar) yaygın olarak kullanılmaktadır (Patel ve Shah, 2013).

Tablo 2.3 YPB’da kullanılan farklı kimyasal katkıları (Patel, ve Shah, 2013)

Kimyasal katkıları	İşlev
Süper akışkanlaştırıcı	Yüksek dayanımlı ve yoğun betona yol açan işlenebilirliği etkilemeden su ihtiyacını %15 ila %20 azaltmak.
Priz hızlandırıcı	Betonun priz süresini azaltmak, böylece formların erken çıkarılmasına yardımcı olur ve bu nedenle soğuk hava betonlarında kullanılır.
Priz geciktirici	Çimentonun hidrasyonunu yavaşlatarak priz süresini arttırmak ve bu nedenle yüksek sıcaklıktaki betonlama yerlerinde tercih edilir.
Su azaltıcı katkı	Belirli bir dayanımlılık için düşük s/ç oranında belirli işlenebilirlik (çökme) elde etmek, böylece çimento üzerinde tasarrufu sağlar.
Hava sürükletici katkı	betonda küçük hava kabarcıklarını sürüklemek, böylece işlenebilirliği arttırmak ve bu nedenle soğuk iklimde betondaki genleşen su üzerinde bir yastıklama etkisi sağladığı için donma-çözülme döngülerinde çok etkilidir.

Sıradan su azaltıcı katkıların su azaltıcı oranı düşüktür ve genellikle %5 ile %10 arasındadır, oysa bir akışkanlaştırıcının su azaltıcı oranı %15'in üzerindedir ve %30 ve üzerine kadar yüksek olabilir. Kalsiyum lignosülfonat veya melas gibi daha eski su azaltıcı maddeler yüksek dozlarda kullanılmamalıdır (örneğin %0,3), aksi takdirde beton prizini geciktirilir. Modern bir süperakışkanlaştırıcı, betonun özelliği üzerinde herhangi bir olumsuz etki olmaksızın yüksek dozda eklenebilir (Xincheng vd., 2012).

2.4.2. S/Ç ve S/B Oranı

Su-çimento (S/Ç) oranı genellikle betonun performansı ve dayanıklılığını etkileyen en önemli parametresi olarak kabul edilir, (Neville, 1998) çimentonun hidrasyonu için su gereklidir. Bununla birlikte, karışıma eklenen su, genellikle betonun yerleştirilmesi için akışkanlık gereksinimi nedeniyle kimyasal reaksiyonun gereksiniminden çok daha yüksektir. Böylece, çimento pastasındaki üç çeşit suyu rollerine göre ayırt edebiliriz: kimyasal olarak reaksiyona giren su, emilen su ve serbest su. C-S-H, CH ve Aft gibi hidrasyon ürünlerini oluşturmak için C,S,A,F ile reaksiyona giren su, kimyasal olarak reaksiyona giren su yada bağlanmış su olarak adlandırılır. Bu tip suyun çimento pastasından çıkarılması zordur ve tam bir ayrışma yaklaşık 900°C sıcaklıkta gerçekleşir. Emilen su, C-S-H jel katmanlarının içindeki su molekülleridir. Emilen suyun kaybı büzölmeye neden olur ve emilen suyun sabit bir yük altında hareketi veya taşınması sürünmeyi etkiler. Serbest su, C-S-H jelinin dışındaki sudur. Serbest su gibi davranır ve buharlaştırıldığında kılcal gözenekler oluşturur ve betonun dayanımlılığını ve geçirgenliğini etkileyebilir (Li, 2011).

Betonun dayanımını etkileyen temel faktör olan s/b oranı olduğu iyi bilinmektedir. Betonun yeterince akışkan olması koşuluyla, karışım kalıp sıkıştırma ekipmanı ile tamamen sıkıştırılabilir, s/ç oranı ne kadar düşük olursa, betonun dayanımı o kadar yüksek olur-genellikle s/ç oranı kuralı olarak adlandırılır. Bu kural aynı zamanda yüksek performanslı ve süper yüksek performanslı beton için de geçerlidir, çünkü s/b oranı ne kadar düşük olursa, betonun gözenekliliği o kadar düşük olmaktadır (Xincheng vd., 2012).

Aitcin (2016) tarafından ortaya konduğu gibi, beton basınç dayanımını kontrol eden en önemli parametreler her zaman s/ç ve s/b oranları olmuştur. 19. Yüzyılda Féret (1892) tarafından çimento pastaları için ve daha sonra Abrams tarafından 1918'de beton için bulundu. Daha sonra gösterildiği gibi, bu oranlar hem taze hem de sertleşmiş hallerdeki çimento pastanın mikro yapısını ve dolayısıyla reolojisini, mekanik özelliklerini, geçirgenliğini, dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini kontrol eder (Aitkin, 2016).

Nair vd. (2013), s/b 0,35'ten 0,4'e yükseldiğinde basınç dayanımının arttığını bildirdi. Bunu PK'nın amorf doğasına atfettiler. Ancak sonuçlar, basınç dayanımının 0,45'e yükseldiğinde azaldığını göstermiştir. Ayrıca Akhter vd. (2018), uçucu kül ve pirinç kabuğu külünün s/ç= 0,3 ve 0,35'te kombine olarak değiştirilmesinin, sadece beton karışımlarının pirinç kabuğu külü ile değiştirilmesinden daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği sonucuna varılmıştır.

2.4.3. Kür Yöntemi

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

Mehta (2001) 'ya göre, kür verimliliğini aşağıda gösterildiği gib üç faktör etkilemektedir; zaman, nem ve sıcaklık.

Zaman: Basınç dayanımının zamanla değerlendirilmesi, yapı mühendisleri için büyük endişe kaynağıdır. Beton teknolojisindeki zaman dayanım ilişkilerinin genellikle nemli sertleşme koşulları ve normal sıcaklıklar olduğunu belirtmek gerekir. Belirli bir s/ç oranında, nemli kür süresi ne kadar uzun olursa, dayanım o kadar yüksek olur. Portland çimentosu içeren beton ile genellikle minimum 7 günlük nemli kür süresi önerilir; açıkçası, kompoze Portland çimentosu veya mineral katkı maddesi içeren beton karışımları ile, puzolanik reaksiyondan dayanım katkısını sağlamak için daha uzun kürlenme süresi arzu edilir.

Nem: ıslak kür püskürtme veya ponding veya ıslak kum, talaş veya pamuk paspaslar ile beton yüzeyinin kaplanması ile sağlanır. Bir beton karışımında kullanılan karıştırma suyu miktarı genellikle Portland çimentosu hidratasyonu için gerekenden daha fazla olduğundan (çimento ağırlığına göre yaklaşık yüzde 30 olduğu tahmin edilmektedir), beton yerleşiminden kısa bir süre sonra geçirimsiz bir membranın uygun şekilde uygulanması, dayanımlılık gelişimini tatmin edici bir oranda korumak için kabul edilebilir bir yol sağlar. Bununla birlikte, otojen büzülme veya termal

büzülme nedeniyle çatlamanın kontrolü önemli olduğunda nemli kürleme tercih edilen yöntem olmalıdır.

Sıcaklık: Yüksek sıcaklık daha hızlı çimento hidratasyon ve dayanım kazancına yol açar. Genel olarak, kür sıcaklığı ne kadar düşük olursa, 28 güne kadar olan dayanım o kadar düşük olur.

Sıcaklığın çimentolu malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki iyi bilinen etkisi, düşük bağıl nem koşullarında bile kılcal gözeneklerde yeterli su varsa, özellikle erken yaşlarda yüksek bağıl nem koşullarında gözlenmiştir. Erken dayanım değerleri daha sıcak koşullarda daha soğuk koşullara göre daha yüksektir. Nemlendirme işlemi ve dayanım artışı, %75'e kadar yüksek bağıl nem rejimleri altında sürekli olarak gelişmiştir. Bununla birlikte, dayanım gelişimi %75 bağıl nem altında gözlenmemiştir. Bu sonuç, zaman aralığının ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan iyi bilinen olgunluk formülünün, bağıl nem değerleri %75'in altındaki iklimlerde geçerli olmadığını göstermektedir. Ayrıca eğilme dayanımının, özellikle bağıl neme karşı sertleşme koşullarına, basınç dayanımına göre daha duyarlı olduğunu bildirmiştir. Düşük bağıl nem değerleri eğilme dayanımında azalmaya neden olmaktadır (Un ve Baradan, 2011).

Barnett vd. (2006), YFC içeren karışımların erken yaş dayanım gelişiminin sıcaklığa bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Standart kür koşullarında, YFC harçları Portland çimento harçlarından daha yavaş dayanım kazanmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmanın sonucu, daha yüksek sıcaklıklarda dayanımlılık kazancının çok daha hızlı olduğunu ve erken yaştaki dayanımlılıktaki iyileşmenin, daha yüksek YFC seviyelerinde daha önemli olduğunu göstermiştir. Standart kür sıcaklığının üzerindeki kür sıcaklığındaki 10 °C'lik bir artış bile, yüksek seviyelerde YFC içeren harçların dayanımı gelişimini önemli ölçüde hızlandırır ve 40 ve 50 °C'de, YFC harçlarının dayanımı 3 gün sonra Portland çimentosu harcı ile hemen hemen eşdeğerdir.

Ishak vd. (2017), yüksek sertleşme sıcaklıklarının erken yaş dayanımı üzerinde yararlı bir etkiye sahip olduğunu, ancak uzun vadeli dayanım gelişimi üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğunu belirtti. Ayrıca elde edilen sonuçlar, YFC'nin, Portland

çimentosu ve uçucu külden daha yüksek sıcaklıklarda kürlenmeye karşı daha duyarlı olduğunu göstermiştir.

Zakir ve Aköz (2008) tarafından yapılan çalışmada, YFC olan ve olmayan harçların özellikleri üzerine, kür koşullarının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, çimento yerine %0 (referans), %30 ve %60 ağırlıkça YFC ile harçlar üretildi. İki grup harçtan biri 20 °C standart koşullarda suda kürlenmiş, diğeri 40 °C sıcaklıkta ve yaklaşık %100 bağıl nemde(BN) nem kabinde tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, yüksek sıcaklığın erken yaşlarda harç performansını arttırdığı, ancak daha sonraki yaşlarda azaldığı ve cüruf yerine geçen harçlarda bu etkinin daha önemli olduğunu göstermiştir.

Aprianti vd. (2016) malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini, basınç dayanımını, eğilme dayanımını, su emme ve kompoze çimentoların gözenekliliğini farklı kürlenme yöntemleri altında inceledi. UK, YFC ve PK kütle ile %50 Portland çimentosu ile değiştirildi. Numuneler, su küründe (SK), oda sıcaklığındaki hava küründe (HK), 24 saat boyunca 60 °C'de sıcak su sonrası normal su kürü ile kombine kür uygulanmıştır. Sonuçlar, sıcak hava kürü (SHK), yüksek basınç ve eğilme dayanımı ile etkili bir kür yöntemi olabileceğini göstermiştir, ayrıca çalışma bağlayıcı içinde YFC içeren harçların erken sıcak su kürlenme altında basınç dayanımı üzerinde daha yüksek bir artış olduğunu göstermiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölüm, Bölüm 1'de belirtilen hedeflere ulaşmada kullanılan araştırma metodolojisini açıklamaktadır;

- Kullanılan malzemeler ve bunların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kaynağına ek olarak detayları.
- Hazırlanan numunelerin tasarımını, kullanılan malzemelerin yüzdesinin ve miktarlarını (1 m³ için).
- Karıştırma dizileri ve döküm prosedürü; bu bölümde, bu amaçla kullanılan malzeme ve mikser karıştırma aşamaları, döküm öncesi ve sonrası kalıpların hazırlanması açıklanmaktadır.
- Kür yöntemleri; bu bölüm, bu çalışmada kullanılan kür koşullarının ayırt edilmesini içermektedir, kabul edilen kür koşulları SK, SSK ve BK'dir.
- Test numunelerinin hazırlanmasında benimsenen adımlar ve farklı test prosedürleri tartışılmaktadır. Bu çalışmada kabul edilen testler yayılma testi, birim ağırlık, su emme, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı'dır.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ)

Bu çalışmada CEM 1 42,5 R normal Portland çimentosu kullanılmıştır. TS EN 197-7:2011'e uygundur ve inceliği 3 560 cm²/g'dir. Tedarikçiden alınan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de ve kullanılan çimento Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 CEM 1 42,5 R'nin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri

TS EN 197-1 Standard Limit değerleri			
Fiziksel Özellikler			
		Standart	Ölçüm Sonuçları
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		-	3,13
Hacim Genleşmesi (mm)		≤ 10	1,0
Priz Süreleri (dakika)	Başlama	≥ 60	29,25
	Bitiş	≤ 600	160
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine)	-	3 350
	cm ² /g	-	
	45µ Elek Üstü	-	5,0
	90µ Elek Üstü	-	0,1
Basınç Dayanım Sonuçları (MPa)			
2 GÜN		≥ 20	30,5
7 Gün		-	42,1
28 Gün		≥ 42,5	49,0
Kimyasal Özellikler			
Toplam SiO ₂		% 18 ≤ - ≤ %26	19,57
Çözünmeyen Kalıntı		≤ % 5,0	0,40
Çözünen SiO ₂		% 18 ≤ - ≤ % 26	19,17
Al ₂ O ₃		% 3 ≤ - ≤ % 7	5,53
Fe ₂ O ₃		% 2 ≤ - ≤ % 6	2,86
CaO		% 59 ≤ - ≤ % 68	64,44
MgO		% 1 ≤ - ≤ % 3	2,09
SO ₃		% 1 ≤ - ≤ % 3	2,81
Kızdırma Kaybı		≤ % 5,0	2,45
Cl-		≤ % 0,1	0,018
Na ₂ OEq		-	1,18



Şekil 3.1 Çalışmada kullanılan CEMI 42,5 R çimento

3.1.2. Pirinç Kabuğu Külü(PK)

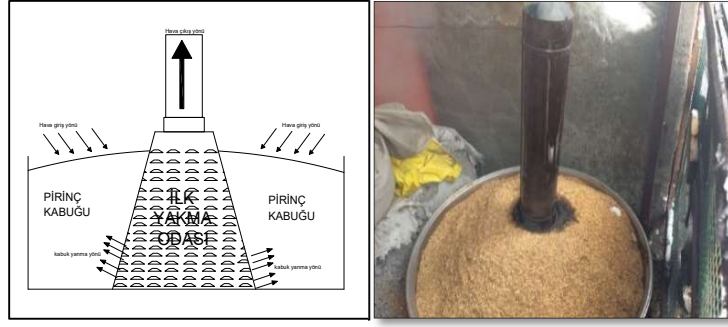
Pirinç kabuğu külü (PK) mineral katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Pirinç kabuğu, Kastamonu/Türkiye'deki bir pirinç üretim fabrikasından temin edilmiştir. PK aşağıdaki adımlarla elde edildi;

- Laboratuarda bu amaçla üretilen basit bir soba'da PK yakılmıştır. Bu soba, havalandırma için birçok küçük açıklığa ve 60 kg ham pirinç kabuğu kapasitesine sahiptir. Yanan sobanın planı ve fotoğraflık görünümü Şekil 3.2'de gösterilmiştir.
- 24 saatlik yanma süresinden sonra, pirinç kabuğu külü (PK), sobadan dikkatlice çıkarılmıştır.
- Bundan sonra PK, halkalı değirmen öğütücü ile öğütme işlemine hazırlamak için uygun bir elek ile elenmiştir, öğütücü Şekil 3.3'te gösterilmiştir.
- PK öğütme süresi, kimyasal katkı maddesi eklenmeden 60 dakikadır.

Elde edilen PK Şekil 3.4'te gösterilmiştir ve kimyasal özellikleri Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.2 PK kimyasal analizi

Oksit %	%
SiO ₂	96,55
Al ₂ O ₃	0,55
Fe ₂ O ₃	0,31
CaO	0,60
MgO	0,88
SO ₃	0,21
K ₂ O	2,28
Na ₂ O	1,07



Şekil 3.2 PK üretmek için kullanılan yakılan soba



Şekil 3.3 PK taşlama için kullanılan Halkalı değirmen öğütücü



Şekil 3.4 PK'nın fotoğraflı görünümü

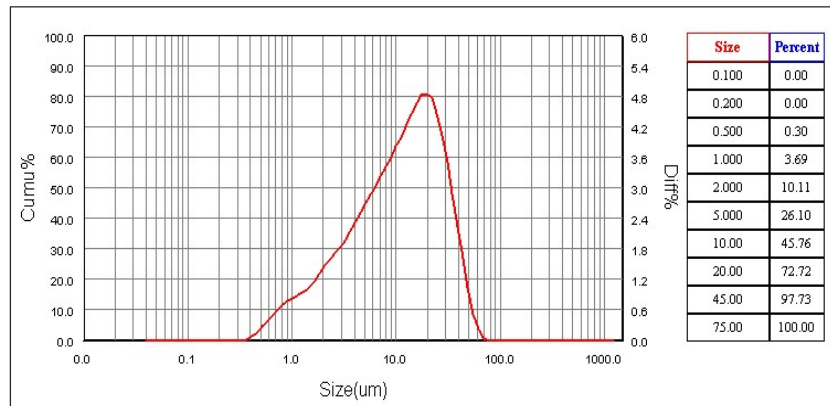
3.1.3. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Bu çalışmada kullanılan YFC'ü, Erdemir Demir Çelik fabrikası (Zonguldak-Ereğli) ve Oyak Bolu Çimento San. İnş. Şirk.'ten temin edilmiştir. Elde edilen YFC, $2,95 \text{ g/cm}^3$ Özgül ağırlığa ve $4\,989 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliğine sahiptir. Üreticiden alınan YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir. 7 ve 28 günlük puzzolanik aktivite indeksleri sırasıyla 54,2 ve 72,5 olarak belirlenmiştir. YFC'nin parçacık boyutu sınıflandırılması Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

YFC bünyesinden nemini uzaklaştırması için, 24 saat boyunca 105 °C kurutulmuş (Şekil 3.7). Bundan sonraki kurutma işlemi, cüruf çelik bilyalı değirmen makinesi ile öğütülmüştür (Şekil 3.7). İçerisinde kimyasal katkı olmadan 30 dakika boyunca aralıksız öğütülmüştür. Elde edilen YFC Şekil 3.8 gösterilmiştir.

Tablo 3.3 YFC kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oksit	%	EN 197-1 Standart limit değerler	Test metodu
MgO	5,75	Max. 18	TS EN 196-2
S(sulfide)	0,54	Max. 2,0	TS EN 196-2
SO ₃	0,19	Max. 2,5	TS EN 196-2
CL ⁻	0,0185	Max. 0,1	TS EN 196-2
Nemlilik	0,06	Max. 1,0	TS EN 15167-1
Na ₂ O	0,56	-	TS EN 196-2
K ₂ O	0,28	-	TS EN 196-2
Na ₂ O Eşdeğer	0,74	-	TS EN 196-2
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık g/cm ³	2,95	-	TS EN 196-6
Özgül yüzey cm ² /g	4 989	Min. 2 750	TS EN 196-6
Mineralojik özellikler	%		
Cam içeriği	100	-	TS EN 196-2
LOI	0,09	Max. 3,0	TS EN 196-2



Şekil 3.5 YFC partikül boyutu dağılımı



Şekil 3.6 Kurutma amacıyla kullanılan fırın



Şekil 3.7 YFC öğütülmesinde kullanılan bilyalı değirmen



Şekil 3.8 Karışımlarında kullanılan YFC

3.1.4. Agreg

Harç karışımlarının hazırlanmasında, ince agrega olarak 0-2 mm arasında değişen partikül büyüklüğüne sahip silis kumu kullanılmıştır. Silt veya kil tabakalarının varlığında çimento ve agrega arasındaki bağ dayanımının azaltılmasını önlemek için agregaların temiz olmasını sağlamak önemlidir. Bu çalışmada kullanılan agrega Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Harç karışımında kullanılan silis kumu

3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı

Bu çalışmada süperakışkanlaştırıcı olarak, CHRYSO Lab Bet 8109 kullanılmıştır. Bu süperakışkanlaştırıcı, TS EN 934-2. Ç.3.1/3.2.'e uygun yüksek oranda su azaltıcı beton katkıdır.

İşlenebilirliği arttırarak düşük su/çimento oranı için kullanılan yeni nesil polikarboksilat bazlı Süper akışkanlaştırıcıdır ve özellikle KYB için tavsiye edilir, tedarikçi belgesine göre özetle, CHRYSO Lab bet 8109'un teknik detayları ve açıklaması Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4 CHRYSO Lab Bet 8109 teknik detayları ve Özeti

Süperakışkanlaştırıcı Türü	CHRYSO Lab Bet 8109
Temel	polycarboxylate
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,075±0,02 gm/cm ³

3.1.6.Su

Bu çalışmada TS-EN 1008 (2003) standardına göre Kastamonu Üniversitesi kampüsünün içilebilir suyu tüm karışımlar için kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları

Bu çalışmada, harç karışımları 0,22 sabit su/ bağlayıcı (S/B) oranı ve 1 000 kg/m² toplam bağlayıcı içeriği ile tasarlanmıştır. Referans karışımı % 100 PÇ ile üretildi. Çimento, 0, 5, 10 ve %15 içeriğe sahip üç YFC yüzdesiyle değiştirildi ve Her YFC yüzdesinin 0, 5 ve %10'u içeren üç farklı PK oranı mevcuttur. Bağlayıcı-agrega oranı 1/1'de sabittir. Tablo 3.5. ve Tablo 3.6' ya göre 11 deney karışımı hazırlandı.

Tablo 3.5 Farklı karışım oranları

Karışım no	Çimento	YFC	PK	Agrega/bağlayıcı	S/b	SA/b
%						
1	100	0	0	1	0,22	0,02
2	95	0	5	1	0,22	0,02
3	90	0	10	1	0,22	0,02
4	95	5	0	1	0,22	0,02
5	90	5	5	1	0,22	0,02
6	85	5	10	1	0,22	0,02
7	90	10	0	1	0,22	0,02
8	85	10	5	1	0,22	0,02
9	80	10	10	1	0,22	0,02
10	85	15	0	1	0,22	0,02
11	80	15	5	1	0,22	0,02
12	75	15	10	1	0,22	0,02

Tablo 3.6 Bir metreküp harç içindeki malzeme miktarları

Çimento	YFC	PK	Kum	Su	SA
(kg/m ³)					
1 000	0	0	1 000	220	20
950	0	50	1 000	220	20
900	0	100	1 000	220	20
950	50	0	1 000	220	20
900	50	50	1 000	220	20
850	50	100	1 000	220	20
900	100	0	1 000	220	20
850	100	50	1 000	220	20
800	100	100	1 000	220	20
850	150	0	1 000	220	20
800	150	50	1 000	220	20
750	150	100	1 000	220	20

3.2.2. Karıştırma Dizileri

Bu çalışmada, karışımın kuru bileşenleri tarafından suyun yüksek emmeyi önlemek ve ayrışmayı önlemek için aşağıdaki karıştırma adımları benimsenmiştir:

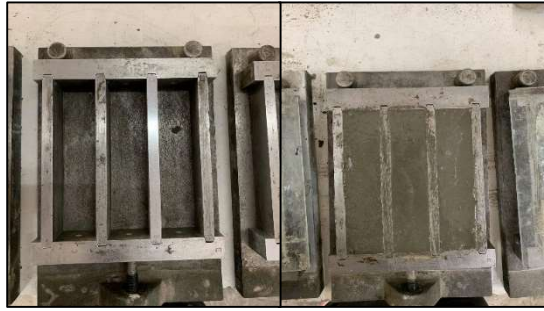
- Su/bağlayıcı oranı ile belirlenen su içeriğinin yüzde 30'unu eklendi.
- Islak kum karışımı için beş dakika karıştırıldı.
- PÇ, PK ve YFC gibi kalan kuru malzemeleri ekleyerek 5 dakika karıştırıldı.
- Yavaş yavaş, Süper akışkanlaştırıcıların yüzde 50'sini ve suyun yüzde 30'unu ilave ederek 5 dakika boyunca karıştırmaya devam edildi.
- Son olarak, kalan su ve süper akışkanlaştırıcılar eklenerek ve on dakika boyunca karıştırmaya devam edildi. Karıştırmada kullanılan karıştırıcı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Harçların karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı

3.2.3. Numune Hazırlama

Bu çalışmada her deney karışımı için 45 numune hazırlanmıştır. Numune boyutu (40 X 40 X160) mm'dır. Kalıplar, numunelerin döküm işlemini tamamladıktan sonra herhangi bir sıkıştırma olmaksızın taze harçla doldurulmuş; nem kaybını önlemek için kalıplar 24 saat boyunca cam panel ile kaplanmıştır. Numuneler, 2 yarı eşit parçada eğilme dayanımı ile test edilmiştir. Bu iki parça basınç dayanımı test etmek için de kullanılmıştır. Ve 12 test numunesi diğer test uygulamalarında kullanmak için, ayrılmıştır. Numune hazırlama aşamaları Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



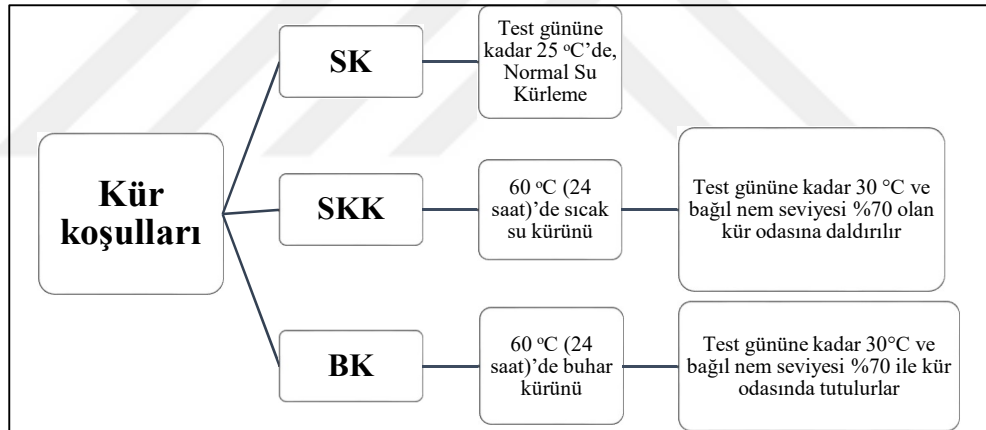
Şekil 3.11 Numune hazırlama aşamaları

3.2.3. Kür Yöntemleri

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi, bu çalışmada aşağıdaki gibi üç farklı kür koşulu uygulanmıştır:

1. Normal su kürü (NSK): Numuneler test gününe kadar kür işlemleri TS EN 12390-2 standartına uygun olacak şekilde 23 ± 2 °C ve % 95 neme sahip kirece doygun kür havuzunda bekletilmiştir

2. Sıcak su kürü (SSK): 60 °C (24 saat)'de sıcak su kürü kombine kür yöntemine dâhil edildi. Bundan sonra numuneler 60°C suda tutulur ve yavaş yavaş kür oda sıcaklığına ulaşması için iki saat serin bırakılır ve sular oda sıcaklığına ulaştığında, test gününe kadar 30 °C ve bağıl nem seviyesi %70 olan kür odasında suya daldırılarak bekletilmiştir.
3. Buhar kürü (BK): 60 °C (24 saat)'de buhar kürünü, kombine kür yöntemine dâhil edildi. Bundan sonra numuneler 60° C suda tutulur ve yavaş yavaş kür oda sıcaklığına ulaşmak için iki saat serin bırakılır ve sular oda sıcaklığına ulaştığında, test gününe kadar 30°C ve bağıl nem seviyesi %70 ile kür odasında bekletilmiştir. Tüm kür uygulamaları sonunda numuneler TS EN 196-1(2002) standardına uygun olarak ortadan tekil yüklemeli eğilme deneyine ve eğilme sonrası tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur Sıcak su ve buhar kürleme için kullanılan tank Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Kür yöntemleri



Şekil 3.13 Sıcak su ve buhar kürleme tankı

3.3. Test Prosedürü

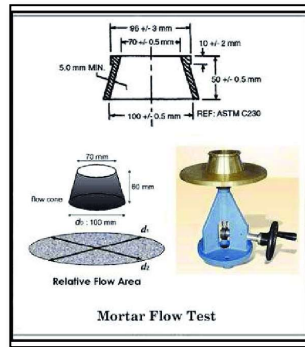
Laboratuvar testleri, hem taze hem de sertleştirilmiş harç özelliklerine yönelik testlerden oluşmaktadır. Taze beton, yayılma tablası testi ile test edilmiştir. Sertleşmiş beton, birim ağırlık, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ile test edilmiştir.

3.3.1. Yayılma Testi

Harcın taze hal özelliği, Şekil 3.14'te gösterilen ASTM C1437'ye göre yayılma tablasının yapılması ile belirlenmiştir. Bu yöntem, beton yoğunluğunun ve yapışkanlığının bir göstergesidir. Aynı zamanda sarsıntıya maruz kalan bir beton yığınının yayılmasını ölçerek ayrışmaya karşı eğilim vermesidir. Bu test segregasyon açısından en büyük değere sahiptir. Bununla birlikte, sert, zengin ve yapışkan beton karışımlarının yoğunluğunu iyi bir şekilde değerlendirmesini de sağlamaktadır. Normalde bu yöntem agrega düşük boyutunun 38 mm'yi aşmadığı beton için kullanılmaktadır. Akış testi, betonun çökme testinin kullanılabileceği kıvamları için tatmin edici sonuçlar verir. Bu testte; kesik koni, taze harç ile doldurulmuş ve dairesel akış tablasının ortasına yerleştirilmiştir. Bundan sonra koni dikkatlice yukarı kaldırılır ve masaya yerleşen taze harç üzerine bırakılır. Yerleşmiş taze harcın çapı ilk kayıt olarak ölçülür ve daha sonra tabloda 15 saniyede 25 kez düşürülmüştür. Standartta %105 ila %115 arasında değişen akış belirtileri, numunenin işlenebilirliğini gösterir. Çapın referansı 101,5 mm'dir ve akış yüzdesi eşitlik 3.1' de belirlenebilir.

$$D_0 \text{ (mm)} = 101,6 \text{ mm (test konisinin alt kenarının çapı)}$$

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



Şekil 3.14 Harç yayılma testi (ASTM C1437)

3.3.2. Su Emme, Porozite ve Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

Harç numunelerinin 28 gün boyunca kür havuzundan çıkardıktan sonra porozite ve su emme miktarları deneyleri ASTM C642/97 ve TS EN 12390-7'ye göre belirlenmiştir. Suyu doymuş ağırlığı ve ardından 24 saat boyunca 100 °C (± 5 °C) etüvde bekletildikten sonra kuru ağırlığı belirlenmiştir. (Şekil 3.15)' te Arşimet terazisi ile su içinde tartımı yapılarak gerçek hacim değerleri bulunmuştur. Buna bağlı olarak sertleşmiş birim hacim ağırlığı, su emme ve porozite değerleri (3.2), (3.3) ve (3.4) denklemleri ile hesaplanmıştır.

$$\text{Birim Hacim Ağırlık} = \frac{W_0}{W_1 - W_2} \cdot \frac{t}{m^3} \quad (3.2)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \quad (3.3)$$

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2} \quad (3.4)$$

Burada;

W_0 = kuru ağırlık (Etüv kurusu)

W_1 = Suyu doymuş durumda ağırlık

W_2 = Suyun içerisindeki ağırlık olarak tarif edilmektedir



Şekil 3.15 Arşimet test ekipmanı

3.3.3. Eğilme Dayanımı Testi

Bu çalışmada ASTM C293-1994'e göre merkez nokta yüklemeli P numuneleri kullanılarak eğilme dayanımı belirlenmiştir. Üç noktalı yükleme koşulları altında bir kirişin bükülmesi için gereken kuvveti (P) ölçer. Bu testte kiriş numunesi, Şekil 3.16'da gösterildiği gibi iki destek üzerine yatay duruma yerleştirildi ve numunenin ortasına makine yükleme kuvveti uygulandı. Yükleme, kopma oluşana kadar numune üzerinde ve şoklama yapılmadan sürekli olarak başlatıldı. Ayrıca, yükün kiriş numunesinin Merkez çizgisinin hemen üstünde olmasını sağlamak önemlidir ve aynı zamanda numunenin yüzeyi ile kuvvet paneli arasında herhangi bir boşluk bırakmadan tam temas etmesi gerekmektedir. Eğilme dayanımı, Eşitlik cinsinden KN tarafından kaydedilen kuvvet değeri kullanılarak belirlendi. Test Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

$$\sigma = 1.5 PL / 2bd^2 \quad (3.5)$$

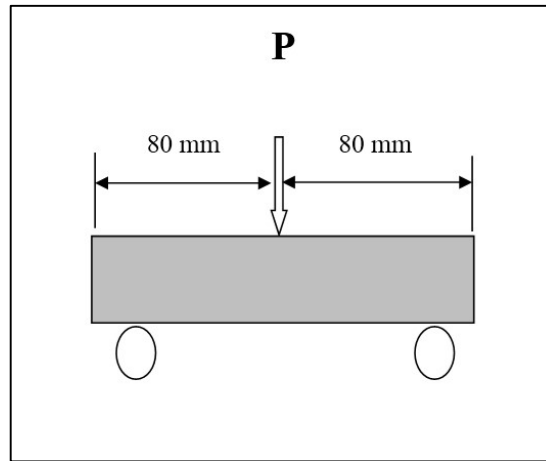
Eşitlikte;

P= Test makinesi tarafından uygulanan maksimum yük

L= Açıklık uzunluğu

B= Kırılma noktasında numunenin ortalama genişliği

D= Kırılma noktasında numunenin ortalama derinliği



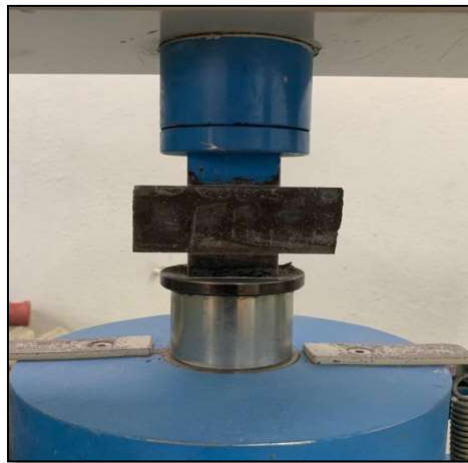
Şekil 3.16 Merkez nokta yükleme ile bükülme testinin şematik görünümü



Şekil 3.17 Eğilme testinin fotografik görünümü

3.3.4. Basınç Dayanımı Testi

Bu çalışmanın en önemli amacı, çimento ikame malzemeleri ile hazırlanan harç karışımlarının mekanik performansının basınç dayanımı testi yapılarak değerlendirilmesidir. Basınç testi, sertleştirilmiş beton üzerindeki tüm testlerin en yaygın olanıdır. Betonun potansiyel dayanımını tahmin etmek için kullanılır. Bu çalışmada ki basınç dayanımı testi TS-EN196-1'e göre belirlenmiştir. Basınç dayanımı testi, eğilme dayanımının tamamlanmasından sonra gerçekleşmiştir. Basınç dayanımı testi Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Basınç dayanımı testi

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yayılma testi, sertleşmiş harcın birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme ve porozite gibi taze ve sertleşmiş harçlarda yapılan testlerin sonuçları, ayrıca farklı kür süreçlerinden elde edilen sonuçlar bu bölümde ele alınacaktır.

4.1. Taze Harç Özellikleri

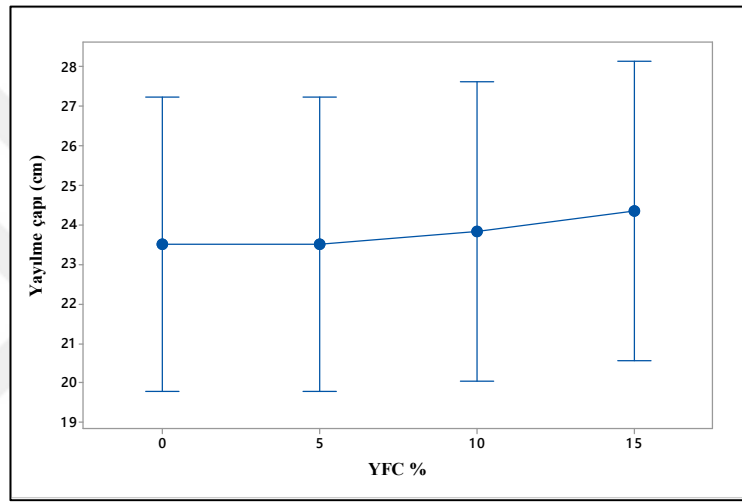
Bölüm 3'te açıklandığı gibi, tüm deneysel karışımlar için süperakışkanlaştırıcı yüzdesi sabitlenmiştir. Çeşitli karışımların yayılma testi sonuçları Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Yayılma testi Sonuçları

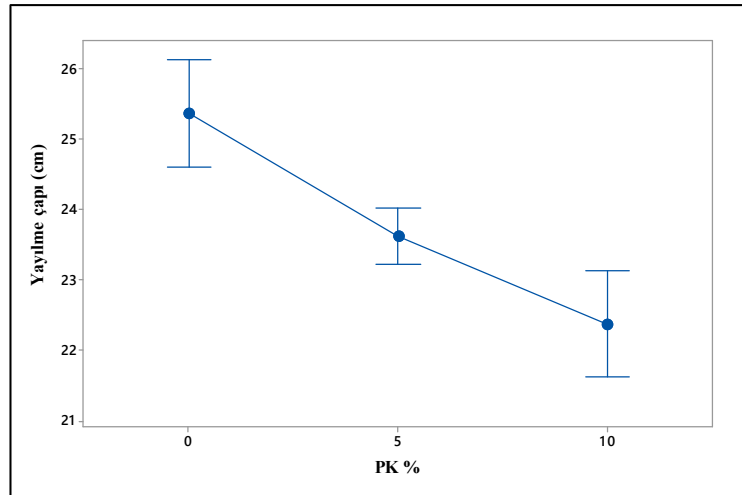
Karışım kodu	Çimento	YFC %	PK %	Yayılma çapı (cm)
REF	100	0	0	25
C0P5	95	0	5	23,5
C0P10	90	0	10	21
C5P0	95	5	0	25
C5P5	90	5	5	23
C5P10	85	5	10	22
C10P0	90	10	0	25,5
C10P5	85	10	5	25
C10P10	80	10	10	22
C15P0	85	15	0	26
C15P5	80	15	5	24
C15P10	75	15	10	23

Tablo 4.1'de görüldüğü gibi, REF karışım, en yüksek değerin %15 YFC ve %0 PK ile karışım C15P0'e ait olduğu 25 cm yayılma testi sonuçları ile elde edilmiştir. En düşük yayılma değeri ise, %10 YFC ve %10 PK ile C0P10 karışımında gerçekleşmiştir. Genel olarak, dört karışım, REF karışımlarının C5P0, C10P0, C10P5 ve C15P0 yayılma sonuçları değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.1, YFC'lerin yayılma testinden elde edilen sonuçlar üzerindeki bireysel etkisini göstermektedir. Şekil incelendiğinde, YFC içeriğinin artmasının, PÇ'nin yerine kullanılan YFC'nin küresel şekli ve pasta hacmini artıran, ince agrega-pasta arayüzünde sürtünmeyi azaltan yayılma sonuçlarında hafif bir iyileşme sağladığı görülebilmektedir (Zhao vd., 2015). Bu nedenle, YFC içeriğinin PÇ'nin yerine %0'dan %15'e yükselmesiyle yayılma sonuçları 25 ile 26 cm arasında değişmektedir. YFC'nin etkisi, aşağıda sunulan yayılma sonuçlarını düşürmeye yol açan PK'nin varlığı nedeniyle önemli değildir.

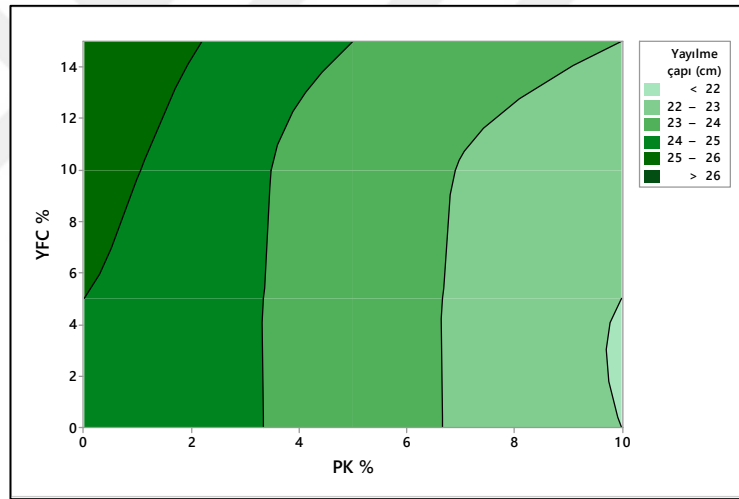


Şekil 4.1 YFC'nin yayılma testi sonuçlarına etkisi



Şekil 4.2 PK'nin yayılma testi sonuçlarına etkisi

Şekil 4.2, PK'nin yayılma testi sonuçları üzerindeki etkisini göstermektedir, PK artışının yayılma sonuçlarını düşürdüğü açıktır. Böylece, PK içeriğinin 0% 'den 5%' e ve daha sonra 10 %'a artışı, yayılmayı 25,5 cm, 23,6 cm ve 22,3 cm olarak düşürmüştür. Genel olarak, PK içeren harçta kuma veya ayrışma kaydedilmemiştir. Van Tuan vd. (2011), bu duruma PK'nin yüksek özgül yüzey alanı ile açıklamışlardır. Ayrıca, Nair vd. (2013) çalışmasında, süperakışkanlaştırıcı dozajının PK içeriğinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Bu durumu PK örneğinin porozitesine bağladılar. Bu nedenle, PK'nin yüzde değişimi arttıkça, karışımdaki PK'nin miktarı artar, bu da kontrol betonununki ile aynı derecede yağlama elde etmek için süperakışkanlaştırıcı içeriğinin aşırı kullanımını gerektirir. Bu, Habeeb ve Mahmud (2010) ile aynı fikirde olup, SA içeriğinin, su talebini artıracak olan PK'nin yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle PK inceliği ve içeriği ile birlikte arttırılması gerektiğini bildirmiştir.



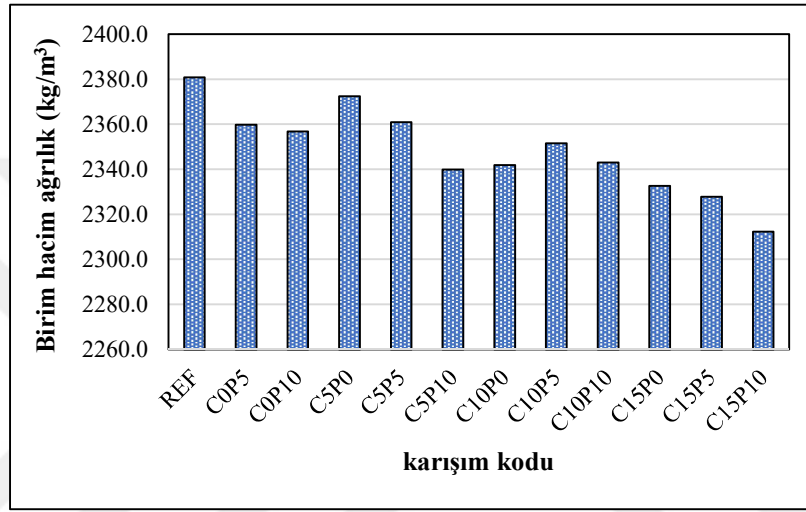
Şekil 4.3 YFC ve PK ve yayılma sonuçlarının Optimum içeriği

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, yüksek yayılma sonuçlarına ulaşmak için YFC ve PK'nin optimum yüzdeleri sırasıyla %15 ve %0'dır. En düşük sonuç değeri PK için %10 ve YFC için ise %0 ile elde edilmiştir.

4.2. Sertleştirilmiş Özellikler

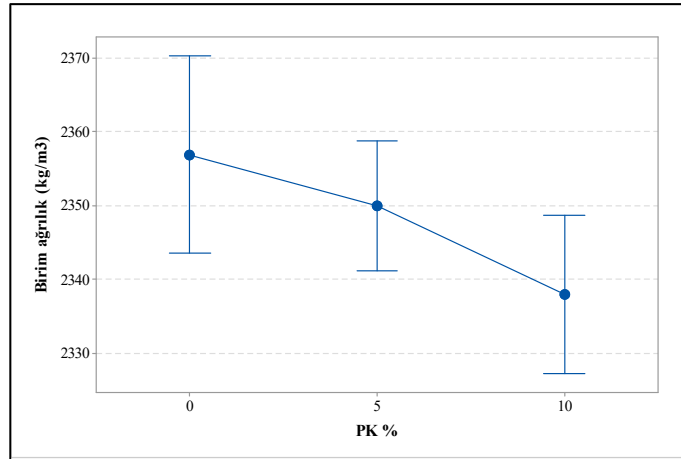
4.2.1. Birim Hacim Ağırlık (BHA)

Deneysel karışımlar için elde edilen BHA sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bu sonuçlar, tüm sertleşme koşullarından ortalama birim ağırlık değerleri alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca YFC ve PK'nin etkileri Şekil 4.5, Şekil 4.6'da sunulmuştur.



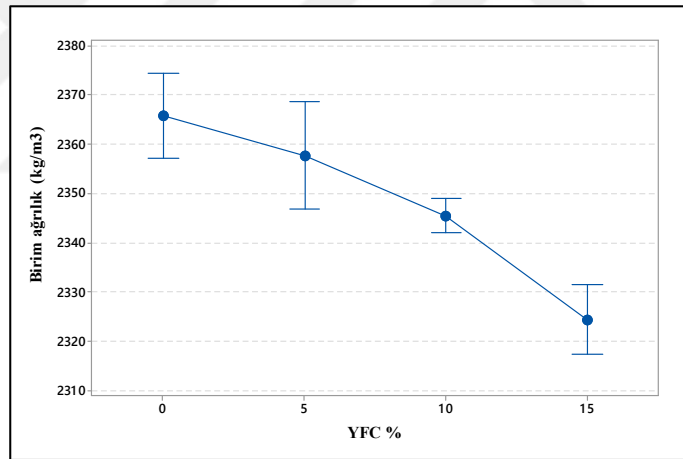
Şekil 4.4 Deneysel karışımların birim ağırlık Sonuçları

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, PK ve YFC ile çimentonun değiştirilmesi, tüm karışımların BHA değerlerini düşürmüştür. Bu nedenle, REF karışımında, BHA 2 380,9 kg / m³'tür, ancak C15P10'daki çimentonun %15 değiştirilmesinde, 2 312,3 kg/m³'ün en düşük BHA ulaşılmıştır.



Şekil 4.5 PK'nin BHA üzerine etkisi

Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, PK içeriğinin artması BHA değerlerinin ortalamasını biraz düşürmektedir. PK'nin %0, %5 ve %10 olarak artması BHA 2 356,9 kg/m³, 2 350 kg/m³ ve 2 337,9 kg/m³ olarak düşürmüştür. Bu, Habeeb ve Mahmud (2010) tarafından açıklandığı gibi birim hacim başına kütlenin düşüşüne yol açan PK'nin düşük özgül ağırlığından kaynaklanmaktadır. Bu aynı zamanda Nair vd. (2013) ile aynı fikirde olup, PK ile çimentonun değiştirilmesinin beton yoğunluğunun azaltılmasına neden olduğunu ve PK'nin özgül ağırlığının çimentodan çok daha düşük olması nedeniyle atfedildiğini belirtilmiştir. Aynı davranış, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi YFC içeriğinin artmasıyla gerçekleşmiştir. Böylece YFC'nin %0, %5, %10 ve %15 olarak artması, BHA 2 365,8 kg/m³, 2 357,7 kg/m³, 2 345,4 kg/m³ ve 2 324,4 kg/m³ olarak elde edilmesine neden olmuştur. Bu aynı zamanda, çimento ile karşılaştırıldığında daha düşük özgül ağırlıklarını da içeren çimento ve YFC arasındaki özgül ağırlıktaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Li, 2011).



Şekil 4.6 YFC'nin BHA sonuçlarına etkisi

4.2.2. Basınç Dayanımı

Deney karışımları için basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.2'de özetlenmiştir. Tabloda gösterildiği gibi, 3. günde, basınç dayanımının en yüksek sonucu REF karışım ile 90,6 MPa elde edilmiştir. Bununla birlikte, en düşük sonuç, SK altında kürlenene ve 53,4 MPa'ya ulaşan karışım C15P10'a aittir. 7 günlük harç karışımlarında, C0P10 karışımı ile elde edilen en yüksek basınç dayanımı değeri, bu karışımın basınç dayanımı 102,6 MPa ve en yüksek YFC değiştirme yüzdesi ile C15P0 karışımı ile elde edilen en düşük sonuçtur.

28 ve 90 gün süreli, C15P10 tarafından en yüksek basınç dayanımı sonuçları, 28 ve 90 günlerinde sırasıyla 119,9 MPa ve 123,3 MPa elde edilmiştir. REF karışım ile elde edilen en düşük sonuçlar ise sırasıyla 92,3 MPa ve 100,3 MPa'dır. Tabloda basınç dayanımının en yüksek sonuçlarını elde ettiği ve kür yönteminin etkileri ayrıntılı olarak açıklanacağı belirtilmiştir.

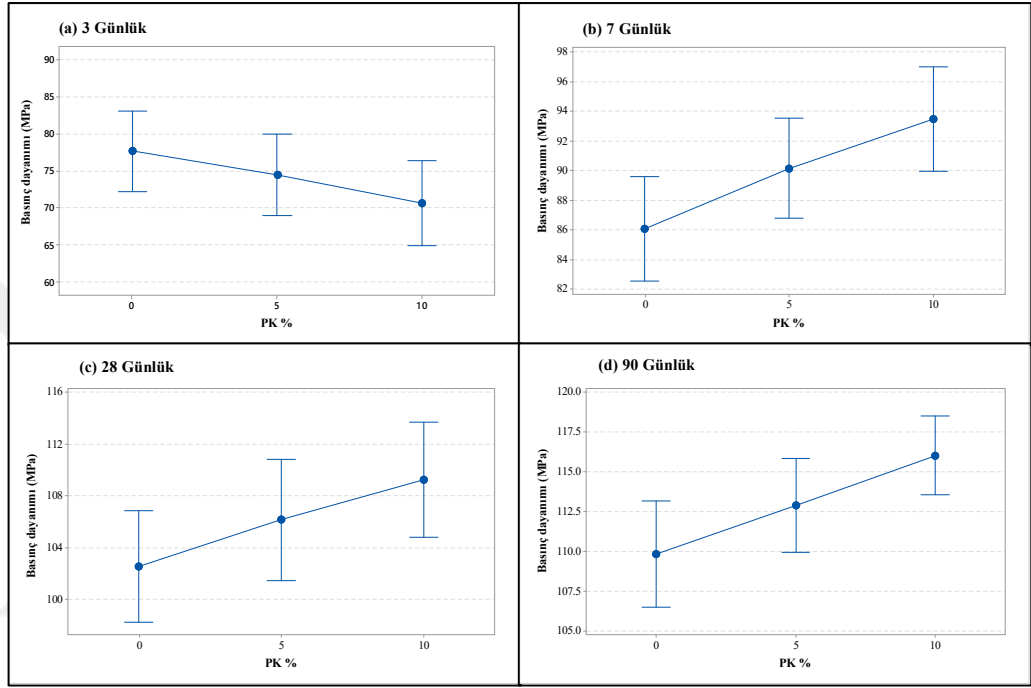
Tablo 4.2 Basınç dayanımı sonuçları

Karışım kodu	3 gün			7 gün			28 gün			90 gün		
	SK	SSK	BK	SK	SSK	BK	SK	SSK	BK	SK	SSK	BK
REF	75,6	87,3	90,6	81,4	92,1	94,2	92,3	98,6	100,1	100,3	104,6	106,6
C0P5	71,7	84,9	86,7	84,9	95,8	97,6	93,3	103,6	104,6	104,8	109,5	111,5
C0P10	68,5	78,6	84,1	90,1	98,1	102,6	96,4	105,6	107,9	110,2	111,8	113,8
C5P0	70,0	81,1	83,6	80,5	89,6	91,7	94,7	102,5	108,1	107,3	107,6	109,6
C5P5	67,4	80,6	82,4	84,6	93,8	96,4	96,6	107,4	110,3	108,1	110,8	112,8
C5P10	64,8	78,9	80,8	88,3	95,1	98,3	100,0	110,6	112,3	113,9	114,6	116,6
C10P0	62,7	79,8	80,7	79,8	87,6	89,5	99,8	105,3	110,9	108,8	110,2	112,2
C10P5	64,0	76,6	78,0	83,7	90,6	91,8	105,3	108,6	113,7	110,5	113,9	115,9
C10P10	59,8	70,9	71,8	85,1	93,1	95,6	107,0	112,8	116,7	113,4	115,9	117,9
C15P0	64,1	77,2	79,0	77,0	83,5	85,9	95,5	110,9	111,6	114,7	117,9	119,0
C15P5	58,1	70,3	72,8	82,1	89,6	90,7	98,5	115,6	116,3	117,5	119,6	119,8
C15P10	53,4	67,2	68,4	84,3	94,3	96,3	104,7	116,9	119,9	119,5	121,3	123,3

4.2.2.1. PK'nin basınç dayanımı üzerine etkisi

PK'nin 3, 7, 28 ve 90 Günlük harç dönemlerindeki basınç dayanımı üzerine etkisi sırasıyla Şekil 4.7 a, b, c ve d'de gösterilmiştir. 3 gün içinde, şekil 4.7 (a), PK değiştirme yüzdelerindeki artışın basınç dayanımında düşüşe neden olduğunu, bu nedenle PK'nin daha yüksek içeriğinin daha düşük basınç dayanımı elde ettiğini göstermektedir. %0, %5 ve %10 ile elde edilen basınç dayanımı sırasıyla 77,6 MPa, 75,4 MPa ve 70,6 MPa'dır. Van Tuan vd. (2011)'de bahsettiği gibi, sonuçların PK ile modifiye edilmiş numunenin erken dönemlerde, yani 7 günden önce daha düşük bir

basınç dayanımı gösterdiğini ve bu çalışmanın basınç dayanımındaki bu düşüşün, çimentonun hidratlanması için sistemdeki mevcut suyun daha düşük miktarından kaynaklandığı varsayılmıştır, PK karıştırma sırasında belirli bir miktarda su emer ve emilen su, betonun basınç dayanımının artmasına neden olan daha sonraki dönemlerde çimentonun hidratasyonunu teşvik edebilmektedir.



Şekil 4.7 PK'nin basınç dayanımı sonuçlarına etkisi

7, 28 ve 90 gün içinde ve Şekil 4.7 (b), (c) ve (d) ' de gösterildiği gibi, PK ile çimentonun değiştirme yüzdesindeki artış, basınç dayanımı sonuçlarını iyileştirmiştir. Buna göre, 7 günlük PK'nin %0, %5 ve daha sonra %10 artırılması, basınç dayanımını sırasıyla 86 MPa'dan 90,1 MPa'ya ve daha sonra 94,4 MPa'ya yükseltmiştir. 28 gün içinde PK içeriğinin %0, %5 ve %10 olarak artması, basınç dayanımını 102,5 MPa, 106,1 MPa ve 109,2 MPa ve 90 gün içinde sırasıyla 109,8 MPa, 112,8 MPa ve 116 MPa elde edilmesini sağlamıştır. Burada, yukarıdaki şekilde sunulan sonuçların, tüm kütleme yöntemleri ile elde edilen basınç dayanımının ortalama değeri olduğunu belirtmek önemlidir.

Van Tuan vd. (2011) çalışmasında ve PK modifiye edilmiş numunenin basınç dayanımı ile ilgili olarak, deneysel sonuçlar PK'nin daha sonraki dönemlerde UYPB'nin basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir. Bu çalışma,

karışımların paketleme yoğunluğunun arttırılması, PK'nin iç kürlenmesi ve PK karışımının daha düşük etkili s/b oranının arttırılmasıyla PK kullanılarak UYPB'nin basınç dayanımının iyileştirilmesini açıklandı. Bu nedenle, çimentodan daha küçük bir parçacık boyutuna sahip PK'nin eklenmesi, dolgu etkisi nedeniyle UYPB'nin basınç dayanımını arttıracaktır. Bu, aynı derecede çimento hidratasyonunda kontrol örneğinkine kıyasla PK modifiye edilmiş numunenin daha yüksek bir basınç dayanımına yol açmalıdır. Bu emilen su, daha sonraki dönemlerde çimentonun hidratasyonunu teşvik edebilir ve UYPB'nin basınç dayanımının artmasını sağlayabilir. Ek olarak, PK modifiye edilmiş numunenin daha yüksek basınç dayanımı, PK modifiye edilmiş karışımda etkili s/b oranının düşürülmesine bağlanabilir, çünkü serbest suyun bir kısmı eklenen PK tarafından emilir ve küçük gözeneklerinde tutulur (Van Tuan vd., 2011).

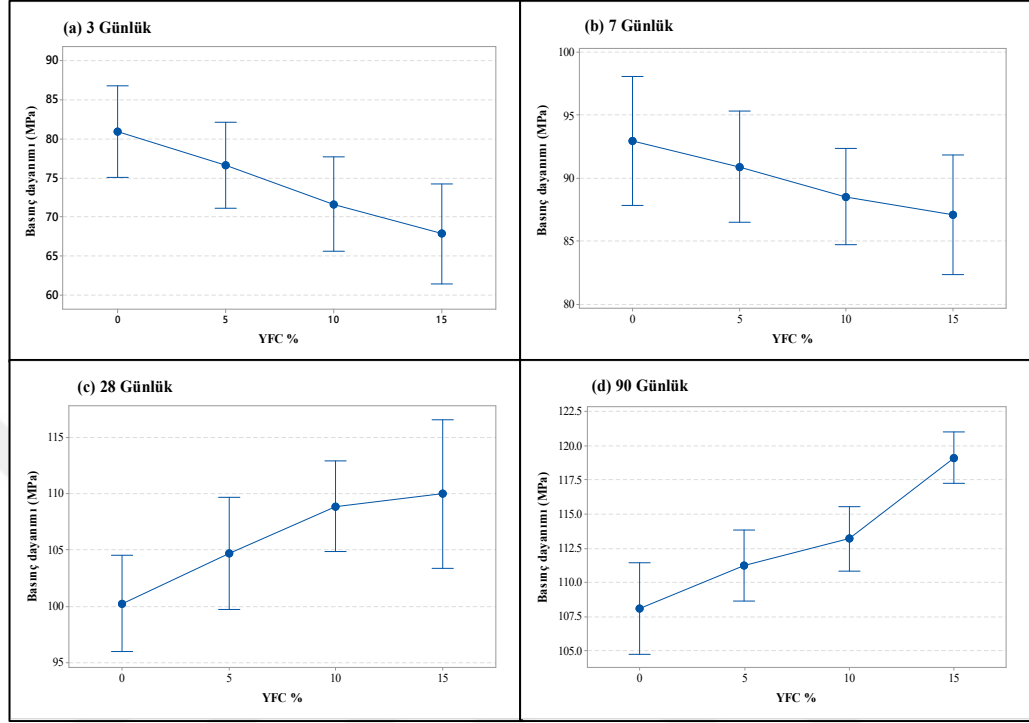
4.2.2.2. YFC'nin basınç dayanımı üzerine etkisi

YFC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.8 a, b, c ve d'de gösterilmiştir. Şekil 4.8 (a) ve (b) ' de gösterildiği gibi, YFC'de daha fazla içerik olmasına rağmen daha düşük basınç dayanımı sonuçları 3 günlük numunede elde edildi ve 7 günlük PK davranışının aksine YFC basınç dayanımı sonuçlarında düşüşe neden oldu. Mohseni vd. (2017), dayanım geliştirme sürecinde, PK içeren beton, UK ve YFC gibi aktivitelerin genellikle gecikmeli olduğu bu tür diğer çimentolu malzemelerden farklı, erken dönemde puzzolanik hızlı aktivite üretebilmektedir.

Şekil 4.8 (a) ' da görüldüğü gibi, 3 gün içinde YFC'nin değiştirme yüzdesi sırasıyla %0, %5, %10 ve %15 ortalama basınç dayanımı 80,8 MPa, 76,6 MPa, 71,6 MPa ve 67,8 MPa değerlerine ulaşırken, YFC eklenerek dayanım azalma yüzdeleri sırasıyla 5%, %11 ve %16 için değiştirme yüzdeleri %5, 10 ve 15'dir.

7 Günlük, YFC'nin %0, %5, %10 ve %15 oranında değiştirme yüzdesi, sırasıyla basınç dayanımında 92,9 MPa, 90,9 MPa, 88,5 MPa ve 87 MPa ortalama değerlerine ulaşmıştır. Bununla birlikte, basınç dayanımı sonuçlarındaki düşüş %2, %4 ve %5'dir, 7 günlük düşüşün 3 günlükten daha az olduğu fark edilmiştir, betonun erken

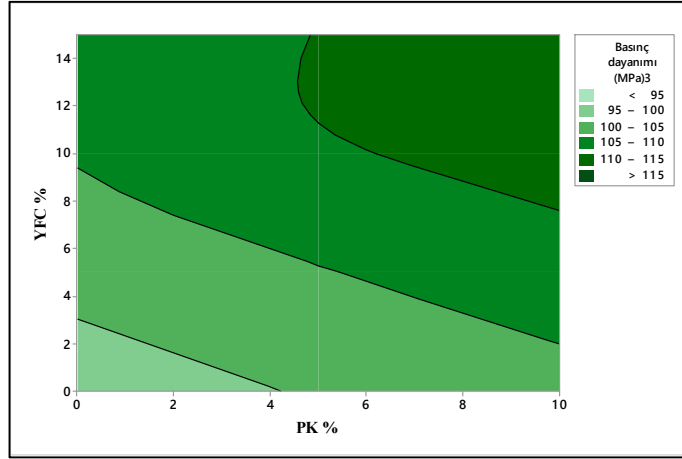
dönemdeki basınç dayanımındaki düşüşün, puzolanik aktivitenin üretilmesinin genellikle YFC’de gecikmeden kaynaklandığı fikri ile ilgilidir (Mohseni vd., 2017).



Şekil 4.8 YFC’nin basınç dayanımı sonuçlarına etkisi

28 ve 90 günlerinde, YFC ile çimentonun daha yüksek değiştirilmesi, basınç dayanımı sonuçlarında iyileşme sağlamıştır. 28 gün içinde YFC’nin %0, %5, %10 ve %15 olarak artması sırasıyla 100,2 MPa, 104,7 MPa, 108,9 MPa ve 109,9 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Ishak vd. (2017), YFC’nin PK ile birleşmesinin betonun özelliklerini geliştiren sinerjik etki sağlayabileceğini bildirmiştir. Ayrıca 90 gün içinde elde edilen basınç dayanımı sonuçları 108,1 MPa, 111,2 MPa, 113,3 MPa ve 119,08 MPa’dır. Thomas ve Rajaselvi (2016) çalışmalarında, YFC’yi betonda tek bir malzeme olarak kullanmanın, daha yüksek oranda değiştirme yüzdesinde basınç dayanımını düşüreceği belirtmiştir. Böylece, üçlü bağlayıcı değiştirme olarak PK ve YFC’yi kullanarak basınç dayanımı performansını artırabileceği kabul edilmiştir.

Şekil 4.9, PK ve YFC’nin optimum içeriği açısından, 28 günlük harç döneminde en yüksek basınç dayanımı sonuçlarını elde etmek için PK ve YFC’nin optimum değerlerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, en yüksek basınç dayanımı YFC’nin %8-15’i ve PK’nin %5 - 10’u ile elde edilmiştir.



Şekil 4.9 PK ve YFC'nin Optimum içeriği ve basınç dayanımı sonuçları

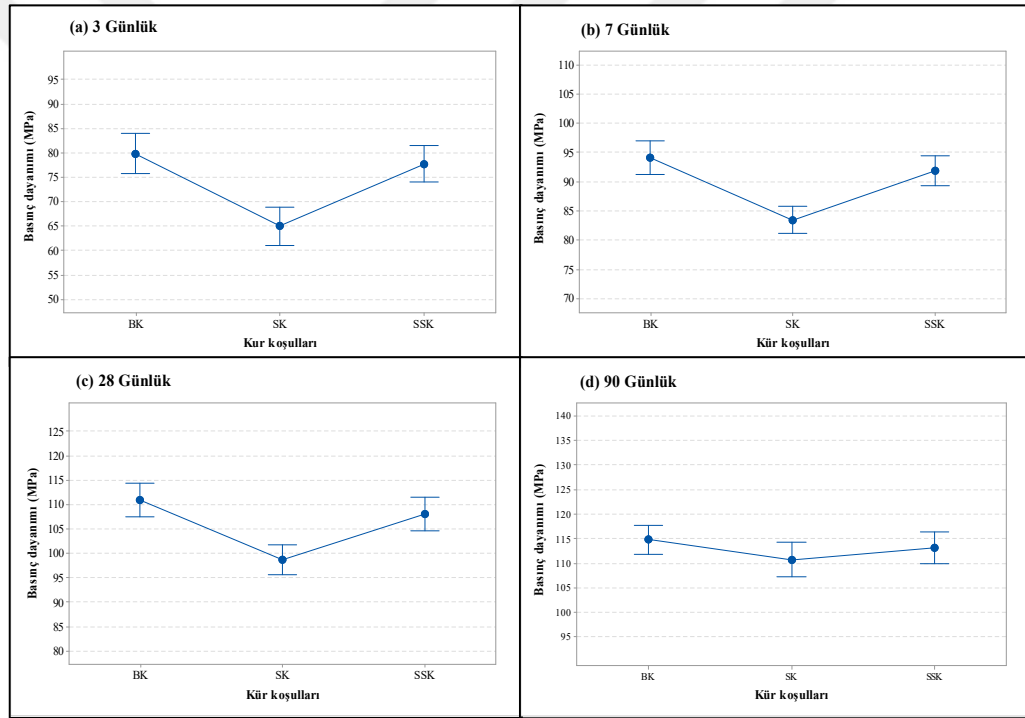
4.2.2.3. Basınç dayanımı üzerine kürleme koşullarının etkisi

Şekil 4.10 a, b, c ve d farklı kür rejimlerinin 3, 7, 28 ve 90 Günlük harç dönemlerindeki basınç dayanımı sonuçlarına etkisini göstermektedir.

Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, her dönem en yüksek basınç dayanımı buhar kürleme (BK) ile elde edilmiş ve en düşük sonuçlar normal su kürleme (SK) ile gerçekleşmiştir. Şekil 4.10 (a) 'da gösterildiği gibi, 3 gün içinde SK, SSK ve BK tarafından elde edilen sonuçlar sırasıyla 65 MPa, 77,7 MPa ve 79,9 MPa'dır. Soutsos vd. (2017) tarafından belirtildiği gibi, erken dönemlerde, reaksiyon hızı daha yüksek olduğu için dayanım daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksektir, ayrıca harçların erken dönem dayanımı gelişiminde, özellikle de YFC içerenlerde daha yüksek sertleşme sıcaklıklarının fayda sağladığını düşündüklerini belirttiler.

Khadiranaikar (2012), normal kürlemeye kıyasla sıcak suda kürlendiğinde basınç dayanımının %10 arttığını bildirmiştir. Ve çalışma, 27°C'ye kıyasla daha yüksek sertleşme sıcaklıklarında çimentonun hızlı hidratasyonundan kaynaklandığını açıklamıştır. Ayrıca Soutsos vd. (2017), YFC içeren harçların sıcaklığa daha duyarlı olduğunu ve erken dönemde kuvvetlerin sıcaklık ile daha geniş bir varyasyon gösterdiğini ortaya koymuştur.

Basınç dayanımındaki bu fark 7 gün içinde devam etmiştir, ancak bu dönemden sonra daha az gerçekleşmiş, 90 gün içinde fark kaybolmuştur. Böylece, 7 günlük SK, SSK ve BK sırasıyla 83,4 MPa, 91,9 MPa ve 94,2 MPa elde edilirken, 28 günlük kürlemede sırasıyla 98,6 MPa, 108,2 MPa ve 111 MPa elde edilmiştir. Farklı kürleme koşullarından elde edilen sonuçlar 90 günlük normal kürleme yöntemine daha yakinken, SK, SSK ve BK sırasıyla 110,7 MPa, 112,1 MPa ve 113,8 MPa elde edilmiştir. Soutsos vd. (2017), daha sonraki dönemlerde, yüksek sertleşme sıcaklıklarında dayanımın daha düşük olduğunu, reaksiyona girmemiş çimento parçacıkları etrafında yoğun hidratlı fazların oluşması nedeniyle daha fazla hidrasyonun önlendiğini açıklamıştır.



Şekil 4.10 kür rejiminin basınç dayanımı sonuçlarına etkisi

4.2.3. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımının 3, 7, 28 ve 90 gün içindeki sonuçları Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi, 3 gün içindeki eğilme dayanımı, C15P10 karışımındaki 7,2 MPa'dan C5P10 karışımındaki 13,3 MPa'ya kadar değişmiştir. 7 günlük en düşük sonuç, REF karışım ile elde edilen ve SK ile iyileştirilen 10,5 MPa, YFC ve PK'nin daha yüksek değiştirme yüzdeleri ile elde edilen en yüksek sonuçlar ve 28 ve 90

günlerindeki sonuçlar için geçerlidir. Genel olarak, 7, 28 ve 90 gün içinde, tüm deneysel karışımların REF karışımından daha yüksek eğilme dayanımı sonuçları elde edilmiştir, 28 ve 90 gün içinde en yüksek değerler sırasıyla 17,6 MPa ve 18,6 MPa'dır. Ayrıca, beklendiği gibi ve basınç dayanımı BK'ye benzer şekilde, eğilme dayanımını sıcak su kürlemesinden daha fazla geliştirmiştir.

Tablo 4.3 Eğilme dayanımı sonuçları

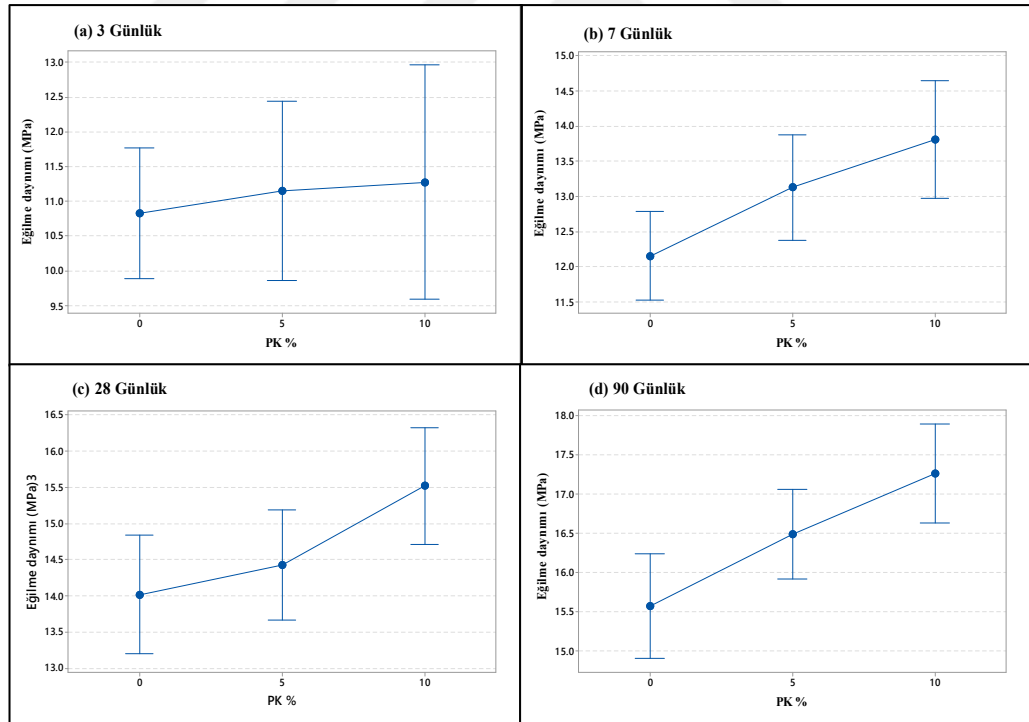
Karışım kodu	3 gün			7 gün			28 gün			90 gün		
	SK	SSK	BK	SK	SSK	BK	SK	SSK	BK	SK	SSK	BK
REF	9,8	10,9	11,3	10,5	12,2	12,5	12,1	13,7	13,9	14,1	14,4	15,9
C0P5	9,0	12,2	12,4	11,5	12,9	14,2	12,4	14,3	14,4	14,7	15,7	16,2
C0P10	7,9	12,5	13,0	11,3	13,2	14	13,5	15,1	16,6	15,1	15,9	17,6
C5P0	10,0	11	11,5	11,2	12,3	13,4	12,2	13,6	13,7	14,8	14,9	16,4
C5P5	9,8	11,9	12,9	11,8	13,7	14,2	12,8	14,5	14,6	15,5	16,6	17,2
C5P10	8,6	12,5	13,3	12,2	14,3	15,1	14,2	15,6	15,7	16,4	17,8	17,8
C10P0	8,5	12,1	12,8	11,2	13,2	14,6	13,0	14,9	15,3	14,9	15,4	16,8
C10P5	8,0	12,6	13,1	12,1	13,8	14,9	13,6	14,3	15,6	16,2	16,8	16,9
C10P10	7,4	12,9	14,6	13,0	14,2	15,4	13,9	15,7	16,3	17,2	17,3	17,5
C15P0	8,0	11,1	11,5	10,8	12,3	13	13,9	15,8	16,1	15,2	16,7	17,4
C15P5	7,4	12	12,3	11,3	14,7	14,9	14,1	16,1	16,5	16,9	17,2	18,0
C15P10	7,2	12,4	13,0	12,8	15,1	15,8	14,7	17,2	17,6	18,0	18,0	18,6

4.2.3.1. PK'nin eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.11, PK'nin 3, 7, 28 ve 90 günlük uygulamalarda eğilme dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi, PK ile çimento ikamesinin artması, hem erken hem de daha sonraki dönemlerde eğilme dayanımını sonuçlarını iyileştirmiştir. PK yüzdelerinde %0, %5 ve %10 olarak artış 10,8 MPa, 11,1 MPa ve

11,2 MPa, 3 gün içinde sırasıyla 12,1 MPa, 13,1 MPa ve 13,8 MPa olarak elde edilmiştir.

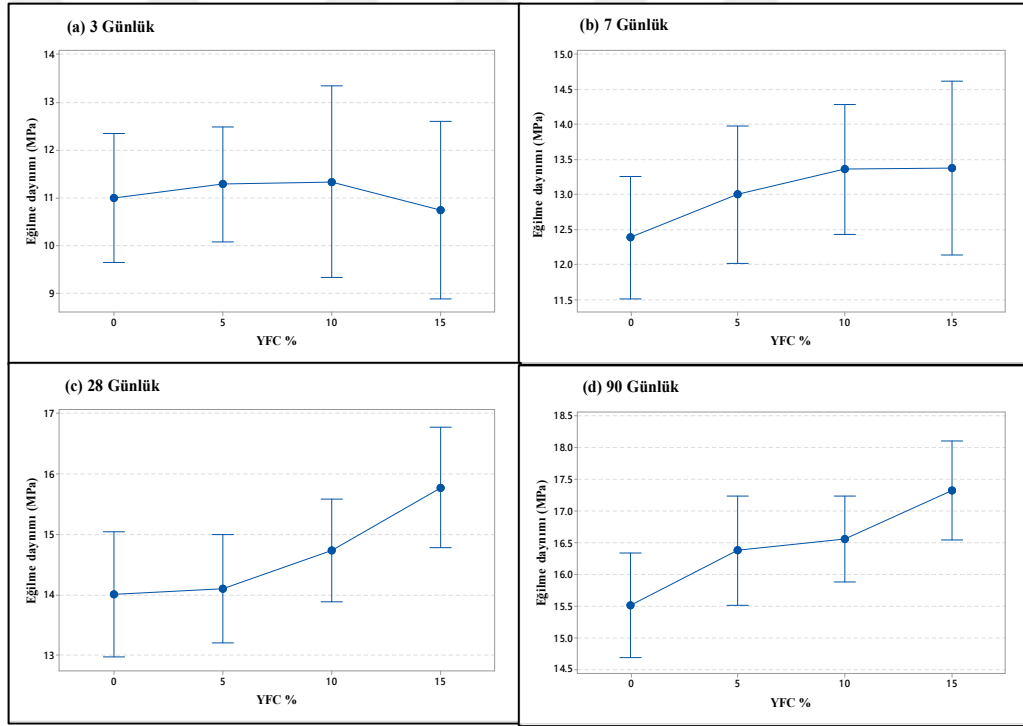
28 Günlük PK yüzdelерinin %0, %5'ten artması, eğilme dayanımını 14 MPa, 14,4 MPa olarak hafifçe arttırmıştır ve PK içeriğinde %10' a kadar daha fazla artış, eğilme dayanımında 15,5 Mpa daha yüksek iyileşme sağlamıştır. Talsania vd. (2017) ayrıca PK ile %20 NPCÇ değiştirme seviyesinde eğilme dayanımında bir artış gerçekleştirdiğini bildirmiştir. Vinothan ve Baskar (2015), PK ile PÇ'nin sadece %10 değiştirme seviyesinde eğilme dayanımında bir artış gösterdiğini belirttiler. Nair vd. (2013) çalışmasında, 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarının yüzde 25 çimentonun PK ile değiştirilmesiyle arttığını göstermiştir. Çalışmada, puzolanik reaksiyonu hızlandıran PK'nin daha yüksek özgül alanı nedeni ve çalışmaya göre PK'da daha yüksek CaO içeriğinin varlığından kaynaklandığının ikinci neden olduğunu belirtilmiştir.



Şekil 4.11 PK'nin eğilme dayanımı üzerine etkisi

4.2.3.2. YFC'nin eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.12, YFC'nin 3, 7, 28 ve 90 günlerinde eğilme dayanımı sonuçları üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, 3 günlük YFC içeriğindeki %10'a kadar artışı eğilme dayanımını biraz arttırmıştır, ancak %15'e daha fazla artış sonuçlarda belirgin bir düşüşe yol açmıştır. Bununla birlikte, 7 günlük harç döneminden sonra, YFC'nin artışı tüm karışımlarda eğilme dayanımını arttırmıştır ve YFC'nin tüm yüzdeleri REF karışımından daha yüksek eğilme dayanımı değerleri elde etmiştir. Kumar Karri vd. (2015) çalışmasında, çimentonun YFC ile yaklaşık %40 oranında değiştirilmesinde betonun maksimum eğilme dayanımına ulaştığı gözlenmiştir.

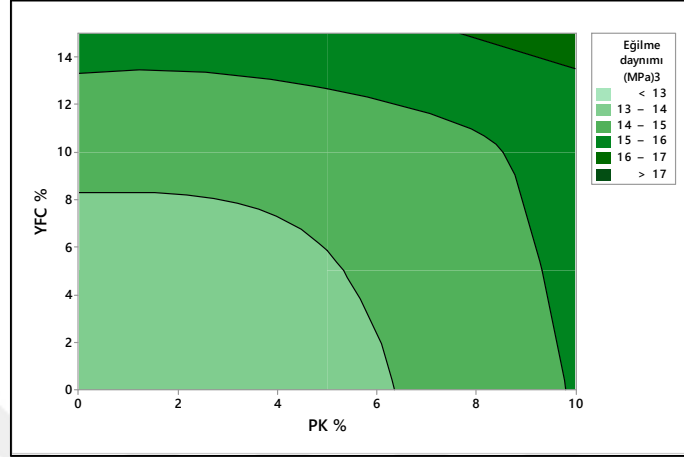


Şekil 4.12 YFC'nin eğilme dayanımı sonuçlarına etkisi

3 Günlük %0, %5, %10 ve %15 için elde edilen eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla 11 MPa, 11,2 MPa, 11,3 MPa ve 10,7 MPa'dır, 7 günlük sonuçlar ise 12,3 MPa, 13 MPa, 13,3 MPa ve 13,4 MPa'dır.

28 Günlük, YFC'nin %0'dan %5'e yükselmesi, sırasıyla 14 MPa ve 14,1 MPa olarak eğilme dayanımında hafif bir artışa neden olmuştur ve %10 ve %15'e daha fazla artış,

14,7 MPa ve 15,7 MPa olarak eğilme dayanımı üzerinde daha etkili bir artışa yol açmıştır. 90 günlük, YFC içeriğinin %0, %5, %10 ve %15 için sırasıyla 15,5 MPa, 16,3 MPa, 16,5 MPa ve 17,3 MPa olarak eğilme dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 4.13 Optimum PK ve YFC içeriği ve eğilme dayanımı sonuçları

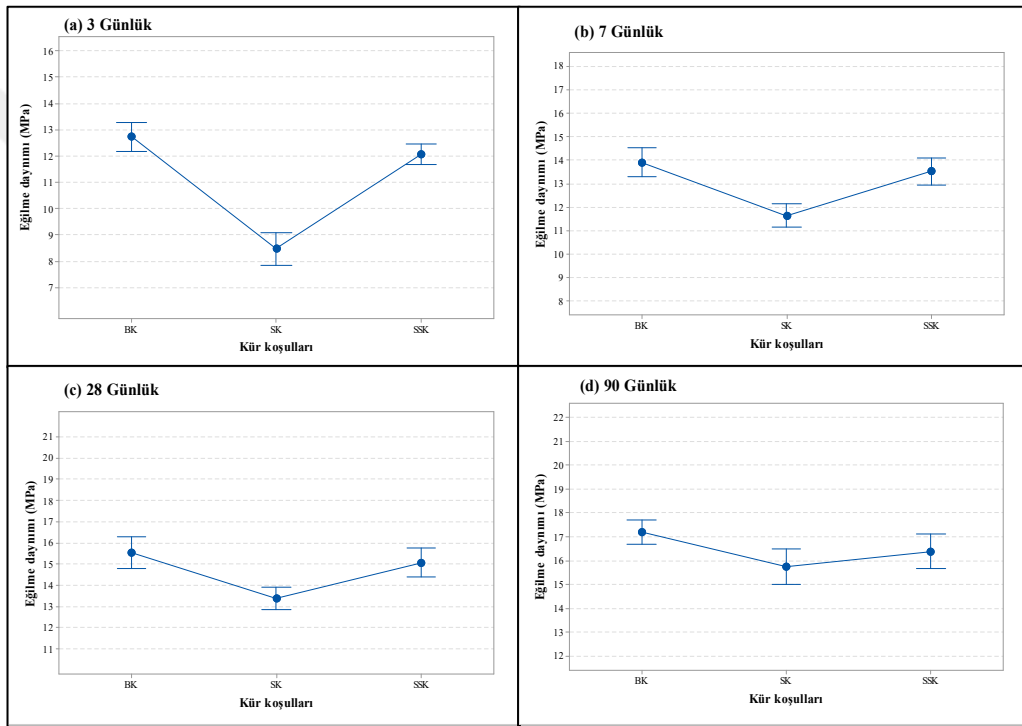
Şekil 4.13, yukarıda açıklandığı gibi, PK ve YFC'nin en yüksek değiştirme yüzdeleri en yüksek eğilme dayanımını elde ettiği gibi, 28 günlük en yüksek dayanım sonuçlarını elde etmek için PK ve YFC'nin optimum içeriğini göstermektedir. PK'nin %0 ile %6'sı ve YFC'nin %0 ile %8'i ile elde edilen en düşük eğilme dayanımı değerleri ve bu yüzdeler için eğilme dayanımı 13 MPa'dan düşüktür.

4.2.3.3. Kür koşullarının eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.14, üç farklı kür koşulunun 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına etkisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, basınç dayanımına benzer şekilde, buhar kürleme (BK) ve sıcak su kürleme (SSK) altında eğilme dayanımının gelişimi normal su kürleme(SK)'den daha yüksektir. Korde (2018) tarafından belirtildiği gibi, çeşitli dönemlerdeki sıcaklığın sertleşmesinin erken dönem dayanımı kazanımı için etkili olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca Wu vd. (2017) çalışmasında, sıcak su ve buhar kürlemesinin 30-40 MPa'ya kadar eğilme dayanımını önemli ölçüde geliştirdiği fark etmiştir. Bağlayıcının reaksiyon hızını artırabilen yüksek sıcaklıkta sertleşmeye atfedilmiştir. Bunun nedeni, yüksek sıcaklıktaki sertleşmenin bağlayıcı reaksiyon oranını artırabilmesi, yüksek sıcaklığın daha yoğun ve daha yüksek dayanımlı

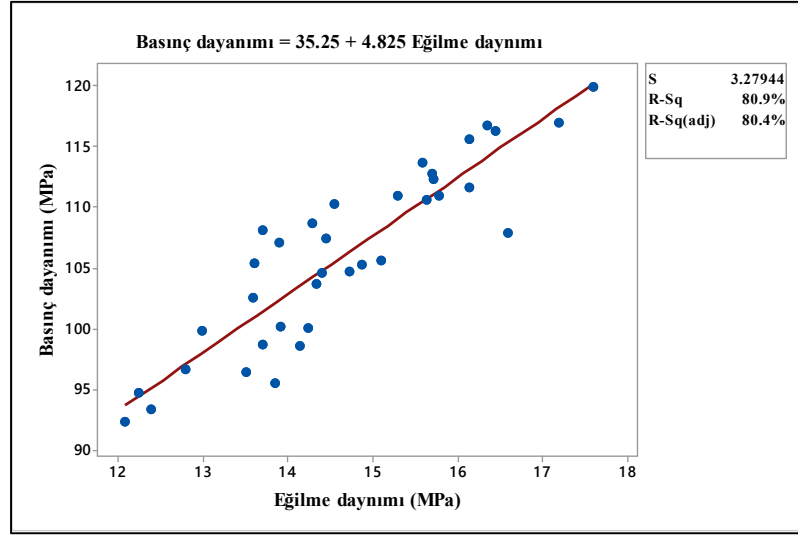
hidrasyon ürünlerini güvence altına almak için C-S-H dizi uzunluğundaki artışa yol açabilmesidir.

Farklı kür koşullarında kürlenene eğilme dayanımı sonuçları arasındaki fark 7 gün sonra düşmüştür ve 90 gün içinde normal su kürü altında kürlenene örneklere benzemektedir. Böylece 3 günlük SK, SSK ve BK, 8,4 MPa, 12 MPa ve 12,7 MPa elde etti, ancak 90 günlük elde edilen 15,7 MPa, 16,3 MPa ve 17,1 MPa, BK'nin eğilme dayanımının en yüksek iyileşmesinin sağlandığı farkedilmiştir.



Şekil 4.14 Kür koşullarının eğilme dayanımı sonuçlarına etkisi

28 Günlük eğilme ve basınç dayanımı arasındaki regresyon ilişkisi Şekil 4.15'de verilmiştir. Şekil olarak görülen eğilme dayanımı basınç dayanımı arttıkça artmaktadır. Statik olarak R^2 ilişki oranı %80'dir ve denklemde ifade edilebilir; Basınç dayanımı = $35,25 + 4,825$ Eğilme dayanımı. Ayrıca standart sapmanın 3,28 olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.15 28 Günlük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi

4.3. Porozite ve Su Emme

Porozite ve su emme testi sonuçlarının ayrıntıları Tablo 4.4'te sunulmuştur. 90 günlük harçta porozite ve su emme (SE) testleri yapılmıştır.

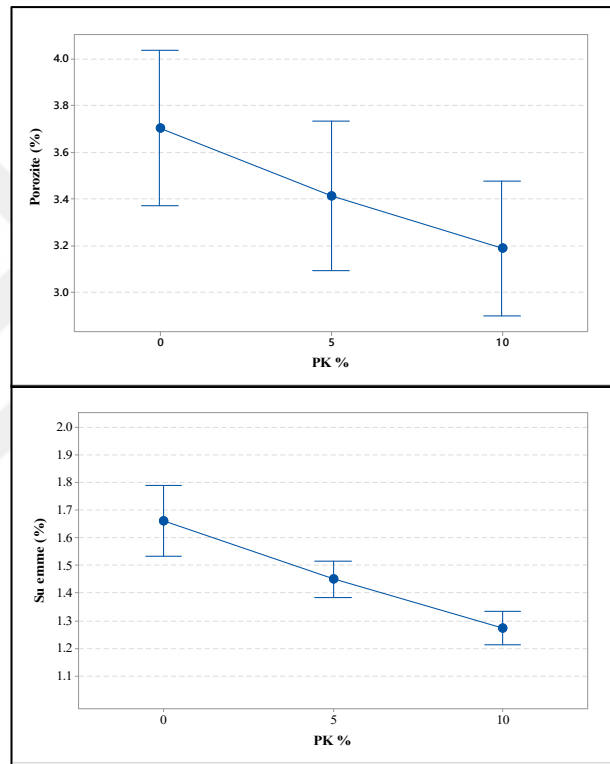
Tablo 4.4 Porozite ve su emme (SE) sonuçları

Karışım kodu	Porozite	SE
	%	
REF	4,33	1,92
C0P5	4,17	1,36
C0P10	3,89	1,40
C5P0	3,94	1,73
C5P5	3,40	1,58
C5P10	3,17	1,18
C10P0	3,57	1,61
C10P5	3,26	1,52
C10P10	2,99	0,98
C15P0	2,97	1,39
C15P5	2,83	1,35
C15P10	2,70	1,19

Tablo 4.3. incelendiğinde, REF karışımının sırasıyla %4,33 ve %1,92 ile daha yüksek porozite ve SE değerlerine sahip olduğu açıktır. PK ve YFC ile çimento ikamesindeki artış sonucu düşüşe yol açmıştır. En düşük porozite ve SE değerleri sırasıyla %2,7 ve %1,19 elde edilen C15P10 karışımına aittir.

4.3.1. PK Etkisi

PK'nin porozite ve SE üzerindeki etkisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



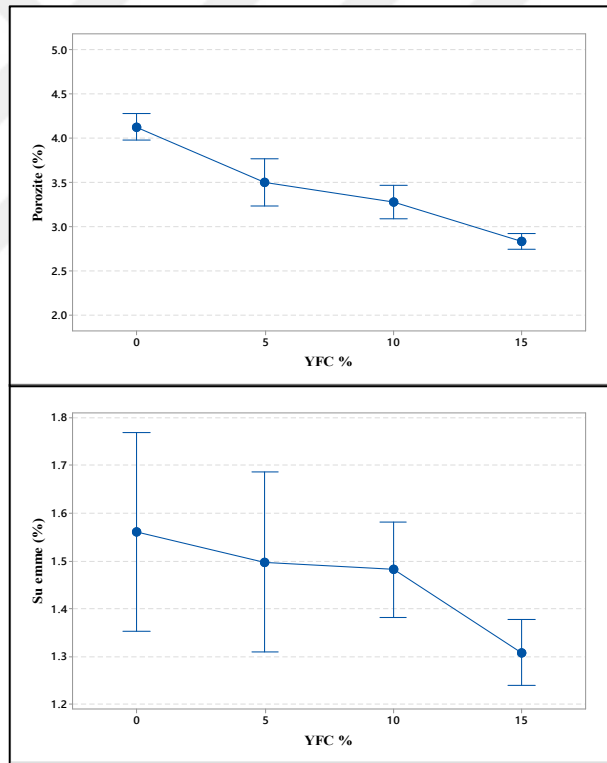
Şekil 4.16 PK'nin porozite ve SE üzerine etkisi

PK içeriğindeki artış porozite ve SE'yi düşürür ve bunlar üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir, bu nedenle PK'nin %0, %5 ve %10'u porozite için %3,7, %3,4 ve %3,1 ve SE için %1,66, %1,45 ve 1,27 olarak sonuçlanmıştır. Mahmud vd. (2009) betonda PK varlığının daha düşük bir su emme ve uzun dayanıklılık için önemli bir faktör olan poroziteye yol açtığını göstermiştir. Ayrıca Fapohunda vd. (2017), PK harcı ve beton örneklerinin genel etkisinin, PK içermeyen örneklerle karşılaştırıldığında geçirgenlikteki azalma ve dolayısıyla beton örneklerinin porozite olduğunu göstermiştir. Safiuddin vd. (2011), betonların su emmesinin daha yüksek bir PK içeriği

ile düştüğünü, çünkü betonun porozitesinin daha yüksek PK betonunda düştüğünü açıklamıştır.

4.3.2. YFC'nin Etkisi

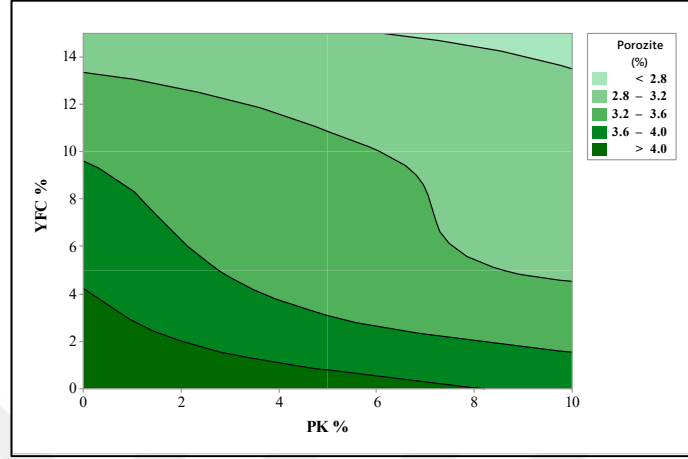
YFC'nin porozite ve SE üzerindeki etkisi Şekil 4.17'de sunulmuştur. YFC'nin daha yüksek değiştirme yüzdelerinin porozite ve SE'nin daha düşük sonuçlarına neden olduğu açıktır, bu nedenle YFC yüzdesi %0, %5, %10 ve %15 olarak elde edilen sonuçların ortalaması porozite için %4,1; %3,5; %3,2 ve %2,8 ve SE için %1,56; %1,49; %1,48 ve %1,31. Chi vd. (2008), YFC'nin artan çimento değiştirme yüzdesi ile SE'nin azaldığını ve YFC'nin parçacık doldurma etkisi ile YFC içeren betonun düşük SE'ni açıkladığını bildirmiştir.



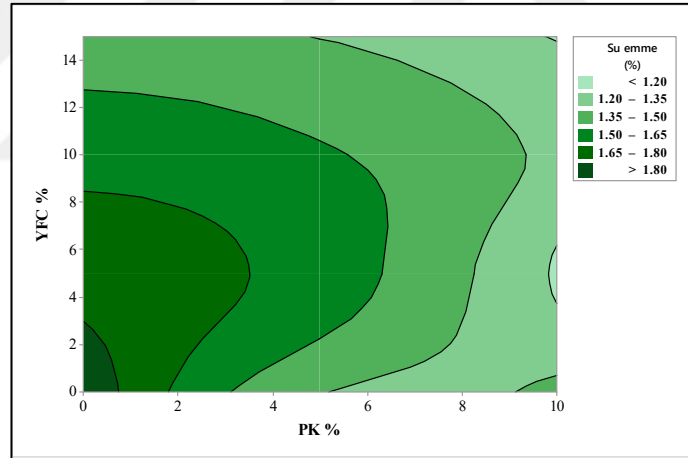
Şekil 4.17 YFC'nin porozite ve SE üzerindeki etkisi

Daha düşük Porozite ve SE elde etmek için PK ve YFC'nin optimum içeriği Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmiştir, Porozite açısından PK ve YFC'nin optimum içeriği en yüksek değiştirme yüzdesidir, böylece PK'nin %10'u ve YFC'nin %14'inden fazlası, Porozite yüzdesini %2,8'den daha az elde etmiştir.

Su emme için, PK'nin %5 daha fazla YFC'nin tümü ile değiştirilmesi %1,35 den daha az SE elde edildi ve en düşük SE sonuçları, PK için %10 ve %5 YFC göre %1,2 daha az elde edilmiştir.

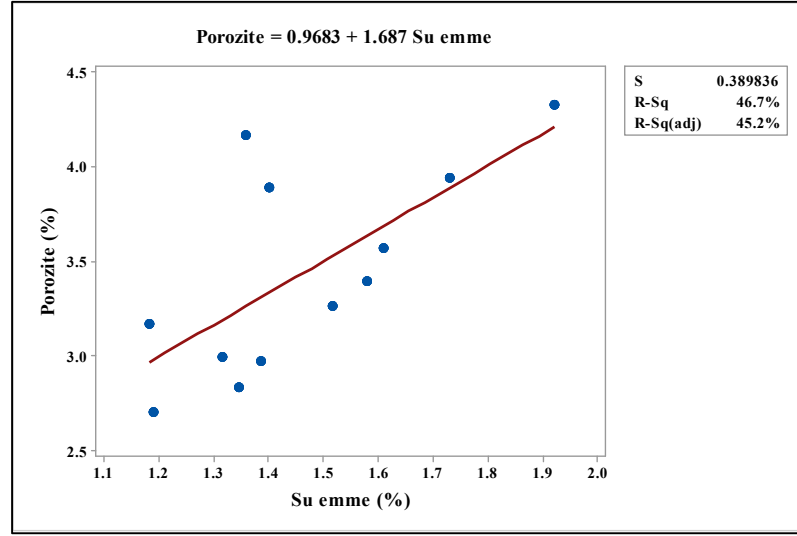


Şekil 4.18 Porozite sonuçları için PK ve YFC'nin Optimum içeriği



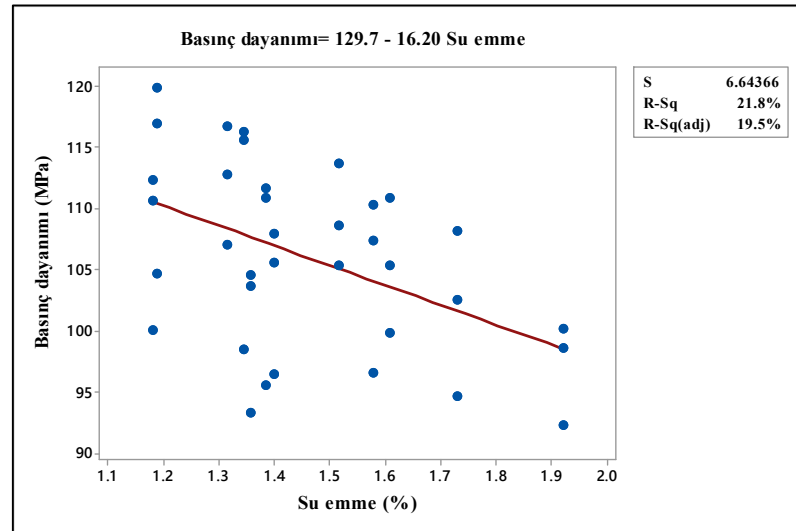
Şekil 4.19 SE sonuçları için PK ve YFC'nin Optimum içeriği

Şekil 4.20, porozite ve su emme arasındaki regresyon ilişkisini, $R^2=46,7\%$ statik ilişki oranını gösterir ve ilişki oranı bu denklemde özetlenebilir (Porozite = $0,9683+1,687$ Su emme). Su emme, porozitenin artmasıyla artar ve su emme yüzdesinin (SE), doymuş koşullarda su tarafından işgal edilen sertleşmiş betonda porozite hacminin bir ölçüsü olduğu iyi bilinmektedir (Chi vd., 2018; Givi vd., 2010). Burada, PK ve YFC'nin varlığı porozite ve su emmeyi etkileyen aynı faktörlerdir, bu nedenle betonların su emme daha büyük bir PK içeriği ile azaltılmıştır, çünkü betonun porozitesi daha yüksek PK ile düşürülmüştür (Fapohunda vd., 2017).

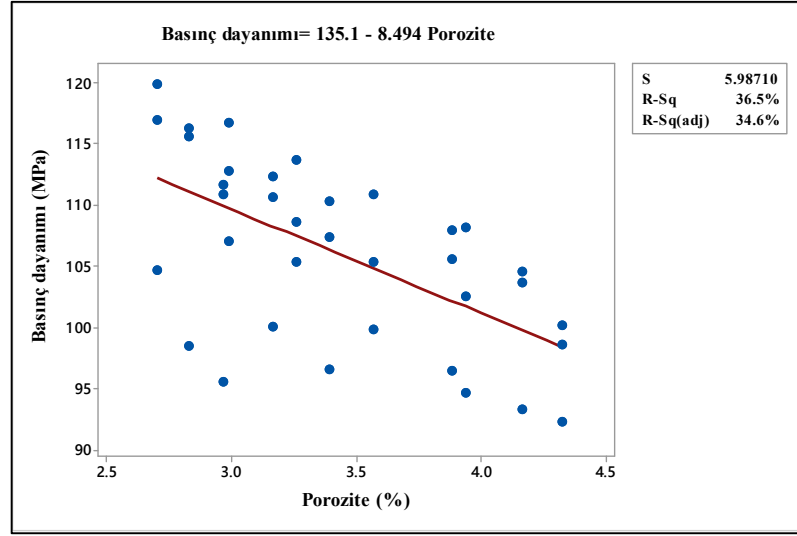


Şekil 4.20 Porozite ve SE arasındaki ilişki

Basınç dayanımı ve porozite arasındaki regresyon ilişkisi Şekil 4.21'de gösterilmiştir, şekildeki gibi, porozitedeki artış, basınç dayanımı sonuçlarını $R^2 = \%36,5$ oranında statik olarak arttırmıştır ve bu denklemden sunulabilir (basınç dayanımı = 135,1 – 8,494 Porozite). Porozite ve basınç dayanımı arasındaki bağlantı, poroziteyi daha iyi bir güç göstergesi olarak gören Larrard ve Sedran (1994) tarafından da sorgulanmaktadır. Ne olursa olsun, S/B oranı poroziteyi etkileyen tek faktör olmasa bile basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Ngyen, 2011).

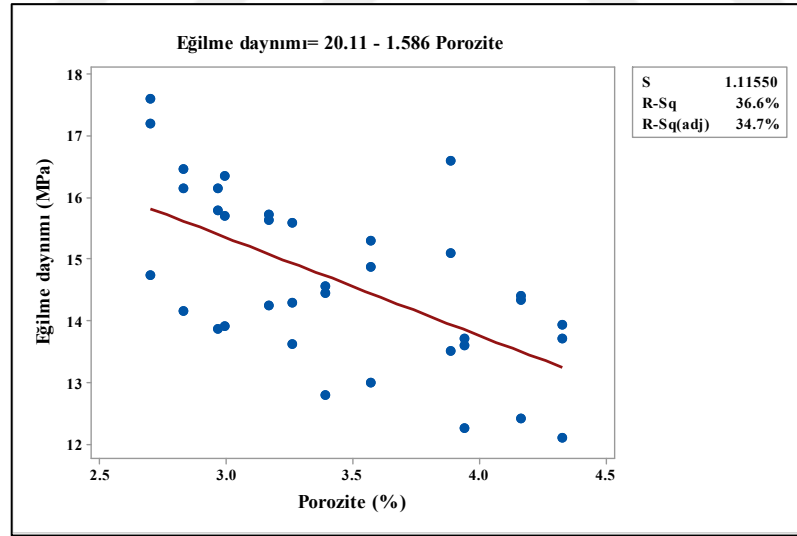


Şekil 4.21 Porozite ve basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.22 SE ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

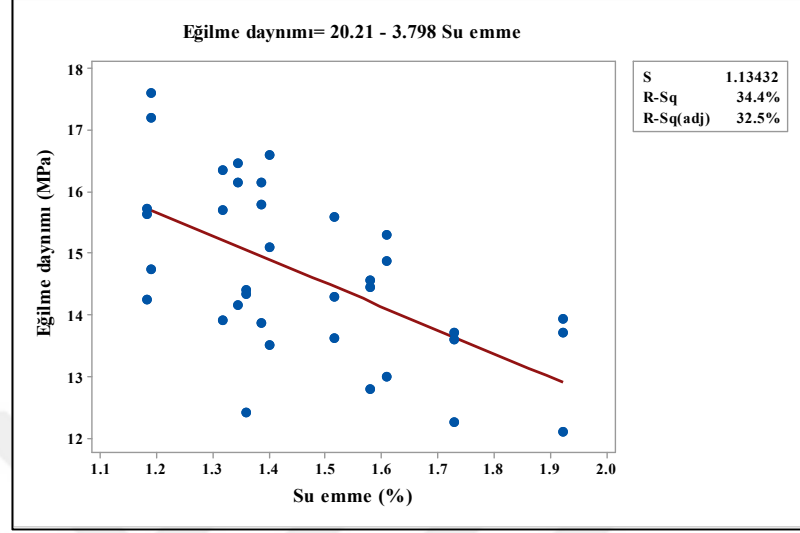
Porozitedeki artış su emmeyi arttırdığından ve basınç dayanımını düşürdüğünden, su emmedeki artış dayanımdaki düşme ile ilgilidir. Şekil 4.22'de görüldüğü gibi, statik olarak, regresyon ilişki oranı $R^2 = \%35,5$ ve denklem (Basınç dayanımı= 129,7 —16,20 Su emme) ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4.23 Eğilme dayanımı ve porozite arasındaki ilişki

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24, eğilme dayanımı ile porozite ve su emme arasındaki regresyon ilişkilerini göstermektedir. Basınç dayanımı ile benzer ilişkisi, eğilme dayanımının azalması ile porozite ve su emme artışıdır. Statik olarak, R^2 eğilme dayanımı ve porozite ilişki oranı $\%36,6$ olup (Eğilme dayanımı= 20,11 —1,586

Porozite) olarak sunulmuştur. Ayrıca eğilme dayanımı ve SE, R^2 'nin ilişki oranı %34,4'tür ve bu denklemde ifade edilir (Eğilme dayanımı= 20,21–3,798 Su emme).



Şekil 4.24 Eğilme dayanımı ve SE arasındaki ilişki

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada YFC ve PK'nin yüksek performanslı harçların taze ve sertleştirmiş özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca üç farklı kürleme rejiminin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir:

- YFC'nin çimento ikamesindeki artış, yayılma testi sonuçlarında bir artış sağlamıştır ve YFC'nin en yüksek içeriği en yüksek yayılma değerine sahiptir.
- PK ile çimento ikamesindeki artış, yayılma testi sonuçlarında bir düşüşe neden olmuştur, bu nedenle PK'nin en yüksek içeri en düşük yayılma değerine sahiptir.
- YFC ve PK ile çimentonun daha yüksek oranlarda ikamesi, yüksek performanslı harcın birim ağırlığında daha düşük sonuçlara neden olmuştur.
- Yüksek PK içeriği, 3 günlük ve tüm kür koşulları için, harç döneminde basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, 7 günlük kürlemeden sonra ve PK yüzdesindeki artış basınç dayanımında iyileşme sağlamıştır ve bu sayede PK'nin %10 içeriği 7, 28 ve 90 günlük kürlemede en iyi sonuçları elde etmiştir.
- YFC, 3 ve 7 günlük kürlemede ve tüm kür koşulları için basınç dayanımını azalmasına yol açmıştır, ancak 28 ve 90 günlük kürleme, YFC'nin %15'i basınç dayanımında iyileşmesinde olumlu bir etki sağlamıştır.
- Buhar kürleme (BK) ve sıcak su kürleme(SSK) erken dönemlerde basınç dayanımı gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Buhar kürü ile yüksek sonuçlar elde edilmiştir, bununla birlikte, ileri yaştaki buhar kürleme ve normal su kürleme arasındaki basınç dayanımı farkı daha az olmuştur.

- PK, tüm harç dönemlerinde eğilme dayanımı sonuçları üzerinde olumlu bir etki göstermiştir. Böylece PK'nin en yüksek içeriği (%10) ile en yüksek sonuçlar elde edilebilmektedir.
- YFC içeriğindeki artış, erken dönemde (3 gün) düşük eğilme dayanımına yol açmıştır, ancak YFC'nin daha yüksek içeriği ile 7, 28 ve 90 günlük kürlemede daha yüksek eğilme dayanımı sonuçları elde edilmiştir.
- Buhar kürleme (BK) ve sıcak su kürleme(SSK) erken dönemlerde eğilme dayanımını ölçüde önemli etkilemiştir. Ancak daha sonraki yaşlarda (90 gün), tüm kür yöntemleri arasındaki sonuçlarda fark daha azdır.
- PK, tüm karışımlarda porozite ve su emme oranlarında düşüşe yol açmıştır. Bu nedenle PK'nin daha yüksek içeriği daha düşük porozite ve su emme ile sonuçlanmıştır.
- YFC, tüm karışımlarda porozite ve su emme oranlarında düşüşe yol açmıştır. Bu nedenle YFC'nin daha yüksek içeriği daha düşük porozite ve su emme ile sonuçlanmıştır.

5.2. Gelecekteki Araştırmalar İçin Öneriler

Daha fazla Araştırma için birkaç öneri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çimento tipinin yüksek performanslı harcın mekanik özelliklerine etkileri dikkate alınmalıdır.
- YFC ve PK varlığında lif ihtiyacının etkisi araştırılmalıdır.
- Aynı malzeme için (YFC-PK) donma-çözülme, yüksek sıcaklık direnci gibi dayanıklılık göstergelerinin araştırılması gerekir.
- Daha fazla kür yöntemi ve yüksek kür sıcaklığı ve bunların yüksek performanslı harç performansı üzerindeki etkiler incelenebilir.
- YFC, PK ve kürleme yöntemlerinin yüksek performanslı harcın mikro yapısı üzerindeki etkisi daha ileri çalışmalarda incelenebilir.
- Başka farklı bir puzzolanik malzemenin harç performansı üzerinde etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Adam Neville, P.-C. A. tcin (1998) 'High performance concrete - An overview', 31(1), pp. 111–117.
- Adesina, A. (2018) 'The higher tensile strength has been ascribed to the pozzolanic and filler effect of RHA', (September).
- Aİtcin, P. C. (2016) 'The importance of the water-cement and water-binder ratios', *Science and Technology of Concrete Admixtures*, pp. 3–13. doi: 10.1016/B978-0-08-100693-1.00001-1.
- Akhter, M. F., Azam, F. & Hussain, D. A. (2018) 'Comparative Study on Effect of Fly Ash and Rice Husk Ash on Strength of Concrete', *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, Volume-2(Issue-5), pp. 1803–1813. doi: 10.31142/ijtsrd18169.
- Al-Khalaf, M. N. & Yousif, H. A. (2015) 'Use of rice husk ash in concrete', *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 6(4), pp. 241–248. doi: 10.1016/0262-5075(84)90019-8.
- Alex, J., Dhanalakshmi, J. & Ambedkar, B. (2016) 'Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 127, pp. 353–362. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.150.
- Alp, I., Deveci, H., Sungun, Y. H., Yilmaz, A., Kesimal, A., & Yilmaz, E. (2009). Pozzolanic characteristics of a natural raw material for use in blended cements. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 33(B4), 291-300.
- Al Saffar, D. M., Al Saad, A. J. K. & Tayeh, B. A. (2019) 'Effect of internal curing on behavior of high performance concrete: An overview', *Case Studies in Construction Materials*. The Authors, 10, p. e00229. doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00229.
- Als Salman, A., Dang, C. N. & Micah Hale, W. (2017) 'Development of High Performance Concrete with Locally Available Materials', *Construction and Building Materials*, 133(May), pp. 135–145. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.040.
- Aparicio, S., Martínez-Ramírez, S., Molero-Armenta, M., Fuente, J. V., & Hernández, M. G. (2016). The effect of curing relative humidity on the microstructure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 104, 154-159.
- Aprianti, E., Shafigh, P., Zawawi, R., & Hassan, Z. F. A. (2016). Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 107, 365-377.

- Asteray, B., Oyawa, W. & Shitote, S. (2017) 'Experimental Investigation on Compressive Strength of Recycled Reactive Powder Concrete Containing Glass Powder and Rice Husk Ash', *Journal of Civil Engineering Research*, 7(4), pp. 124–129. doi: 10.5923/j.jce.20170704.03.
- ASTM C642-97 (1997), American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete
- Bapat, J. D. (2012). *Mineral admixtures in cement and concrete*. CRC Press.
- Barnett, S. J., Soutsos, M. N., Millard, S. G., & Bungey, J. H. (2006). Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 434-440.
- Boukendakdji, O., Kadri, E. & Kenai, S. (2012) 'Cement & Concrete Composites Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 34(4), pp. 583–590. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013.
- Çakır, Ö., & Aköz, F. (2008). Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS. *Construction and Building Materials*, 22(3), 308-314.
- Chi, M. C., Chi, J. H. & Wu, C. H. (2018) 'Effect of GGBFS on Compressive Strength and Durability of Concrete', *Advanced Materials Research*, 1145, pp. 22–26. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1145.22.
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D. & De Moraes Rego Fairbairn, E. (2009) 'Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete', *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(7), pp. 983–992. doi: 10.1617/s11527-008-9437-z.
- Dadsetan, S., & Bai, J. (2017). Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, 146, 658-667.
- Dash, A. K. (2010). *Effect of pozzolanas on fiber reinforced concrete* (Doctoral dissertation).
- Emmanuel B Ettah, Jerome G Egbe, E. S. U. & Ekei E. O. (2018) 'Investigation of Rice Husk Ash (RHA) as a Supplement in Cement for Building Applications', *Civil Engineering Research Journal*, 6(2), pp. 2–7. doi: 10.19080/cej.2018.06.555681.
- Fapohunda, C., Akinbile, B. & Shittu, A. (2017) 'Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review', *International Journal of Sustainable Built Environment*. The Gulf Organisation for Research and Development, 6(2), pp. 675–692. doi: 10.1016/j.ijbsbe.2017.07.004.

- Feng, Q., Yamamichi, H., Shoya, M., & Sugita, S. (2004). Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and concrete research*, 34(3), 521-526.
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2145-2150.10.1016/j.conbuildmat.2010.04.045.
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O. A., & Öz, H. Ö. (2016). Effect of nano silica on the workability of self-compacting concretes having untreated and surface treated lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 115, 371-380.
- Guruvu, S. K. & Ratnam, M. K. M. V (2016) 'Development of High Strength Concrete using Rice Husk Ash and Slag', 5(06), pp. 617–622.
- Habeeb, G. A. & Mahmud, H. Bin (2010) 'Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material', *Materials Research*, 13(2), pp. 185–190. doi: 10.1590/S1516-14392010000200011.
- Hafizyar, R. & Dheyaaldin, M. H. (2019) 'Concrete Technology and Sustainably Development from Past to Future Concrete Technology and Sustainably Development from Past to Future', (May), pp. 0–13. doi: 10.26392/SSM.2019.02.01.001.
- Inti, S., Sharma, M., & Tandon, V. (2016). Ground granulated blast furnace slag (GGBS) and rice husk ash (RHA) uses in the production of geopolymer concrete. In *Geo-Chicago 2016* (pp. 621-632).
- Ishak, N. I., Johari, M. A. M. & Hashim, S. F. S. (2017) 'Effects of using blended binder of RHA and GGBS on the properties of concrete: A review', *AIP Conference Proceedings*, 1892. doi: 10.1063/1.5005658.
- Kang, S. H., Hong, S. G. & Moon, J. (2019) 'The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 115(August), pp. 389–400. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.09.004.
- Khadiranaikar & S., M. (2012) 'Factors affecting the strength of reactive powder concrete rpc_factors affecting the strength of reactive powder concrete rpc.pdf', pp. 455–464.
- Khan, M. N. N., Jamil, M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., & Kaish, A. A. (2015). Utilization of rice husk ash for sustainable construction: a review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 9(12), 1119-1127.
- Khan, S. U., Nuruddin, M. F., Ayub, T., & Shafiq, N. (2014). Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete. *The Scientific World Journal*, 2014.

- Kumar Karri, S., Rao, G. V. R. & Raju, P. M. (2015) 'Strength and Durability Studies on GGBS Concrete', *International Journal of Civil Engineering*, 2(10), pp. 34–41. doi: 10.14445/23488352/ijce-v2i10p106.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Springer Science & Business.
- Le, H. T., Müller, M., Siewert, K., & Ludwig, H. M. (2015). The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. *Materials & Design*, 72, 51-62.
- Li, C., Sun, H. & Li, L. (2010) 'A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 40(9), pp. 1341–1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons.
- Mahmud, H. B., Malik, M. F. A., Kahar, R. A., Zain, M. F. M., & Raman, S. N. (2009). Mechanical properties and durability of normal and water reduced high strength grade 60 concrete containing rice husk ash. *Journal of advanced concrete technology*, 7(1), 21-30.
- Mehta, P. K. & P. J. M. M. (2001) *Concrete Microstructure, Properties, and Materials P.*, McGraw-Hill.
- Mohseni, E., Yazdi, M. A., Miyandehi, B. M., Zadshir, M., & Ranjbar, M. M. (2017). Combined effects of metakaolin, rice husk ash, and polypropylene fiber on the engineering properties and microstructure of mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 04017025.
- Nair, D. G., Sivaraman, K. & Thomas, J. (2013) 'Mechanical Properties of Rice Husk Ash (RHA) - High strength Concrete', *American Journal of Engineering Research (AJER)*, (Xx), pp. 2–8.
- Nehdi, M., Duquette, J. & El Damatty, A. (2003) 'Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete', *Cement and Concrete Research*, 33(8), pp. 1203–1210. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00038-3.
- Nguyen, V. T. (2011). Rice husk ash as a mineral admixture for ultra high performance concrete.
- Oner, A., & Akyuz, S. (2007). An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 505-514.
- Oyetola, E. B., & Abdullahi, M. (2006). The use of rice husk ash in low-cost sandcrete block production. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 8(1), 58-70.

- Patel, V. & Shah, N. (2013) 'A Survey of High Performance Concrete Developments in Civil Engineering Field', *Open Journal of Civil Engineering*, 03(02), pp. 69–79. doi: 10.4236/ojce.2013.32007.
- Patel, Y. J. & Shah, N. (2018) 'Enhancement of the properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag based Self Compacting Geopolymer Concrete by incorporating Rice Husk Ash', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 171, pp. 654–662. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.166.
- Rao, P. P., Kumar, A. P. & Singh, B. B. (2014) 'A Study on Use of Rice Husk Ash in Concrete', 0033, pp. 75–81.
- Rathi, V. R. & Modhera, C. D. (2007) 'An overview on the Influence of Pozzolanic Materials on Properties of Concrete', *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO Certified Organization)*, 3297(2), pp. 17–24. Available at: www.ijirset.com.
- Reddy, J., West, R., Korde, C., & Cruickshank, M. Evaluation of Pre-Early Age Strength of Super Fine Ggbs Mortars. *Materials Research Proceedings*.
- Rößler, C., Bui, D. D., & Ludwig, H. M. (2013). Mesoporous structure and pozzolanic reactivity of rice husk ash in cementitious system. *Construction and Building Materials*, 43, 208-216.
- Rößler, C., Bui, D. D., & Ludwig, H. M. (2014). Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 53, 270-278.
- Safiuddin, M., West, J. S. & Soudki, K. A. (2011) 'Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 25(2), pp. 973–978. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.084.
- Soutsos, M., Hatzitheodorou, A., Kanavaris, F., & Kwasny, J. (2017). Effect of temperature on the strength development of mortar mixes with GGBS and fly ash. *Magazine of Concrete Research*, 69(15), 787-801.
- Talsania, S., Pitroda, J. & Vyas, C. M. (2017) 'Effect of rice husk ash on properties of aluminium alloys: A review', *Materials Today: Proceedings*, 4(2), pp. 486–495. doi: 10.1016/j.matpr.2017.01.049.
- Thomas, R. S. & Rajaselvi, J. F. (2016) 'An Experimental Investigation on the Effects of Concrete by Replacing Cement with GGBS and Rice Husk Ash with the Addition of Steel Fibers', *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(2), pp. 2104–2106. doi: 10.21275/v5i2.25021601.
- TS EN 12390-7, 2002. Testing Hardened Concrete – Part 7: Density of Hardened Concrete. Turkish Standard Institution, Turkey

- Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K. & Copuroglu, O. (2011) 'Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 41(11), pp. 1104–1111. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.06.009.
- Vinothan, M. K., & Baskar, G. (2015). Study of structural behaviour on pozzolanic material (rice husk). *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, 6(9), 31-46.
- Wu, Z., Shi, C. & He, W. (2017) 'Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 136, pp. 307–313. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.052.
- Xincheng, P. (2012). *Super-high-strength high performance concrete*. CRC Press.
- Yahia, A., Mantellato, S. & Flatt, R. J. (2015) *Concrete rheology: A basis for understanding chemical admixtures, Science and Technology of Concrete Admixtures*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-08-100693-1.00007-2.
- Yalley, P. P., & Sam, A. (2018). Effect of sand fines and water/cement ratio on concrete properties. *Civil Engineering Research Journal*, 4(3), 1-7.
- Zain, M. F. M., Islam, M. N., Mahmud, F., & Jamil, M. (2011). Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. *Construction and building materials*, 25(2), 798-805.
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case studies in construction materials*, 7, 73-81.
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, 95, 66-74.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fadel Mohamed Alı FELLO
Doğum Yeri ve Yılı : Zawia, 1978
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : fellow2014@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Ebi Şeybe Lisesi, 2003
Lisans : Al-Zawiyah Yüksek Bilim ve Teknoloji Enstitüsü –
İnşaat Mühendisliği, 2008