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

MİNERAL KATKILARIN YÜKSEK DAYANIMLI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Mohammed Miftah Abdullah BEEDIQ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

NİSAN - 2021
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Mohammed Miftah Abdullah BEEDIQ tarafından hazırlanan **"MİNERAL KATKILARIN YÜKSEK DAYANIMLI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**" adlı tez çalışması 27/04/2021 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

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

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

Enstitü Müdürü	Prof. Dr. İzzet ŞENER	……...……

TAAHHÜTNAME

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

Mohammed Miftah Abdullah BEEDIQ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİNERAL KATKILARIN YÜKSEK DAYANIMLI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Mohammed Miftah Abdullah BEEDIQ
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:PROF. DR. HASBİ YAPRAK

Kendiliğinden yerleşen çimentolu sistemler genellikle yüksek ayrışma direnci ve deformasyon özelliklerine sahip, kompozit malzemelerdir. Bu çalışmada Portland çimentosunun neden olduğu çevresel etkilerin azaltılması amacıyla yüksek fırın cürufu (YFC) ve pirinç kabuğu külü (PK) gibi endüstriyel ve tarımsal atıklar yüksek oranda çimento ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. YFC %0, %20, %40, PK %0, %15 ve %30 oranında kullanılarak, 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen harç numuneler üretilmiş, karışımlar da ayrıca %2 oranında polivinil alkol (PVA) lif kullanılmıştır. Laboratuvar ve buhar kürü uygulanan numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları test edilmiş, ayrıca 90 günlük numunelerin su emme ve ultrases geçiş hızı, BHA değerleri belirlenmiştir. YFC, PK ve YFC-PK ikamesi, erken yaş dayanımlarını olumsuz etkimiş, ancak buhar kürü 28 günlük numunelerde önemli dayanım artışları sağlamıştır. Her iki kür koşulunda da, %40 YFC-%30 PK ikamesinin 90 günlük mekanik dayanımlarda artış sağladığı, %2 PVA lif katkısının dayanımları olumlu etkilediği gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Kendiliğinden yerleşen harç, Yüksek fırın cürufu, Pirinç kabuğu külü, PVA lif, Mekanik özellikler

Nisan 2021, 66 Sayfa

ABSTRACT

MSC. THESIS

EFFECTS OF DIFFERENT MINERAL ADDITIVES ON HIGH STRENGTH SELF-COMPACTING MORTAR PROPERTIES
Mohammed Miftah Abdullah BEEDIQ
KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR:PROF. DR. HASBİ YAPRAK

Self-compacting cementitious systems are composite materials with high segregation resistance and high deformation properties. In this study, industrial and agricultural wastes such as slag and rice husk ash (RHA) were used as cement replacement materials at a high rate in order to reduce the environmental effects caused by Portland cement. By using 0%, 20%, 40%, slag, and 0%, 15%, and 30% of RHA, prismatic high-strength self-compacting mortar samples of 40x40x160 mm were produced, and 2% polyvinyl alcohol (PVA) fiber was used in the mixtures. The 3, 7, 28 and 90-day compressive and flexural strengths of the laboratory and steam cured samples were tested, and the water absorption, ultrasound transmission rate, and BHA values of the 90-day samples were determined. Slag, RHA, and slag-RHA substitution had a negative effect on the early age strength, but steam curing created significant strength increases in the mechanical strength of the 28-day samples. In both curing conditions, 40% slag-30% RHA substitution resulted in a significant increase in 90-day mechanical strengths. It has been observed that 2% PVA fiber additive affects the strengths positively.

KEYWORDS: Self-compacting concrete, Ground granulated blast furnace slag, Rice husk ash, PVA fiber, Mechanical properties
April 2021**,** 64 Page

TEŞEKKÜR

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

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

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

Son olarak çalışmalarımda kullanılan malzemelerin temin edilmesine yardımcı olan Cryso Kimya San. A.Ş.ve OYAK Beton'a teşekkürlerimi sunarım.

Mohammed Miftah Abdullah BEEDIQ

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **xi**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ **4**
2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton 4
2.2 Taze Özellikleri 5
2.2.1 Doldurma Kabiliyeti 5
2.2.2 Ayrışmaya Karşı Direnç 6
2.2.3 Geçiş Yeteneği 7
2.3 KYB'nin Sağladığı Avantajlar 7
2.4 KYB'nin Olumsuz Özellikleri 8
2.5 KYB Tasarımında Kullanılan Malzemeler 8
2.5.1 Çimento 8
2.5.2 Agrega 8
2.5.3 Mineral Katkılar 10
2.5.3.1 Yüksek fırın cürufu (YFC) 11
2.5.3.2 Pirinç kabuğu külü (PK) 12
2.5.4 Polivinilalkol Lif (PVA) 14
2.5.5 Süper Akışkanlaştırıcı (SA) 14
2.6 KYB'nun Mekanik Özellikleri 15
3. MATERYAL VE METOD **17**
3.1 Materyal 17
3.1.1 Çimento (Ç) 17
3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC) 18
3.1.3 Pirinç Kabuğu Külü (PK) 19
3.1.4 Polininil-alkol Lif (PVA) 21
3.1.5 Kum 21
3.1.6 Su 22
3.1.7 Kimyasal Katkı (Süperakışkanlaştırıcı) 22
3.2 Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları 23
3.3 Numunelerin Hazırlanması 24
3.4 Kür Koşulları 24
3.5 Test Yöntemleri 25
3.5.1 Yayılma Testi 25
3.5.2 Birim Hacim Ağırlık (BHA) 25
3.5.3 Eğilme Dayanımı Testi 26
3.5.4 Basınç Dayanımı Testi 27

3.5.5 Ultrases Geçiş Hızı 27
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 29
4.1 KYH Karışımlarının Yayılma Özellikleri 29
4.2 Birim Hacim Ağırlık 31
4.3 KYH'nin Mekanik Özellikleri 33
4.3.1 Basınç Dayanımı 33
1.3.1.1 3 günlük basınç dayanımı 34
4.3.1.2 7 günlük basınç dayanımı 35
4.3.1.3 28 günlük sürede basınç dayanımı 37
4.3.1.4 90 günlük basınç dayanımı 40
4.3.2 Eğilme Dayanımı 43
4.3.2.1 3 günlük eğilme dayanımı 44
4.3.2.2 7 günlük eğilme dayanımı 45
4.3.2.3 28 günlük eğilme dayanımı 47
4.3.2.4 90 günlük eğilme dayanımı 49
4.4 Ultrasonik Geçiş Hızı (UGH) 52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 55
5.1 Sonuçlar 55
5.1.1 KYH'ların Yayılma Sonuçları 55
5.1.2 KYH Numunelerinin BHA Sonuçları 55
5.1.3 Basınç, Eğilme Dayanımı ve UGH Sonuçları 55
5.2 Öneriler 57
KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ 66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 CEMI 42,5 R çimento 18
Şekil 3.2 YFC'nin partikül boyut dağılımı..... 19
Şekil 3.3 YFC 19
Şekil 3.4 Etüv 20
Şekil 3.5 Pirinç kabuğu yakma düzeneği 20
Şekil 3.6 Pirinç kabuğu külü 20
Şekil 3.7 KYH'de kullanılan silis kumu 22
Şekil 3.8 Harç yayılma testi cihazi (ASTM C1.437)..... 25
Şekil 3.9 Merkez nokta yükleme ile bükülme testinin şematik görünümleri 26
Şekil 3.10 Eğilme testinin fotografik görünümü 27
Şekil 3.11 Basınç dayanımı testi 27
Şekil 3.12 Ultrasonik geçiş hızı testi 28
Şekil 4.1 KYH karışımlarının yayılma testi sonuçları..... 29
Şekil 4.2 YFC'nin KYH karışımlarının yayılma değerlerine etkisi 30
Şekil 4.3 PK'ın KYH karışımlarının yayılma değerlerine etkisi..... 30
Şekil 4.4 PL'nin KYB yayılma testi sonuçlarına etkisi..... 31
Şekil 4.5 KYH numunelerinin BHA değerleri 32
Şekil 4.6 YFC'nin KYH numunelerinin BHA değerlerine etkisi..... 32
Şekil 4.7 PK'nın KYH numunelerinin BHA değerlerine etkisi 33
Şekil 4.8 PL'nin KYH numunelerinin BHA değerlerine etkisi..... 33
Şekil 4.9 KYH numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları 34
Şekil 4.10 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 3 günlük basınç dayanımına etkisi . 35
Şekil 4.11 KYH numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 36
Şekil 4.12 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 7 günlük basınç dayanımına etkisi . 37
Şekil 4.13 KYH numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 38
Şekil 4.14 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 28 günlük basınç dayanımına etkisi 39
Şekil 4.15 28 günlük basınç dayanımı için optimum YFC-PK oranları..... 40
Şekil 4.16 28 günlük basınç dayanımı ve BHA arasındaki ilişki 40
Şekil 4.17 KYH numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 41
Şekil 4.18 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 90 günlük basınç dayanımına etkisi 42
Şekil 4.19 90 günlük basınç dayanımı için optimum YFC-PK oranları..... 43
Şekil 4.20 90 günlük basınç dayanımı ve BHA arasındaki ilişki 43
Şekil 4.21 KYH numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları..... 44
Şekil 4.22 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 3 günlük eğilme dayanımına etkisi. 45
Şekil 4.23 KYH numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları..... 45
Şekil 4.24 YFC, PK, PL ve kür şartlarının 7 günlük eğilme dayanımına etkisi.... 46
Şekil 4.25 KYB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 47
Şekil 4.26 YFC, PK, PL ve kür şartlarının 28 günlük eğilme dayanımına etkisi.. 48
Şekil 4.27 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki 49
Şekil 4.28 KYB numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımları 50
Şekil 4.29 YFC, PK, PL ve kür şartlarının 90 günlük eğilme dayanımına etkisi.. 51
Şekil 4.30 90 günlük basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki 51
Şekil 4.31 KYH numunelerinin UGH değerleri 52
Şekil 4.32 UGH ve BHA arasındaki ilişki 53

Şekil 4.33 90 günlük basınç dayanımı ve UGH arasındaki ilişki 53
Şekil 4.34 90 günlük eğilme dayanımı ve UGH arasındaki ilişki 54

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 KYB bileşenlerin tipik aralıkları. 4
Tablo 2.2 EFNARC (2002) KYB sınır değerleri 5
Tablo 2.3 Mineral katkı tip ve sınıfları 11
Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri 17
Tablo 3.2 YFC'nin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri 18
Tablo 3.3 PK'nin kimyasal özellikler 21
Tablo 3.4 PVA lifin fiziksel ve mekanik özellikleri 21
Tablo 3.5 SA'nın teknik özellikleri 22
Tablo 3.6 KYH malzeme karışım oranları 24
Tablo 4.1 Beton Kalitesinin Tanımlanması 54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

YFC	**:** Yüksek Fırın Cürufu
KK	**:** Kırma Kum
KT	**:** Kırma Taş
KYB	**:** Kendiliğinden Yerleşen Beton
PÇ	**:** Portland Çimentosu
PK	**:** Pirinç Kabuğu Külü
s/b	**:** Su / bağlayıcı
s/ç	**:** Su / çimento
SA	**:** Süper Akışkanlaştırıcı
SD	**:** Silis Dumanı
SK	**:** Silisli Kum
UK	**:** Uçucu Kül
UGH	**:** Ultrases Geçiş Hızı
VAK	**:** Viskozite Arttırıcı Katkı Maddesi

1. GİRİŞ

Beton, dünyada sudan sonra en çok tüketilen yapı malzemesi olup ve sudan sonra da en çok kullanılan ikinci malzemedir. Yılda yaklaşık olarak kişi başına bir m^3 beton üretilmekte, buna bağlı olarak da önemli miktarda hammadde ve doğal kaynak tüketilmektedir (Adesina, 2018). Betonun tasarlanmış dayanım ve dayanıklılığının elde edilebilmesi, önemli ölçüde betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında oluşturulan sıkıştırmaya dayanır. Yetersiz vibrasyon, sertleşmiş betonun performansını önemli ölçüde düşürebilir. Bu nedenle KYB, çok sık donatılı ve karmaşık kesitli yapı elemanlarında betonun yerleşimini kolaylaştırmak, dökülen betonun yeterli ölçüde sıkıştırılmasını ve homojenliğini sağlamak amacıyla getirilmiştir (Deeb, 2013).

KYB, Japonya'da beton dökümünde karşılaşılan işçilik maliyetini azaltmak ve beton yüzey kalitesini iyileştirmek için 1986'da Tokyo Üniversitesi'nde geliştirilmiş, ilk uygulaması 1988 yılında yapılmış (Okamura ve Ouchi, 1999), standart bir ürün haline getirmek amacıyla da, ölçülebilir karışım tasarımı ve deney yöntemleri geliştirilmiştir (Okamura ve Ouchi 2003).

KYB gelişmekte olan pek çok ülkede gökdelen, kentsel altyapı ve yapı tasarımlarında, güçlendirme gibi farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, son yıllarda da KYB kullanımında önemli artışlar kaydedilmiştir (Kurt vd., 2016; Mansoor vd., 2018).

Kendiliğinden yerleşme/sıkışma özelliğinin dışında, düşük akma gerilmesi, yüksek deformasyon yeteneği, ayrışma direnci ve plastik viskoziteye, ayrıca mükemmel reolojik özelliklere ve segregasyon direncine sahip yüksek performanslı özel bir betondur. Kendinden yerleşen/sıkışan beton olarak tanımlanır, çok sık donatılı uygulamalarda, kendi ağırlığı altında vibrasyona gerek kalmaksızın kalıbı boşluksuz doldurma özelliğine sahiptir (Abhishek vd., 2019).

Ponikiewski ve Gołaszewski (2014)'e göre KYB, taze betonun yerleştirilmesi aşamasında, insan faktörünü minimize etmek, özellikle yerleşim alanlarında gürültü

problemini azaltmak, titreşim etkisini kaldırarak iş sağlığında iyileşme sağlamak, iş gücü ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir.

KYB, yüksek işlenebilirlik, taşıma, pompalama ve kalıba yerleştirme aşamasında ayrışma ve terlemenin önlenebilmesi için, yaklaşık 450-600 kg/m^3 çimentoya gereksinim duyar, ekonomik olmamasının yanı sıra, yüksek dozda çimento kullanımı çevre üzerinde de negatif bir etki oluşturur (Zhao vd., 2015; Matos, Sakata ve Prudêncio, 2019).

Küresel çimento üretimi 2018 yılında 4,1 milyar tona yükselmiş olup, 2050 yılına kadar da %45 oranında artacağı öngörülmektedir. Çimento üretimi, küresel karbondioksitin %5-7'sinden sorumludur. CO_2 ise sera gazı emisyonlarının %65'ini oluşturur. PC üretiminden kaynaklanan emisyonlar, beton üretimi için alternatif bir bağlayıcı kullanılarak veya beton üretiminde çimentonun kısmen değiştirilmesiyle azaltılabilir.

KYB'nin daha sürdürülebilir ve daha çevreci bir ürüne dönüşebilmesi, endüstriyel atıkların, KYB'ye çimento ikamesi olarak dahil edilmesi ile sağlanabilir. YFC, UK vb. ikame malzemelerinin kullanımı, KYB'nin maliyetini düşürür, çimento üretiminin neden olduğu çevresel etkileri azaltır, depolama maliyeti ve enerji tüketiminde tasarruf ve çevrenin kirleticilerden korunmasına katkı sağlar (Nwankwo vd., 2020).

Endüstriyel atık bir ürün olan YFC, betonun işlenebilirliğini, mekanik dayanımını ve durabilitesini arttırır, geçirimliliğini azaltır. Çimentodan yaklaşık % 10 daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, ayrışma direnci ve akışkanlığı büyük ölçüde artıran daha fazla bir hamur hacmi elde edilmesini sağlar (Geso vd., 2016; Dadsetan ve Bai, 2017). Boukendakdji vd. (2012)'ye göre, YFC, düşük hidrasyon ısısı, sülfat, asit ve korozyon direnci, yüksek işlenebilirlik, daha düşük geçirgenlik gibi birçok avantaj sunar. Türkiye'de yıllık 600 000 ton civarında YFC yan ürün olarak elde edilmektedir.

Tarımsal atık olan pirinç kabuğundan, kontrollü bir kalsinasyon ile yüksek incelik ve yüzey alanına sahip, puzolanik aktivitesi yüksek, % 95-97 oranında amorf SiO_2 içeren bir puzolan elde edilebilir ve çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilir (Nair vd., 2008; Fapohunda vd., 2017).

Pirinç kabuğu, elektrik veya buhar üretimi için yakıt olarak kullanılan bir biyokütle kaynağı olarak kabul edilmektedir. Kabuk yakıldıktan sonra, kül genellikle nehirlerde veya depolama alanlarına atılmakta, kül düzgün bir şekilde kontrollü olarak bertaraf edilmediğinden ilave çevre problemlerine neden olmaktadır. Bunun önüne geçilebilmesi için PK'nın ekonomiye kazandırılması gerekir (Kang vd., 2019). Piriç hasadı sonrası elde edilen pirinç kabuğu ülkemizde yeterince değerlendirilememektedir.

Bu tez çalışmasında, YFC ve PK gibi endüstriyel ve tarımsal atıkların yüksek oranda çimento ikame malzemesi olarak kullanımı amaçlanmıştır. YFC %0, %20, %40 ve PK %0, %15 ve %30 oranında çimento ikame malzemesi olarak kullanılarak 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen harç numuneler üretilmiştir. Harç karışımlarında ayrıca %2 oranında PVA lif kullanılmıştır. İki farklı kür ortamında olgunlaştırılan numunelerin, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları test edilmiş, ayrıca 90 günlük numunelerin su emme ve ultrases geçiş hızı, BHA değerleri belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Bu bölümde, KYB ile ilgili literatür gözden geçirilmiş, tarihsel gelişimi, tasarım özellikleri, bileşimini oluşturan malzemelerin özellikleri ile taze ve sertleşmiş KYB özellikleri üzerinde ki etkileri incelenmiştir.

2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton

Kendiliğinden yerleşen çimentolu sistemler genellikle yüksek ayrışma direnci ve yüksek deformasyon gibi temel özellikleri karşılamak için kimyasal ve mineral katkılar içerir. Yüksek segregasyon direnci, yeterli miktarda toz veya viskozite ayarlayıcı katkı veya her ikisi kullanılarak elde edilirken, yüksek deformasyon yeteneği, etkili yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılarak elde edilir (Faheem vd., 2021).

EFNARC (2005) kriterlerine göre; KYB'nin doldurma kabiliyeti ve kararlılığı, akışkanlık, vizkozite ve akıcılık, geçiş yeteneği ve ayrışma (segregasyon) direnci ile tanımlanabilir.

EFNARC (2005) tarafından, KYB'nin bileşiminde kullanılan malzemelerin kütlece ve hacimce tipik aralıkları Tablo 2.1'de verilmiştir. Bu değerler sınırlayıcı değildir, yapılacak denemeler ile geliştirilebilir.

Tablo 2.1 KYB bileşenlerin tipik aralıkları.

Bileşenler	**Kütlece aralık (kg/m^3)**	**Hacimce aralık l/m^3)**
Toz	380-600	…
Hamur	…	300-380
Su	150-210	150-210
İri Agrega	750-1,000	270-360
Kum	Toplam agreganın %48-55'i	
Su/toz oranı	…	0,85-1,10

Homojenliğin ve iri ve ince agrega arasındaki aderansın oluşturulabilmesi için iri agrega çeperlerinin yeterli bir harç tabakası ile sarılması gerekir, bunun

sağlanabilmesi için de KYB bileşiminde yer alan iri/ince agrega oranı azaltılmalıdır. Böylelikle, betonun dar kesit veya donatı arasındaki boşluklardan geçen taze haldeki karışımın topaklanma ve bloklanmasını azaltarak KYB'nin geçme özelliğini arttırır (EFNARC 2005).

2.2 Taze Özellikleri

KYB'nin karekteristik özellikleri; yüksek akıcılık, stabilite ve geçiş yeteneğidir. Bunların sağlanması için de taze betonun yüksek akışkanlığa, viskozite ve kohezyona sahip olması gerekir. KYB'nin kendiliğinden yerleşme özelliği; doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği ile ifade edilebilir (Kılınç 2012).

Tablo 2.2 EFNARC (2002) KYB sınır değerleri (Beycioğlu. A, 2013)

Belirlenen özellik	Yöntem	Birim	Değer aralığı	
Akıcılık-Doldurma yeteneği	Çökmede yayılma	mm	650	800
Viskozite/Akıcılık	T_{500} çökmede yayılma	sn	2	5
	V-hunisi	sn	6	12
Segregasyon direnci	Zaman artışı, T_{5dak}. V-hunisi	sn	0	+3*
Geçme kabiliyeti	L-kutusu	$h_2(h_1)$	0,8	1,0
	U-kutusu	(H1-H2), mm	0	30
	Doldurma kutusu (Kajima)	%	90	100
	J-halkası	mm	0	10
	Elek ayrışma direnci	%	0	15
*V-hunisi akış süresinden 3 dk. fazla olabilir				

2.2.1 Doldurma Kabiliyeti

KYB'nin kendi ağırlığı ile deformasyona uğrayarak ve ayrışma olmaksızın dökülmüş olduğu kalıbın şeklini, boşluk oluşturmadan alabilmesidir. Doldurma yeteneği çökme-yayılma deney yöntemi ile ölçülebilir (EFNARC 2005).

Yüksek bir doldurma yeteneği için, akışkanlık ile akış hızı arasında denge olmalı, bunun sağlanabilmesi için de, iri agrega, ince agrega ve bağlayıcı içerisindeki katı partiküller arasındaki sürtünmenin azaltılması gerekir. Akışkanlığın ve ayrışmaya

karşı direncin yüksek olması, KYB'nin doldurma yeteneğini arttırır (Atlı, 2012). Sonebi vd. (2007), Karışım içerisinde yer alan malzemelerin partikülleri arasındaki sürtünmenin doldurma kabiliyetini etkilediğini, partiküller arasında oluşan sürtünmenin, akmaya karşı iç direnci arttırdığını, bunun doldurma kabiliyetini ve akma hızını sınırladığını ifade etmiştir. SA katkıların kullanılması, çimento tanelerini dağıtır ve partiküller arası sürtünmeyi azaltır ve taze betonun akışkanlığını korurken, su içeriğinde de azalma sağlar.

Yüksek akışkanlıkla birlikte, ayrışmaya karşı direncin arttırılması, taze betonun sık donatılar arasından homojenliği koruyarak, bloklanmadan hareket etmesi, doldurma yeteneğinin arttırılması açısından önemlidir. İstenilen doldurma yeteneğinin sağlanabilmesi için çimento hamurunun deformasyon yeteneğinin artırılması ve katı tanecikler arasındaki sürtünmelerin azaltılması gerekir (Okamura ve Ouchi 1998).

Sahraoui ve Bouziani, (2019)'e göre, SA katkıların kullanılması, optimum su/toz oranının sağlanması, iri agrega hacminin azaltılması ve optimize edilmiş toz malzemenin kullanılması doldurma yeteneğinin artırılması için önemlidir.

2.2.2 Ayrışmaya Karşı Direnç

KYB'nin, karıştırma, taşınma ve dökülme işlemleri sırasında, taze betonun homojenliğini koruyarak, ayrışmaya karşı gösterdiği direnç, ayrışma direni olarak tanımlanır ve L kutusu deneyi bu amaçla kullanılır (EFNARC 2005).

KYB, dış etkilere rağmen bütünlüğünü koruyabilmeli ve kararlılık göstermelidir. Geleneksel beton, dar ve sık donatılı kesitlerden geçerken, iri agregaların kütleden ayrılması sonucu ayrışma gösterebilir. KYB'de;

- Terleme,
- Çimento hamuru-agrega ayrışması,
- İri agrega blokajı,
- Hava boşluklarının homojen dağılmaması şeklinde oluşabilecek durumların oluşumu engellenmelidir.

Terlemenin azaltılması için su/toz malzeme oranının düşürülmesi gerekir. Toz miktarının artması, özgül yüzey alanını arttırır ve serbest suyun buralara tutunarak terleme azalır. Viskozite arttırıcı katkı maddeleri kullanılarak, karışımın plastikliğinin azalmasının önüne geçilebilir (Okamura ve Ouchi 2003).

2.2.3 Geçiş Yeteneği

KYB'nin, yapı elemanının dar ve çok sık donatılı olduğu uygulamalarda, betonun engellenmeden ve homojenliği bozulmadan, istenilen bölgelere geçebilme yeteneği olup, V hunisi, U ve L kutusu uygulamaları ile test edilebilir. Geçiş yeteneği;

- Su/toz madde oranı düşürülerek,
- D_{max} ve iri agrega miktarı azaltılarak,
- Viskozite arttırılarak sağlanabilir (Bul vd., 2002; EFNARC 2005; Sezer 2017).

2.3 KYB'nin Sağladığı Avantajlar

- Vibrasyon gerekmeden kendiliğinden yerleştirilmesi,
- İşçilik ve yapı maliyetinin azalması,
- Beton dökümünde zamandan tasarruf sağlanması,
- Özellikle yerleşim alanlarında vibrasyonun neden olduğu gürültü kirliliğinin azalması,
- Çevre ve insan sağlığına verilen zararın azaltılması,
- Dar ve sık donatı donatılı yapı elemanlarına homojen beton dökülebilmesi,
- Farklı formlarda, estetik tasarımların oluşturulabilmesi,
- Yüksek akıcılığı sayesinde kolaylıkla pompalanabilmesi,
- İşçilik hatalarının minimum düzeye indirgenmesi,
- Beton dayanımı ve durabilitesinde iyileşmenin sağlanması (Benzabih, 2018).

2.4 KYB'nin Olumsuz Özellikleri

- Maliyetinin geleneksel betona göre yüksek olması,
- Tasarım, üretim ve uygulama aşamalarının sürekli ve detaylı bir süreç gerektirmesi,
- SA katkıların, bileşenlere göre farklı etki göstermesi,
- Pürüzsüz oluşan yapı elemanı yüzeylerinde aderans problemi olarak sıralanabilir (Wu, 2005).

2.5 KYB Tasarımında Kullanılan Malzemeler

2.5.1 Çimento

Geleneksel betonda kullanılan TS EN 197-1'e uygun tüm çimentolar KYB'de bağlayıcı olarak kullanılabilir. Kullanılacak çimento miktarı; 350-450 kg/m^3 olarak kabul edilebilir, 500 kg/m^3'den daha yüksek çimento dozajları çimentolu üründe oluşabilecek rötreyi arttırabilir. 350 kg/m^3'den daha az çimento kullanılması durumunda, yeterli incelik ve miktarda UK, YFC, silis dumanı vb. mineral katkıların karışıma eklenmesi gerekir (EFNARC 2005).

2.5.2 Agrega

Agreganın; geometrisi, dokusu, mineralojisi, D_{max} ve mekanik dayanım özellikleri, betonun; işlenebilirlik, hacim sabitliği, dayanım, durabilite ve maliyet gibi özellikleri üzerinde etkilidir (Aydın vd., 2010; Güneyisi vd., 2014).

KYB üretiminde kullanılacak agregaların TS 706 EN 12.620-A1 (2009) standardına uygun olması gerekir. Geleneksel beton üretiminde kullanılan tüm agregalar, KYB için de uygundur, ancak D_{max} ve iri agrega miktarın azaltılması gerekir.

İnce agreganın taze beton özellikleri üzerindeki etkisi, iri agregadan daha fazladır. EFNARC (2005)'de, KYB karışımlarında kütlece ve hacimce bulunması gereken ince ve iri agrega miktarları tanımlanmıştır. Ayrıca 0,125 mm'den daha küçük boyuttaki partiküllerin çimento hamuruna dahil edilmesi, su/toz oranın belirlenmesinde hesaba

katılması, toz miktarının, su/toz oranın 0,85-1,10 aralığı dikkate alınarak belirlenebileceği ifade edilmiştir.

Agrega granülometrisi ve iri agrega geometrisi KYB'nin akışkanlık ve geçiş yeteneğini doğrudan etkiler. Agrega taneleri ne kadar küresel formda olursa, bloklanma riski azalır ve içsel sürtünmenin azalmasından dolayı da akışkanlığı artar (EFNARC 2005).

KYB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerinin iyileştirilebilmesi için, ince agrega/iri agrega oranının optimize edilmesi gerekir (Sooriyaarachchi ve Lasintha, 2016). Yüksek akışkanlık, stabilite ve doldurma kabiliyetinin sağlanmasında ki güçlük nedeni ile tasarım ve üretim sürecinde iri agrega boyutlarından kaçınılır. KYB üretiminde kullanılan iri agreganın D_{max}'ı 8 mm civarındadır, maksimum agrega tane boyutunun sınırlandırılmasının bir başka nedeni de, iri agregaların KYB'nin akışkanlığını ve sık donatılar arasından geçiş yeteneğini sınırlanmaması amacını taşır (Hunger, 2010).

İhsan (2017), KYB'nin dayanım ve durabite özelliklerinin arttırılması için kullanılacak ince agregaların; keskin köşeli, inert, yüksek yoğunlukta, düşük su emme ve zararlı madde içermeyen özelliklerde, ayrıca hamur hacminin azaltılması için de iyi bir granülometriye sahip olması gerektğini ifade etmiştir. İri agrega/toplam agrega oranındaki azalmanın KYB'nin elastisite modülünü etkilemediği görülmüştür (Su, Hsu ve Chai (2001).

Maksimum agrega boyutu, iri agrega içeriği ve beton yaşının KYB'nin mekanik dayanımı üzerinde etkileri araştırılmış, s/b oranı 0,38 ve 0,53 olarak belirlenmiş, iri agrega boyutu 9,5 mm'den 19 mm'ye yükseltilmiş, basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla %5 ve %25 arttığı belirlenmiştir (Nikbin vd., 2014),

Khaleel ve Razak (2011), doğal çakıl, kırma çakıl ve kırma kireçtaşının KYB'nin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış, D_{max} değerindeki artışın KYB'nin, akışkanlık ve geçiş kabiliyetini azalttığını, doğal çakılın, kırma çakıla kıyasla, akışkanlık, geçiş kabiliyeti ve segregasyon direncini arttığını, kırma kireçtaşı kullanımının, kırma ve doğal çakıla göre daha yüksek dayanım ve elastisite modülü değerleri verdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, iri agrega boyutunun küçülmesi sonucu

KYB’nin mekanik dayanımının arttığı da gözlenmiştir.

Bouziani (2013), farklı kum türlerinin KYB'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmış, doğal dere kumu, kırma kum ve kumul kumlarını ikili ve üçlü karışımlar şeklinde KYB üretiminde kullanmış, 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının, kırma kum oranındaki artışa bağlı olarak arttığını, kumul kumu oranının artmasıyla azaldığını test etmiştir.

Azzouza vd. (2015), KYB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerine kırma, doğal ve kumul kumların etkisini araştırmış, kumlar ikili veya üçlü kombinasyonlarında kullanıldığında, harç ve betonların reolojik ve mekanik özelliklerinin, kırma ve doğal kum karışımlarında arttığını, yüksek kumul kum içeriğine sahip kırma-kumul

2.5.3 Mineral Katkılar

Mineral katkılar, taze betonun işlenebilirlik, sertleşmiş betonun dayanım ve durabilite gibi özeliklerini iyileştirmek, betonun maliyetini ve çevresel etkilerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan malzemelerdir (Druta, 2003).

KYB bileşeni olarak çimento ikame ve ikincil atık malzemelerinin kullanılması, kendiliğinden yerleşen çimentolu kompozitlerin taze ve sertleşmiş birçok özelliğinde değişiklikler oluşturur. Karışımın su ihtiyacı, çimento miktarı, hacim sabitliği, hidratasyon kinetiği, doldurma kabiliyeti ve akışkanlık gibi belirli özelliklerini değiştirmek, KYB'nin mikroyapı , durabilite ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için farklı mineral katkı malzemeleri kullanılır (Faheem vd., 2021).

KYB’de, segregasyonu engellemek ve kohezyonu arttırmak için farklı çimento ikame malzemeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Mineral katkılar, hidratasyon ısısını ve termal büzülmeyi azaltır, çimento miktarını düşürür, agregalarla oluşan hamur arasında daha güçlü bir aderans oluşmasını sağlar. EFNARC’a (2005) göre KYB’de kullanılan toz malzeme miktarının 380-600 kg/m^3 arasında olmalıdır. EFNARC (2005)’e göre mineral katkılar reaksiyon özellikleri açısından Tablo 2.3’te tanımlanmıştır.

Tablo 2.3 Mineral katkı tip ve sınıfları (EFNARC, 2005)

Tip 1	Puzolanik olmayan yada yarı puzolanik	Mineral filler (kireçtaşı, dolomit vb.) Pigmentler
Tip 2	Puzolanik	EN 450'ye uygun uçucu kül En 13.263'e uygun silis dumanı
	Hidrolik	Yüksek fırm cürufu

2.5.3.1 Yüksek fırın cürufu (YFC)

Hidratasyon sonucu çimento pastası yaklaşık %70 CSH, %20 CH, %7 sülfo-alüminat ve %3 oranında da ikincil fazları içerir. CH, kısmen suda çözünür ve yeterli dayanıklılığa sahip olmadığı için boşluklar oluşturarak betonun dayanım ve durabilitesini olumsuz yönde etkiler. YFC, CH bileşiğinin bağlanması üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir, YFC ve CH'ın reaksiyonu sonucu, ikincil CSH hidrasyon ürünleri oluşur (Öner ve Akyüz, 2007).

YFC, taze ve sertleşmiş KYB özelliklerine olumlu katkı sağlar, deneysel çalışmalarda; betonun işlenebilirliğini, mekanik dayanımını ve durabilitesini arttırdığı, geçirimliliğini azalttığı, hidratasyon ısısının düşük olmasından dolayı, uzun süreli bir kür uygulanmasına gereksinim duyduğu belirlenmiştir (Bilim ve Atış, 2011).

Mohamed ve Najm (2017), %0 - %80 YFC ve 0,36 s/b oranına sahip KYB numunelerinin basınç dayanımlarını test etmiş ve 28. günde, %35 YFC ikameli KYB'nin basınç dayanımının referans betonun basınç dayanımından daha yüksek değerler aldığını, daha yüksek YFC ikamesinin basınç dayanımını düşürdüğünü bildirmiştir.

Dadsetan ve Bai (2017), s/b oranı 0,45, YFC ikame oranı % 10, % 20 ve % 30 olan 100 mm boyutundaki küp numunelerin basınç dayanımlarının kontrol betonunun üzerinde gerçekleştiğini ve dayanımların ikame oranı ile birlikte arttığını yaptıkları çalışma sonucunda belirtmişlerdir.

Mansoor vd. (2018), yaptıkları çalışmada, su kürü uygulanan %5 - %25 YFC ikame oranına sahip KYB küp numunelerin basınç dayanımlarının, 7 ve 28. gün sonrası arttığını ifade etmişlerdir.

Öner ve Akyüz (2007), artan YFC ikame oranın, benzer işlenebilirlik için s/b oranı azaltığını, YFC'nin KYB'nin işlenebilirliği üzerinde olumlu bir etki oluşturduğunu, erken yaş dayanım değerlerini düşürdüğünü ancak artan kür süresi ile birlikte basınç dayanım arttığını, bu etkinin YFC'nin yavaş gelişen puzolanik reaksiyon ve hidratasyon gelişiminden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Adesina ve Awoyera (2019), % 20 ve %40 YFC ikamesinin, KYB'nin çökme değerinde sırasıyla yaklaşık 10 mm ve 30 mm arttırdığını, % 60 ikame oranının ise çökme değerini 10 mm kadar düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

2.5.3.2 Pirinç kabuğu külü (PK)

PK, pirinç kabuğunun 700 ^{o}C'den daha düşük sıcaklıklarda yakılmasıyla elde edilen puzolanik bir katkı maddesidir. Çeltiğin öğütme işlemi sırasında pirinç tanelerinin kapçıklarının alınması sonucu ortaya çıkan organik tarımsal bir atık üründür. Pirinç kabuğu; % 40 selüloz, % 30 lignin grubu ve % 20 oranında hidrat amorf silis içerir. Yakma işlemi sonucu % 60-65 uçucu madde ve % 20-25 oranında PK oluşur, PK % 95-97 oranında SiO_2 içerir (Chindaprasirt, P. ve Kanchanda, P., 2007; Ganesan vd., 2008; Nair vd., 2008). Yakma işlemi sırasında kabukta bulunan silis, kristabolite dönüşür, ancak kontrollü bir kalsinasyon ile yüksek incelik ve yüzey alanına sahip, puzolanik aktivitesi yüksek PK elde edilebilir, amorf silika içeriğine sahip PK çimentolu kompozit malzemelerin üretiminde çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilir (Saraswathy, V. ve Song, H. W., 2007; Zain, vd., 2011; Lung, vd., 2011, Fapohunda vd., 2017).

Yüksek oranda silis içeren PK'nın CH ile oluşturduğu puzolanik reaksiyon, içerdiği amorf silis ve PK'nın özgül yüzeyine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Reaktivitesi bünyesindeki kristal/amorf oranına bağlı olduğundan, kullanım öncesi PK'nın karakterizasyonun ve amorf silis oranının belirlenmesi önemlidir. PK yeterli incelikte öğütülerek çimentolu kompozitlerde puzolanik katkı olarak kullanılabilir, puzolanik

aktivite indeksi yanma derecesi ve süresi ile inceliğine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Paya, vd., 2001; Saraswathy, V. ve Song, H. W., 2007).

Sundeep vd. (2016) ve Fello, (2020), 500-800 ^{o}C sıcaklıkta gerçekleşen yakma işleminin PK'da aktif SiO_2 oluşumuna neden olduğunu, PK'nın silis içeriğinin %90-95 arasında değiştiğini ifade etmiştir.

Alex vd. (2016)'de, PK'nın çimento ikame malzemesi olarak kullanılmasında dikkate alınması gereken önemli faktörlerin, yakma işlemi sıcaklığı ve soğutma süreci ile PK'nın inceliği olduğunu belirtmiştir (Alex vd., 2016).

PK'nın beton üretiminde kullanımı çevresel olumlu etkilerin yanında bertarafı ile ilgili sorunları da azaltır (Guruvu ve Ratnam, 2016).

PK ikameli çimento harcının su gereksinimi, iç gözenekliliği, düzensiz şekil yapısı ve yüksek inceliği nedeniyle daha yüksektir. Partikül yapısı ve inceliği, taze betonun reolojik özellikleri olan, akış yeteneği ve plastik viskozitesinin belirlenmesinde de kritik bir rol oynamaktadır (Bapat, 2012).

Guruvu ve Ratnam (2016), PK'nın mineral katkı olarak kullanılabileceğini, ancak %10, %15, %20 ve %25 ikame oranlarında, referans betonla karşılaştırıldığında, 28 günlük basınç dayanımı değerlerini düşürdüğünü belirtmiştir.

Zareei vd. (2017), %10 mikro silisin yanında, %5, 10, 15, 20 ve %25 oranında PK'yı çimento ikamesi olarak kullanmış, %15 PK ikamesinin basınç dayanımlarında yaklaşık %20 dayanım artışı sağladığını, %20 ikame oranlarında optimum performans ve dayanıklılık özellikleri sergilediğini bildirmişlerdir.

Kang vd. (2019), ultra yüksek performanslı betonunun mekanik özelliklerini ısıl işlem olmaksızın iyileştirmek için PK'yı çimento ikamesi olarak kullanmış, 20 °C ve %60 bağıl nem koşullarında, 91 gün sonunda 200 MPa civarında olağanüstü bir dayanım elde edildiğini, bunun gözenekli yapı sonrası oluşan içsel kürleme etkisi ve amorf silisin oluşturduğu puzzolanik reaksiyondan kaynaklandığını araştırma sonucunda açıklamıştır.

2.5.4 Polivinil alkol (PVA) Lif (PL)

Polivinil alkol (PVA) lifler ilk olarak 50 yıl önce Japonya'da üretilmiş, farklı endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılmıştır. PVA lifler yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahiptir, ayrıca UV ışınları, kimyasal etkiler ve hava koşullarına karşı da yüksek direnç gösterir. PVA liflerin diğer liflerden farklı olarak hidrofil özelliği göstermesi, bu liflerin çimentolu kompozitin hidratasyonu ve kür işlemi sırasında matrisle arasında moleküler bağ kurulmasını sağlar. Oluşan bağ direnci, eğilme ve çekme dayanımını arttırarak, PVA lif katkılı çimentolu kompozite yüksek performans kazandırır. Yapılan deneysel çalışmalar, PVA liflerin 20 yıl sonra bile bozulmadığını, kuvvetli alkali ortamlarda yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur. PVA lifler yüksek yoğunluğa sahip olduklarından karıştırma, pompalama ve yüzey tamamlama işlemleri sırasında karışım içinde stabil kalarak yüzeye çıkmazlar. PVA'nın kimyasal yapısını karbon, hidrojen ve oksijen meydana getirdiğinden, yanma sonrası dioksin ve amonyak gibi zararlı maddeler ortama yayılmaz. PVA lifler, yüksek elastisite modülüne sahiptir, çatlak ilerlemesine iyi bir performans gösterir, lif-matris aderansı yüksek olduğundan üretim esnasında liflerin yüzeylerinde yapılacak deformasyonlarla, lif-matris aderansı daha da güçlendirilebilir (Kurt, 2006; Yonar, Y., 2014).

2.5.5 Süper Akışkanlaştırıcı (SA)

KYB'de kimyasal olarak süper akışkanlaştırıcı katkıların kullanılması taze betonun eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitesini düşürerek, karışımın geçiş ve doldurma yeteneğini arttırır (Yamada vd., 2000), SA katkılar, polikarboksilat esaslı olup, yüksek oranda akışkanlaştırıcı bir etkiye sahiptir, karışıma SA katılması betonun stabilitesini korur ve segregasyonu önler Uygunoğlu 2008). KYB'nin işlenebilirlik süresi dikkate alınarak, taze betonun erken yaş dayanımını önleyen ve en az bir saat işlenebilirlik sağlayan, TS EN 934-2-A1'e uygun kimyasal katkılar tercih edilmelidir (Topçu vd., 2008). SA katkılar, KYB üretimini kolaylaştırarak, beton bileşiminde farklı malzemelerin kullanımına katkı sağlamıştır (Newman ve Choo 2003).

2.5.6 Viskozite Düzenleyici Katkılar (VDK)

Viskozite düzenleyici katkılar taze betonun viskozitesini arttırarak ayrışmayı engeller ve betonun homojenliğini sağlar. Viskozite düzenleyici katkılar, genellikle yüksek moleküler ağırlıklı çözülebilir polimerlerdir, katkının su ile etkileşime girmesi ile birlikte, sıvı ortamdaki viskoziteyi artırırlar, ancak yüksek maliyetleri ürün fiyatlarında artışa neden olur (Ramachandran, 1995).

Viskozite düzenleyici katkıların sağladığı faydalar aşağıda ki gibi özetlenebilir.

- Viskozitede artış,
- Toz bileşen miktarında azalma,
- Segregasyonun engellenmesi ile terleme riskinde düşme ve akışkanlığın artması,
- Doldurma yeteneğinde artış,
- Taze betonun kalıpta oluşturduğu basınçta azalma,
- Daha düzgün yüzeyli beton oluşumu (Kaya 2010).

2.6 KYB'nin Mekanik Özellikleri

Altyapı, prefabrik yapı elemanları ve güçlendirme gibi farklı uygulamalarda son yıllarda yaygın kullanım alanı bulan KYB'nin karışım tasarımı, reolojisi, uygulanabilirliği, pompalanabilirliği ve durabilitesi gibi konularda birçok araştırma yapılmış, mekanik özelliklerine yönelik çok sayıda araştırmalar yapılmıştır (Khayat ve Schutter, 2014).

Betonun basınç dayanımı; s/b oranı, bağlayıcı/agrega oranı, sıkıştırma derecesi, bileşenlerin kimyasal özellikleri ve karışım oranlarına bağlı olarak değişir (Ihsan, 2017). KYB'nin mekanik dayanımı ve reolojisi üzerine yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar, geleneksel betonla karşılaştırıldığında, KYB'nin daha iyi bir

performans sergilediğini ortaya koymuştur (Alhanghari, 2020). Esfandiari ve Loghmani, (2019), Benaicha vd., (2019), SA ve vizkozite düzenleyici kimyasalların ve puzolanik aktivitesi yüksek mineral katkıların kullanımı, s/b oranının düşürülmesi, ve ince agrega/toplam agrega optimizasyonun bunda etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Domone, (2007), toz malzemenin tipi, inceliği ve kimyasal kompozisyonun KYB'nin basınç dayanımını, s/b oranından daha çok etkilediğini belirtmiştir.

Moghadam ve Khoshbin (2012), s/b oranının yaklaşık 0,45 oranına düşürülmesiyle, KYB'nin, basınç, eğilme dayanımı ve elastisite modülünün yükseltilebileceğini belirtmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

Tezin bu bölümde, KYH numunelerin üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri, karışım dizaynı, numune özellikleri, kür yöntemleri, taze ve sertleşmiş harç numunelere uygulanan test yöntemleri sunulmuştur.

3.1.1 Çimento (PÇ)

Tezin deneysel çalışmalarında TS EN 197-1 standartlarına uygun CEM I 42,5R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3,13 g/cm^3, blaine değeri 3.350 cm^2/g olup, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri üretici firmadan alınmış ve Tablo 3.1'de belirtilmiş, çimento ile ilgili görsel Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler			
		Standart	Sonuçlar
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)		-	3,13
Hacim Genleşmesi (mm)		≤ 10	1
Priz Süreleri	Başlama (dak)	≥ 60	29,25
	Bitiş (dak)	≤ 600	160
İncelik	Özgül Yüzey (cm^2/g)		3.350
	45 µ Elek Üstü		5
	90 µ Elek Üstü		0,1
Basınç Dayanım Sonuçları (MPa)			
2 gün		≥ 20	30,5
7 gün		-	42,1
28 gün		≥ 42,5	49
Kimyasal Özellikler			
Toplam SiO_2		% 18 ≤ - ≤ %26	19,57
Çözünmeyen Kalıntı		≤ % 5,0	0,4
Çözünen SiO_2		% 18 ≤ - ≤ % 26	19,17
Al_2O3		% 3 ≤ - ≤ % 7	5,53
Fe_2O_3		% 2 ≤ - ≤ % 6	2,86
CaO		% 59 ≤ - ≤ % 68	64,44
MgO		% 1 ≤ - ≤ % 3	2,09
SO_3		% 1 ≤ - ≤ % 3	2,81
Kızdırma Kaybı		≤ % 5,0	2,45
CI-		≤ % 0,1	0,018
Na_2O eşdeğeri		-	1,18



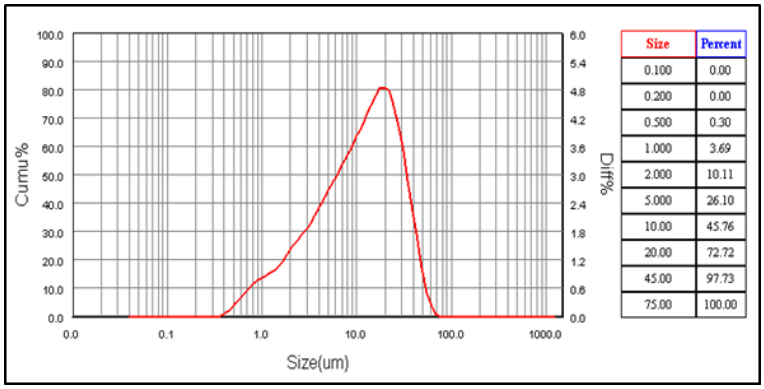
Şekil 3.1 CEMI 42,5 R çimento

3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Çimento ikame malzemesi olarak, Erdemir (Zonguldak/Ereğli) atığı yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. Atık ürün Oyak Bolu Çimento Fabrikasından temin edilmiştir. YFC 4 989 cm^2/g incelik ve 2,95 g/cm^3 özgül ağırlıkta olup, kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de, partikül boyut dağılımı Şekil 3.2'de, YFC ile ilgili görsel Şekil 3.3'te verilmiştir. YFC'nin 7 ve 28-günlük puzolanik aktivite indeksleri sırasıyla 54,2 ve 72,5 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2 YFC'nin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri

Kimyasal kompozisyon	Test değerleri (%)	EN 197-1 Standart	Test metodu
MgO	5,75	Max. 18	TS EN 196-2
S	0,54	Max. 2,0	TS EN 196-2
SO_3	0,19	Max. 2,5	TS EN 196-2
CL^-	0,0185	Max. 0,1	TS EN 196-2
Nem	0,06	Max. 1,0	TS EN 15.167-1
Na_2O	0,56	-	TS EN 196-2
K_2O	0,28	-	TS EN 196-2
Na_2O eşdeğeri	0,74	-	TS EN 196-2
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık g/cm^3	2,95	-	TS EN 196-6
Özgül yüzey cm^2/g	4.989	Min. 2.750	TS EN 196-6
Mineralojik özellikler	%		
Cam içeriği	100,00	-	TS EN 196-2
LOI	0,09	Max. 3,0	TS EN 196-2



Size	Percent
0.100	0.00
0.200	0.00
0.500	0.30
1.000	3.69
2.000	10.11
5.000	26.10
10.00	45.76
20.00	72.72
45.00	97.73
75.00	100.00

Şekil 3.2 YFC'nin partikül boyut dağılımı



Şekil 3.3 YFC

3.1.3 Pirinç Kabuğu Külü (PK)

Deneysel çalışmalarda çimento ikame malzemesi olarak kullanılan pirinç kabuğu, Kastamonu/Tosya'da bulunan bir çeltik fabrikasından temin edilmiştir. Pirinç kabuğu külü çimento ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Pirinç kabuğu önce etüvde kurutulmuş (Şekil 3.4), daha sonra Şekil 3.5'te tanımlanan düzenek kullanılarak pirinç kabuğunun yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yakma işlemi sonucu elde edilen kül, halkalı öğütücüde (Şekil 3.6) 60 dak. süreyle öğütülerek inceliği arttırılmıştır. PK'nın özgül ağırlığı 2,14 g/cm^3, BET yüzey alanı 14,70 m^2/g olarak belirlenmiştir.

PK, Şekil 3.4'de, kimyasal özellikleri Tablo3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.4 Etüv



Şekil 3.5 Pirinç kabuğu yakma düzeneği



Şekil 3.6 Öğütme işlemi için kullanılan Halkalı öğütücü



Şekil 3.7 Pirinç kabuğu külü

Tablo 3.3 PK'nin kimyasal özellikler

Bileşenler	%
SiO_2	95,45
Al_2O_3	0,85
Fe_2O_3	0,2
CaO	0,52
MgO	0,26
SO_3	0,15
Na_2O	0,1
K_2O	1,35

3.1.4 Polininil-alkol (PVA) Lif (PL)

PVA lifler yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahiptir, diğer liflerden farklı olarak hidrofil özelliği göstermesi, bu liflerin çimentolu kompozitin hidratasyonu ve kür işlemi sırasında matrisle arasında moleküler bağ kurmasını sağlar, bağ direnci, kompozitin eğilme ve çekme dayanımını arttırarak, çimentolu kompozite yüksek performans kazandırır. KYH numunelerin hazırlanmasında EN 14.889-2:2006 standardına uygun, polimerik, Kuraray marka PVA lifler kullanılmıştır. PL liflerin karakteristik özellikleri Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Tablo 3.4 PVA lifin fiziksel ve mekanik özellikleri

Çap (mm)	Boy (mm)	Çekme dayanımı (N/mm^2)	E-Modülü (Gpa)
0,200	12	800	8,5

3.1.5 Kum

Numune karışımlarının hazırlanmasında 0-2 mm silis kumu (SK) kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı 2,65, su emme oranı 0,96 olarak belirlenmiştir. Silisli kum Kastamonu'da mevcut kum ocağından temin edilmiş ve Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 KYH'de kullanılan silis kumu

3.1.6 Su

Bu tez kapsamında, Kastamonu kampüsünün şebeke suyu tüm harç karışımları için TS-EN 1.008 (2003) standartlarına uygun kullanılmıştır.

3.1.7 Süperakışkanlaştırıcı

Bu tez kapsamında, TS EN 934-2. Ç.3,1/3,2. ile intihal niteliklere sahip, CHRYSO firmasından tedarik edilen yüksek oranda su azaltıcı beton katkısı polikarboksilat esaslı yeni nesil SA CHRYSO Lab Bet 8.109 kullanılmıştır.

Özellikle KYB için tavsiye edilen yeni nesil polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı, çimentonun homojen dağılmasını sağlayarak, su gereksinimini önemli oranda düşürüp yoğunluğu ve su geçirimsizliğini arttıran beton katkısıdır. Tedarikçi firmadan temin edilen CHRYSO Lab Bet 8.109 teknik detay açıklaması ve nitelikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 SA'nın teknik özellikleri

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

3.2 Karışım Tasarımı ve Malzeme Oranları

Bu tez çalışmasında, KYH numunelerinin karışım tasarımı yüksek dayanımlı olacak şekilde tasarlanmış, bağlayıcı malzeme 900 kg/m^3, kum/bağlayıcı oranı 1,0, su/bağlayıcı oranı (s/b) 0,21 olarak seçilmiştir. REF karışımda bağlayıcı olarak %100 Portland çimentosu kullanılmış, YFC %0, %20, %40 ve %0, %15 ve %30 oranında PK çimento ikame malzemesi olarak karışıma eklenmiştir. KYH karışımlarında lif/bağlayıcı (l/b) oranı %0 ve %2 olacak şekilde, PVA lif (PL) karışımlara eklenmiştir. Harç karışımlarında düşük s/b oranı, yüksek işlenebirlik sağlamak için SA kullanılmış, SA/b oranı 0,03 değerinde sabit tutulmuştur. KYH karışım oranları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 KYH malzeme karışım oranları

Karışım kodu	PÇ	PK	YFC	l/b
	%			
REF	100	0		
L0-C0P15	85	15	0	
L0-C0P30	70	30		
L0-C20P0	80	0		
L0-C20P15	65	15	20	0
L0-C20P30	50	30		
L0-C40P0	60	0		
L0-C40P15	45	15	40	
L0-C40P30	30	30		
L2-C0P0	100	0		
L2-C0P15	85	15	0	
L2-C0P30	70	30		
L2-C20P0	80	0		
L2-C20P15	65	15	20	2
L2-C20P30	50	30		
L2-C40P0	60	0		
L2-C40P15	45	15	40	
L2-C40P30	30	30		

3.3 Numunelerin Hazırlanması

KYH numuneleri, 40x40x160 mm boyutlarında prizma şeklinde TS EN 196–1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Numune kalıpları harçla doldurulduktan sonra, üzerleri cam plaka ile kapatılarak 24 saat süreyle laboratuvar ortamında bekletilmiş, daha sonra kalıptan çıkartılan numunelere iki farklı kür işlemi uygulanmıştır.

3.4 Kür Koşulları

Kalıptan çıkartılan KYH numunelerine aşağıda tanımlanan iki farklı ortamda kür işlemi uygulanmıştır.

1. Kür odası (LK): Bu kür işlemi özellikle ortalama 32±1 °C ortalam sıcaklığı ve yaklaşık %70 nem seviyesine sahip dış ortam koşullarının numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini görmek için tasarlanmıştır.

2. Buhar kürü (BK): Kademeli bir sıcaklık artışı ile numunelere 90 °C'de 24 saat buhar kürü uygulanmış, numunelere daha sonra 32±1 °C sıcaklık ve yaklaşık %70 nem ortamında kür uygulanmıştır.

3.5 Test Yöntemleri

3.5.1 Yayılma Testi

Taze harç karışımlarına uygulanacak yayılma testi ASTM C 437'ye göre belirtilenmiştir. ASTM C 437'ye göre belirtilen yayılma tablası Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Test işlemi için kesik koni harçla doldurularak dairesel yayılma tablasının tam ortasına yerleştirilmiş, koni dikkatle yukarı kaldırılmış, taze haldeki karışımın tablada oluşan yayılma çapı ölçülmüştür.



Şekil 3.9 Harç yayılma testi cihazı

3.5.2 Birim Hacim Ağırlık (BHA)

Prizmatik numuneler etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutularak ağırlıkları tartılmış, daha sonra numunelerin boyutları digital kumpasla ölçülerek numunelerin BHA değerleri hesaplanmıştır. Test işlemi ASTM C 642'ye uygun olarak yapılmıştır.

3.5.3 Eğilme Dayanımı Testi

Kür işlemi sonrası KYH numunelerin eğilme dayanımları TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 3, 7, 28 ve 90 günlük prizma numuneler deney cihazına yerleştirilmiş, yükleme hızı 50N/s olarak ayarlanmış, Şekil 3.11'de tanımlanan test cihazı yardımı ile numunelerin P kırılma yükleri belirlenmiştir. Daha sonra eşitlik 3.1 yardımı ile numunelerin eğilme dayanımları hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{1.5\ PL}{bd^2} \tag{3.1}$$

Eşitlikte;

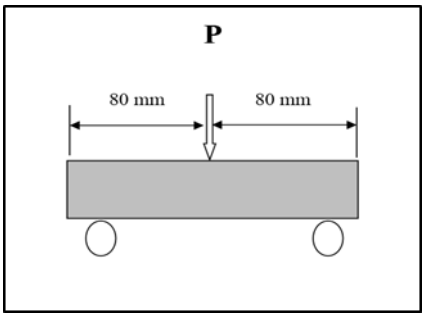
σ = Eğilme dayanımı (Mpa)

P = Kırılma yükü (kN)

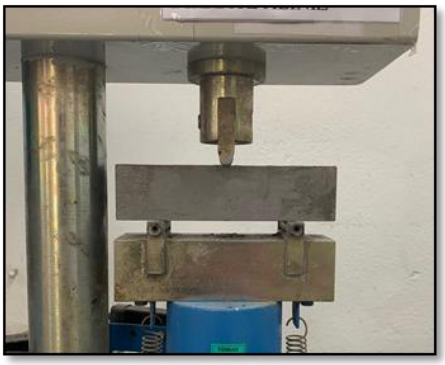
L = Mesnet açıklığı (mm)

b = Numune eni (mm)

d = Numune yüksekliği (mm)



Şekil 3.10 Üç noktadan yüklemeli eğilme testinin şematik görünümü



Şekil 3.11 Eğilme test düzeneği

3.5.4 Basınç Dayanımı Testi

Harç numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde eğilme testinden elde edilen harç numuneleri kullanılmıştır. Yükleme öncesi numunelerin yüzeyleri düzeltilmiş, test işleminde 200 kN kapasiteli çimento presi kullanılmış, yükleme hızı 2,4 kN/s olarak belirlenmiştir. KYH numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları TS-EN 196-1'e uygun olarak yapılmış, deney düzeneği Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.12 Basınç dayanımı testi

3.5.5 Ultrases Geçiş Hızı

Ultrasonik test yöntemi tahribatsız test yöntemlerinden biridir. Ses dalgasının hızı, geçtiği ortamın özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu test, çimentolu kompozitlerin homojenliğinin, çatlak yapısının belirlenmesi ve basınç dayanımının tahmini amacıyla kullanılmaktadır. Ses geçiş süresinin azalması, malzemenin boşluklu olduğunun bir göstergesidir.

Kürden çıkartılan harç numuneleri etüvde 50 °C'de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş, soğumaları beklenmiş, zımparalanarak yüzeyleri temizlenmiş, boyutları kumpas ile ölçülmüştür. Test öncesi kalibrasyon çubuğu yardımı ile cihazın kalibrasyonu yapılmıştır. Test işleminde frekansı 55 kHz olan dijital test cihazı kullanılarak, işlem ASTM 597-09'ye uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.13). Test sırasında probların numune yüzeyine temasının sağlanabilmesi için ultrason jeli kullanılmış, problar numune yüzeyine hafifçe bastırılarak ve karşılıklı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Ekranda ki geçiş süresi μs olarak kaydedilmiştir. Ses geçiş hızı Eşitlik 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Test işlemi her seri için üç tekrarlı olarak yapılmıştır.

$$V = (S / t)\ 10^6 \qquad (3.2)$$

Eşitlikte;

V = P dalga hızı (km/sn),

S = Numunenin yüzeyleri arasındaki mesafe (m),

t = P dalganın geçiş süresi (μs)



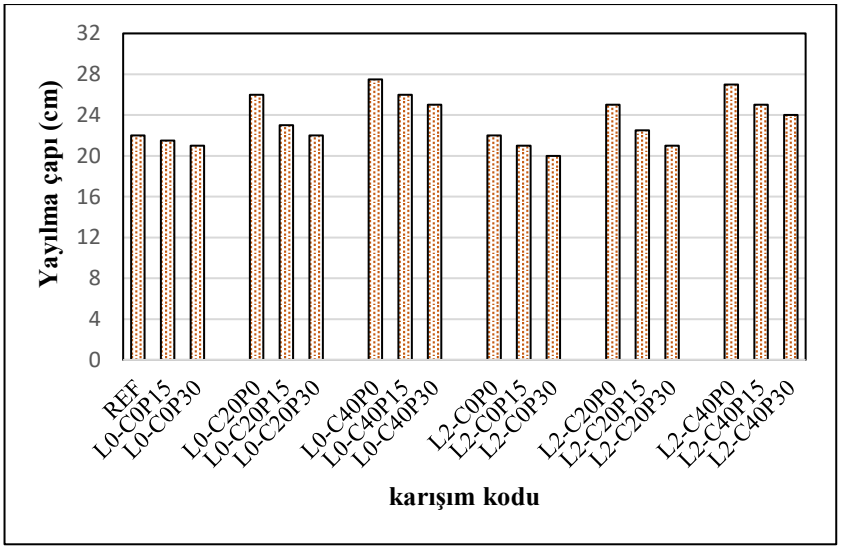
Şekil 3.13 Ultrasonik geçiş hızı testi uygulaması

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde KYH numunelerinin yayılma, BHA, eğilme ve basınç dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı testlerinden elde edilen sonuçlar grafik olarak tanımlanmış ve değerlendirilmiştir.

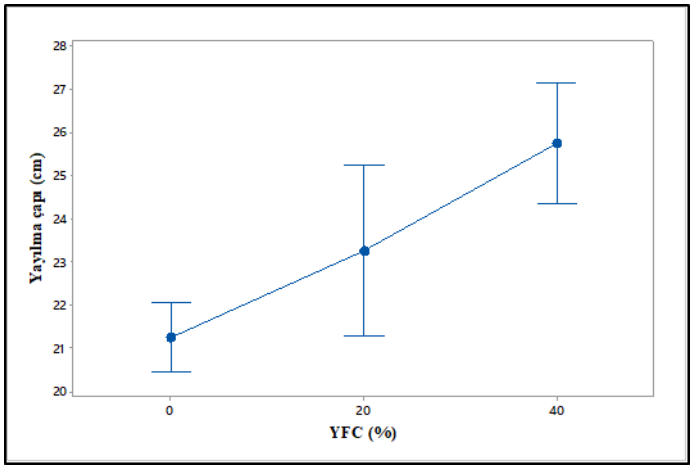
4.1 KYH Karışımlarının Yayılma Özellikleri

YFC, PK ikame malzemeleri ve PL katkı içeren KYH karışımlarının yayılma değerleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



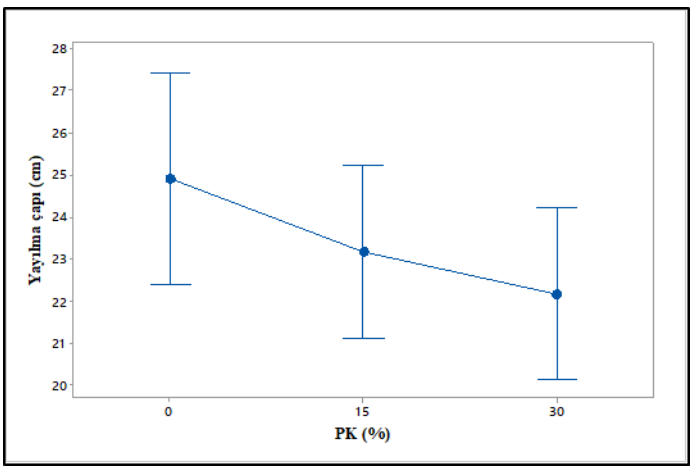
Şekil 4.1 KYH karışımlarının yayılma testi sonuçları

KYH karışımlarının yayılma değerlerinin 20 cm ile 27,5 cm arasında değiştiği Şekil 4.1'de görülmektedir. En yüksek yayılmanın L0-C40P0 kodlu %40 YFC ikameli karışımda, en düşük yayılmanın %2 PL ve %30 PK katkılı karşımda oluştuğu, L2-C0P30 kodlu karışım dışında, tüm karışımların ASTM C1.437'ye uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, taze harçların görsel muayenesinde, karışımların hiçbirinde herhangi bir ayrışma ve terlemenin oluşmadığı, karışımların homojen olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.2 YFC'nin KYH karışımlarının yayılma değerlerine etkisi

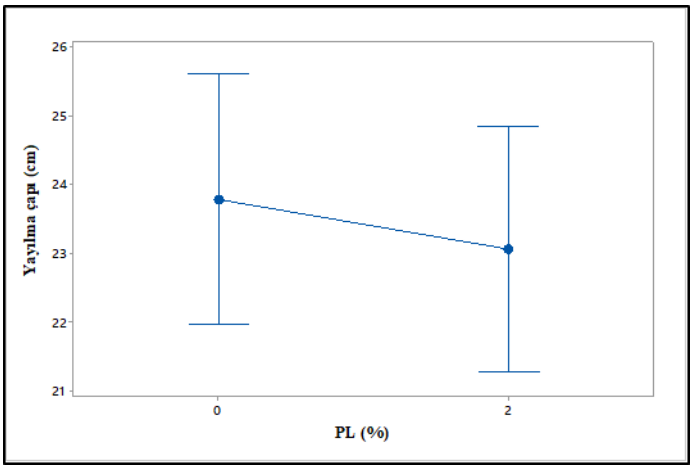
YFC, PK ve PL'nin harçların yayılma üzerindeki etkisi Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.2'de, YFC ikame oranlarındaki artışın işlenebilirliği ve dolayısıyla da harçların yayılma değerlerini arttırdığı görülmektedir. Betonun işlenebilirliğinin tane boyutu, özgül yüzey alanı, ikame oranı ve mineral katkıların reaktivitesiyle ilişkili olduğu bilinmektedir. YFC'nin puzolanik aktivitesinin yavaş gelişimi, cürufun pürüzsüz yüzey dokusu, YFC'nin PÇ'ye göre %3 daha az karışım suyuna gereksinim duymasından dolayı YFC'nin işlenebilirliği arttırdığı ifade edilebilir (Ishak, Johari ve Hashim, 2017).



Şekil 4.3 PK'ın KYH karışımlarının yayılma değerlerine etkisi

PK'nın KYH karışımlarının yayılma çapları üzerindeki etkisi Şekil 4.3'te görülmektedir. PK ikame oranlarının artmasıyla yayılma çaplarının azaldığı belirlenmiştir. Nair vd. (2013); Sathawane vd. (2013); Bharathi ve Sreekumaran,

(2020), PK'nın işlenebilirlik üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğunu, bunun PK'nın gözenekli yapısındandan ve yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasından kaynaklandığını çalışmalarında belirtilmişlerdir. Fapohunda, Akinbile ve Shittu (2017)'de, PK içeren karışımların, geleneksel karışımlardan daha yüksek karışım suyu gerektireceğini ve PK oranındaki artışa bağlı olarak bunun artacağını ifade etmişlerdir.



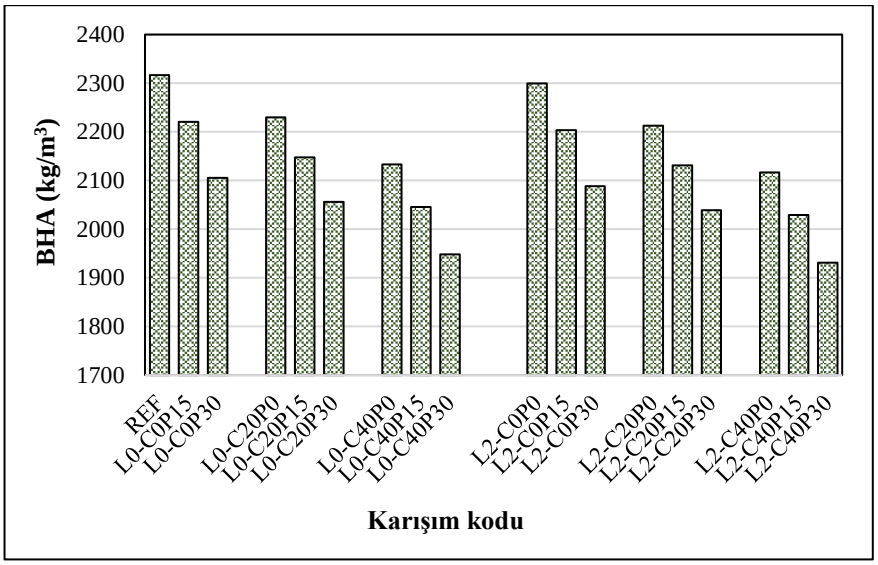
Şekil 4.4 PL'nin KYB yayılma testi sonuçlarına etkisi

4.2 Birim Hacim Ağırlık

Beton yoğunluğu, gözenekliliğin belirlenmesinde, dayanıklılığın ve mukavemetin değerlendirilmesinde ve hidratasyon sonucu oluşan CSH fazının tahmininde önemli bir faktördür (Fapohunda vd., 2017). KYH karışımını oluşturan harç bileşenleri ve oranlarının KYH numunelerinin BHA değerlerinin değişimine etkisi Şekil 4.5'de verilmiştir.

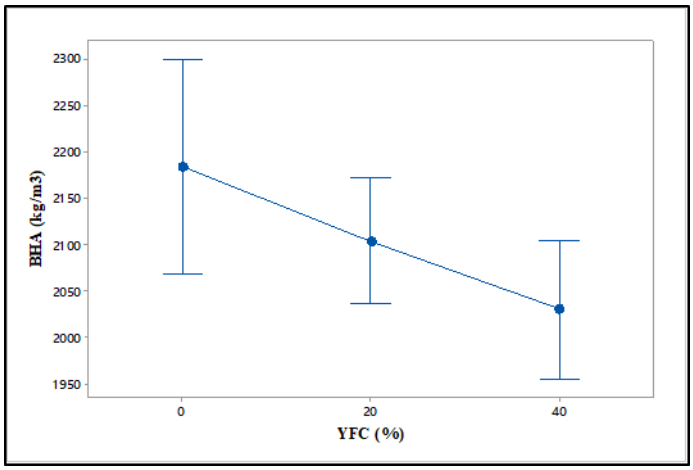
YFC, PK ikame ve PL katkı oranlarının KYH numunelerin BHA değerlerini düşürdüğü görülmektedir. En yüksek BHA değeri, 2.316 kg/m³ olarak REF numunede, en düşük değer ise 1.931 kg/m³ olarak L2-C40P30 numunede elde edilmiştir. YFC içeriğindeki artışın (Şekil 4.6), BHA değerlerinin düşmesinde etkili olduğu görülmektedir. Bu durum, çimentonun özgül ağırlığı ile YFC'nin özgül ağırlığı arasındaki farktan kaynaklanmaktadır (Li, 2011). Ayrıca, PK ikamesinin ve ikame oranlarında ki artışın da KYH numunelerinin BHA'nın da azalmasına yol açmıştır. Adenuga vd. (2010), yapılan deneysel çalışmalarda, tüm su bağlayıcı oranlarında, PK içeren numunelerinin yoğunluğunun PK içeriğindeki artışla azaldığını ifade

etmişlerdir. Yüzer vd. (2013), PK ikamesinin çimentolu kompozitin gözenekliliğini artırdığını, yoğunluğunu azalttığını, Nair vd. (2013), bu değişimin PK'nın özgül ağırlığının çimentonunkinden çok daha düşük olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Şekil 4.8'de, PL ilavesiyle BHA sonuçlarında hafif bir azalma gözlemlendiği görülmektedir. Dolayısıyla PL'nin %0 ve %2 olması duumunda sırasıyla 2 113 ve 2 098 kg/m^3 değerlerine ulaşılmıştır.

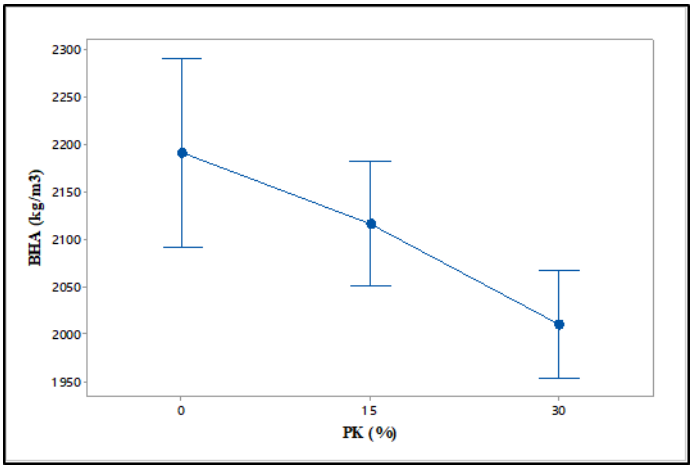


Şekil 4.5 KYH numunelerinin BHA değerleri

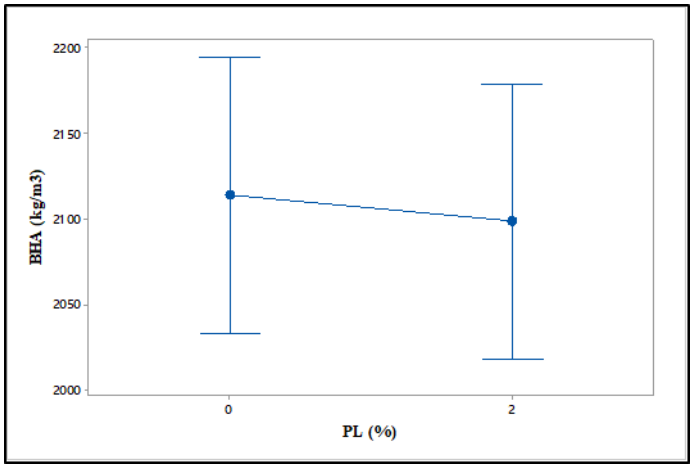
YFC, PK ve PL'nin BHA üzerindeki etkileri Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de gafik olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.6 YFC'nin KYH numunelerinin BHA değerlerine etkisi



Şekil 4.7 PK'nın KYH numunelerinin BHA değerlerine etkisi



Şekil 4.8 PL'nin KYH numunelerinin BHA değerlerine etkisi

4.3 KYH'nin Mekanik Özellikleri

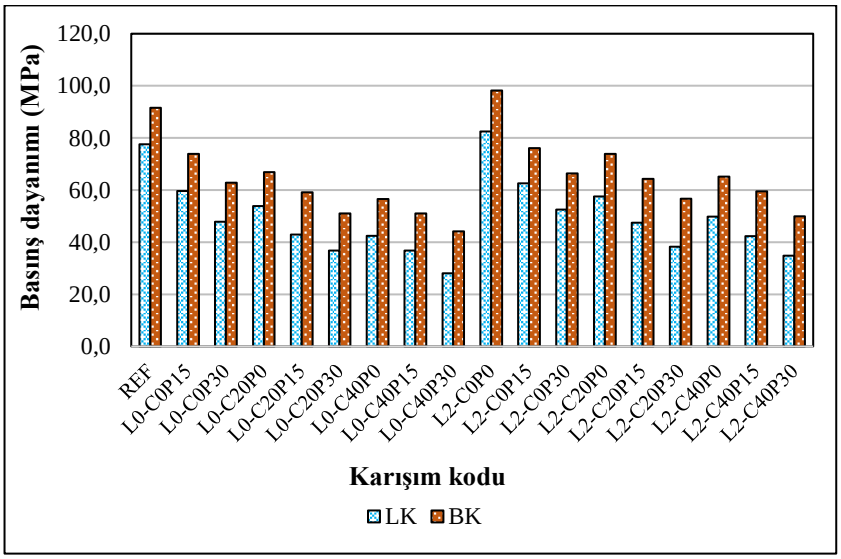
4.3.1 Basınç Dayanımı

Farklı oranlarda YFC, PK ve PL içeren serleşmiş KYH numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.

Uygunoğlu vd. (2021), %2 oranında PL katkısının harçların basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığını, Shah vd., (2020)'de, %2 PL katkısının, UK-YFC esaslı alkalilerle aktive edilmiş harçların basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığını ifade etmişlerdir.

1.3.1.1 3 günlük basınç dayanımı

LK ve BK'de kür uygulanan lif katkısız ve %2 PL katkılı KYH numunelerin 3 günlük basınç dayanı değerleri Şekil 4.9'da görülmektedir.

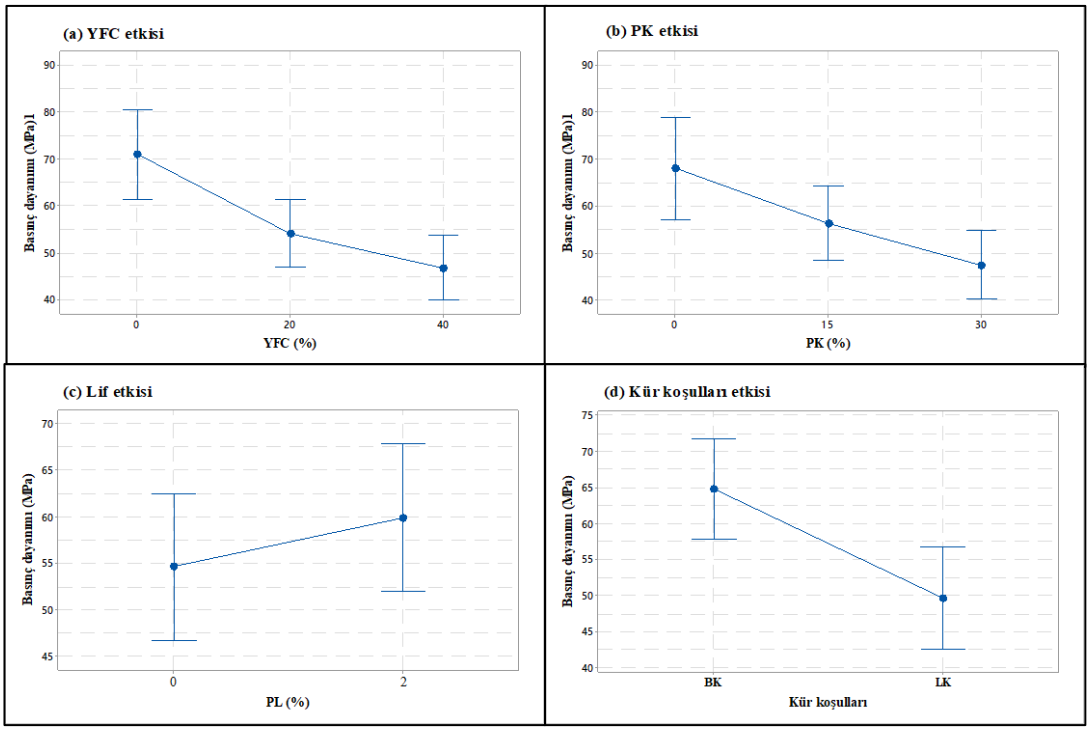


Şekil 4.9 KYH numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları

LK ve BK uygulanan L0 ve L2 kodlu numunelerin, PK ve YFC ikame oranlarındaki artışın basınç dayanımlarını düşürdüğü, %2 PL katkısının ise basınç dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu görülmüştür. LK uygulanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı REF ve L2-C0P0'da 77,6 ve 82,5 Mpa, en düşük basınç dayanımı L0-C40P30'da 28,1 Mpa olarak gerçekleşmiştir.

BK'nin hem L0, hem de L2 kodlu numunelerin basınç dayanımları üzerinde belirgin bir etki oluşturduğu belirlenmiştir. REF numune esas alındığında, L0-C0P0 (BK)'da %18, L2-C0P0'da %27 dayanım artışı oluşturmuştur. En yüksek basınç dayanımı REF ve L2-C0P0'da 91,6 ve 98,2 Mpa, en düşük basınç dayanımı da L0-C40P30'da 44,1 Mpa olarak gerçekleşmiştir.

YFC, PK, PL ve kür koşullarının 3 günlük basınç dayanımına etkileri Şekil 4,10'da tanımlanmıştır.



Şekil 4.10 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 3 günlük basınç dayanımına etkisi

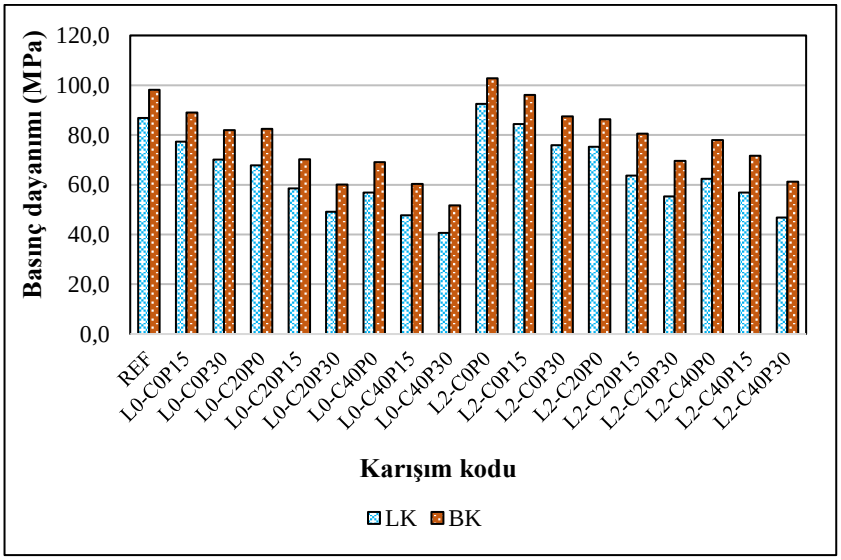
YFC oranlarındaki artış erken yaş basınç dayanımlarını düşürmüştür. YFC'nin PÇ'ye kıyasla daha düşük bir CaO'ya sahip olması, hidratasyonun gelişimini yavaşlatmış ve erken yaş dayanımlarını azaltmıştır (Gholampour ve Özbakkaloğlu 2017).

PK ikamesi ve oranlarındaki artış 3 günlük basınç dayanımlarını olumsuz etkilemiştir. Erken yaş dayanımındaki azalma, Ishak vd. (2017) tarafından da bildirildiği gibi, PK'nın düşük puzolanik aktivitesinden kaynaklanmaktadır. Chao-Lung vd. (2011)'e göre, öğütülmüş PK ikamesi çimento miktarını azaltır, kapiler boşlukların hacmi artar ve ara yüzde CH birikir, daha düşük yoğunlukta oluşan bu yapı, basınç dayanımının düşmesine yol açar.

%2 oranında PL'nin basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etki oluşturmuştur. BK'nin lifli ve lifsiz KYH numunelerinin basınç dayanımlarını arttırdığı gözlenmiştir.

4.3.1.2 7 günlük basınç dayanımı

YFC, PK ve PL'nin 7 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 4,11'de sunulmuştur.

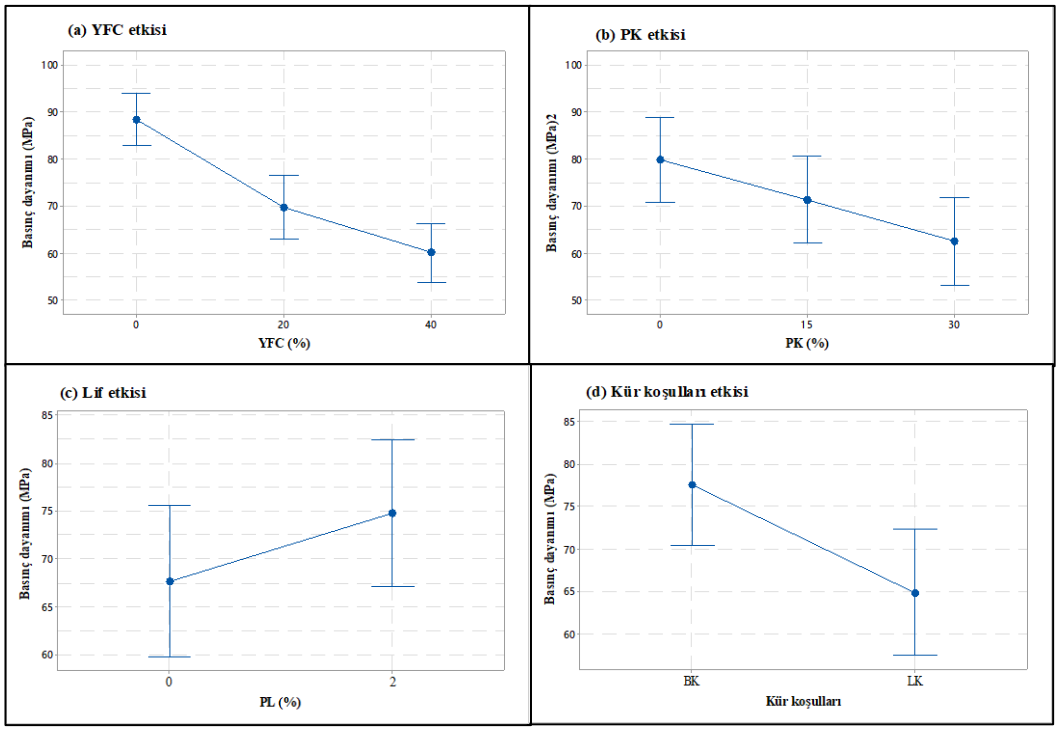


Şekil 4.11 KYH numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

LK dikkate alındığında, YFC içeriğindeki artış, basınç dayanımlarını düşürmüştür. REF numune esas alındığında dayanım kaybı, L0-C40P0'da %33, L2-C40P0'da %27 olmuştur. PK ikamesi de basınç dayanımlarını düşürmüştür. REF'ye göre L0-C0P30'da %19, L2-C0P30'da %12 dayanım kaybı gerçekleşmiştir. YFC ve PK ikamelerinin birlikte kullanıldığı numunelerde dayanım kaybı daha yüksek değerlere ulaşmış, en yüksek dayanım, REF ve L2-C0P0'da sırasıyla 89,9 ve 95,5 Mpa, en düşük dayanım L0-C40P30'da 43,7 Mpa olarak belirlenmiştir. Siddique ve Cachim, (2018)'e göre 3 ve 7 gün yaş dayanımları için, dayanımın yavaş gelişi nedeniyle, bir dezavantaj olsa da, 28 gün ve üzeri yaşlar için bir avantajdır, Çünkü YFC içeren çimentolu ürünler, daha sonraki yaşlarda PÇ'ye göre daha yüksek oranda dayanım kazanmaya devam etmektedir. Chao-Lung vd. (2011)'e göre, PK içeriğinin artmasıyla erken yaştaki bu azalma, PK'nin düşük puzolanik aktivitesinden kaynaklanmaktadır.

BK uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının LK'ye göre arttığı, L0-C0P15, L0-C0P30, L0-C20P0 ve L2-C20P15 numunelerinin basınç dayanımlarının REF(LK)'ın %90'ına eş değer basınç dayanımları kazandıkları, L0-C0P15, L2-C0P30 ve L2-C20P0'in, REF'ye eş değer dayanıma sahip oldukları görülmüştür.

YFC, PK, PL ve kür şartlarının ayrı ayrı 7 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.12 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 7 günlük basınç dayanımına etkisi

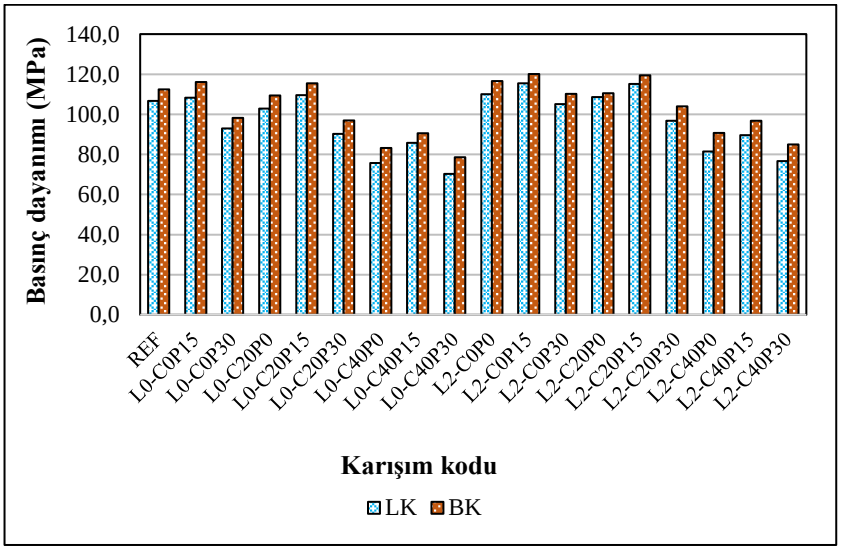
YFC ve PK ikame oranlarındaki artış basınç dayanımını olumsuz, PL katkısı ve BK ise olumlu yönde etkilemiştir.

4.3.1.3 28 günlük basınç dayanımı

YFC, PK, PL katkı oranlarının ve LK, BK koşullarının KYH numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 4,13'te verilmiştir.

YFC ve PK ikame oranlarındaki artışların, basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerinin hem LK, hem de BK uygulanan numunelerde azaldığı görülmektedir. Lifli ve lifsiz, özellikle %15 PK, %20 YFC ve %20 YFC-%15 PK ikameli numunelerde REF numuneye eşdeğer veya daha yüksek basınç dayanımı değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Dayanım artışı %2 PL katkılı ve BK uygulanan numunelerde daha belirgin olmuştur. LK'de en yüksek basınç dayanımı, L2-C0P15 ve L2-C20P15'de 115,0 MPa, BK'de L2-C0P15 ve L2-C20P15'de 120,0 MPa, en düşük dayanım L0-C40P30 (LK)'da 70,3 Mpa olarak belirlenmiştir. YFC, Siddique ve Cachim (2018) ve Gholampour ve Özbakkaloğlu (2017) tarafından ifade edildiği gibi 28 günden sonraki dayanımları artırmaktadır. Yüksek oranda YFC ikameli numunelerde gözlenen

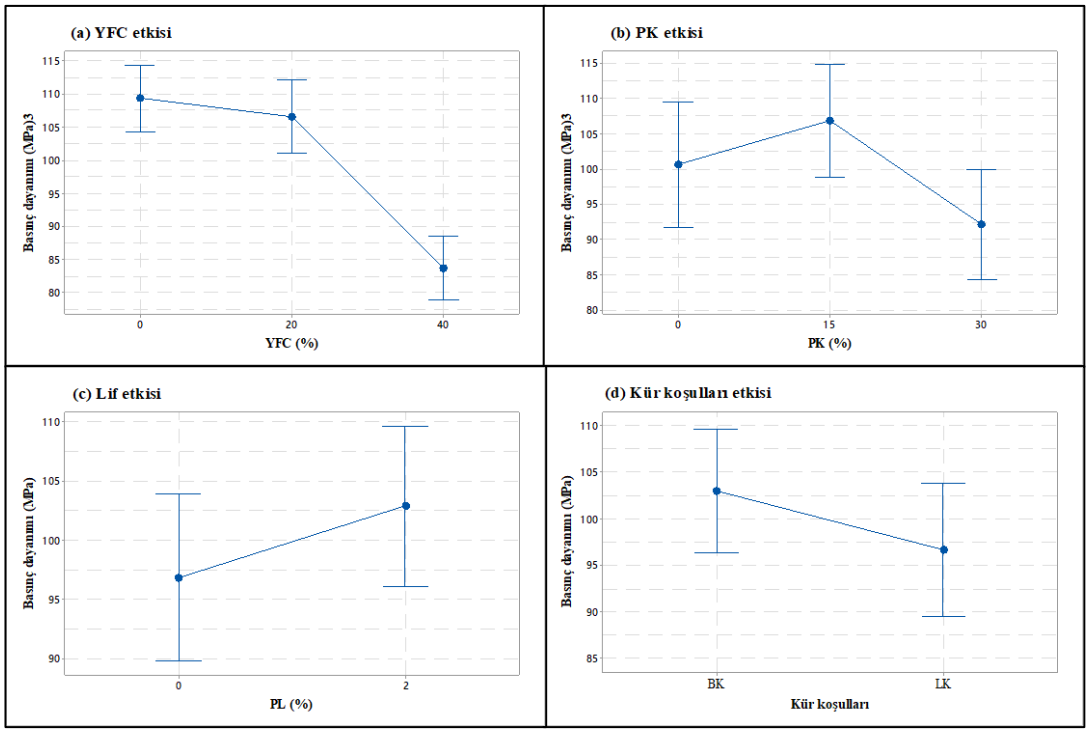
dayanım kayıpları, YFC partikülleri tarafından üretilen düşük yoğunluklu C-S-H jelinin varlığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu durum mevcut serbest kalsiyum hidroksitin puzolanik aktivite için yetersizliğine de bağlanabilir (Bharathi ve Sreekumaran, 2020).



Şekil 4.13 KYH numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları

Sutharsan vd. (2019) %15 PK ikamesinin basınç dayanımını artırdığını ifade etmiştir. Gözenekli PK başlangıçta karışım suyunun bir kısmını emer, gözenekteki su daha sonra serbest kalır. PK'daki amorf silika ve serbest kalan su puzolanik reaksiyon sonucu, ilave C-S-H oluşumuna neden olur (Chao-Lungvd., 2011). Zareei vd. (2017), dayanımdaki artışın, kısmen puzolanik reaksiyondan, kısmen de PK'nın yüksek spesifik yüzey alanı ve PK'da mevcut reaktif silikanın varlığından kaynaklanabileceğini açıklamıştır. Filler etkisinin yanı sıra, PK'nın hem puzolanik reaktivitesi, hem de içsel kürleme etkisi, Huang vd. (2017) tarafından belirtildiği gibi basınç dayanımının gelişimine olağanüstü katkı sağlar.

YFC, PK, PL ve kür şartlarının ayrı ayrı 28 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 4.14'de görülmektedir.

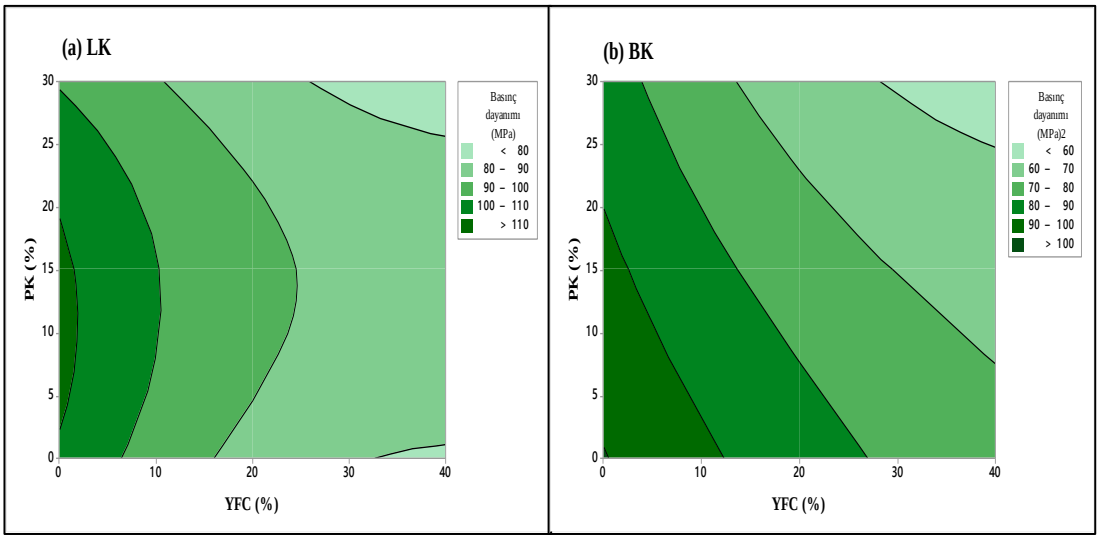


Şekil 4.14 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 28 günlük basınç dayanımına etkisi

%15 PK ikamesi, %2 PL katkısı ve BK'nın KYH numunelerinin basınç dayanımı üzerinde olumlu, %40 YFC ikamesinin basınç dayanımları üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.15'de %20 YFC ikamesinin basınç dayanımlarını düşürdüğü gözlensede, gerek tek başına kullanıldığında, gerekse %15 PK ile kullanıldığında, LK'de referans numuneye eşdeğer, BK ise numunelerin referans numuneden daha yüksek basınç dayanımı değerine sahip olduğu görülmektedir.

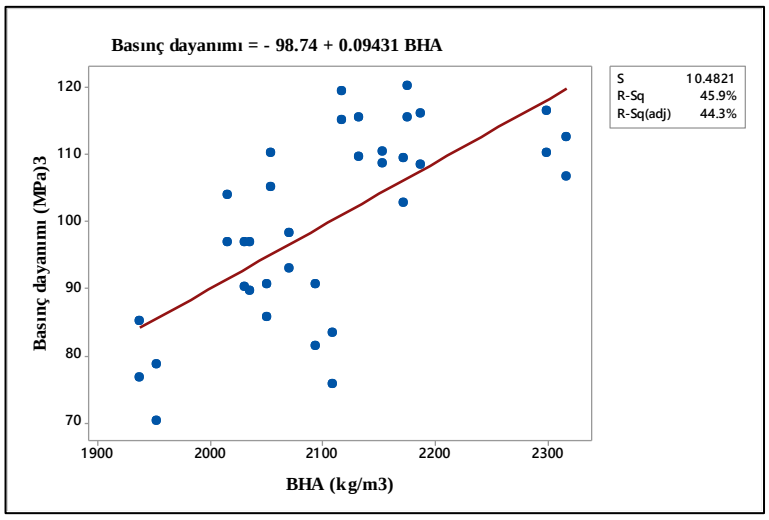
Niu vd. (2021), PL'nin 28 günlük basınç dayanımları ile eğilme dayanımlarını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Şekil 4.15'te LK ve BK şartlarında farklı basınç dayanımı değerleri için optimum YFC-PK ikame oranları verilmiştir.



Şekil 4.15 28 günlük basınç dayanımı için optimum YFC-PK oranları

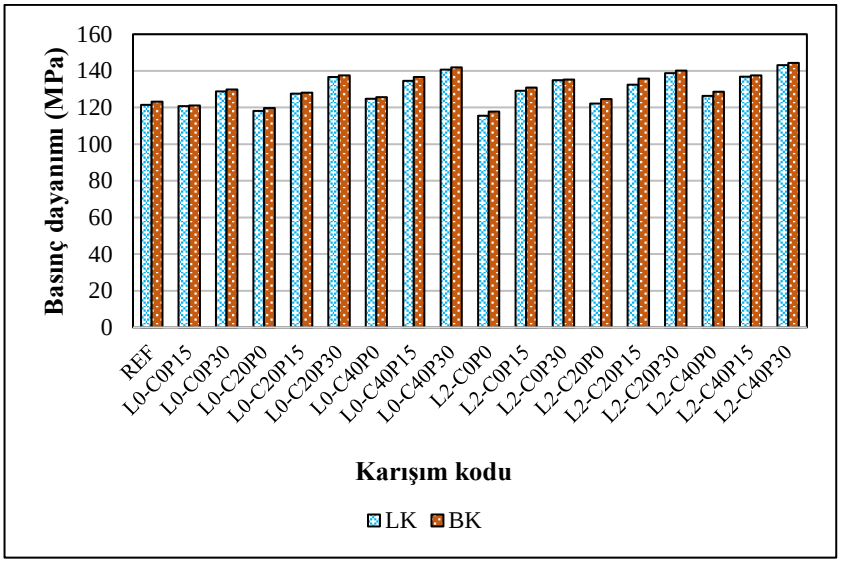
Şekil 4.16'da 28 günlük basınç dayanımı ile BHA arasında R^2 = %45,9 oranında istatiksel bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Korelasyon katsayısının düşük olmasında, YFC, PK ve PL'nin birim ağırlık değerleri üzerinde oluşturduğu olumsuz etki ve puzolanik reaksiyonların 28 günlük sürede yetersiz gelişiminden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.16 Yirmi sekiz günlük basınç dayanımı ve BHA arasındaki ilişki

4.3.1.4 90 günlük basınç dayanımı

YFC, PK, PL katkı oranlarının ve LK, BK koşullarının KYH numunelerinin 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 4.17'de verilmiştir.



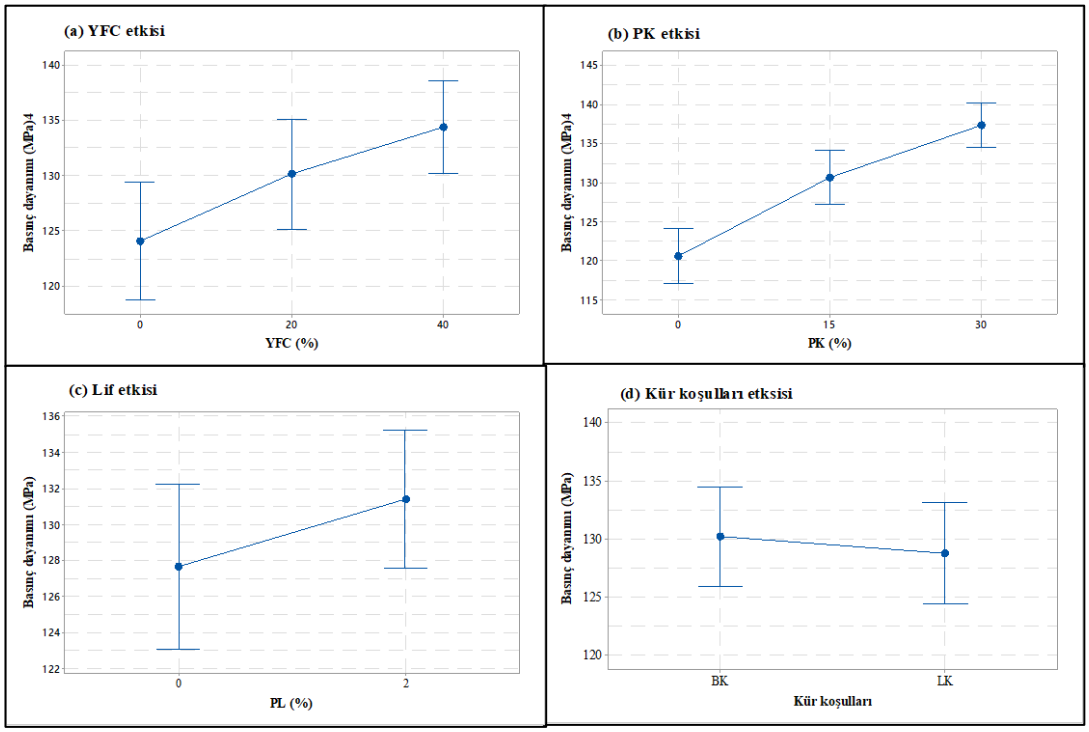
Şekil 4.17 KYH numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları

Hem LK, hem de BK ortamında olgunlaştırılan YFC, PK ve YFC-PK ikameli, P0 ve P2 kodlu numunelerin 90 günlük basınç dayanımlarının REF kodlu numuneden daha yüksek gerçekleştiği görülmektedir. 28 günlük REF numune esas alındığında, dayanım artışı LK'de %11-%33, BK'de %14-%33 arasında değişmektedir. LK'de en büyük dayanım artışı L0-C40P30, L2-C20P30 ve L2-C40P30 kodlu %20 YFC-%30 PK, %40 YFC-%30 PK ikameli, BK'de ise L0-C40P30 ve L2-C40P30 kodlu %40 YFC-%30 PK ikameli numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar YFC ve PK'nın birlikte kullanıldığında ileri yaşlarda iyi bir puzolanik aktivite sonucu, yüksek mekanik dayanım artışları oluşturabileceğini sergilemektedir. 90 günlük mekanik dayanımlar üzerinde %2 PL katkısının önemli bir etki oluşturmadığı gözlenmiştir.

Thomas ve Rajaselvi (2016), optimum YFC ikame oranın %30 olduğunu gözlemlemişler, ancak, tatmin edici YFC ikame oranı %40 ila %50 aralığında gözden geçirilmiş, YFC içeren betonun ileri yaşlardaki dayanımının arttığı, Ishak vd. (2017) tarafından ifade edilmiştir. Nair vd. (2013), PK'nın 90 günlük basınç dayanımlarında %6 artış sağladığını belirtmiş, bunu PK'nın ileri yaşlarda ki puzolanik etkisine bağlamışlardır. Chao-Lung vd. (2011), PK'nın puzolanik reaksiyonunun 28 gün sonra geliştiğini, CH miktarını azalttığını, mikro yapıyı iyileştirdiğini ve sonraki aşamada basınç dayanımının arttığını belirtmiştir.

Kang vd. (2019), ultra yüksek performanslı betonunun mekanik özelliklerini ısıl işlem olmaksızın iyileştirmek için PK'yı çimento ikamesi olarak kullanmış, 20 °C ve %60 bağıl nem koşullarında, 91 gün sonunda 200 MPa civarında olağanüstü bir dayanım elde edildiğini, bunun gözenekli yapı sonrası oluşan içsel kürleme etkisi ve amorf silisin oluşturduğu puzzolanik reaksiyondan kaynaklandığını araştırma sonucunda açıklamıştır.

YFC, PK, PL ve kür şartlarının 90 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 4.18'de görülmektedir.

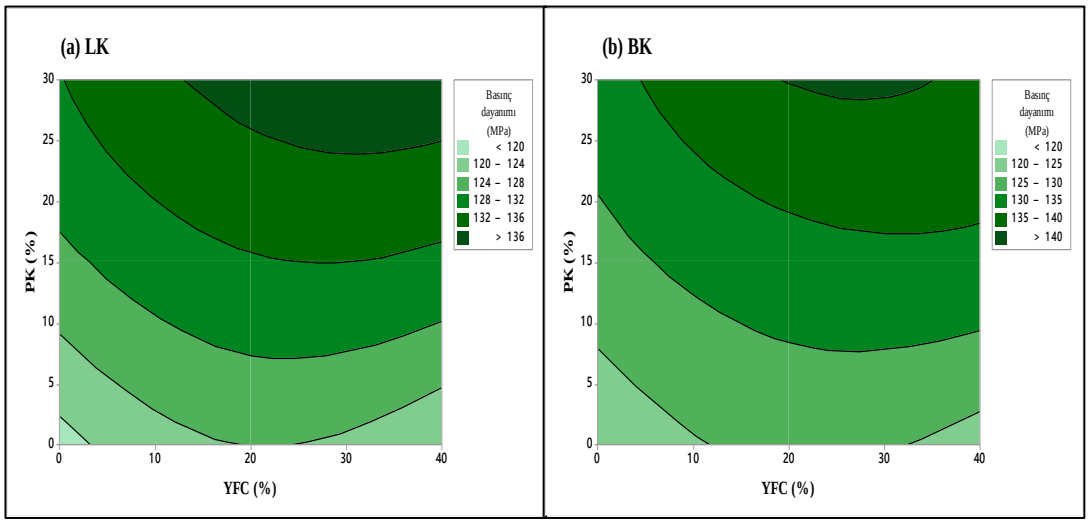


Şekil 4.18 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 90 günlük basınç dayanımına etkisi

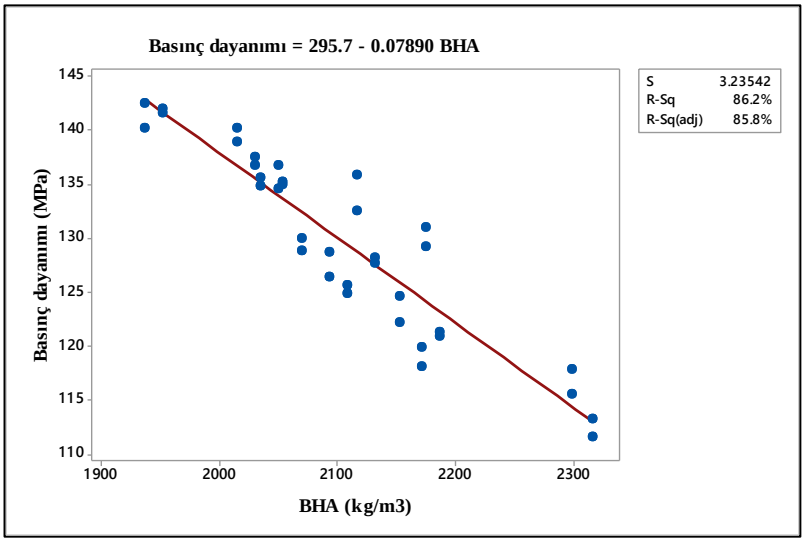
YFC, PK ikame oranlarının, %2 PL katkısı ve BK'nın 90 günlük basınç dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu, bu etkinin YFC ve PK ikamesinde daha etkili olduğu, PL katkısının ve BK'nın daha sınırlı bir etki oluşturduğu Şekil 4.17'de görülmektedir.

Şekil 4.19'da LK ve BK şartlarında, farklı basınç dayanımı değerleri için optimum YFC-PK ikame oranları verilmiştir.

Şekil 4.20'de, 90 günlük basınç dayanımı ile BHA arasındaki ilişki sunulmaktadır. 90 günlük basınç dayanımı ile BHA arasında R^2 = %85,8 oranında istatiksel bir ilişkinin olduğu görülmüştür.



Şekil 4.19 90 günlük basınç dayanımı için optimum YFC-PK oranları



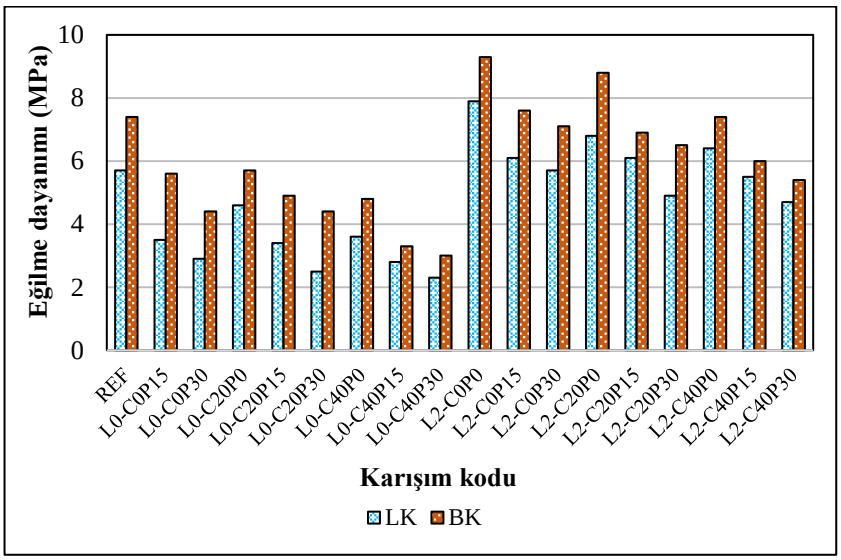
Şekil 4.20 90 günlük basınç dayanımı ve BHA arasındaki ilişki

4.3.2 Eğilme Dayanımı

Farklı oranlarda YFC, PK ve PL içeren serleşmiş KYH numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'te verilmiştir.

4.3.2.1 3 günlük eğilme dayanımı

LK ve BK uygulanan L0 ve L2 kodlu KYH numunelerin 3 günlük eğilme dayanımı değerlerinin değişimi Şekil 4.21'de verilmiştir.

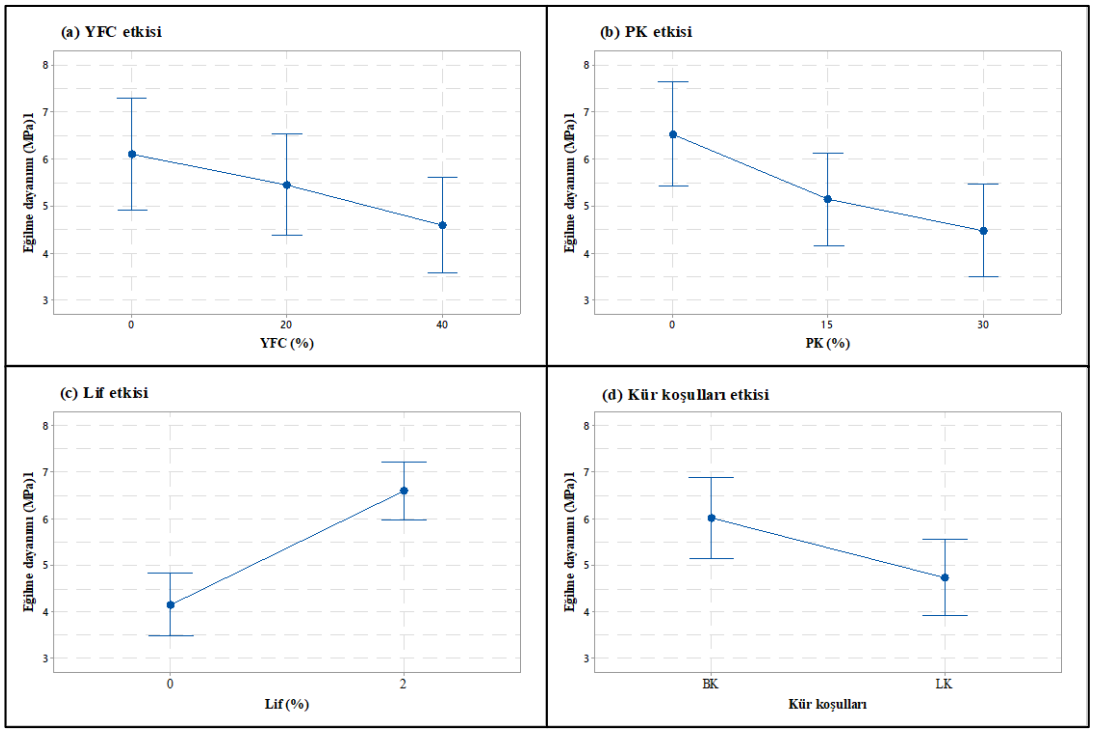


Şekil 4.21 KYH numunelerinin 3 günlük eğilme dayanımları

LK ve BK uygulanan L0 ve L2 kodlu numunelerin, PK ve YFC ikame oranlarındaki artışın eğilme dayanımlarını düşürdüğü, %2 PL katkısının ise eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu görülmüştür. LK uygulanan numunelerde en yüksek eğilme dayanımı REF ve L2-C0P0'da 5,7 ve 7,9 MPa, en düşük eğilme dayanımı L0-C40P30'da 2,3 Mpa olarak gerçekleşmiştir.

BK'nin hem L0, hem de L2 kodlu numunelerin eğilme dayanımları üzerinde belirgin bir etki oluşturduğu belirlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı REF ve L2-C0P0'da 8,4 ve 10,7 Mpa, en düşük eğilme dayanımı da L0-C40P30'da 3,2 MPa olarak gerçekleşmiştir.

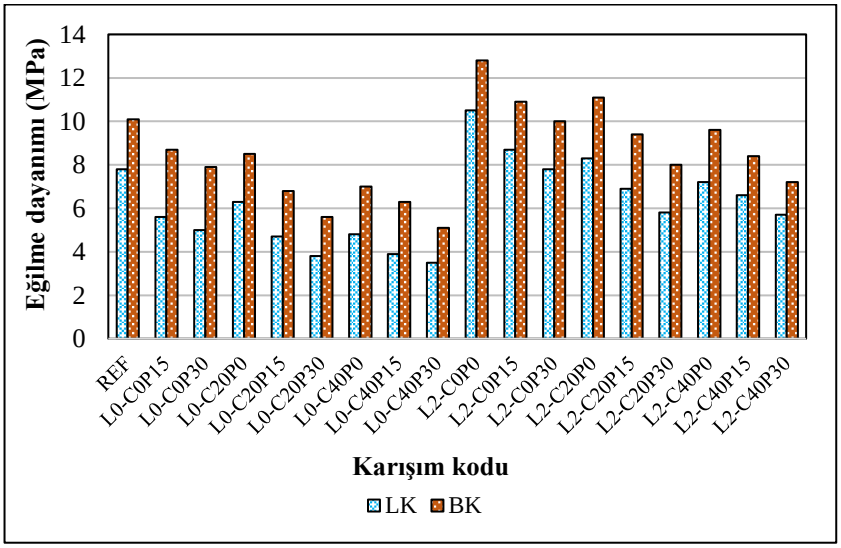
YFC ve PK, KYH numunelerinin eğilme dayanımlarını olumsuz, %2 PL katkısı ve BK ise olumlu etkilemiştir.



Şekil 4.22 YFC, PK, PL ve kür koşullarının 3 günlük eğilme dayanımına etkisi

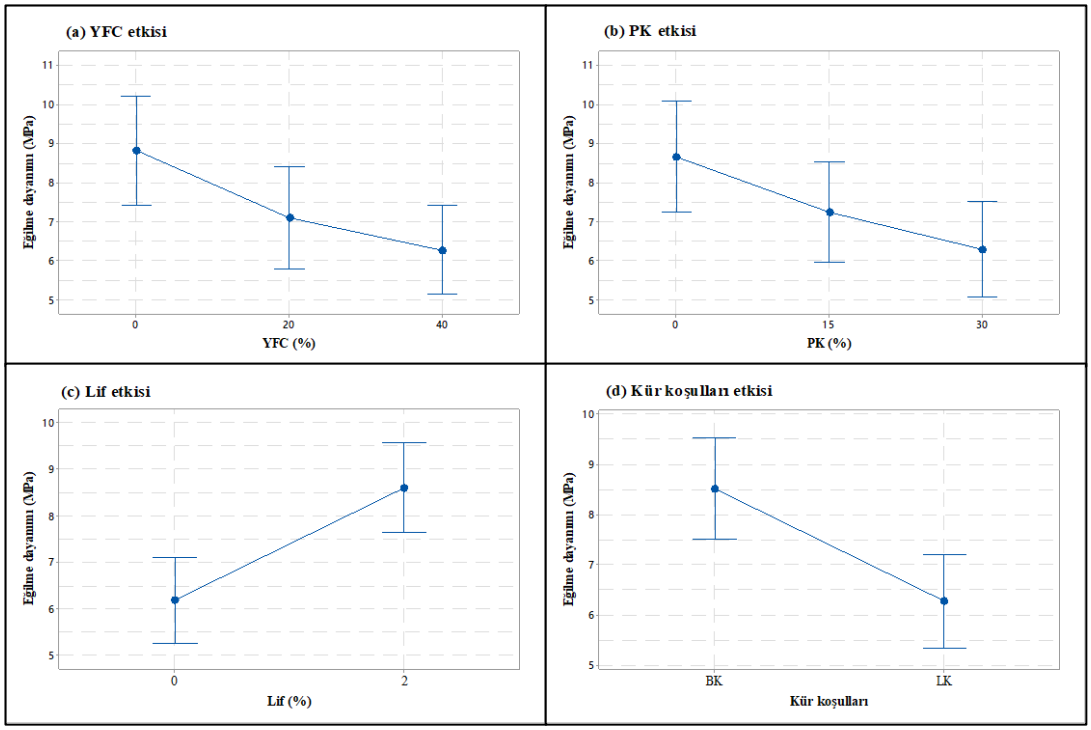
4.3.2.2 7 günlük eğilme dayanımı

YFC, PK, CL ve kür koşullarının KYH numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımı üzerindeki etkisi grafik olarak Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23 KYH numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları

LK dikkate alındığında, YFC içeriğindeki artış, eğilme dayanımlarını düşürmüştür. REF numune dikkate alındığında dayanım kaybı, L0-C40P0'da %38, L2-C40P0'da %8 olmuştur. PK ikamesi de eğilme dayanımlarını düşürmüştür. REF'ye göre L0-C0P30'da %36, dayanım kaybı gerçekleşmiş, L2 kodlu numunelerde eğilme dayanımı kaybı daha az olmuştur. L0 kodlu, YFC-PK ikameli numunelerde dayanım kaybı daha yüksek değerlere ulaşmış, en yüksek dayanım, REF ve L2-C0P0'da sırasıyla 7,8 ve 10,5 MPa, en düşük dayanım L0-C40P30'da 3,5 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.24 YFC, PK, PL ve kür şartlarının 7 günlük eğilme dayanımına etkisi

BK uygulanan numunelerin eğilme dayanımlarının LK'ye göre arttığı, L0-C0P15, L0-C0P30 ve L0-C20P0 numunelerinin eğilme dayanımlarının REF'den daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. %2 PL katkılı (L2), numunelerin neredeyse tamamının eğilme dayanımlarının, REF'nin eğilme dayanımından fazla olduğu, L2-C0P0, L2-C0P15, L2-C0P30 ve L2-C20P0'ın eğilme dayanımlarının 10,0 MPa'ın üzerinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

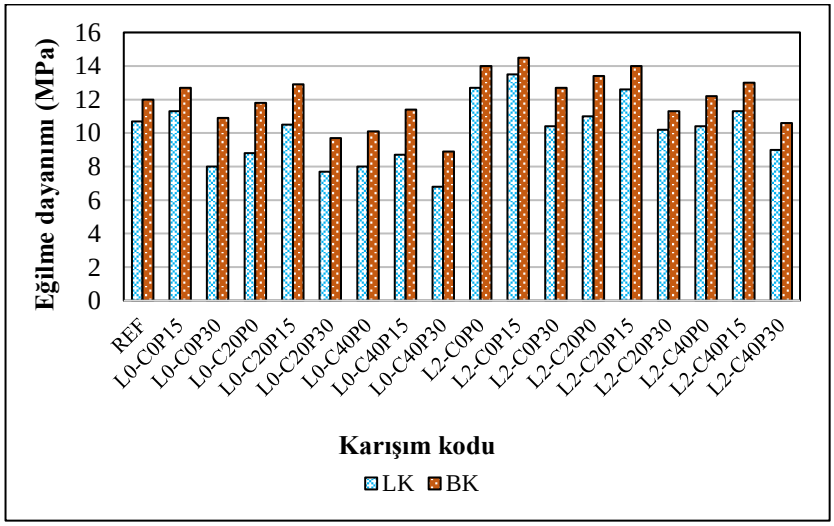
YFC ve PK'nın 7 günlük eğilme dayanımlarını olumsuz etkilediği, %2 PL katkısı ve BK'nin eğilme dayanımları üzerinde oldukça etkili olduğu Şekil 4.24'de görülmektedir.

4.3.2.3 28 günlük eğilme dayanımı

YFC, PK ikame ve PL katkı oranlarının, ayrıca LK, BK ortam şartlarının KYH numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 4.25'te verilmiştir.

L0 kodlu numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarının, LK ortamında, YFC, PT ve YFC-PT ikamelerinden oldukça az etkilendiği görülmektedir. L2 kodlu numunelerde, L2-C40P30 haricindeki tüm numunelerin eğilme dayanımları, REF'ye eşdeğer veya yüksek gerçekleşmiş, L2-C0P15 ve L2-C20P15'in eğilme dayanımlarının sırasıyla %26 ve %18 arttığı belirlenmiştir. Eğilme dayanımı artışında %15 PK ve %20 YFC-%15 PK ve %2 PL katkısının etkili olduğu gözlenmiştir.

BK etkisinde bırakılan L0 ve L2 kodlu numunelerin neredeyse tamamının eğilme dayanımları REF'den yüksek çıkmıştır. Dayanım artışının L0'da %0,07-%19 arasında, L2'de %0,06-%36 arasında değiştiği gözlenmiştir. Eğilme dayanımlarının artmasında, %15 PK ve %20 YFC-%15 PK ikame oranları ile %2 PL katkısının etkili olduğu belirlenmiştir. Wu, Shi ve He, (2017)'ye göre, yüksek sıcaklık kürü, bağlayıcının reaksiyon hızını artırabilir, ayrıca, daha yoğun ve daha yüksek mukavemetli hidrasyon ürünleri oluşturabilir.



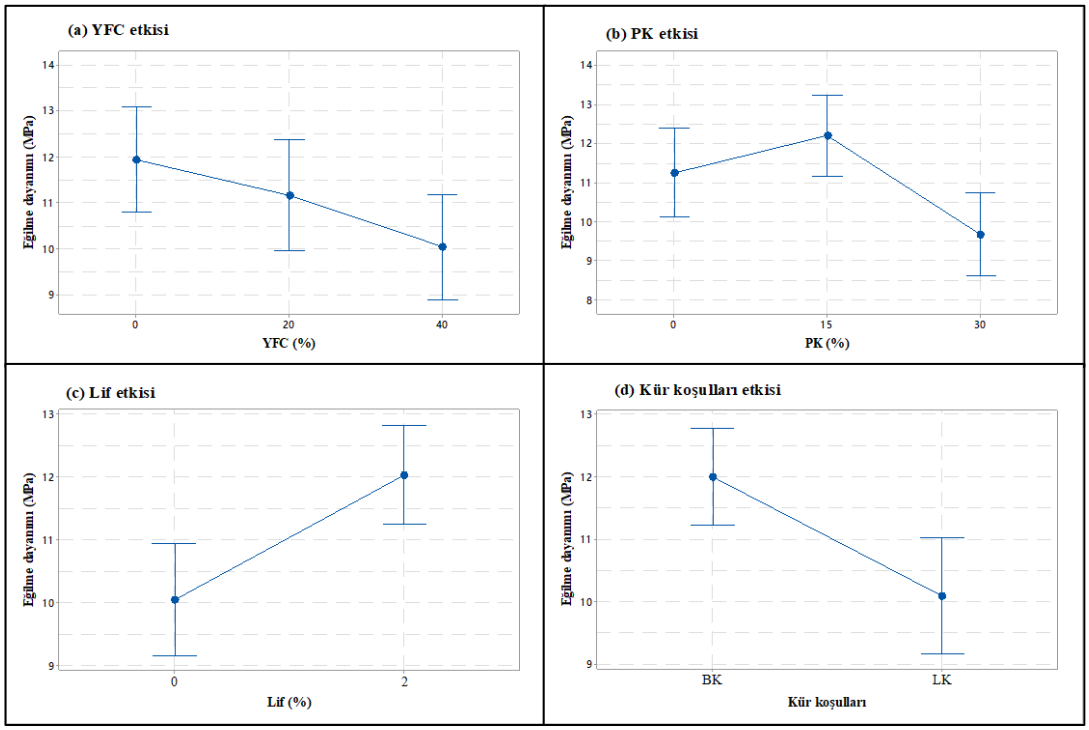
Şekil 4.25 KYB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları

Barbhuiya vd. Giaccio vd. Bhikshma vd., Habeeb vd, Ve Salas vd,, Naveen, Bensal Sumit, (2014) tarafından yapılan araştırma da PK ikamesinin eğilme dayanımını arttırdığı ifade edilmiştir.

YFC, PK, PL ve kür şartlarının ayrı ayrı 28 günlük eğilme dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 4.26'da görülmektedir.

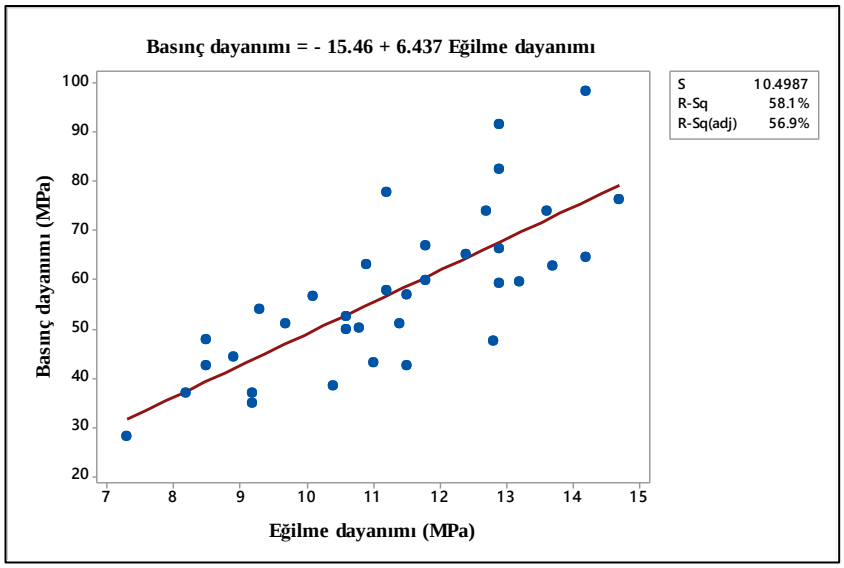
%15 PK ikamesi, %2 PL katkısı ve BK'nın KYH numunelerinin eğilme dayanımı üzerinde olumlu, %40 YFC-%30 PK ikamesinin eğilme dayanımları üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.26'da %20 YFC ikamesinin eğilme dayanımlarını düşürdüğü gözlensede, gerek tek başına kullanıldığında, gerekse %15 PK ile kullanıldığında, her iki kür koşulunda da referans numuneye eşdeğer eğilme dayanımı etkisi oluşturmuştur.

Niu vd. (2021), PL'nin 28 günlük basınç dayanımları ile eğilme dayanımlarını arttırdığını ifade etmişlerdir.



Şekil 4.26 YFC, PK, PL ve kür şartlarının 28 günlük eğilme dayanımına etkisi

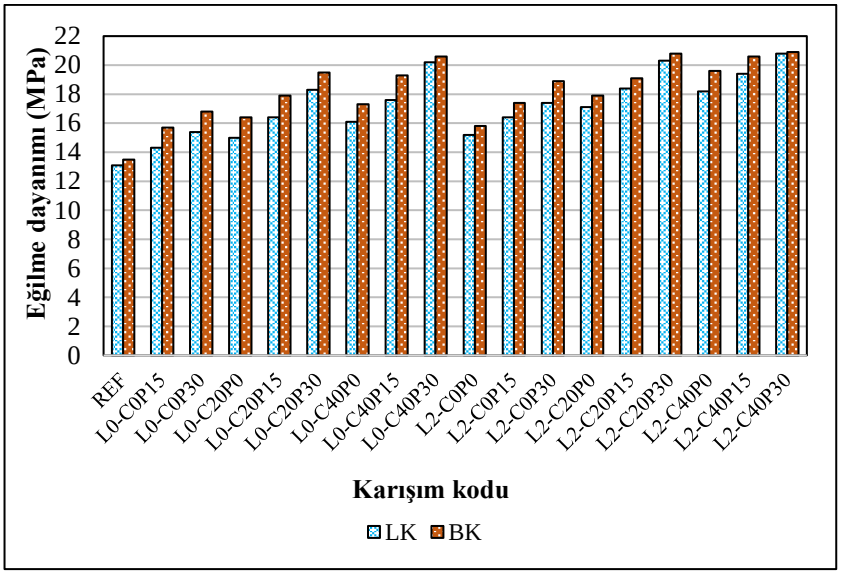
Şekil 4.27, 28 günlük eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi tanımlamakta, R^2 = %58,1 oranında istatiksel bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Korelasyon katsayısının düşük olmasında 28 günlük süreçte yüksek oranda YFC, PK ve YFC-PK'nın hidratasyon gelişiminin yeterince gelişmemesinin eğilme dayanımı değerini düşürmesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.27 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki

4.3.2.4 90 günlük eğilme dayanımı

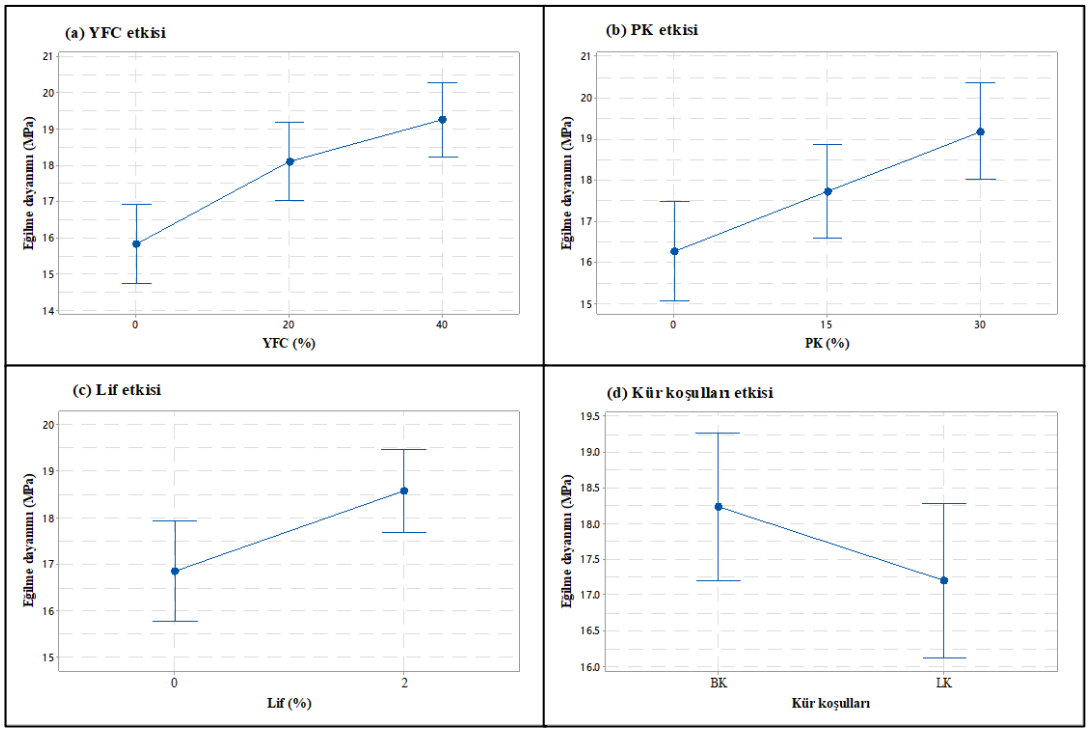
YFC, PK, PL katkı oranlarının ve LK, BK koşullarının KYH numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 4,28'de verilmiştir.



Şekil 4.28 KYB numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımları

Hem LK, hem de BK ortamında olgunlaştırılan YFC, PK ve YFC-PK ikameli, P0 ve P2 kodlu numunelerin 90 günlük eğilme dayanımlarının REF kodlu numuneden daha yüksek gerçekleştiği görülmektedir. LK'de en büyük dayanım artışı L0 ve L2 kodlu numunelerde YFC-PK ikameli, BK'de L0 kodlu numunelerde YFC-PK ikameli, L2 kodlu numunelerde ise YFC, PK ve YFC-PK ikameli numunelerin tamamında elde edilmiştir. YFC-PK ikamesinin ileri yaşlarda oluşturduğu puzolanik aktivite ile eğilme dayanımlarını arttırabileceği görülmüştür. 90 günlük mekanik dayanımlar üzerinde %2 PL katkısının sınırlı bir etki oluşturduğu gözlenmiştir.

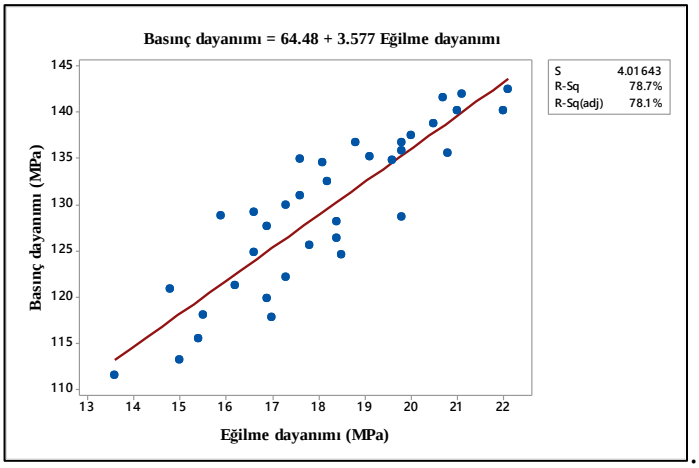
YFC, PK, PL ve kür şartlarının ayrı ayrı 90 günlük eğilme dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 4.29'da görülmektedir.



Şekil 4.29 YFC, PK, PL ve kür şartlarının 90 günlük eğilme dayanımına etkisi

YFC, PK ikame oranlarının, %2 PL katkısı ve BK'nın 90 günlük eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu, bu etkinin YFC ve PK ikamesinde daha etkili olduğu, PL katkısının ve BK'nın daha sınırlı bir etki oluşturduğu Şekil 4.29'da görülmektedir.

90 günlük basınç ve eğilme dayanımları arasındaki korelasyon Şekil 4.30'da verilmiştir. R^2 = %78,7 değerinde bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

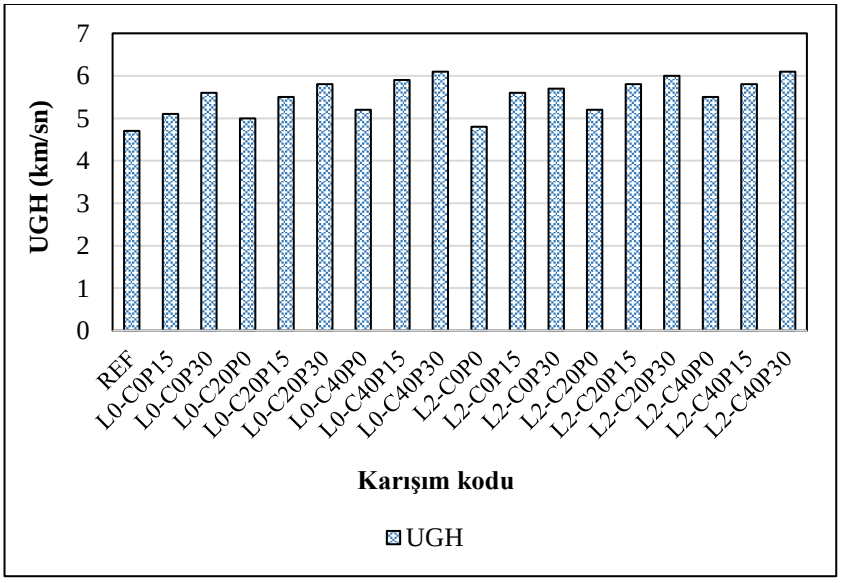


Şekil 4.30 90 günlük basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki

4.4 Ultrasonik Geçiş Hızı (UGH)

Ultrases geçiş hızı (UGH), tahribatsız bir test yöntemi olup, betonun homojenliğini, göreceli kalitesini değerlendirmek, boşlukların ve çatlakların varlığını belirlemek ve çatlak onarımlarının etkinliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ultrasonik dalgaların beton içerisinden geçiş süresi betonun kalitesine bağlı olarak değişir. UGH'nin yüksek olması betonun boşluksuz, düşük olması ise boşluklu bir yapıda olduğunu gösterir (Chao-Lungvd., 2011). UGH testi 90 gün BK uygulanan prizmatik KYH numunelerine uygulanmış ve test sonuçları grafik olarak Şekil 4.31'de verilmiş, test değerlerinin, 4,7 km/s ile 6,1 km/s arasında değiştiği belirlenmiştir.

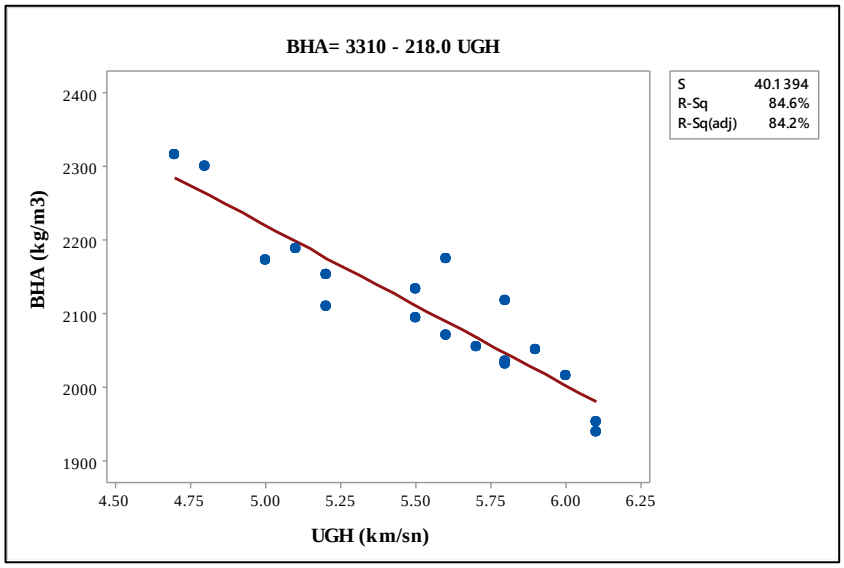
YFC, PK ve PL katkı oranlarının değişimine bağlı olarak numunelerin UGH değerlerinin değiştiği görülmektedir. En düşük değer REF numunede, en yüksek değer L0-C40P30 ve L2-C40P30 kodlu %40 YFC-%30 PK ikameli numunelerde elde edilmiştir. YFC-PK ikameli numunelerin UGH değerlerinin yüksek çıkmasında, YFC ve PK'nın oluşturduğu filler ve yoğun mikroyapının sonucu oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.31 KYH numunelerinin UGH değerleri

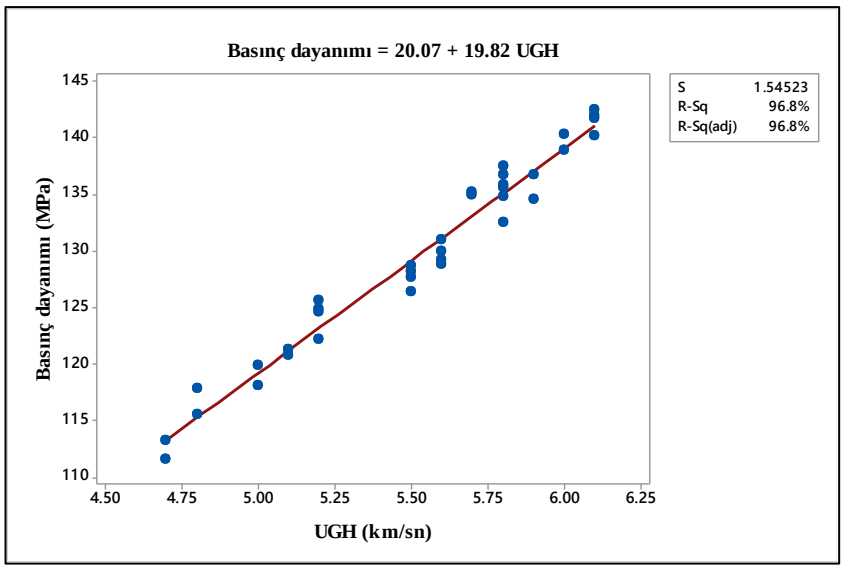
%20 oranında öğütülmüş PK ikamesi, kontrol betonu ile aynı UGH değerlerine ulaşır, çimento dozajı azaldığında UGH artmaya devam eder, artan çimento miktarı UGH değerlerini azaltır Chao-Lung vd., (2011), Vigneshwari vd,, (2018).

Daha önce ifade edildiği gibi, amorf silika ve serbest kalan suyun puzolanik reaksiyonu sonucu, PK, ilave C-S-H oluşturur, filler etkisinin yanı sıra, PK'nın oluşturduğu içsel kürleme etkisi daha yoğun bir mikro yapı gelişimine katkı sağlar (Chao-Lung vd., 2011; Huang vd., 2017; Zareei vd., 2017).



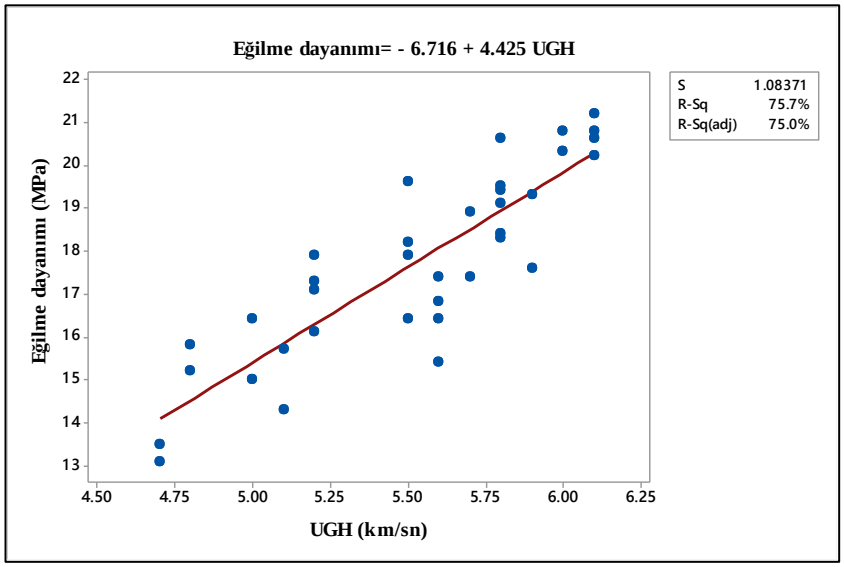
Şekil 4.32 UGH ve BHA arasındaki ilişki

UGH ve BHA arasındaki korelasyon Şekil 4.32'de verilmiş ve R^2 = %84,6 değerinde bir ilişkinin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.33 90 günlük basınç dayanımı ve UGH arasındaki ilişki

90 Günlük basınç dayanımı ve UGH arasındaki ilişkinin R^2 = %96,8 olduğunu gösteren grafik Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil 4.34 90 günlük eğilme dayanımı ve UGH arasındaki ilişki

90 Günlük eğilme dayanımı ve UGH arasındaki ilişkinin R^2 = %75,7 olduğunu gösteren grafik Şekil 4.34'te verilmiştir.

Whitehurst (1951) ve Saint-Pierre vd.(2016), Vosoughi vd. (2015)'in, Tablo 4,1'de yaptıkları değerlendirme dikkate alındığında, tüm KYH örneklerinin UGH sonuçlarının 4,5 km/sn'den yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 4.1 Beton Kalitesinin Tanımlanması

UGH (km/sn)	Beton kalitesi
More than 4,5	Mükemmel
3,6 - 4,5	İyi
3 - 3,6	Şüpheli
2,1 - 3	Düşük
1,8 - 2,1	Çok düşük

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

LK ve BK olmak üzere iki farklı ortamda kürlenmiş olan, farklı oranlarda YFC, PK, YFC-PK ikameli ve PL katkılı KYH numuneleri üzerinde yapılan test sonuçları değerlendirilerek, açıklanmıştır.

5.1.1 KYH'ların Yayılma Sonuçları

YFC, PK ve PL'nin KYH karışımlarının özelliklerine etkisi

1. YFC içeriğindeki artış, KYH karışımlarının yayılma değerlerini arttırmış, PK oranlarındaki artış yayılma değerlerini azaltmıştır.

2. %2 PL katkısı işlenebilirliği olumsuz etkilemiş, yayılma değerlerinin bir miktar düşmesine neden olmuştur.

3. En yüksek yayılma değeri %40 YFC ikameli harçta 27,5 cm, en düşük değer ise %2 PL katkılı ve %30 PK ikameli harçta oluşmuştur.

5.1.2 KYH Numunelerinin BHA Sonuçları

1. YFC ve PK ikamesi, KYH numunelerinin BHA değerlerini azaltmıştır.

2. PL katkısı da numunelerin BHA'larını düşürmüştür.

3. En yüksek BHA değeri REF'de 2.316 kg/m³, en düşük BHA 1.931 kg/m³ olarak %40 YFC-%30 PK ve %2 PL katkılı numunede bulunmuştur.

5.1.3 Basınç, Eğilme Dayanımı ve UGH Sonuçları

1. YFC ve PK ikamesi, 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarını düşürmüştür.

2. %15 PK, %20 YFC ve %20 YFC-%15 ikameli numunelerin hem LK, hem de BK koşullarında REF numuneden daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

3. P0 ve P2 kodlu numunelerin 90 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük REF numune esas alındığında, dayanım artışının LK'de %11-%33, BK'de %14-%33 arasında değiştiği belirlenmiştir. LK'de en büyük dayanım artışı %20 YFC-%30 PK, %40 YFC-%30 PK ikameli, BK'de ise %40 YFC-%30 PK ikameli numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar YFC ve PK'nın birlikte kullanıldığında ileri yaşlarda iyi bir puzolanik aktivite sonucu, yüksek mekanik dayanım artışları oluşturabileceğini sergilemektedir. 90 günlük mekanik dayanımlar üzerinde %2 PL katkısının önemli bir etki oluşturmadığı gözlenmiştir.

4. YFC ve PK ikamesi, 3 ve 7 günlük eğilme dayanımlarını düşürmüştür.

5. L0 kodlu numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarının, LK'de, YFC, PT ve YFC-PT ikamelerinden az etkilendiği görülmüş, L2 kodlu numunelerde, L2-C40P30 haricindeki tüm numunelerin eğilme dayanımları, REF'ye eşdeğer veya yüksek gerçekleşmiş, L2-C0P15 ve L2-C20P15'in eğilme dayanımlarının sırasıyla %26 ve %18 arttığı belirlenmiştir. Eğilme dayanımı artışında %15 PK ve %20 YFC-%15 PK ve %2 PL katkısının etkili olduğu gözlenmiştir.

6. BK etkisinde bırakılan L0 ve L2 kodlu numunelerin neredeyse tamamının eğilme dayanımları REF'den yüksek çıkmıştır. Eğilme dayanımlarının artmasında, %15 PK ve %20 YFC-%15 PK ikame oranları ile %2 PL katkısının etkili olduğu belirlenmiştir.

7. YFC, PK ve YFC-PK ikameli numunelerin 90 günlük eğilme dayanımlarının REF numuneden daha yüksek gerçekleştiği görülmektedir. LK'de en büyük dayanım artışı YFC-PK ikameli, BK'de L0 kodlu numunelerde YFC-PK ikameli, L2 kodlu numunelerde ise YFC, PK ve YFC-PK ikameli numunelerin tamamında elde edilmiştir. YFC-PK ikamesinin ileri yaşlarda oluşturduğu puzolanik aktivite ile eğilme dayanımlarını arttırabileceği görülmüştür. 90 günlük mekanik dayanımlar üzerinde %2 PL katkısının sınırlı bir etki oluşturduğu gözlenmiştir.

8. En düşük USG değeri REF numunede, en yüksek değer L0-C40P30 ve L2-C40P30 kodlu %40 YFC-%30 PK ikameli numunelerde elde edilmiştir. YFC-PK ikameli numunelerin UGH değerlerinin yüksek çıkmasında, YFC ve PK'nın oluşturduğu filler ve yoğun mikroyapının sonucu oluştuğu söylenebilir.

9. %2 oranında PL katkısı 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımlarını arttırmıştır.

5.2 Öneriler

1. Endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan yan ürün miktarı fazla olmasına rağmen yeterince kullanılamayan YFC ve henüz ekonomiye kazandırılamayan PK külünün kullanımı özellikle buhar kürü uygulanabilen sektörlerde yaygınlaştırılabilir.

2. Farklı incelik ve oranlarda YFC-PK ikameli karışımların, farklı kür ve farklı buhar kürü ortamlarındaki mekanik özellikleri incelenebilir.

3. Daha düşük YFC-PK ikameli karışımların erken yaşlardaki mekanik özelliklerini arttırmaya yönelik etkin, uygulanabilir kür yöntemleri araştırılabilir.

4. Farklı incelik ve oranlarda YFC-PK ikameli karışımların durabilite özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

Abhishek, P., Lohith, P., Sravan, N., & Rajesh, D. V. S. P. (2019). Experimental Study on Self-Compacting Concrete with Replacement Material's. In *Sustainable Construction and Building Materials* (pp. 1-11). Springer, Singapore.

Adesina, A. (2018). Use of Rice Husk in concrete: Review of mechanical properties.

Adenuga, O.A., Soyingbe, A.A., Ogunsanmi, O.E., 2010. The use of rice husk ash as partial replacement for cement in concrete. Lagos J. Environ. Stud. 7 (2), 47–50.

Alex, J., Dhanalakshmi, J. and 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.

ASTM C 1437-07 (2009) 'Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar', *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 6–7.

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

ASTM, C (2013). Standard Test Method For Density, Absorption, and Voids In Hardened Concrete. C642-13.

Atlı, İ. (2012). Farklı iri agrega içeriğinin kendiliğinden yerleşen betonların yüzey aşınma direncine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

Aydin, S., Yazici, H., Yardimci, M. Y., & Yiğiter, H. (2010). Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete. ACI Materials Journal, 107(5).

Azzouz, L., Benabed, B., & Kadri, E. H. (2015, May). Effect of sand type on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. In *2nd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS) Ankara–Turkiye* (pp. 28-30).

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

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

Benaicha, M., Alaoui, A. H., Jalbaud, O., & Burtschell, Y. (2019). Dosage effect of

superplasticizer on self-compacting concrete: correlation between rheology and strength. *Journal of Materials Research and Technology*, *8*(2), 2063-2069.

Benzabih, E.F. (2018). Kendiliğinden YerleŞen Beton (KYB) Konulu ÇalıŞmaların Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.

Beycioğlu, A., (2013), Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Beton İle Donatı Aderansı İlişkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Universitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Bilim, C. ve Atiş, C. D. (2011). ÖğütülmüŞ granüle yüksek fırın cürufu içeren harçların aŞınma ve mukavemet özellikleri, Politeknik Dergisi, 2: 101-107.

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

Bouziani, T. (2013). Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach. *Construction and Building Materials*, *49*, 308-314.

BS EN 14889-2 (2006), Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity

Chao-Lung, H., Le Anh-Tuan, B., & Chun-Tsun, C. (2011). Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Construction and building materials*, *25*(9), 3768-3772.

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.

Deeb, R. (2013). *Flow of self-compacting concrete* (Doctoral dissertation, Cardiff University).

Deepa, N. G., Sivaraman, K., & Job, T. (2013). Mechanical Properties of Rice Husk Ash (RHA)-High strength Concrete.

Domone, P. L. (2007). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and concrete composites*, *29*(1), 1-12.

Druta, C. (2003). Tensile strength and bonding characteristics of self-compacting concrete. Master's Thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.

EFNARC, 2005. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Free pdf copy downloadable from <http://www.efnarc.org>.

El Mir, A. I. (2017). Influence of additives on the porosity related properties of self-compacting concrete. PhD Thesis, Department of Construction Materials and Technologies, Budapest Universıty of Technology and Economics.

Esfandiari, J., & Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement*, *147*, 106846.

Faheem, A., Rizwan, S. A., & Bier, T. A. (2021). Properties of self-compacting mortars using blends of limestone powder, fly ash, and zeolite powder. *Construction and Building Materials*, *286*, 122788.

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

Geso, M., Güneyisi, E. and Öz, H. Ö. (2016) 'Using of Fly Ash and Blast Furnace Slag in the Production of Lightweight Aggregates through Cold-Bonding Process', (January 2012).

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

Guruvu, S. K., Minapu, L. K., Ratnam, M. K. M. V., & RangaRaju, U. Development of High Strength Concrete using Rice Husk Ash and Slag.

Güneyisi, E., Gesoglu, M., Al-Goody, A., & İpek, S. (2015). Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 95, 29-44.

Gürdal, H. ve Yüceer, Z. (2004). Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden YerleÇen Beton Uygulamaları, Beton Kongre Bildirisi, Ġstanbul.

Hunger, M. (2010). *An integral design concept for ecological self-compacting concrete*. University of Technology.

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, October). Effects of using

blended binder of RHA and GGBS on the properties of concrete: A review. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1892, No. 1, p. 020027). AIP Publishing LLC.

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*, *115*, 389-400.

Kaya, A.O. (2010). Farklı Türde Mineral Katkı Kullanımının Kendiliğinden YerleĢen Betonun Taze Faz ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ġstanbul Teknik Üniversitesi, Ġstanbul.

Khayat, K. H., & De Schutter, G. (2014). *Mechanical properties of self-compacting concrete* (Vol. 14, p. 161). Springer.

Khaleel, O. R., Al-Mishhadani, S. A., & Razak, H. A. (2011). The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC). *Procedia Engineering*, *14*, 805-813.

Kılınç, C. (2012). Kendiliğinden YerleĢen Beton, THBB Hazır Beton Dergisi, 112:70- 75.

Kurt, G., (2006), Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

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

Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons.

Mansoor, J., Shah, S. A. R., Khan, M. M., Sadiq, A. N., Anwar, M. K., Siddiq, M. U., & Ahmad, H. (2018). Analysis of mechanical properties of self compacted concrete by partial replacement of cement with industrial wastes under elevated temperature. *Applied Sciences*, *8*(3), 364.

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

Moghadam, H. A., & Khoshbin, O. A. (2012). Effect of water-cement ratio (w/c) on mechanical properties of self-compacting concrete (case study). *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil,*

Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, *6*(5), 317-320.

Nair, D., Fraaij, A., Klaassen, A. A. K., Kentgens, A. P. M., 2008, "A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes", Cement and Concrete Research, 38 (6), 861-869.

Nikbin, I. M., Beygi, M. H. A., Kazemi, M. T., Amiri, J. V., Rahmani, E., Rabbanifar, S., & Eslami, M. (2014). A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials & Design*, *59*, 199-210.

Niu, D., Su, L., Luo, Y., Huang, D., & Luo, D. (2020). Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *237*, 117628.

Okamura, H., & Ouchi, M. (1999, September). Self-compacting concrete. Development, present use and future. In *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium* (pp. 3-14). Cachan Cedex, France: Rilem Publications.

Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, *1*(1), 5-15.

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

Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Mellado, A., Ordonez, L. M., 2001, "Determination ofamorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method", Cement and Concrete Research, 31, 227-231.

Ponikiewski, T., & Gołaszewski, J. (2014). The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, *72*, 212-221.

Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. William Andrew.

R.Sutharsan *et al.* (2019) *Utilization of Rice Husk Ash in Reactive Powder Concrete, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-4S2, December 2019Utilization*

Sahraoui, M., & Bouziani, T. (2019). Effects of fine aggregates types and contents on rheological and fresh properties of SCC. *Journal of Building Engineering*, *26*,

100890.

Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, *125*, 1022-1027.

Saraswathy, V., Song, H. W., 2007, "Corrosion performance of rice husk ash blended concrete", Construction and Building Materials, 21 (8), 1779-1784.

Sathawane, S. H., Vairagade, V. S., & Kene, K. S. (2013). Combine effect of rice husk ash and fly ash on concrete by 30% cement replacement. *Procedia Engineering*, *51*, 35-44.

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

Sonebi, M., Grünewald, S., & Walraven, J. (2007). Filling ability and passing ability of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, *104*(2), 162.

Su, N., Hsu, K. C., & Chai, H. W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and concrete research*, *31*(12), 1799-1807.

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.

Topçu Ġ.B., Bilir T. ve Baylavlı H., (2008). Kendiliğinden YerleÇen Betonun Özellikleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 1: 1-22.

TS 706 EN 12620-A1. Aggregates for Concrete. Institute of Turkish Standards, Ankara, Turkey; 2009.

TS EN-197-1. Cements – Part 1: Compositions and conformity criteria for common cements. Turkish Standards Institute, TSE, Turkey, 2004 [in Turkish]

TS EN 196-1, Methods of testing cement. Part 1. Determination of strength, Ankara, TSE-Turkish Standards Institution, 2002.

Uygunoğlu, T., (2008). Hafif agregalı kendiliğinden yerleÇen betonların özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta

Vigneshwari, M., Arunachalam, K. and Angayarkanni, A. (2018) 'Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete',

Journal of Cleaner Production. Elsevier Ltd, 188, pp. 264–277. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.008.

Vosoughi, V., Crin, S. M. M., & Eisapour, S. (2015). Evaluation of perlite powder Performance in concrete to replace part of the cement. *Fen Bilimleri Dergisi (CFD)*, *36*(4).

Whitehurst, E. A. (1951). The Soniscope-A Device for Field Testing of Concrete.

Wu, S. (2005). Application of Self-compacting Concrete in Frame-shear wall structure and road construction. In First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005),

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*, *136*, 307-313.

Yahia, A., Tanimura, M., and Shimoyama, Y. (2002). Evaluation of deformability of different types of self-consolidating concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 303-310.

Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M. (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and concrete research*, *30*(2), 197-207.

Yonar, Y., (2014), Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Yuzer, N., Cinar, Z., Akoz, F., Biricik, H., Gurkan, Y.Y., Kabay, N., Kizilkanat, A.B., 2013. Influence of raw rice husk addition on structure and properties of Concrete. Constr. Build. Mater. 44, 54–62.

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

Zhang, H., Wang, B., Xie, A., & Qi, Y. (2017). Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *152*, 154-167.