

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



FARKLI MİNERAL KATKILARIN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

HAYTHAM H. A. ALHANGHARİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

TEMMUZ - 2020

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Haytham H A. ALHANGHARI tarafından hazırlanan “**FARKLI MİNERAL KATKILARIN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**” adlı tez çalışması 28/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

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

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

Enstitü Müdürü	Prof. Dr. İzzet ŞENER
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

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

Haytham H. A. ALHANGHARI

v. Bashar Qasem Taha

Al-hity

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI MİNERAL KATKILARIN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ Haytham H. A. ALHANGHARİ

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

DANIŞMAN: PROF. DR. HASBİ YAPRAK

Kendinden yerleşen beton (KYB), yüksek akıcı kıvam özelliğinden dolayı, inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulan özel bir beton türüdür. KYB, kendiliğinden yerleşebilme özelliği sayesinde sık donatılı yapı elemanlarında, herhangi bir vibrasyona ihtiyaç duymadan kalıbı boşluksuz olarak doldurma ve vibrasyonun oluşturduğu gürültü kirliliğini azaltma kabiliyetine sahiptir. KYB üretimi, gelişmiş özellikleri ve uygulama açısından sağlamış olduğu avantajları nedeniyle de kullanımı hızla artmaktadır. Bununla birlikte, KYB üretiminde kullanılan malzemeler ile ilgili olarak sürdürülebilirlik çerçevesinde sorunlar yaşanmakta, beton endüstrisinin neden olduğu çevresel etkiler son yıllarda büyük bir endişe oluşturmaktadır. Ayrıca, KYB'nin önemli bir bileşeni olan Portland çimentosu (PÇ) üretimi, dünya endüstriyel enerjisinin yaklaşık %13'ünün tüketiminden ve küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinin sorumluluğunu üstlenmektedir. KYB'de, PÇ'nin yerine uçucu kül (UK), granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), silis dumanı (SD) vb. puzolanik katkı maddelerinin kullanımı yalnızca KYB'nin toplam malzeme maliyetini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir bir gelişime ve çevresel etkilerin azaltılmasına da önemli katkılar sağlar. UK, YFC mineral katkıların KYB'de kullanımı hem taze, hem de serleşmiş betonun fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesine önemli bir katkı sağlar. Bu çalışmada, YFC, UK ve perlit tozu (PT) çimento ikamesi olarak kullanılarak, farklı mineral katkıların, KYB'nin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. GYFC %35, %45 ve %55, UK %10, %20, %30, PT %5 ve %10 oranlarında çimento yerine ikame edilmiştir. Kür koşullarının KYB'nin performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla da KYB numuneleri; standart normal su kürü (SK) (23±2 °C) ve sıcak hava ve yüksek nem koşullarını simüle etmek için de sıcaklık ve nem kontrollü (32±2 °C ve %70 bağıl nem) ortamda (LK) olgunlaştırılmıştır. KYB numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük sürelerin sonunda basınç dayanımları belirlenmiştir. 28 günlük numunelere ASTM C 666'ya uygun donma-çözülme ve ultrases geçiş hızı testleri uygulanmıştır. Özellikle, 3 ve 7 günlük basınç dayanımları üzerinde LK'nin etkili olduğu, Referans (REF) numunenin erken yaşlarda daha yüksek basınç dayanımları gösterdiği, 90 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımının %30 UK, %35 GYFC ve %5 PT katkılı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Kendiliğinden yerleşen beton, Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, Perlit tozu, Basınç dayanımı, Donma-çözülme

Temmuz 2020, 76 Sayfa

Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSC. THESIS

EFFECTS OF DIFFERENT MINERAL ADDITIVES ON SELF-COMPACTING CONCRETE PROPERTIES

Haytham H. A. ALHANGHARI

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. DR. HASBI YAPRAK

Self-compacting concrete (SCC) is a special type of concrete that has become widespread in the construction sector due to its high fluidity. SCC can fill the frameworks without any need for vibration and that reduces the noise pollution generated by vibration infrequently equipped building elements. SCC production is increasing rapidly due to its advanced properties and advantages in terms of application. However, there were problems with the sustainability of materials used in SCC production, and the environmental impacts caused by the concrete industry have been a major concern in recent years. Also, Portland cement (PC) production, an important component of SCC, is responsible for the consumption of approximately 13% of the world's industrial energy and approximately 7% of global CO₂ emissions. In SCC, PC is replaced by fly ash (FA), ground granulated blast furnace slag (GGBFS), silica fume (SF), etc. The use of pozzolanic additives not only reduces the total material cost of SCC but also makes significant contributions to sustainable development and reducing environmental impacts. The utilizing of FA and GGBFS as minerals admixtures in SCC improves the physical, mechanical, and durability of concrete in fresh and hardened properties. The aim of this study was the investigate the effect of different mineral admixtures on the physical and mechanical properties of SCC by using ground granulated blast furnace slag (GGBFS), fly ash (FA), and perlite powder (PP) as cement substitution. Cement substitutions percentages were 35%, 45% and 55% for GGBFS, 10%, 20% and 30% for FA and 0%, 5% and 10% for PP. To investigate the effect of curing conditions on SCC performance, SCC samples were cured in a standard normal water cure (23.5±2 °C) and controlled temperature and humidity (32±2 °C and 70% relative humidity) environment (LC) to simulate hot air and high humidity conditions. The compressive strength was determined in 3, 7, 28, and 90 days. Freeze-thaw according to ASTM C666 and ultrasound velocity pulse tests in were applied to 28-day samples. The results showed that LC curing method was effective on the compressive strength in 3 and 7 age of concrete. The reference mix showed the highest compressive strength at an early age. However, the mix with 30% of FA, 35% of GGBFS, and 5% of PP showed the highest compressive strength results in 90 days.

KEYWORDS: Self-compacting concrete, Fly ash, Ground granulated blast furnace slag, Perlite powder, Compressive strength, Freeze-thaw

Temmuz 2020, 76 Page

Science Code: 91

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 istatistiksel veri analizi ve optimizasyon çalışmalarında yardımını esirgemeyen Karabük Üniversitesi öğretim üyesi Dr.Öğr. Üyesi Hüseyin ÇETİN ve Bashar Qasem Taha AL-HITY'e teşekkürlerimi sunarım.

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

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

Haytham H. A. ALHANGHARİ

Kastamonu, 2020

İÇİNDEKİLER

	<u>Syafa</u>
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 KYB'nin Formülasyonu ve Özellikleri	6
2.2.1 Doldurma Kabiliyeti.....	6
2.2.2 Geçiş Kabiliyeti.....	7
2.2.3 Ayrışma Direnci	7
2.3 KYB'nin Mekanik Özellikleri	8
2.4 KYB'de Kullanılan Malzemeler	9
2.4.1 Çimento	10
2.4.2 Agregası	11
2.4.3 Katkı Maddeleri	12
2.5 Kür Koşullarının KYB Özelliklerine Etkisi	17
2.6 Su/Bağlayıcı Oranının KYB Üzerindeki Etkisi	18
2.7 KYB'nin Dayanıklılığı	19
3. MATERYAL VE METOD	21
3.1 Materyal	21
3.1.1 Çimento	21
3.1.2 Uçucu Kül	22
3.1.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	23
3.1.4 Genleştirilmiş Perlit	25
3.1.5 İnce ve İri Agregası.....	26
3.1.6 Su.....	27
3.1.7 Kimyasal katkı	27
3.2 KYB Karışımların Özellikleri ve Numunelerin Hazırlanması	28
3.3 Taze Beton Deneyleri.....	30
3.3.1 Çökme-Yayıma Deneyi.....	30
3.4 Sertleşmiş KYB Numunelerine Uygulanan Testler	30
3.4.1 Su Emme	30
3.4.2 Basınç Dayanımı	31
3.4.3 Ultrases Geçiş Hızı.....	31
3.4.4 Donma-Çözülme Testi	33
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	34
4.1 KYB'nin Taze Hal Özellikleri.....	34
4.2 Su Emme	37

4.3 KYB'nin Mekanik Özellikleri	39
3.3.1 3 Günlük Basınç Dayanımı	40
3.3.2 7 Günlük Basınç Dayanımı	44
3.3.3 28 Günlük Basınç Dayanımı	49
3.3.4 90 Günlük Basınç Dayanımı	53
4.4 Donma-Çözülme Sonuçları.....	57
4.5 Ultra Ses Geçiş Hızı Test Sonuçları.....	58
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	76



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 KYB’de kullanılan PÇ	22
Şekil 3.2 UK’nın partikül boyutu dağılımı	23
Şekil 3.3 KYB’de kullanılan UK	23
Şekil 3.4 GYFC’nin partikül boyut dağılımı.....	24
Şekil 3.5 KYB’de kullanılan GYFC	24
Şekil 3.6 PT’nin partikül boyut dağılım.....	25
Şekil 3.7 KYB’de kullanılan PT	26
Şekil 3.8 Bilyalı değirmen.....	26
Şekil 3.9 KYB’de kullanılan agregalar	27
Şekil 3.10 KYB numunelere uygulanan çökme-yayılma testi.....	29
Şekil 3.11 Basınç dayanımı testi	31
Şekil 3.12 Ultrasonik geçiş hızı testi.....	32
Şekil 3.13 Donma-çözülme test cihazı ve numuneler	33
Şekil 4.1 KYB karışımlarının yayılma testi sonuçları	34
Şekil 4.2 UK’nın KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi.....	35
Şekil 4.3 GYFC’nin KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi	35
Şekil 4.4 PT’nin KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi	36
Şekil 4.5 UK ve GYFC'nin KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi ..	36
Şekil 4.6 KYB numunelerinin su emme değerlerinin değişimi	37
Şekil 4.7 UK’nın KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi.....	38
Şekil 4.8 GYFC'nin KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi	38
Şekil 4.9 PT’nin KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi.....	39
Şekil 4.10 UK ve GYFC'nin KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi.....	39
Şekil 4.11 UK'nın 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	41
Şekil 4.12 GYFC'nin 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	42
Şekil 4.13 PT’nin 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi.....	43
Şekil 4.14 Kür yönteminin 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	43
Şekil 4.15 3 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları	44
Şekil 4.16 UK'nın 7 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	45
Şekil 4.17 GYFC'nin 7 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi	46
Şekil 4.18 PT'nin 7 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi	47
Şekil 4.19 Kür koşullarının 7 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi.....	48
Şekil 4.20 7 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları	48
Şekil 4.21 UK'nın 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi	49
Şekil 4.22 GYFC'nin 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi	50
Şekil 4.23 PT'nin 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi	51
Şekil 4.24 Kür yöntemlerinin 28 günlük basınç dayanımına etkisi	51
Şekil 4.25 28 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları	52
Şekil 4.26 UK'nın 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	53
Şekil 4.27 GYFC'nin 90 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımına etkisi.....	54
Şekil 4.28 PT 'nin 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	55

Şekil 4.29 Kür yöntemlerinin 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi	56
Şekil 4.30 90 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları	56
Şekil 4.31 KYB numunelerinin 250 döngü sonrası basınç dayanım kaybı oranları	57
Şekil 4.32 KYB karışımlarının UGH sonuçları	59
Şekil 4.33 Basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki.....	60



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	21
Tablo 3.2 UK'nın kimyasal kompozisyonu	22
Tablo 3.3 GYFC'nin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri.....	24
Tablo 3.4 PT'nin kimyasal özellikleri.....	25
Tablo 3.5 İnce ve iri agrega elek analizi değerleri	26
Tablo 3.6 Agrega fiziksel özellikleri.....	27
Tablo 3.7 SA'nın teknik özellikleri.....	27
Tablo 3.8 KYB malzeme oranları	28
Tablo 3.9 KYB karışım özellikleri.....	28
Tablo 4.1. KYB numunelerinin basınç dayanımı değerleri	40
Tablo 4.2 3 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları.....	44
Tablo 4.3 7 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları.....	49
Tablo 4.4 28 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları....	52
Tablo 4.5 90 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları....	57
Tablo 4.6 Betonun UPV sonuçlarına göre sınıflandırılması	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
KK	: Kıрма Kum
KT	: Kıрма Taş
KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
PÇ	: Portland Çimentosu
PK	: Pirinç Kabuğu Külü
PT	: Perlit Tozu
s/b	: Su / bağlayıcı oranı
s/ç	: Su / çimento oranı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
SD	: Silis Dumanı
SK	: Silisli Kum
UK	: Uçucu Kül
UPV	: Ultrases Geçiş Hızı
VAK	: Viskozite Arttırıcı Katkı Maddesi

1.GİRİŞ

Beton günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Betonarme yapılarda, sık donatılar arasından geçerek yerleştirme ve vibrasyonun neden olabileceği kusurlardan dolayı, kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır (Samimi vd., 2018). Geleneksel betonla karşılaştırıldığında sahip olduğu yüksek işlenebilirlik, düşük ayrışma ve kompleks kalıp bölümlerini doldurma kabiliyeti nedeniyle KYB uygulaması sürekli gelişme kaydetmektedir. İlaveten, kendi ağırlığı altında akması ve kendiliğinden sıkışması nedeniyle, KYB kullanımı, enerji, maliyet ve yapım süresini önemli ölçüde azaltabilir. Her ne kadar, KYB sürdürülebilir bir beton olarak değerlendirilse de, KYB üretiminde kullanılan malzemeler sürdürülebilir bir çevre için tehdit oluşturmaktadır (Adesina ve Awoyera, 2019).

KYB, taşıma ve yerleştirme sırasında yüksek bir akıcılık seviyesine ve yeterli kararlılığa ulaşması için yüksek çimento içeriği kullanılarak üretilir, bu nedenle yüksek hidrasyon ısı, otojen büzülme ve maliyet gibi bazı problemler ortaya çıkabilir. Ayrıca, doğal kaynakların tüketimi ve çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları nedeniyle de ciddi çevresel etkiler oluşabilir (Güneyisi vd., 2015).

Çimento endüstrisi, toplam küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 5-8'inden sorumludur. Küresel ısınma nedeniyle, araştırma ve geliştirme açısından çevre dostu betonlar büyük ilgi görmüştür. Günümüzde çimento endüstrisi, çimento ikame malzemeleri ile kompoze çimentolar oluşturarak CO₂ etkisini azaltmaya çalışmaktadır. Endüstriyel atıkların çimento üretiminde alternatif çimento malzemeleri olarak değerlendirilmesi, hammadde kaynaklarının sürdürülebilirliği, çevrenin korunması ve atıkların bertaraf edilebilmesi gibi problemlerin çözümüne de önemli katkılar sağlar (Patel ve Shah, 2018). Çimento ikame malzemeleri, nemin varlığında çimentolu özelliklere sahip bileşikler oluşturmak için kimyasal olarak kalsiyum hidroksit ile reaksiyona giren silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir. UK, YFC ve silis dumanı (SD) vb. çimento ikame malzemelerinin karışımlara eklenmesinin, hem işlenebilirlik hem de bazı durabilite özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği, sadece Portland çimentosu kullanılarak yapılan beton karışımları ile aynı slump değerini elde etmek

için gerekli olan süper akışkanlaştırıcı dozajını da azalttığı belirlenmiştir (Benli vd., 2017; Askarian vd., 2019). Önemli bir bölümü endüstriyel atık niteliğindeki çimento ikame malzemelerinin inşaat sektöründe kullanılması, ilave klinker prosesleri gerektirmediklerinden, CO₂ emisyonlarının azaltılmasına da katkı sağlar (Matos vd., 2019).

Ülkemizde termik santral yan ürün olarak elde edilen UK miktarı yıllık 15 milyon/ton dan fazladır (Geso vd., 2016). UK kül kullanımının, KYB’de yüksek miktarda ihtiyaç duyulan çimento, ince dolgu malzemesi ve kum talebini azalttığı, kohezyonu arttırdığı ve su içeriğinde oluşan değişikliklere duyarlılığı azalttığı için KYB’de etkili bir mineral katkı olduğu görülmüştür (Ovbeniyekede vd., 2018).

Demir-çelik üretimi sırasında yüksek fırınlardan ergimiş halde, endüstriyel atık olarak elde edilen bir yan ürün olan GYFC, KYB’de mineral katkı olarak kullanılan bir başka puzolan çeşidi olup, Türkiye’de yaklaşık yıllık 600 000 ton üretilmektedir. YFC kullanımı, çimentoyu hem sülfat hem de klorür atağına karşı korur, KYB’nin işlenebilirliğini arttırmak ve daha uzun süre muhafaza etmek gibi birçok avantaj sunar. YFC, Portland çimentosundan yaklaşık % 10 daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, eşit bir çimento kütlelerinin YFC ile değiştirilmesi, KYB’nin ayrışma direncini ve akışkanlığını büyük ölçüde artıran daha fazla bir hamur hacmi elde edilmesini sağlayacaktır (Geso vd.,2016; Dadsetan ve Bai, 2017).

Doğal puzolanlar volkanik faaliyetlerin ürünleri olup, lav sürecinin hızlı soğumasından kaynaklanan cam yapıları perlit gibi bazı doğal puzolan kaynakları bol miktarda bulunur ve endüstriyel projelerde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Perlit tozu veya genişletilmiş perlit, inşaat endüstrisindeki bu malzemelere ek olarak veya bunların yerine ilave olarak agrega veya çimento esaslı malzemelerle birlikte kullanılabilir (El Mir ve Nehme, 2017; Motahari vd., 2018).

Her ne kadar KYB birçok araştırmacı tarafından araştırılsa da, özellikle geleneksel betona kıyasla dayanıklılık yönlerine ilişkin bazı sorular cevapsız kalmaktadır (Núñez vd., 2010). Donma-çözülme direnci, özellikle soğuk iklimlerde üretilen betonlar için önemli dayanıklılık parametrelerinden biridir. Soğuk ortamlarda beton yapılar göz

önüne alındığında, su donarak buza dönüşür, genişir ve malzemede içsel gerilmeler oluşturur. Oluşan bu gerilmeler malzeme dayanımını aşarsa, yapıda geri dönüşü olmayan hasar olarak, çatlaklar meydana gelir (Öz vd., 2016).

Öğütülmüş GYFC, UK, pirinç kabuğu külü ve SD gibi mineral katkıların kullanılması, daha boşluksuz bir mikro yapı ve porozitesi azaltılmış bir ara yüz oluşumu, donma-çözülme döngülerine karşı daha iyi bir direnç oluşturur (Alimohammad vd., 2019).

Bu tez çalışmasında, endüstriyel atık niteliğindeki YFC, UK ve PT çimento ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. KYB numunelerinin üretiminde öğütülmüş, yüksek incelikte, GYFC %35, %45 ve %55, UK %10, %20, %30, PT %5 ve %10 oranlarında çimento yerine ikame edilmiştir. SK ve LK ortamında olgunlaştırılmış, kür sonrası KYB numunelerinin su emme, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, ultrases geçiş hızı ve donma çözülme özellikleri test edilmiştir. Ayrıca PT'nin puzolanik ve içsel kürlenme özelliklerinin KYB'nin mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Çalışmada temel olarak;

1. Ülkemizde yeterince değerlendirilemeyen UK ve GYFC gibi endüstriyel atıkların geri dönüşüm oranlarının arttırılması, ekonomiye yeniden kazandırılması, çevresel etkilerinin azaltılması,
2. Sağladığı avantajlarından dolayı KYB kullanımının yaygınlaştırılması,
3. Çimento esaslı kompozit ürünlerin üretiminde enerji tüketiminin azaltılması,
4. Sıcak iklim koşullarında içsel kürlenme yoluyla sertleşmiş beton özelliklerinin iyileştirilmesi,
5. Farklı karışım ve kür koşullarının KYB numunelerinin fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton

KYB'nin geliştirilmesi, inşaat endüstrisindeki uygulamaları bakımından beton teknolojisinde büyük ilerleme sağlamıştır (Motahari vd., 2018). KYB, vibrasyona gerek kalmadan, titreşimsiz olarak kendi ağırlığı altında kalıba yerleşip sıkışabilen, aynı zamanda ayrışma veya terleme olmadan işlenebilecek kadar kohezif bir beton olarak kabul edilir. Sık donatılı, dar ve derin kesitli betonarme yapı elemanlarını uygun şekilde doldurmak ve taşıyıcı sistemin performansını artırmak için tercih edilmektedir. KYB ayrıca titreşim gürültüsünü ortadan kaldırarak daha iyi bir çalışma ortamı sağlayabilir (Kurt vd., 2016).

KYB, 1980'lerin başında Japonya'da beton dökümüyle ilgili işçilik maliyetini azaltmak ve beton yüzey kalitesini iyileştirmek için geliştirilmiştir. KYB üretiminde ortaya çıkan ekstra maliyet, çok pahalı olan Japon işgücünden dolayı betonun yerleştirilmesinde sağlanan tasarruflarla telafi edilmiştir. KYB kullanımı kısa sürede tüm dünyada hızla yayılan. KYB günümüzde Kuzey Amerika'da prekast beton tesislerinde mekanik konsolidasyon ihtiyacını gidermek ve normal beton dökümüne bağlı oluşan gürültü sorununu ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Prekast beton aynı zamanda, yüzey onarımlarının gerçekleştirilmesinde ilave işçilik maliyetlerine neden olan bal peteği gibi yüzey kusurları da gösterebilir (Yahia ve Aİtcin, 2015). KYB günümüzde, gelişmekte olan pek çok ülkede farklı uygulamalarda, yüksek gökdelenlerde, kentsel altyapı ve yapı tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. KYB kullanımı inşaat yapımının verimliliği için önemli avantajlar sağlar. Ayrıca son yıllarda KYB kullanımında önemli bir artış kaydedilmiş ve bu konuda çok sayıda makale yayınlanmıştır (Kurt vd., 2016; Mansoor vd., 2018).

Iqbal vd. (2017) 'ne göre KYB temel olarak 3 farklı tipte sınıflandırılabilir.

- Toz tipi;
- Viskozite tipi ve

- Kombinasyon tipi

Toz tipi, 550-650 kg/m³ arasında değişen yüksek miktarda bir toza (tüm malzeme <0,15 mm) sahiptir. Bu, plastik viskozite sağlar ve ayrışmaya karşı direnç oluşturur; Oysa ki akma noktası, uygun süper akışkanlaştırıcıların eklenmesiyle belirlenir.

İkinci tipte 350-450 kg/m³ arasında değişen daha az toz içeriği vardır. Bu tipte, ayrışma direnci için mineral katkı veya dolgu maddeleri kullanılmaz. Akma noktası süper akışkanlaştırıcı tarafından kontrol edilirken, ayrışmayı kontrol etmek için viskozite düzenleyici katkıları kullanılır.

Üçüncü tip, 450-550 kg/m³ toz içeriğine sahiptir, fakat reoloji, uygun doz viskozite düzenleyici katkı ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak kontrol edilir.

Shi vd. (2015)'ne göre, KYB, geleneksel betona göre aşağıda tanımlanan avantajları sağlar.

1. Vibrasyon ihtiyacını ortadan kaldırır,
2. İnşaat süresini ve işçilik maliyetini azaltır,
3. Gürültü kirliliğini azaltır,
4. Sık donatılı yapı elemanlarında betonun yerleştirilme kapasitesini artırır,
5. Çimento hamuru ile agrega/donatı arasındaki ara yüzey geçiş bölgesini iyileştirir,
6. Betonun geçirgenliğini azaltır ve dayanıklılığını artırır,
7. Kolon/perde-kiriş birleşim bölgelerini ve yapının performansını güçlendirir.

Patel ve Pitroda (2014)'da KYB'nin dezavantajları ile ilgili olarak aşağıdaki hususlara vurgu yapmışlardır.

1. Geleneksel betona kıyasla daha fazla bağlayıcı malzeme gerektirmesi,
2. İnce agregadaki % 1'lik nem içeriğinin kontrolsüz bir değişiminin bile, çok düşük su/bağlayıcı (~ 0,3) oranında KYB teolojisi üzerinde çok daha büyük bir etki oluşturması,

3. Bir KYB karışımının geliştirilmesinin çok sayıda deneysel çalışmayı gerektirmesi ve laboratuvar deneme çalışmalarına ek olarak, tipik üretim koşullarını simüle etmesi için sahadaki deneme çalışmalarının kullanılması gerekliliği,
4. KYB'nin, daha yüksek kimyasal katkı dozu nedeniyle geleneksel betondan daha pahalı olması.

2.2 KYB'nin Formülasyonu ve Özellikleri

ACI 237 (2007) 'ye göre, malzemenin kendiliğinden yerleşen olarak kabul edilebilmesi için genellikle üç işleve sahip olması gerekir: doldurma kabiliyeti, geçiş kabiliyeti ve ayrışmaya karşı direnç. (Yahia ve Aİtcin, 2015). Yahia vd. (2015) ve Sezer (2017)'e göre, geçiş kabiliyeti, doldurma kapasitesi ve ayrışma direnci de dahil olmak üzere gerekli özelliklere sahip fonksiyonel bir KYB tasarlamak için beton formülasyonunun değiştirilmesi gerekir. İlk önlemler, kum ve agrega ile ilgilidir, bunlar:

- Çok dar ve kompleks kalıplar için kaba agrega boyutunun maksimum 14 mm, hatta 10 mm'ye kadar düşürülmesi.
- Donatının çok sık olduğu durumlarda geleneksel betonda kullanılan kaba agrega oranının % 50, hatta daha düşük bir değere, bazı uygulamalarda, kaba agrega oranını % 40'a ve maksimum agrega boyutunu 10 mm'ye düşürülmesi.
- Süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ve uygun su / bağlayıcı oranları kullanarak çimento hamurunun deformasyon kapasitesinin artırılması.

İkinci önlem grubu, çimento hamurunun formülasyonu ile ilgilidir. Bu değişikliklerin en önemlisi, iyi geçiş kabiliyeti ve doldurma kapasitesine sahip kararlı bir KYB yapmak için kullanılması gereken ince malzeme miktarıyla ilgilidir. Çimento hamurunun hacmi arttığında kum ve iri agrega taneleri arasında ki boşluk daha da artmaktadır (Roussel vd., 2009; Yahia ve Aİtcin, 2015).

2.2.1 Doldurma Kabiliyeti

Doldurma kabiliyeti, KYB'nin deforme olma kabiliyetini yansıtır, taze beton homojenliğini korurken, kendi ağırlığı altında deforme olur ve yatay ve dikey olarak bütün kalıp parçalarını tamamen doldurur.

Deformasyon kapasitesi maksimum deforme olma olma kabiliyetidir, deformasyon hızı ise betonun akışını bitirmesi için geçen süreyi belirtir. KYB'nin yüksek deformasyon kapasitesi akma gerilimi ile ilgilidir. Bu nedenle, engellerin etrafından akabilmesi ve iyi doldurma kabiliyeti kazanabilmesi için KYB'nin akma geriliminin azaltılması gerekir (Al-Rubaye, 2016).

Farklı katı partiküller (iri agrega, kum ve toz malzemeler) arasındaki sürtünme, doldurma kabiliyetini etkiler. Katı partiküller arasında oluşan sürtünme, akmaya karşı iç direnci artırır, böylece taze betonun doldurma kabiliyetini ve akma hızını sınırlar. Karışımın içindeki farklı katı madde partikülleri arasındaki temas ihtimalinin daha yüksek olması nedeniyle beton sınırlandırılmış alanlardan geçerken partiküller arası sürtünme derecesi artar. Bu, kayma değerini artırır, böylece belirli bir akma kapasitesini korumak için daha büyük kayma gerilmelerine neden olur. Yüksek oranda su azaltıcı katkıların kullanılması, çimento tanelerini dağıtabilir ve partiküller arası sürtünmeyi azaltabilir ve gerekli akışkanlık seviyelerini korurken su içeriğinde azalma sağlar (Sonebi vd., 2007).

2.2.2 Geçiş Kabiliyeti

Taze betonun, bileşenleri ayrılmaksızın ya da bloke edilmeksizin sık donatıların arasından geçebilme yeteneği ve ayrıca matris içindeki iri partiküllerin süspansiyon içindeki kararlılığını sürdürmesi demektir. Sezer (2017) 'e göre, KYB'nin uygun geçiş kabiliyeti için aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- Düşük su / bağlayıcı oranını kullanarak ve viskoziteyi artırarak agrega ayrışmasını azaltmak için kohezyonun artırılması.
- Düşük kaba agrega içeriği ve düşük maksimum agrega tane çapı kullanılarak uygun kaba agrega formunun kullanılması.

2.2.3 Ayrışma Direnci

Ayrışma, betonun homojenliğini koruması ile ilgilidir, fakat “kararlılık” terimi, kasmaya direnç, dökümden sonra yüzeyde oturma ve yerleştirme sırasında karışım bileşenlerinin ayrılması veya “dinamik kararlılık” kavramlarını içerir. KYB'nin

ayırışma direnci, yüksek viskoziteye ve agregaların ayırışmasını engellemek için kullanılan kimyasal katkı maddelerinin toz partikülleri üzerindeki etkisine bağlıdır (Aslani ve Ma, 2018; Garcia, 2018).

Birçok araştırmacı, işlenebilirlik ve ayırışma direncinin, iri agrega hacminde azalma, süperakışkanlaştırıcı dozajı ve toplam ince toz/çimento ikame malzeme miktarının artırılarak ve su/çimento oranının minimize edilerek gerçekleştirilebileceğini ifade etmiştir. Esasen ayırışma direnci ve reolojik özellikler, ince agregaların varlığından oldukça etkilenir (Sahraoui ve Bouziani, 2019).

GYFC, Portland çimentosundan yaklaşık % 10 daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, eşdeğer bir çimento kütesinin GYFC ile değiştirilmesi daha büyük bir hamur hacmi oluşturur, bu da, ayırışma direncini ve akış kabiliyetini önemli ölçüde artırır (Dadsetan ve Bai, 2017).

Sezer, (2017)'e göre, betonun ayırışmasını önlemek için aşağıdaki önlemler alınmalıdır:

- Yeterli bir kohezyon elde etmek için beton karışımında optimum miktarda su kullanılmalı,
- Beton üretiminden son aşamaya kadar tüm evrelerde saha kalite kriterleri sağlanmalı ve kontrol edilmeli,
- Segregasyonun tespitinde, homojen bir beton elde etmek için beton tekrar karıştırılmalı,
- Ayırışmayı önlemek için, hava sürükleyici katkılar ve puzolanik malzemeler gibi kimyasal ve mineral katkılar kullanılmalı,
- Beton dökümü yüksek mesafeden yapılmamalıdır.

2.3 KYB'nin Mekanik Özellikleri

KYB 20 yıldan fazla bir süreçte inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Bu periyotta, KYB'nin karışım tasarımı, reolojisi, uygulanabilirliği, pompalanabilirliği ve durabilitesi gibi konularda birçok araştırma yapılmıştır. Doksanlı yıllarda, malzemenin mekanik özelliklerine ve yapısal performansına çok az önem verilmiş, ancak son

zamanlarda, KYB'nin mekanik özelliklerine yönelik artan sayıda araştırmalar yapılmaktadır (Khayat ve Schutter, 2014).

Sertleşmiş KYB'nin basınç dayanımı betonun genel olarak tüm karakteristik özellikleri hakkında fikir verir, bileşenlerine ve bu bileşenlerin kullanım dozajına bağı olarak değişkenlik gösterir, ayrıca bileşenlerin kalitesi ve üretim aşamasında yapılan kalite denetimi betonun basınç dayanımını etkiler (Sezer, 2017). Mekanik ve reolojik özellikler üzerinde yapılan araştırmalardan elde edilen bulgular, KYB'nin geleneksel betona göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Benzer özellikteki geleneksel betonla kıyaslandığında, basınç dayanımındaki artışın, yaklaşık % 60 düzeyinde olduğu gözlenmiştir. Esfandiari ve Loghmani, (2019), Benaicha vd. (2019), bunun, SA kimyasal katkıların kullanımı ile s/ç oranının azaltması ve mineral katkıları ile yüksek miktarda ince agrega kullanımından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

2.4 KYB'de Kullanılan Malzemeler

Son yıllarda beton malzemeleri araştırmalardaki gelişmeler, geleneksel malzemelere alternatif, çoğunlukla endüstriyel, inşaat ve tarımsal atıklardan oluşan, sürdürülebilir alternatif malzemelerin kullanımına yol açmıştır. Böylelikle, bu malzemelerin geri dönüşüm yoluyla tekrar kullanılmasının, etkili bir atık yönetimine önemli ölçüde katkı sağladığına inanılmaktadır (Adesina ve Awoyera, 2019).

KYB, vibrasyonlu normal betonda kullanılan çimento, agrega, su ve kimyasal katkıları içerir, ancak farklı özellik ve oranlarda. SA ve viskozite artırıcı katkıları gibi kimyasal katkıları, KYB'nin akışkanlığını ve kararlılığını arttırmak için kullanılır. Ayrıca, mineral katkıların eklenmesi, KYB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerini de iyileştirir. KYB kullanımının başlangıcından itibaren, araştırmaların çoğu, karışım dizaynı ile farklı kimyasal ve mineral katkıların KYB'nin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerine odaklanmıştır (Jain and Pradhan, 2019).

Çevre dostu bir inşaat sektörü arayışı için, endüstriyel atıkların, geri dönüştürülmüş malzemelerin ve/veya inşaat atıklarının yeniden kullanılmasıyla çevresel etkilerin azaltılması için çeşitli alternatifler önerilmiştir. Bununla birlikte, PÇ kullanımının azaltılması, beton üretiminden kaynaklanan emisyonların azaltılmasında en etkili

çözüm gibi görünmektedir. Çimento ikame malzemelerinin kullanılması, bu bağlamda yaygın bir seçenektir, çünkü bu malzemeler çimento tüketimini azaltırken beton özelliklerini de iyileştirebilir (Matos vd., 2019).

2.4.1 Çimento

Portland çimentosu KYB'de en yaygın kullanılan bağlayıcı olup, esas bağlayıcı olarak veya çimento ikame malzemeleri ile birlikte kullanılır, fiziksel özelliklerinden dolayı da, KYB'nin akışkanlığını ve işlenebilirliğini artırır (Ihsan, 2017).

Çimento hamuru betonda bir yağlayıcı gibi işlev gördüğünden, agrega yüzeyinin çimento hamuru ile kaplanması, betonun işlenebilirliği üzerinde direkt bir etki oluşturur. Agrega taneleri arasındaki boşlukların çimento hamuru ile dolması, hapsolmuş havayı azaltır ve böylece betonun dayanımını ve dayanıklılığını artırır. Ancak KYB'deki yüksek hamur hacmi, boyutsal kararlılığı azaltır ve rötne riskini artırır. Bunun nedeni, betonun genleşmesi ve büzülmesinin esas olarak çimento hamurundan kaynaklanmasıdır. Bu yüzden KYB, boyutsal kararlılığın sağlanabilmesi için, gerekli dayanımı sağlayacak şekilde optimum çimento hamuru ile tasarlanmalıdır (Panesar vd., 2017).

Doğan ve Özkul (2015), yaptıkları çalışmada KYB üretimi için CEM I çimentosu ile birlikte CEM II / A-P, CEM II / B-M, CEM II / B-P ve CEM IV / B-M olmak üzere dört farklı puzolanik çimento kullanmışlardır. Araştırma sonucunda; CEM II / B-P ve CEM IV / B-M çimentoları ile KYB üretiminin mümkün olmadığını, ancak CEM I, CEM II / B-M ve CEM II / A-P çimentoları ile KYB'nin elde edilebileceğini, CEM II / B-M betonun 28 günlük basınç dayanımının CEM I çimentosundan biraz daha yüksek olduğunu, bunu CEM-II/A-P'nin takip ettiğini, CEM II / B-P ve CEM IV / B-M'nin basınç dayanımlarının ise oldukça düşük değerler aldığını ifade etmişlerdir.

Almuwbbber vd. (2018), ASTM C150'ye uygun özelliklerde dört farklı fabrikadan aldığı CEM I 52.5 N çimentosu kullanarak, UK ve YFC'nin KYB'nin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmış, çimento özelliklerindeki farklılıkların KYB'nin taze haldeki özelliklerini etkilediğini belirtmiştir.

2.4.2 Agrega

Beton hacminin yaklaşık % 60-70'ini oluşturan agreganın; şekil, doku, mineraloji, maksimum boyut ve dayanım gibi özellikleri betonun; işlenebilirlik, boyutsal kararlılık, dayanım, dayanıklılık ve maliyet gibi özellikleri üzerinde önemli bir etki oluşturur (Aydın vd., 2010; Güneysi vd., 2014).

KYB'nin istenen özelliklerinin geliştirilebilmesi için, ince agrega ile iri agrega arasında hassas bir dengenin oluşturulması önemlidir (Sooriyaarachchi ve Lasintha, 2016). Gereksinim duyduğu yüksek akma davranışı ile birlikte, stabilitesini koruma ve doldurma kabiliyetini sürdürme zorluğu nedeni ile KYB üreticileri genellikle iri agrega boyutları kullanmaktan kaçınır. Yaygın olarak üretilen KYB, 8 mm civarında maksimum agrega boyutu içerir, agrega boyutlarının sınırlandırılmasının bir başka nedeni, iri agregaların KYB'nin akışkanlığının ve sık donatılar arasından geçebilme özelliğinin sınırlanmaması içindir (Hunger, 2010).

Birçok araştırmacı tarafından iri agrega özelliklerinin taze ve sertleşmiş KYB özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Khaleel ve Razak, 2011).

2.4.2.1 İri agrega

Khaleel ve Razak (2011), iri agrega türü, maksimum tane boyutu ve doku gibi agrega özelliklerinin KYB özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, kırma taş, doğal çakıl ve kırma kireçtaşı olmak üzere üç farklı iri agrega kullanılmış, iri agrega tane boyutundaki artışın, KYB'nin akışkanlık ve geçiş yeteneğini azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, doğal çakılın akış kabiliyeti, geçiş kabiliyeti ve ayrışma direncini arttırdığı, kırma kireçtaşı ile hazırlanan beton karışımlarının, diğer iki beton karışımından daha yüksek dayanım ve elastisite modülü değeri verdiği gözlenmiştir.

Uysal (2012), farklı özellikteki iri agregaların, UK katkılı KYB'nin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için; bazalt, mermer, dolomit, kireçtaşı ve kum taşı olmak üzere beş farklı iri agrega kullanmış, tüm karışımlarda su / bağlayıcı oranı 0.33 olarak sabit tutulmuştur. Test sonuçları, KYB üretiminde farklı kökenli iri agregaların kullanımının mümkün olduğunu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin,

bazalt agregalı KYB’de elde edildiğini, en düşük basınç dayanımı değerlerinin ise 28, 56 ve 90. günlerde kireçtaşı agregalı KYB’de gerçekleştiğini göstermiştir.

2.4.2.2 İnce agreg

İnce agreg, KYB'nin önemli bileşenlerinden biridir. Bu nedenle, ince agreg tipi ve tane boyutu dağılımının KYB'nin taze ve sertleştirilmiş özellikleri üzerinde oldukça önemli bir etkisi vardır (Bouziani, 2013).

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), farklı morfoloji ve orjinli kumların KYB'nin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmada, kırma kum, doğal dere kumu ve kumul kumları ikili veya üçlü karışımlar biçiminde KYB’de kullanılmış, harç ve betonların reolojik ve mekanik performanslarının, kırma ve doğal dere kumu karışımlarında arttığı, fakat özellikle yüksek kumul kumu içeriğine sahip kırma ve kumul kumu karışımlarında düştüğü gözlenmiştir.

Sahraoui ve Bouziani (2019), üç farklı kum ve kum oranlarının, KYB’nin reolojik ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Test sonuçları; dere kumunun olduğu ikili ya da üçlü karışımlarda, kumul kumu ve kırma kum oranlarındaki artışın akışkanlığı önemli ölçüde azalttığını, 28 günlük basınç dayanımlarının kırma kum oranının artmasıyla arttığını, ikili ve üçlü kum karışımlarında, kumul kumu oranının artmasıyla azaldığını göstermiştir.

2.4.3 Katkı Maddeleri

KYB'nin malzeme bileşenleri genellikle geleneksel vibrasyonlu beton ile aynı olsa da en büyük fark, istenilen akışkanlık seviyesi için yüksek miktarda süper akışkanlaştırıcı, iri agregalar için “yağlayıcı” madde olarak işlev görecektir yüksek

oranda toz içeriği ve ayrışmaya karşı karışımın işlenebilirliğini iyileştirmek ve stabilitesini arttırmak için yüksek ince agrega içeriği gibi bileşenlerin miktarlarından kaynaklanır (Ahmad vd., 2014).

2.4.3.1 Puzolanik katkılar

- **Uçucu kül**

UK, puzolanik reaksiyon özelliği ve gözenek doldurma kabiliyeti nedeniyle farklı beton türlerinde yaygın olarak kullanılmakta, ASTM C 618'e göre F ve C sınıfı olarak sınıflandırılmaktadır (Jalal vd., 2015; Adesina ve Awoyera, 2019).

UK'nın ortalama partikül büyüklüğü, Portland imentosunun ortalama partikül boyutunda olup, yaklaşık 20 mikrondur. 10 mikronun altındaki partiküller betonda erken dayanım sağlarken, 10 - 45 mikron arasındakiler daha yavaş reaksiyona girer. UK'nın özgül ağırlığı, kömür kaynağına bağlı olarak 2,0 – 2,4 arasında değişir, inceliği 250 -600 m²/kg aralığındadır (Zeeshan ve Mahure, 2016).

UK, puzolanik özelliklerinden dolayı KYB'de imento yerine kısmi olarak kullanılabilir, hem taze hem de sertleşmiş özelliklerini iyileştirir ve kütlesel olarak Portland imentosunun %30'una kadar ikame malzemesi olarak kullanılabilir. UK, Portland çimentosundan daha yavaş reaksiyon gösterir, maksimum dayanım kazanabilmek için daha fazla zamana ihtiyaç duyar, küçük küresel formundan dolayı, KYB'nin su talebini azaltırken, reolojik özelliklerini iyileştirir. UK, KYB'nin reaktivitesini artırır, bu etki, betonun basınç dayanımını artmasına, dayanıklılığın iyileşmesine ve kuruma büzülmesinin azalmasına yol açar, ayrıca kismayı azaltır ve stabiliteyi arttırır (Dadsetan ve Bai, 2017).

UK, imento esaslı malzemelerde çoğunlukla puzolanik reaksiyonu başlatan önemli miktarda silika içerir (Awoyera vd., 2019). Genellikle en iyi mekanik performans değerlerine % 40-60 ikame oranlarında ulaşılır (Matos vd., 2019).

Türkiye'de her yıl 13 milyon tondan fazla UK atığı oluşmakta, fakat UK'lerle ilgili yetersiz veri bulunduğundan, bu miktarın ancak % 5'inin inşaat sektöründe kullanıldığı düşünülmektedir (Jalal vd., 2015).

UK'ların inceliği, puzolanik reaktiviteyi etkileyen en önemli fiziksel özelliklerden biridir, UK inceliğinin ölçülmesi için kullanılan farklı teknikler farklı sonuçlar gösterdiğinden, inceliğin puzolanik aktivite üzerindeki etkisini açıklamak zordur (Ramezaniyanpour, 2014).

Zeeshan ve Mahure (2016), UK katkılı yüksek dayanımlı KYB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerini araştırmış, EFNARC şartlarına göre, M70 sınıfı beton için % 0, % 10, % 20 ve % 30 UK ikame oranlarında KYB numuneleri hazırlamıştır. UK katkılı karışımların yeterli işlenebilirlik gösterdiği, 0,23 s/ç oranında geçiş kabiliyeti, doldurma kabiliyeti ve ayrışma direnci değerlerinin EFNARC sınırları içerisinde kaldığı görülmüş, %30 UK ikamesinin M70 sınıfı beton için en yüksek dayanım değerlerini verdiği belirlenmiştir.

Matos vd. (2019), düşük bağlayıcı yüksek performanslı KYB'lerin özelliklerini incelemiş, malzeme oranlarının optimizasyonu için bir tasarım yöntemi kullanılarak, UK % 0 - % 30 oranlarında çimento yerine ikame edilmiş, %10 UK katkılı betonların 28. günde 59 MPa, % 20 ve % 30 UK katkılı betonların 90 günde 71 MPa basınç dayanımı ve yüksek durabilite özelliği gösterdiğini ortaya koymuştur.

- **Granüle yüksek fırın cürufu**

GYFC, puzolanik davranışı ve karışımın işlenebilirliğini arttırmak için PÇ yerine kısmi olarak KYB'de kullanılabilir. PÇ yerine % 20 oranında GYFC ikame edildiğinde, KYB'nin çökme değerinde yaklaşık 10 mm'lik, ikame oranı % 40'a yükseltildiğinde çökme değerinde yaklaşık 30 mm daha fazla artış gözlenmiş, GYFC oranı % 60'a yükseltildiğinde ise çökme değerinde yaklaşık 10 mm'lik bir düşüş belirlenmiştir (Adesina ve Awoyera, 2019).

GYFC'nin KYB'de dayanıklılığı ve dayanım gelişimini arttırdığı görülmüştür. GYFC ikameli betonun dayanımındaki artış, puzolanik reaktivite sonucu hidrasyon

ürünlerinde oluşan artışlar ve mikro yapıda sağlanan boşluk yapısı iyileştirmelerinden kaynaklanır (Mohamed, 2019).

Mohamed ve Najm (2017), yaptıkları çalışmada s/ç oranı 0,36; YFC ikame oranı % 0 ila % 80 arasında değişen KYB numunelerinin mekanik dayanımlarını test etmiş, % 35 GYFC ikameli KYB betonun basınç dayanımının 28. günde, kontrol betonundan daha yüksek basınç dayanımı gösterdiğini, % 35'ten fazla YFC katkısının ise basınç dayanımlarını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Dadsetan ve Bai (2017), s/b oranı 0,45 ve % 10, % 20 ve % 30 GYFC katkılı 100 mm'lik küp KYB numunelerinin basınç dayanımının ikame oranı ile birlikte arttığını ve kontrol karışımı basınç dayanımlarını aştığını yaptıkları çalışmada belirtmişlerdir.

Mansoor vd. (2018), 7 ve 28 gün su kürü sonrası, KYB küp numunelerin basınç dayanımlarının, % 5 - % 25 GYFC ikame oranlarında arttığını göstermiştir.

- **Perlit tozu**

Perlit, yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ içeriği nedeniyle puzolanik bir malzeme olarak nitelendirilen camsı volkanik bir kayadır. Perlit tozu veya genişletilmiş perlit, inşaat endüstrisinde agrega ya da çimento yerine, ikame malzemesi veya bunların bir kombinasyonu olarak kullanılabilir. Perlit toz olarak kullanılacak ise, öğütmeden önce genişletilmemesi ekonomik ve çevresel olarak tercih edilir (Rashad, 2016; El Mir ve Nehme, 2017).

Donma-çözülme döngüleri altında farklı miktarlarda genişletilmiş perlit içeren betonların dayanıklılığının incelenmesi, bu tür hafif agregaların KYB yapımında kullanılabilirliği ve agrega yerine ikame olarak perlit kullanımının beton performansı üzerine etkileri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Fakat, perlitin puzolanik performansı ve bu mineralin çimento yerine ikame edilmesi konusunda çok az çalışma yapılmıştır (Vosoughi vd., 2015).

Tokuy ve Erdoğan (2007), farklı incelik (3200 ve 3700 cm²/g) ve farklı oranlarda perlit (% 20 ve % 30) kullanarak, kompoze çimento üretimi için birlikte veya ayrı

ögütme tekniklerini test etmiş, perlit ile klinkerin birlikte ögütülmesinin kompoze çimento üretimi için daha az enerjiye gereksinim duyduğunu, benzer Blaine inceliği ve aynı miktarda perlitin, birlikte ögütülmüş kompoze çimentoların basınç dayanımlarını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Okuyucu (2011), kontrol karışımlarına göre, doğal PT'nin yarı hafif betonların basınç dayanımlarında önemli bir artış oluşturduğunu belirtmiştir.

Vosoughi vd. (2015), geliştirilmiş PT ikamesinin betonun performansı üzerine etkisini araştırmak için PT'yi % 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında çimento yerine ikame ederek, 0.35 ve 0.55 s/ç oranlarında beton numuneler üretmişler, 0.35 s/ç oranına sahip karışımlarda geliştirilmiş PT'nin, oluşturduğu puzolanik etki sonucu betonun basınç dayanımı üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Motahari vd. (2018), PT ikamesinin, aynı işlenebilirliği elde etmek için karışımın su ihtiyacını artırabileceğini, bunun çözümü için de yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi kullanılmasını önermiş, çok ince PT katkılı beton karışımlarının, özellikle 91 günde, kontrol karışımları ile neredeyse aynı basınç dayanımına sahip olduğunu araştırma sonucunda belirlemişlerdir.

2.4.3.2 Kimyasal katkılar

Daha yüksek işlenebilirlik ve yüksek performans sağlanması için KYB'ye SA veya yüksek oranda su azaltıcı ve viskozite arttırıcı kimyasal katkılar eklenmiştir (Garcia, 2018). Asghari vd., (2016)'ya göre, polinaftalin sülfonat ve polifosfonik bazlı süper akışkanlaştırıcılar, polikarboksilat eter esaslı SA'lardan daha yüksek dayanımlı KYB karışımlarının elde edilmesini sağlar.

Beton uygulamalarında SA dozajı genellikle çimento içeriğine bağlıdır. Bu nedenle karışım içerisinde ki diğer toz malzemeler dikkate alınmaz. Bazı beton türlerinde bu sorunlara neden olabilir. Betonda; (i) karışımındaki su miktarını azaltmak, (ii) taze karışımın hedeflenen işlenebilirliğini sağlamak ve sürdürmek amacıyla SA katkı kullanmak gerekir (Hunger, 2010).

Okamura ve Ouchi (2003); Siddique (2011), SA teknolojisindeki gelişimin KYB'nin yaygınlaşmasına büyük katkı sağladığını ifade etmişlerdir. Almuwbber vd., (2018)'ne göre kimyasal katkıları KYB'nin; işlenebilirlik, su geçirgenliği, karbonatlaşma, klor geçirgenliği özelliklerini iyileştirmek, hem ilk yaşlardaki hem de nihai dayanım değerleri dahil olmak üzere KYB özelliklerini geliştirmek için kullanılır.

Benaicha vd. (2019), sekiz farklı SA dozajı kullanarak reoloji ile KYB'nin basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi araştırmış, SA dozajının artmasıyla, basınç dayanımının azaldığını, çökme-yayıma çapı değerlerinin arttığını ifade etmişlerdir.

2.5 Kür Koşullarının KYB Özelliklerine Etkisi

Kür, hidrate olmuş çimento pastası ve betondaki iç kimyasal reaksiyonların tanımını açıklamak için kullanılan bir terimdir, bu süreç, sertleşmiş çimento hamurunun özelliklerini yeterli nem ve ısı ile zamanla geliştirir. Kür, hidrasyonu destekler, betonda ki su kaybını önler ve malzemeyi mümkün olduğu kadar uzun süre veya yeterli bir süre için doymuş veya hemen hemen doymuş halde tutar (Al Saffar vd., 2019).

Etkili bir kürlenme, bağlayıcı malzemelerin hidrasyonunun devamı ve hedeflenen basınç dayanımının elde edilebilmesi için kritik öneme sahiptir. Su kürü, pratikte betonda en sık kullanılan bir yöntemdir, tümüyle çuval bezi ile kaplanan taze dökülmüş yapı elemanlarının tümüne üç ile yedi gün boyunca sürekli olarak su uygulanır. Su kürünün amacı, bağlayıcı maddenin hidrasyonu için gereken nemi yapı elemanları içinde hapsederek, suyu tutmaktır (Mohamed, 2019).

ACI 301-16 (2011) minimum kürlenme süresini, hedef basınç dayanımının % 70'ini elde etmek için gereken süre kadar olmasını önermiştir. Geleneksel kür yöntemleri istenilen amaçları gerçekleştirmede genelde yeterli olmakla beraber, tüm yapı elemanlarının kürlenmesi içinde önemli miktarda suya gereksinim duyar.

Ayrıca, kür sıcaklığının çimento esaslı malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi yaygın olarak bilinmektedir. Yüksek sıcaklık, betonun erken yaşlardaki basınç

dayanımlarını arttırır, ancak ileri yaşılarıdaki basınç dayanımı değeriierinin düşmesine neden olur (Aparicio vd., 2016).

Geleneksel kür yöntemleri ortamdaki nemin kaybını azaltmada yeterince etkin olamadığından, kür koşullarının gerçekleştirilemediği durumlarda, kendiliğinden kür yöntemi önerilmektedir. Kendiliğinden kürlenme veya içsel kürlenme, daha etkili bir hidrasyon için betonun içinde ekstra nem oluşturmak ve kür işlemine gerek kalmaksızın kısıtlanmış, kendiliğinden kuruma için yeni bir tekniktir. Kendiliğinden kürlenmenin esas amacı, rutubetin beton kütle içerisinde hızla buharlaşmasını sınırlayarak kendiliğinden kürlenmiş betonun su tutma kapasitesini arttırmaktır (Kamal vd., 2018).

Zhao vd. (2012) kür süresi ve farklı kür koşullarının KYB özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, bir grup KYB numunesine 3, 7, 14 gün süreyle su kürü, kalan numunelere ise sürekli su kürü, standart kür ve sürekli oda kürü olmak üzere altı farklı kür işlemi uygulamıştır. Test sonuçları irdelendiğinde, puzolanik aktivitenin oluşabilmesi için ilk 7 gün boyunca KYB numunelerine su kürü uygulanmasının gerekli olduğu, sürekli su kürü uygulanan KYB numunelerinin daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı gösterdiği görülmüştür.

Bingöl ve Tohumcu (2013), açık hava, su ve buhar kürü uygulanan, farklı oranlarda UK ve SD katkılı KYB'nin basınç dayanımı özelliklerini araştırmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeriierinin, 28 gün su kürü uygulanan numunelerde elde edildiği, suda kürlenme süresindeki artışın, basınç dayanımında da artışa neden olduğu gözlenmiştir. Hava kürünün, basınç dayanımını düşürdüğü, en düşük dayanım değeriierinin tüm gruplarda havada kürlenmiş numunelerde gerçekleştiği belirlenmiştir.

2.6 Su/Bağlayıcı Oranının KYB Üzerindeki Etkisi

Su/bağlayıcı oranı betonun performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Daha düşük su içeriğine sahip mineral katkılı beton karışımları, KYB'ye daha yüksek işlenebilirlik ve mekanik özellikler sağlayabilir. Ayrıca daha düşük su içeriği, KYB'nin durabilite özelliklerini iyileştirmek için önemli bir etkidir (Deilami vd., 2019).

Okamura ve Ozawa (1996), KYB için bir karışım tasarımı sistemi önermiştir. Bu sistemde, kaba ve ince agregaya içerikleri sabittir, su/toz oranı ve süper akışkanlaştırıcı dozajı ayarlanarak kendiliğinden yerleşme sağlanacaktır. Betondaki kaba agregaya içeriği genel olarak toplam katı malzeme hacminin %50'si ve ince agregaya da %40'ı değerindedir, su/toz oranının da tozun özellikleri ve süper akışkanlaştırıcı dozajına bağlı olarak hacimsel olarak 0.9-1.0 değerinde olduğu varsayılır. Gereksinim duyulan s/ç oranı, çeşitli denemeler yapılarak belirlenir. KYB'nin sınırlamalarından biri, belirlenmiş bir karışım tasarım prosedürünün bulunmamasıdır (Moghadam ve Khoshbin, 2012).

Moghadam ve Khoshbin (2012), KYB karışımlarındaki s/ç oranının 0.45'e kadar düşürülmesiyle, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülünün arttırılabileceğini ifade etmişlerdir.

Siddique vd. (2012), % 15-35 arasında değişen oranlarda UK katkısı içeren KYB'lerde, su / toz oranının, 28, 90 ve 365 günlük dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış, basınç ve yarma çekme dayanımı değerlerinin, UK ve s/ç oranı değerlerinin azalmasıyla birlikte arttığı gözlenmiştir.

2.7 KYB'nin Dayanıklılığı

Soğuk ortamlarda betonun maruz kaldığı en yaygın fiziksel bozulmalarından biri, beton yapılarda ciddi hasara neden olan ve çatlaklar oluşturan donma-çözülmedir. Kılcal boşluk yapısı içindeki suyun donması, hacim olarak yaklaşık % 9'luk bir artışa neden olur, bu nedenle, özellikle betondaki gözenekler doygun derecesine yakınsa, betonun ciddi şekilde çatlamasına ve bozulmasına neden olur.

Donma-çözülme hasarı iki türdür: i) beton iç yapısındaki suyun donmasından kaynaklanan ve basınç dayanımı kaybı ve ağırlık kaybına neden olan içsel don hasarı; ii) zayıf tuzlu çözeltilerle temas durumunda beton yüzeyinin donmasından kaynaklanan yüzey dökülmesi. Hasar, beton yüzeyinden zayıf parçaların dökülmesi sonucu oluşan pullanma ve yüzeyden kopması ile karakterize edilir (Abed ve Nemes, 2019).

Donma-çözülme döngülerine karşı direnç, betonun soğuk iklim koşullarına dayanıklılığını değerlendirmek için bir kriter olarak kullanılabilir. Betonun sık gerçekleşen donma-çözülme etkilerine karşı durabilitesini ve servis ömrünü artırmak için çok sayıda araştırma yapılmıştır. GYFC, UK, PK ve SD gibi mineral katkıların kullanılması, daha boşluksuz ve yoğun bir mikro yapı oluşumuna, ayrıca ara yüz gözenekliliğinin azalmasına katkı sağlar ve betonun donma-çözülme döngülerine karşı direncini artırır (Alimohammad vd., 2019).

Beton donma-çözülme etkisine maruz kaldığında, hava sürüklenmiş sertleşmiş betonda UK'nın bazı olumsuzluklara neden olabileceği Karakurt ve Bayazit (2015) tarafından ifade edilmiştir. Wawrzeńczyk vd. (2016)'da, GYFC'nin donma-çözülme döngülerine karşı, betonun direnci üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu yaptıkları çalışmada belirtmişlerdir.

Tavasoli vd. (2018), s/ç oranı 0.44, çimento dozajı 418 kg/m^3 , 0, %30, %50, %65 ve %80 GYFC ikameli KYB karışımları ile %50 YFC, %5, %10 ve %15 SD ikameli KYB karışımlarının donma-çözülme direncini test etmişlerdir. Artan GYFC ikamesinin KYB'nin durabilitesini azalttığını, %50 YFC ikamesinin KYB'nin donma direnci üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını araştırmada ifade edilmiştir.

Abed ve Nemes (2019), UK, PT ve geri dönüşümlü beton tozunun KYB'nin uzun süreli dayanıklılığı üzerindeki etkisini araştırmışlar, PT'nin kimyasal kompozisyonu ve tane boyutu dağılımının KYB'nin donma-çözülme direncini arttırmada önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

Araştırmada malzeme olarak; CEM I 42,5 R çimento (PÇ), silisli kum (SK), kırma kum (KK), kırma taş (KT), öğütülmüş genleştirilmiş perlit tozu (PT), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), F sınıfı uçucu kül (UK), süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmış ve karışımda kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Çalışmada kullanılan PÇ'nin, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de tanımlanmış, Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler		Test değerleri	TS EN 197-1 Limit Değerleri	
			Min.	Mak.
Çözünmeyen Kalıntı	(%)	0,79	-	5
MgO	(%)	1,73	-	-
SO ₃	(%)	3,16	-	4
KK	(%)	3,33	-	5
Cl ⁻	(%)	0,0485	-	0,1
Fiziksel Özellikler				
Özgül Ağırlık	(gr/cm ³)	3,08	-	-
Özgül Yüzey	(cm ² /gr)	3 560	-	-
Su İhtiyacı	(%)	28	-	-
Priz Başlangıcı	(dk)	135	60	-
Priz Sonu	(dk)	220	-	-
Hacim Genleşmesi	(mm)	0	-	10
Basınç dayanımı				
2 Günlük	(MPa)	31	20	-
7 Günlük	(MPa)	42,1	-	-
28 Günlük	(MPa)	53,1	42,5	62,5



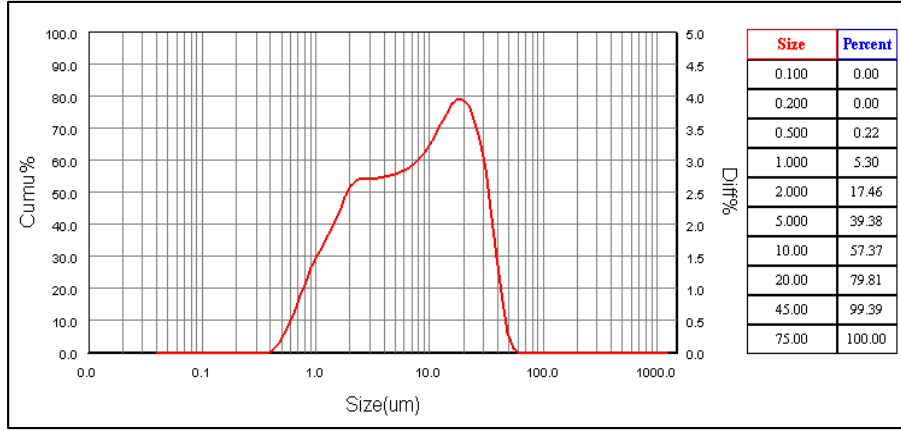
Şekil 3.1 KYB’de kullanılan PÇ

3.1.2 Uçucu Kül

Çimento ikame malzemesi olarak Zonguldak – Çatalağzı Termik Santralinden temin edilen F sınıfı UK kullanılmıştır. UK, 24 saat etüvde 105 ± 5 °C’de kurutulmuş, etüvde bekletilerek soğutulmuş, daha sonra bilyalı öğütücüde 120 dk öğütülmüş, CHRYSO - Cem ADM 3 eklenerek 120 dk ikinci kez öğütülerek $6\ 500\ \text{cm}^2/\text{g}$ incelikte UK elde edilmiştir. UK’nın $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ bileşikleri toplamı %87,22 olup, F sınıfı kategorisindedir. UK’nın partikül boyutu dağılımı Şekil 3.2, kimyasal özellikleri Tablo 3.2’de tanımlanmış, Şekil 3.3’de kullanılan UK’ü gösterilmiştir.

Tablo 3.2 UK’nın kimyasal kompozisyonu

Oksit	(%)	Standartlara uygunluk sınırları		
		TS EN 450	ASTM C 618	
			F	C
SiO_2	63,25			
Al_2O_3	15,78			
Fe_2O_3	8,19			
S+A+F	87,22		>70	>50
CaO	2,05			
MgO	2,26			
SO_3	0,20	<3,00		
K_2O	1,35			
Na_2O	2,05			
KK	1,98	<5,00	<5,00	<6,00



Şekil 3.2 UK'nın partikül boyutu dağılımı



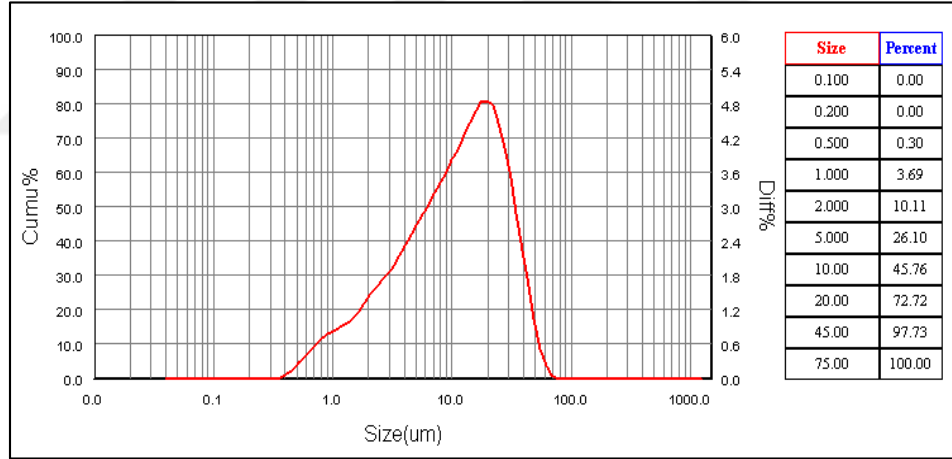
Şekil 3.3 KYB'de kullanılan UK

3.1.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Numunelerin hazırlanmasında ikinci ikame malzemesi olarak OYAK Bolu Çimento San. A.Ş. den temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) kullanılmıştır. GYFC'nin özgül ağırlığı $2,95 \text{ g/cm}^3$, inceliği $4\ 989 \text{ cm}^2/\text{g}$ dır. GYFC'nin partikül boyutu dağılımı Şekil 3.4'te, üretici firmadan alınan kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri Tablo 3.3'te tanımlanmış, Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 GYFC'nin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri

Oksit	%	TS EN 197-1 Sınır değerleri	Test metodu
MgO	5,75	Max. 18	TS EN 196-2
S (Sülfür)	0,54	Max. 2,0	TS EN 196-2
SO ₃	0,19	Max. 2,5	TS EN 196-2
Kızdırma kaybı	0,03	Max. 3,0	TS EN 196-2
Cl ⁻	0,0185	Max. 0,1	TS EN 196-2
Nem	0,06	Max. 1,0	TS EN 15167-1 Ek A
Na ₂ O	0,56	-	TS EN 196-2
K ₂ O	0,28	-	TS EN 196-2
Toplam alkali (Na ₂ O 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
7 günlük aktivite indeksi %	54,2	Min. 45,0	TS EN 196-1
28günlük aktivite indeksi %	72,5	Min. 70,0	TS EN 196-1
Mineralojik özellikler			
Camsı faz %	100	-	TS EN 196-2



Şekil 3.4 GYFC'nin partikül boyut dağılımı



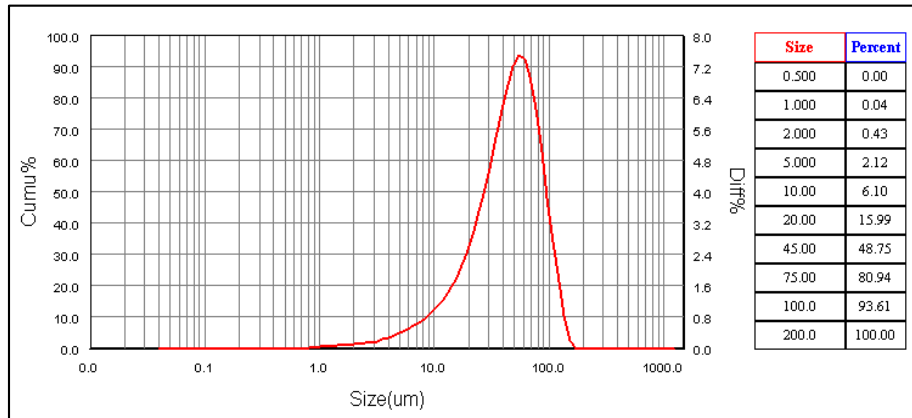
Şekil 3.5 KYB'de kullanılan GYFC

3.1.4 Genleştirilmiş Perlit

Genleştirilmiş perlit Çankırı - Akper Madencilik İnşaat Sanayi Taahhüt Ticaret Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Perlit 24 saat etüvde 105 ± 5 °C'de kurutulmuş, etüvde bekletilerek soğutulmuş, daha sonra bilyalı öğütücüde 120 dk öğütülmüş, CHRYSO - Cem ADM 3 eklenerek 120 dk süreyle ikinci kez öğütülerek $6500 \text{ cm}^2/\text{g}$ incelikte uçucu kül elde edilmiştir. PT'nin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ bileşikleri toplamı %85,63'tür. partikül boyutu dağılımı Şekil 3.6'da tanımlanmış ve bu çalışmada kullanılan PT Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4 PT'nin kimyasal özellikleri

Oksit	%
SiO_2	72,08
Al_2O_3	12,92
Fe_2O_3	0,63
S +A+ F	85,63
CaO	0,88
MgO	0,63
SO_3	1,20
K_2O	4,33
Na_2O	3,76
LOI	1,95



Şekil 3.6 PT'nin partikül boyut dağılım



Şekil 3.7 KYB’de kullanılan PT



Şekil 3.8 Bilyalı değirmen

3.1.5 İnce ve İri Agregalar

KYB karışımlarının hazırlanmasında ince agregalar olarak silis kumu (SK), kırma kum (KK) ve iri agregalar olarak da kırmataş (KT) kullanılmıştır. KK ve KT kalker kökenlidir. Karışımda kullanılan agregaların elek analizi değerleri Tablo 3.5’te ve agregalar özellikleri Tablo 3.6’da tanımlanmıştır.

Tablo 3.5 İnce ve iri agregalar elek analizi değerleri

Elek no	% Geçen		
	SK	KK	KT
1/2"	-	-	100
3/8"	-	100	89,7
4#	100	98,9	29,5
8#	75,7	57,5	0,5
16#	64,6	29,0	0,3
30#	42,2	15,4	0,3
50#	30	8,7	0,3
100#	15,6	2,8	0,3
200#	5,8	2,3	0,3

Tablo 3.6 Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega	Özgül ağırlık g/cm ³	Su emme (%)
SK	2,65	1,3
KK	2,63	1,2
KT	2,65	1,2



Şekil 3.9 KYB’de kullanılan agregalar

3.1.6 Su

KYB numunelerde karışım ve kür suyu olarak TS-EN 1008 standardına uygun içme suyu kullanılmıştır.

3.1.7 Kimyasal katkı

Çalışmada CHRYSO firması ürünü polikarboksilat esaslı Lab Bet 8 109 kodlu süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı suda çözünen polikarboksilat esaslı polimer olup, üçüncü nesil bir akışkanlaştırıcıdır, özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7 SA’nın teknik özellikleri

Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,075±0,02 g/cm ³
pH	4±1
Cl	> %0,1
Etken madde	polikarboksilat

3.2 KYB Karışımların Özellikleri ve Numunelerin Hazırlanması

Fiziksel, mekanik ve durabilite testlerinde 10 x 10 x 10 cm boyutunda küp numuneler kullanılmıştır. Referans numunede bağlayıcı olarak % 100 PÇ kullanılmış, diğer serilerde ise Çizelge 3.8’de tanımlanan oranlarda UK, GYFC ve PT bileşenlerinden oluşan mineral katkı maddeleri üçlü karışım şeklinde çimento ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. KYB numunelerinin karışım özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.8 KYB malzeme oranları

Kod	PÇ	UK	GYFC	PT
REF	100	0	0	0
U10C55P0	35	10	55	0
U10C55P5	30	10	55	5
U10C55P10	25	10	55	10
U20C45P0	35	20	45	0
U20C45P5	30	20	45	5
U20C45P10	25	20	45	10
U30C35P0	35	30	35	0
U30C35P5	30	30	35	5
U30C35P10	25	30	35	10

Tablo 3.9 KYB karışım özellikleri

Karışım kodu	PÇ	UK	GYFC	PT	SK	KK	KT	Su	SA
	(kg/m ³)								
REFERANS	650	0	0	0	470	544	549	202	6
U10C55P0	227,5	65	357,5	0	468	541	546	202	6
U10C55P5	195	65	357,5	32,5	465	538	543	202	6
U10C55P10	162,5	65	357,5	65	462	535	540	202	6
U20C45P0	227,5	130	292,5	0	470	544	550	202	6
U20C45P5	195	130	292,5	32,5	468	541	546	202	6
U20C45P10	162,5	130	292,5	65	465	538	543	202	6
U30C35P0	227,5	195	227,5	0	473	547	552	202	6
U30C35P5	195	195	227,5	32,5	470	544	550	202	6
U30C35P10	162,5	195	227,5	65	468	541	546	202	6

Beton numunelerinin hazırlanmasında 50 dm^3 'lük betoniye kullanılmıştır. Betoniye içerisine önce SK, KK ve KT agregalar konularak, 1 dk süreyle kuru olarak karıştırılmıştır. Betoniye içerisindeki agregaların homojenliği sağlandıktan sonra karışım suyunun $1/3$ 'ü karışıma eklenerek 3 dk süreyle karıştırma işlemine devam edilmiş, daha sonra agregaların suya doymun hale gelmesi için karıştırıcının üstü geçirimsiz bir örtü ile örtülerek 3 dk süreyle karışım bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda betoniye çimento ve diğer mineral katkı maddeleri ilave edilerek tüm malzemelerin 3 dk süreyle karıştırılması sağlanmış, karışım suyunun $1/3$ 'ü karışıma eklenerek, karıştırma işlemine 3 dk süreyle devam edilmiştir. Kalan $1/3$ 'lük karışım suyuna SA katkı eklenmiş, betoniye düşük hızlarda ilave edilerek 5 dk daha karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Taze haldeki KYB'nin TS EN 12350-8 standardına uygun olarak slump hunisi yardımı ile yayılma çapı ölçülmüştür (Şekil 3.10). KYB betonu önceden temizlenerek yağlanan $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ boyutundaki küp kalıplara yerleştirilmiş ve üst yüzeyleri masterla düzeltilmiştir. Küp kalıpların üstü naylon bir örtü ile örtülerek $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ve yaklaşık %65 rutubetli laboratuvar ortamında beklemeye alınmıştır. 24 saatlik bir sürenin sonunda KYB numuneleri kompresör yardımı ile kalıptan çıkartılarak, kür işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.10 KYB numunelere uygulanan çökme-yayılma testi

KYB numunelerine;

- i. *Laboratuvar oda kürü:* $30 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %70 rutubetli ortamda,
- ii. *Su kürü:* $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta su içinde olmak üzere test süresine kadar iki farklı kür işlemi uygulanmıştır.

3.3 Taze Beton Deneyleri

3.3.1 Çökme-Yayılma Deneyi

KYB'nin taze beton özelliklerini belirlemek için TS EN 12350-8 standardına göre çökme-yayılma deneyi yapılmıştır. Çökme-yayılma testi herhangi bir engel olmaksızın taze haldeki betonun kendi ağırlığı ile deformasyon yeteneğinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Betonarme donatıların mevcudiyeti söz konusu olduğunda, taze betonun doldurma yeteneğinin ölçülmesi tam olarak mümkün olmasa da, deneyle segregasyon değerlendirmesi yapılabilmektedir. Çökme-yayılma deneyi slump konisinden yararlanılarak ve yatay yayılma mesafesi ölçülerek gerçekleştirilir. Düz bir yüzeye yerleştirilen yayılma tablasının yüzeyi nemlendirildikten sonra merkezine slump konisi yerleştirilir herhangi bir sıkıştırma işlemi yapmadan tek seferde koni betonla doldurulurak dik konumda yukarıya doğru çekilir. T500 süresi belirlenecek ise, taze betonun 500 mm çaplı daireyle temasına kadar ki süre, T500 olarak kaydedilir. Betonun, yayılma hareketinin tamamlanmasından sonra, yayılan betonun çapı, birbirine dik iki noktadan ölçülerek, iki ölçü değerinin ortalaması alınır ve yayılma çapı olarak kaydedilir. Betonun yayılma özellikleri betonun akıcılığı, homojenliği, vizkozite ve segregasyon özelliklerini belirlemeye yardımcı olur (Newman Choo, 2003).

3.4 Sertleşmiş KYB Numunelerine Uygulanan Testler

İki farklı kür ortamında olgunlaştırılan sertleşmiş 10 x 10 x 10 cm boyutunda ki KYB numunelerine, su emme, ultrasonik ses geçiş hızı testi, basınç dayanımı testi ve donma-çözülme testleri uygulanmıştır.

3.4.1 Su Emme

10 x 10 x 10 cm boyutundaki KYB numunelerinin su emme testleri TS EN 12390-7 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Kür ortamından alınan numunelerin önce etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kadar kurumaları sağlanmış, ortamdaki rutubetten etkilenmeyecek şekilde laboratuvar ortamında soğumaları için beklenmiş, kumpas yardımı ile boyutları ölçülen numunelerinin ağırlıkları 0,1 g

hassasiyetinde terazi ile tartılmıştır. Daha sonra numuneler laboratuvar ortamında 24 saat süreyle kür havuzunda 21 ± 1 °C’de bekletilerek suya doymun hale getirilmiştir. Kür havuzundan çıkartılan numunelerin yüzeyleri nemli bir bezle kurularak 0,1 g hassasiyetinde tartılmıştır. Bu işlemlerden sonra numunelerin su emme değerleri hesaplanmıştır.

3.4.2 Basınç Dayanımı

SK ve LK uygulanan 10 x 10 x 10 cm boyutunda ki küp numunelerin basınç dayanımları “TS EN 12390-3” standardına göre belirlenmiştir. Her seri için üç numune kullanılmış, yükleme hızı 2,4 kN/sn olarak belirlenerek beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. Basınç testi için kullanılan düzenek Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11 Basınç dayanımı testi

3.4.3 Ultrases Geçiş Hızı

Ultrasonik test metodu tahribatsız test yöntemlerinden biridir. Ses dalgasının hızı, geçtiği ortamın özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu test yöntemi; betonun basınç dayanımının tahmini, homojenliğinin ve betonun çatlak yapısının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Ultrases hızı geçiş süresinin azalması, malzemenin boşluklu olduğunun bir göstergesi olup, basınç dayanımı değerleri de azalmaktadır. Problemlerin yüzeye iyi temas edebilmeleri için beton yüzeyinin temiz ve boşluksuz olması gerekir.

Kür ortamından alınan numuneler etüvde 50 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş, ortam sıcaklığına gelene kadar soğumaları beklenmiş, yüzeyleri çok ince bir zımpara ile zımparalanarak yüzeyleri temizlenmiştir. Numunelerin boyutları digital kumpas ile ölçülmüş, kalibrasyon çubuğu yardımı ile test cihazının kalibrasyonu yapılmıştır. Test işleminde frekansı 55 kHz olan dijital test cihazı kullanılarak, işlem ASTM 597-09'ye uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.12). Test sırasında transdüserlerin numune yüzeyine temasının tam olarak sağlanabilmesi için transdüserlere ultrason jeli sürülmüş, transdüserler karşılıklı gelecek şekilde numune yüzeyine hafifçe bastırılarak yerleştirilmiş, digital ekranda ki geçiş süresinin sabit bir değer alması beklenmiş, okuma μs olarak kaydedilmiştir. Ses geçiş hızı eşitlik 3.1 kullanılarak numunelerin ses geçiş hızı hesaplanmıştır. Test işlemi her seri numune için üç tekrarlı olarak yapılmıştır.

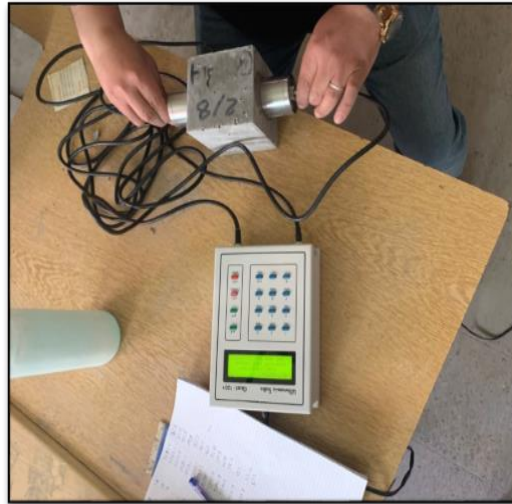
$$V = (S / t) 10^6 \quad (3.1)$$

Eşitlikte;

$V = P$ dalga hızı (km/sn),

$S =$ Numunenin yüzeyleri arasındaki mesafe (m),

$t = P$ dalganın geçiş süresi (μs)



Şekil 3.12 Ultrasonik geçiş hızı testi

3.4.4 Donma-Çözülme Testi

Donma-çözülme testi 100 x 100 x 100 mm boyutunda ki 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. KYB numunelere ASTM C 666-03 standardına uygun olarak test yapılmıştır. “ASTM C666-03 Hızlı Donma Çözölmeye Maruz Betonun Direncini Tespit Etmek İçin Standart Test Metodu” standardında tanımlanan A yöntemine göre işlem uygulanmış, donma-çözölme işlemi su içinde gerçekleştirilmiştir. Donma işleminde sıcaklık +4 °C’den -18 °C’ye düşürölmüş, çözölme de ise sıcaklık -18 °C’den +4 °C’ye yükseltilmiş ve her çevrim 4 saatte tamamlanmıştır. KYB numunelerine bu çerçevede 250 donma-çözölme çevrimi uygulanmış, 250 döngü sonrası numunelerin basınç dayanımları test edilmiştir. KYB numunelere uygulanan donma-çözölme test cihazı ve numuneler Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



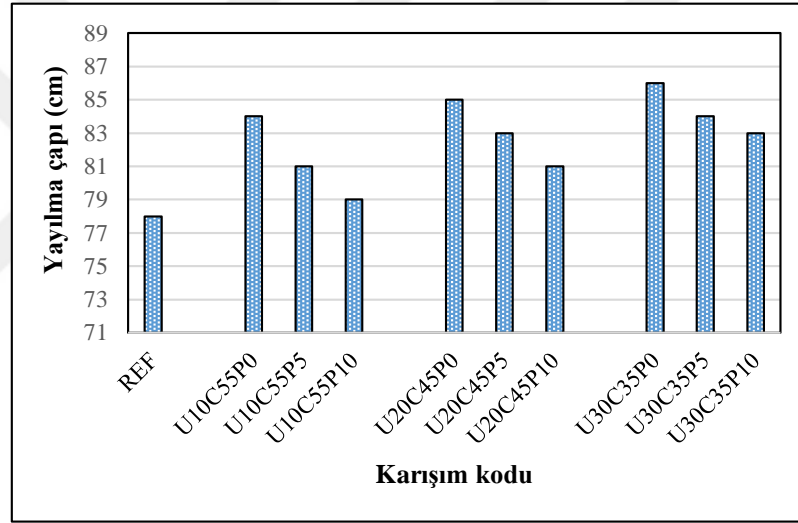
Şekil 3.13 Donma-çözölme test cihazı ve numuneler

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çökme-yayılma testi, basınç dayanımı, su emme, donma-çözülme ve ultrases geçiş hızı test sonuçlarından elde edilen veriler açıklanmıştır.

4.1 KYB'nin Taze Hal Özellikleri

KYB numunelerinin çökme-yayılma çapı değerleri Şekil 4.1'de sunulmuştur. Farklı oranlarda KYB karışımlarında yer alan UK, GYFC ve PT'nin KYB numunelerinin çökme-yayılma çapı üzerindeki etkileri Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te görülmektedir.

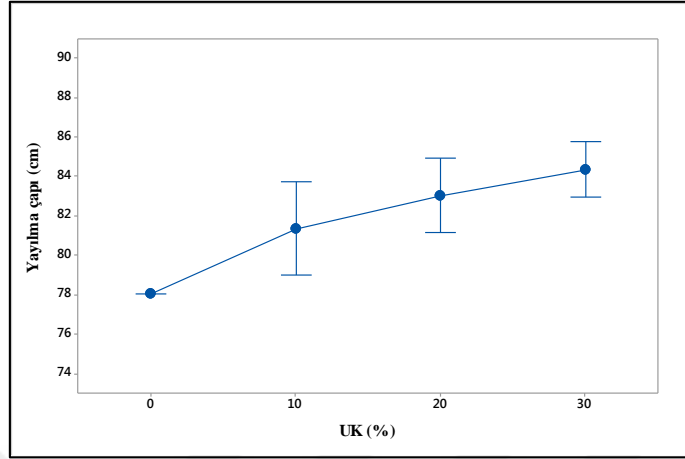


Şekil 4.1 KYB karışımlarının yayılma testi sonuçları

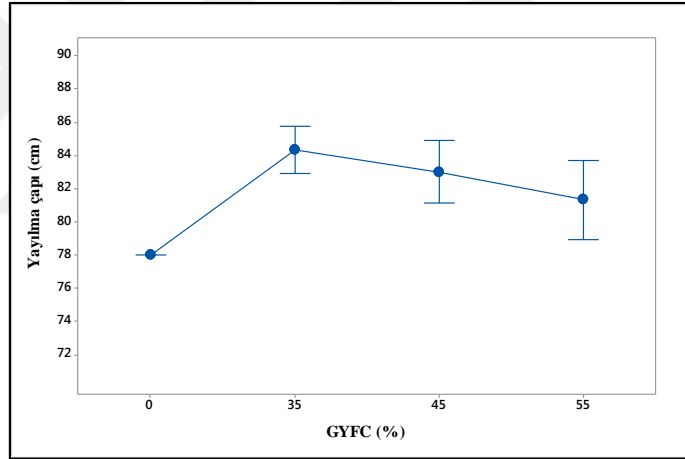
KYB numunelerinin yayılma çaplarının 78 - 88 cm arasında değiştiği Şekil 4.1'de görülmektedir. En düşük yayılma çapı 78 cm ile REF'de, en yüksek yayılma çapı 88 cm ile U30C35P0'de oluşmuştur.

Genel olarak, UK oranındaki artış tüm karışımlarda yayılma çaplarını arttırmıştır, UK'nın oluşturduğu bu etki Şekil 4.2'de görülmektedir. Zulu (2017); Uysal ve Sumer (2011), UK oranındaki artışın karışımın işlenebilirlik ve yayılma değerlerini arttırdığını, bu etkinin UK'nın küresel formundan kaynaklandığını, UK'nın çimento partiküllerinin topaklanmasını engellediğini, UK'nın agrega yüzeyleri arasında oluşturduğu yağlama etkisiyle daha yoğun beton akışı sağladığını belirtmiştir. Test

sonucu ile elde edilen değerlerin, önceki çalışmalarla benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.2 UK'nın KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi

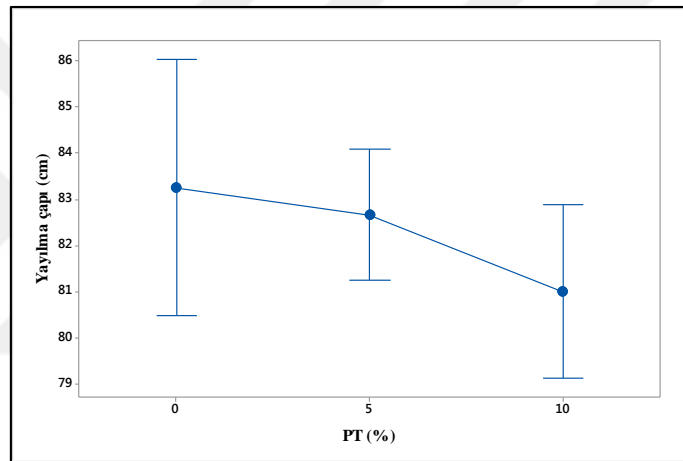


Şekil 4.3 GYFC'nin KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi

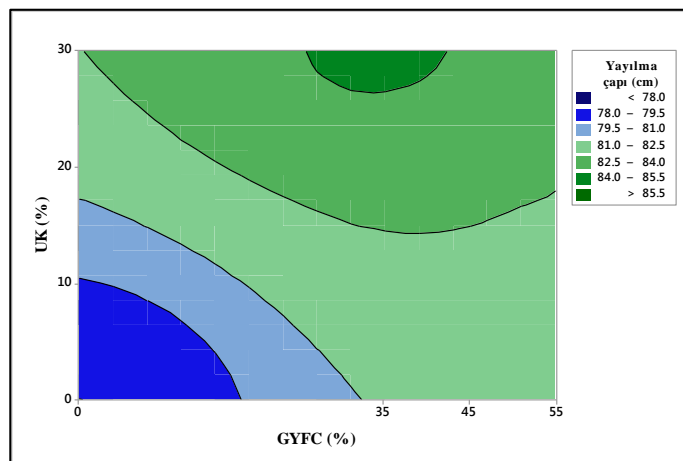
GYFC oranındaki artışın yayılma değerleri üzerinde oluşturduğu etki Şekil 4.3'te görülmektedir. %35 GYFC ikameli karışımların yayılma çapı 84 cm olarak gerçekleşmiş, ancak GYFC oranındaki artışların yayılma çapı değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. Chandrakar (2017), GYFC'nin %20 ikame oranlarına kadar çökme değerini arttırdığını, ikame oranlarında ki artışın yayılma değerleri üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu belirtmiştir. Yalley ve Sam (2018), yayılma değerindeki artışın, YFC'nin pürüzsüz ve ince yapısı sayesinde matristeki havanın sürüklenmesi ve pasta hacminde oluşturduğu artıştan kaynaklandığını, yayılma değerlerindeki düşüşün ise,

yüksek incelikteki GYFC partiküllerinin artan özgül yüzey alanı sonucu oluştuğunu ifade etmiştir.

PT ikame oranında ki artışın betonun yayılma değerlerini düşürdüğü Şekil 4.4'de görülmektedir. El Mir ve Nehme (2017), PT içeren karışımlarda yeterli yayılma sonuçları elde etmenin daha yüksek oranda akışkanlaştırıcı katkı gerektirdiğini, PT'nin su emme kabiliyetinin su talebini artırarak, karışımın işlenebilirliğini azalttığını belirtmiştir. Esfandiari ve Loghmani (2019), PT ikameli karışımlarda istenilen düzeyde bir işlenebilirliğin sağlanabilmesi için, daha yüksek oranda çimento, su ve süperakışkanlaştırıcıya gereksinim duyulduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 4.4 PT'nin KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi



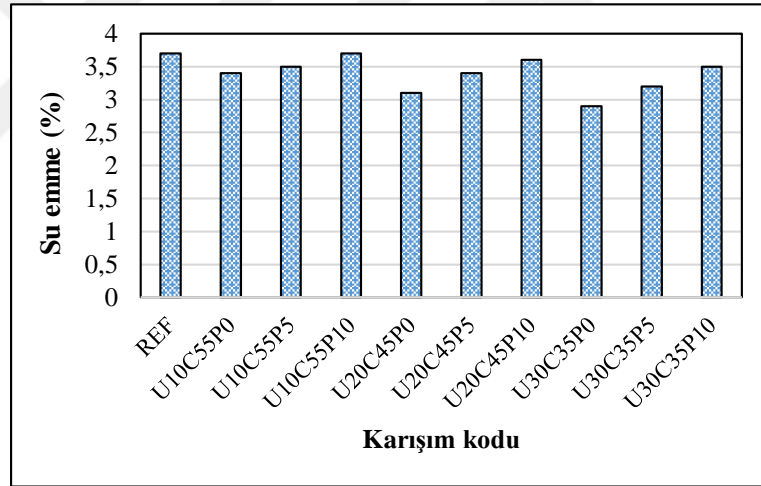
Şekil 4.5 UK ve GYFC'nin KYB karışımlarının yayılma değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.5, UK ve GYFC ikame oranlarında ki değişimin yayılma değeri üzerinde oluşturduğu etkiyi göstermektedir. En yüksek yayılma değeri %30 UK, %35 GYFC

ikame oranlarında, en düşük yayılma değeri ise UK ve GYFC ikamesiz REF kodlu karışımda elde edilmiştir.

4.2 Su Emme

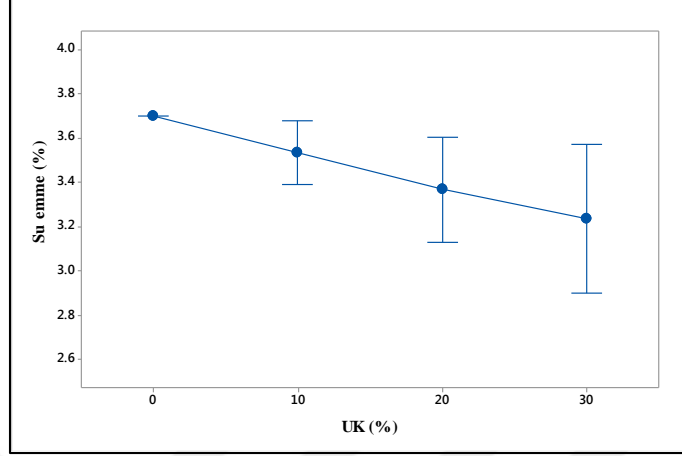
Çalışmada, 28 günlük KYB numunelerine su emme testi uygulanmıştır. UK, YFC ve PT ikame oranlarındaki değişimin KYB numunelerinin su emme değerleri üzerindeki etkisi Şekil 4.12'da verilmiştir. Test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, UK ve YFC katkılarının, tüm KYB numunelerinin su emme değerini düşürdüğü gözlenmiştir. Referans numunenin su emme değeri % 3.7 ile en yüksek değeri almış, % 2.9 ile en düşük su emme değeri ise U30C35P0 kodlu numunede elde edilmiştir. Ayrıca, PT ikame oranlarındaki artışın su emme değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür.



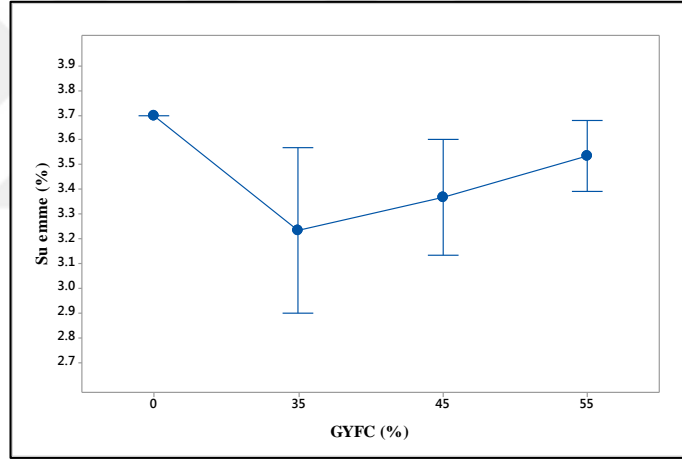
Şekil 4.6 KYB numunelerinin su emme değerlerinin değişimi

UK, GYFC ve PT'nin ayrı ayrı KYB numunelerin su emme özelliğine etkisi Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da görülmektedir. Grafik, UK oranlarındaki artışının su emme değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. Saleh Ahari vd. (2015), UK ikameli KYB numunelerinin 28. günde referans karışıma yakın ve daha düşük su emme değerlerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Foti vd. (2019)'de, UK ve GYFC içeren karışımların referans karışımdan daha düşük bir su emme kapasitesi gösterdiğini belirtmiştir. Wawrzeńczyk vd. (2016), betondaki YFC oranlarındaki artışın su emme üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğunu, Salih Ahari vd. (2015), C sınıfı UK ve GYFC numunelerinin, su

emme değerlerinin sırasıyla 28 ve 90 günlük referans karışıma göre benzer ve düşme eğilimi olduğunu belirtmişlerdir.



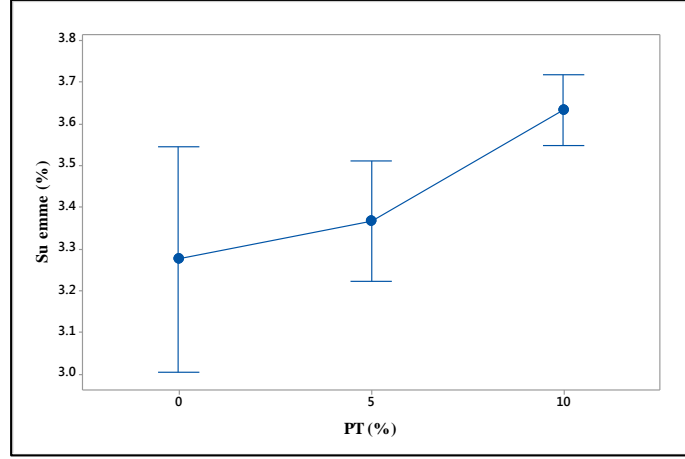
Şekil 4.7 UK'nın KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi



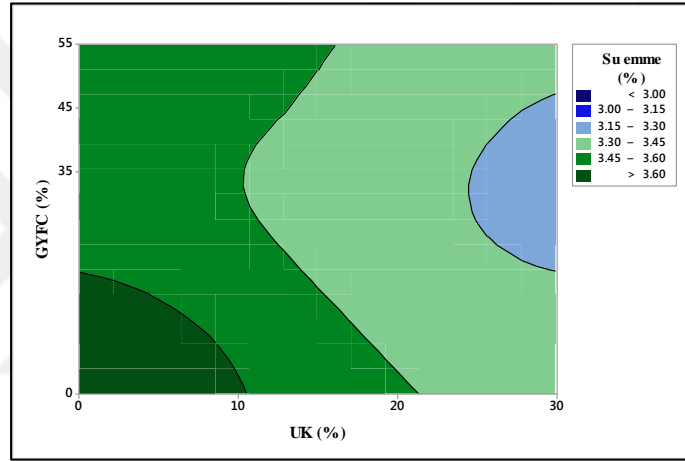
Şekil 4.8 GYFC'nin KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi

PT katkısı ve oranlarındaki artışın KYB numunelerinin su emme değerlerini arttırdığı görülmektedir (Şekil 4.9). Esfandiari ve Loghmani (2019), PT'nin su emme kapasitesinden dolayı PT ikamesinin porozite ve su emme değerlerini arttırdığını ifade etmiştir.

KYB numunelerinin en düşük su emme değeri %30 UK, %35 GYFC ikame oranlarında elde edilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.9 PT'nin KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi



Şekil 4.10 UK ve GYFC'nin KYB numunelerinin su emme özelliklerine etkisi

4.3 KYB'nin Mekanik Özellikleri

3, 7, 28 ve 90 gün süreyle SK ve LK ortamında kesintisiz kür uygulanan KYB numunelerinin basınç dayanımı değerleri Tablo 4.1'de sunulmuştur. Numunelerin basınç dayanımlarının, UK, GYFC ve PT ikame oranlarına, kür koşullarına ve olgunlaşma sürelerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği test sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Tablo 4.1. KYB numunelerinin basınç dayanımı değerleri

Karışım kodu	Basınç dayanımı (MPa)							
	3 Günlük		7 Günlük		28 Günlük		90 Günlük	
	SK	LK	SK	LK	SK	LK	SK	LK
REF	67,70	71,70	76,60	81,80	90,32	91,52	92,50	94,16
U10C55P0	34,30	46,70	62,70	72,30	82,03	86,93	89,19	90,51
U10C55P5	33,50	43,70	60,20	65,30	81,74	82,22	92,58	94,40
U10C55P10	31,10	40,70	57,80	62,70	78,61	80,12	90,58	92,38
U20C45P0	37,70	50,20	65,80	74,20	84,46	88,45	95,25	97,19
U20C45P5	36,30	45,50	63,40	69,00	82,17	87,23	94,68	96,14
U20C45P10	35,90	42,80	61,20	66,50	81,56	84,88	92,11	93,15
U30C35P0	39,50	54,90	67,10	77,60	86,71	89,53	94,88	95,18
U30C35P5	37,90	51,20	67,40	75,50	85,72	87,14	95,57	100,89
U30C35P10	36,90	47,50	64,11	71,10	85,69	86,22	93,98	98,55

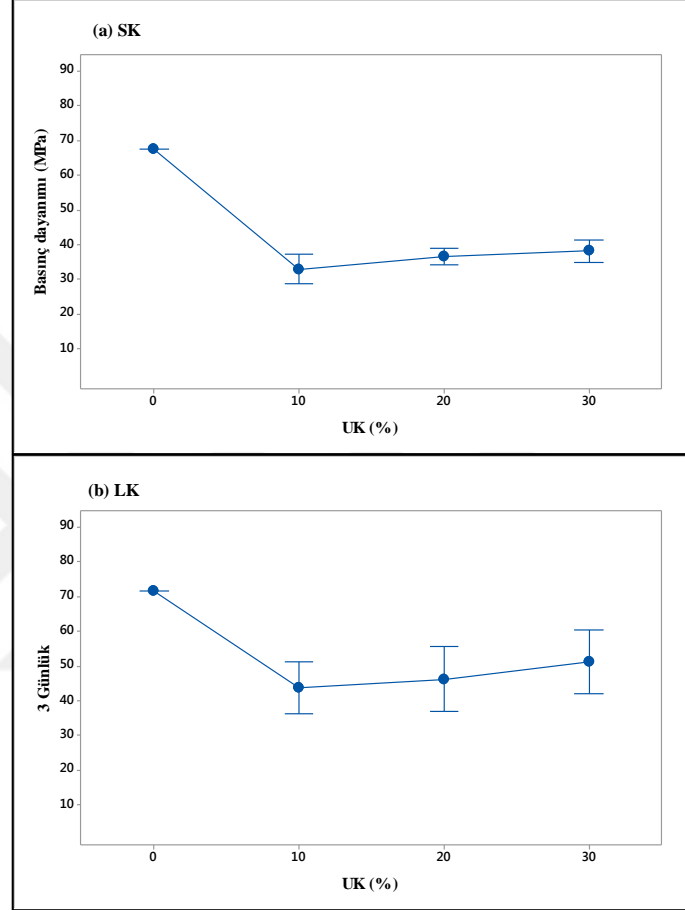
U: UK, C: GYFC, P: PT

3.3.1 3 Günlük Basınç Dayanımı

Farklı kür koşulları ve değişken UK, GYFC ve PT ikame oranlarına bağlı olarak belirlenen KYB numunelerinin 3 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiş ve açıklanmıştır.

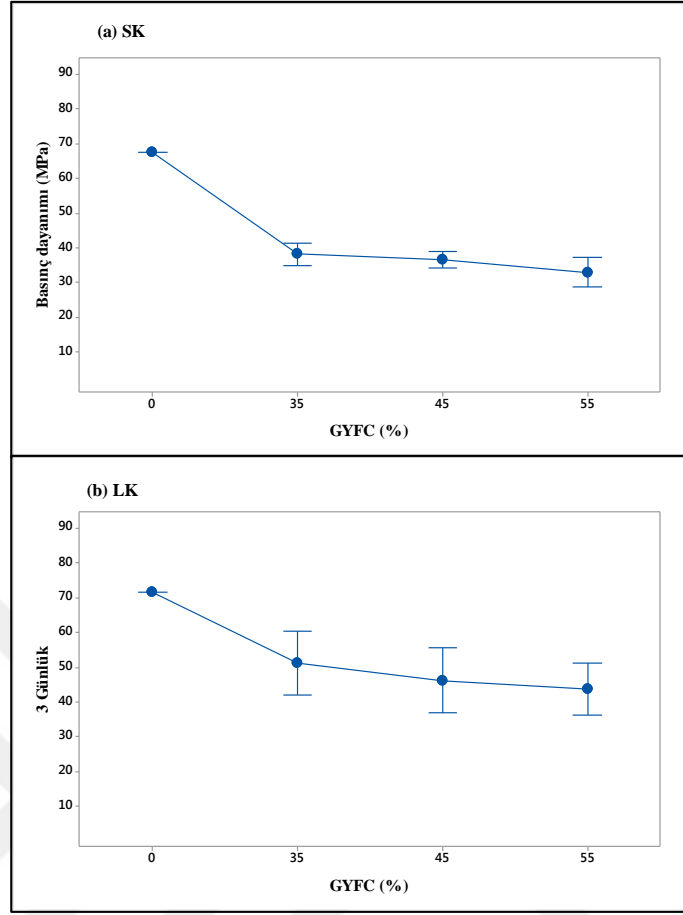
SK ve LK koşullarında UK'nin KYB numunelerinin mekanik özellikleri üzerinde ki etkisi Şekil 4.11'de verilmiştir. Her iki kür koşulunda da UK içeriğindeki artış, 3

günlük basınç dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturarak basınç dayanımlarının artmasını sağlamıştır. UK'nin erken yaşlarda basınç dayanımı üzerinde oluşturduğu bu etki, yüksek incelikteki UK'nin betonun mikro yapısında oluşturduğu filler etkisi ile açıklanabilir (Nguyen vd., 2016).



Şekil 4.11 UK'nin 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Şekil 4.12, SK ve LK'nin farklı GYFC içeriklerine sahip KYB numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Her iki kür koşulunda da basınç dayanımı değerleri, GYFC içeriğinin artmasıyla düşme eğilimi göstermiştir. Tüm karışımlar da basınç dayanımı değerleri R karışımından daha düşük değerler almıştır. GYFC PÇ'ye (yani, >%60) oranla daha düşük bir CaO içeriğine (yani, ~%40) sahip olduğundan GYFC %'sinde ki artış ile birlikte CaO içeriği azalır, bu durum da daha düşük bir hidrasyon gelişimine ve daha düşük erken yaş dayanımına yol açar (Gholampour ve Özbakkaloğlu, 2017).

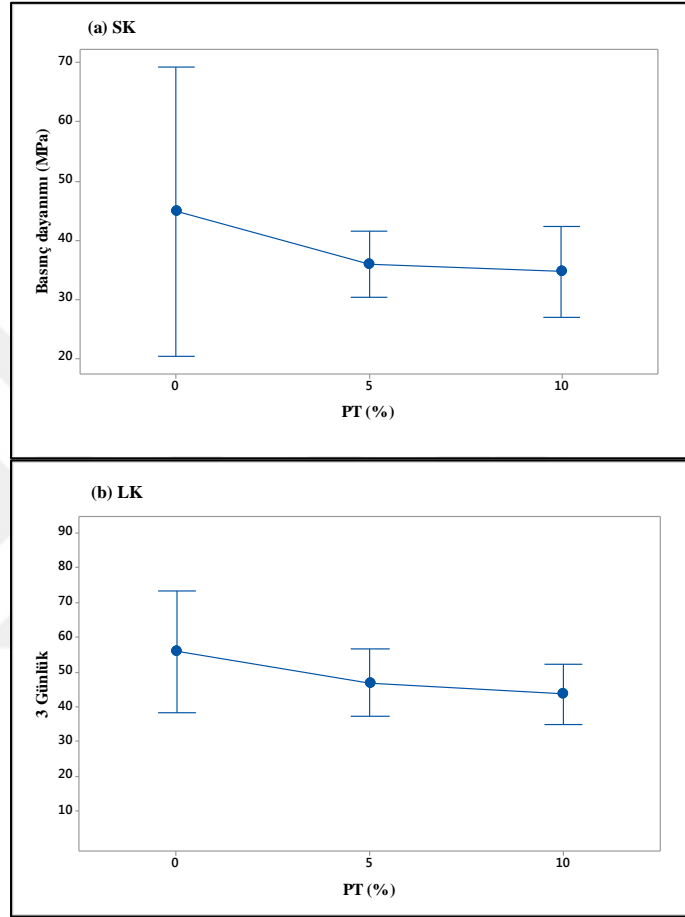


Şekil 4.12 GYFC'nin 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

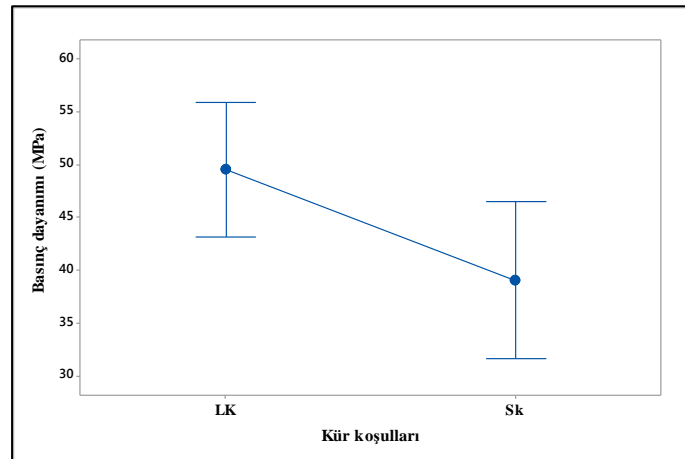
Farklı PT içeriklerine sahip KYB numunelerinin basınç dayanımı, PT içeriğindeki artış ile birlikte düşme eğilimi göstermiştir. Okuyucu (2011), PT'nin erken yaşlarda basınç dayanımını düşürdüğünü, ayrıca PT'nin erken yaşlarda daha düşük bir puzolanik aktiviteye sahip olduğunu belirtmiştir. Ancak SK'de aynı seride ki numuneler arasındaki basınç farkının daha düşük, LK'de ise daha yüksek gerçekleştiği görülmüştür. Bu etkinin, yüksek incelikteki PT'nin KYB numuneleri üzerinde oluşturduğu içsel kütleme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

3 Günlük numunelerde en yüksek dayanım ikamesiz referance numunede LK koşulunda elde edilmiştir. PT ikamesiz, LK ortamında olgunlaştırılan, UK ve GYFC ikameli U10C55P0, U20C45P0 ve U30C35P0 kodlu numunelerde de hem SK uygulanan mineral katkı numunelerden, hem de LK uygulanan PT katkı numunelerden daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. 32 ± 1 °C sıcaklık ve yüksek rutubet ortamının REF numunenin ve UK ve GYFC ikameli numunelerin basınç dayanımlarının artışında etkili olduğu görülmüştür.

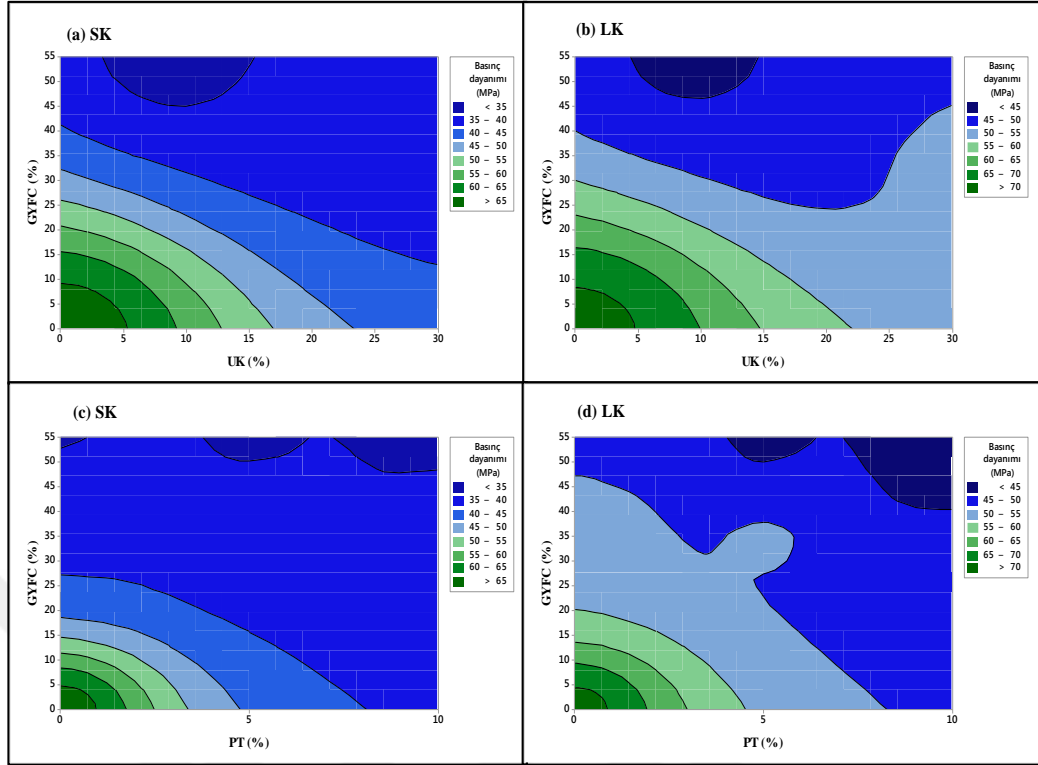
SK ve LK koşullarında olgunlaştırılan KYB numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları Şekil 4.15'te, hedef basınç dayanımı 50,0 - >70,0 MPa aralığında alındığında optimum GYFC, UK ve PT oranları Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.13 PT'nin 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi



Şekil 4.14 Kür yönteminin 3 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi



Şekil 4.15 3 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları

Tablo 4.2 3 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları

Kür koşulu	İkame malzeme bileşenleri	3 günlük		
		GYFC (%)	UK (%)	PT (%)
SK	GYFC-UK	26,0	17,0	
	GYFC-PT	15,0		4,0
LK	GYFC-UK	30,0	22,0	
	GYFC-PT	20,0		5,0

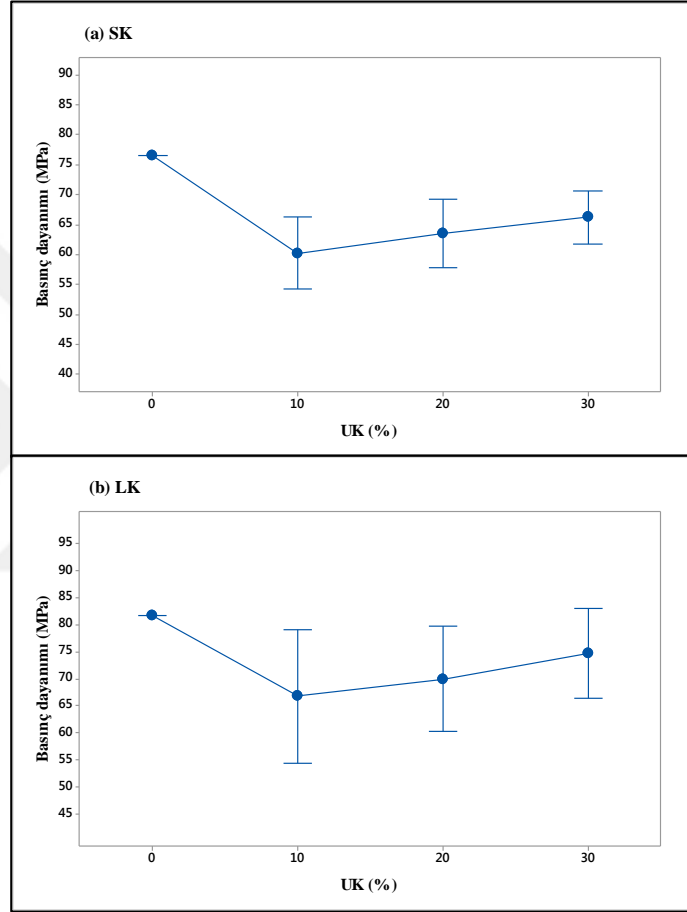
3.3.2 7 Günlük Basınç Dayanımı

SK ve LK ortamında bekletilen, UK, GYFC ve PT ikameli 7 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımı değerleri Şekil 4.16, 4.17, 4.18 ve 4.19'da görülmektedir.

7 Günlük basınç dayanımları irdelendiğinde en yüksek basınç dayanımı değerleri 76,60 MPa ve 81,80 MPa olarak REF kodlu numunelerde sırasıyla SK ve LK'de belirlenmiştir. Mineral katkı ikameli numunelerde ise en düşük dayanım SK uygulanan U10C55P10 numunelerde, en yüksek dayanım ise LK uygulanan U30C35P0 kodlu

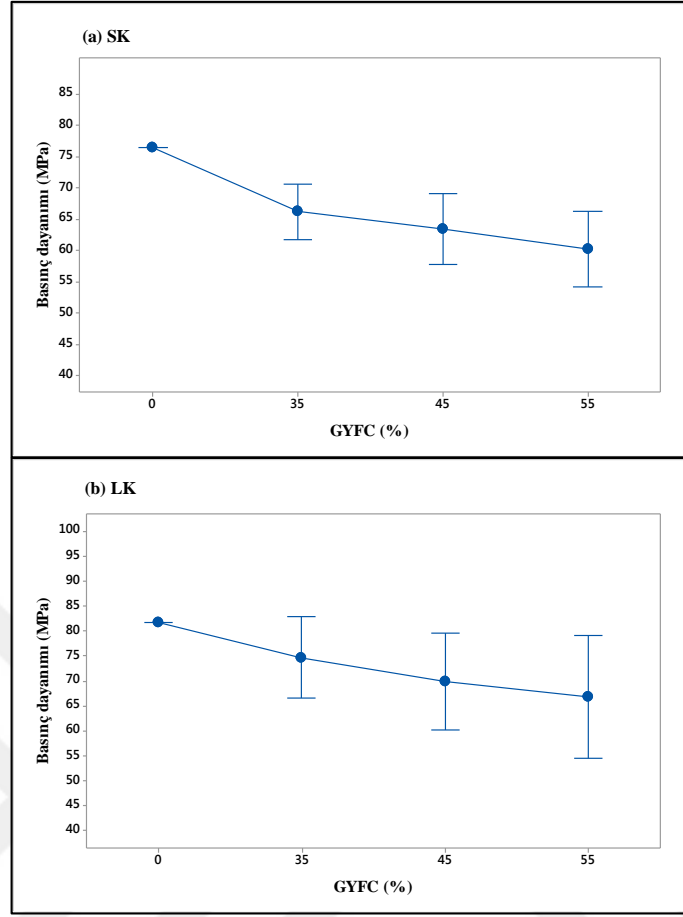
numunelerde elde edilmiştir. Tüm seriler dikkate alındığında LK uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerlerinin SK'den yüksek değerler aldığı gözlenmiştir.

Farklı UK ikame oranlarının 7 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkisi Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16 UK'nın 7 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

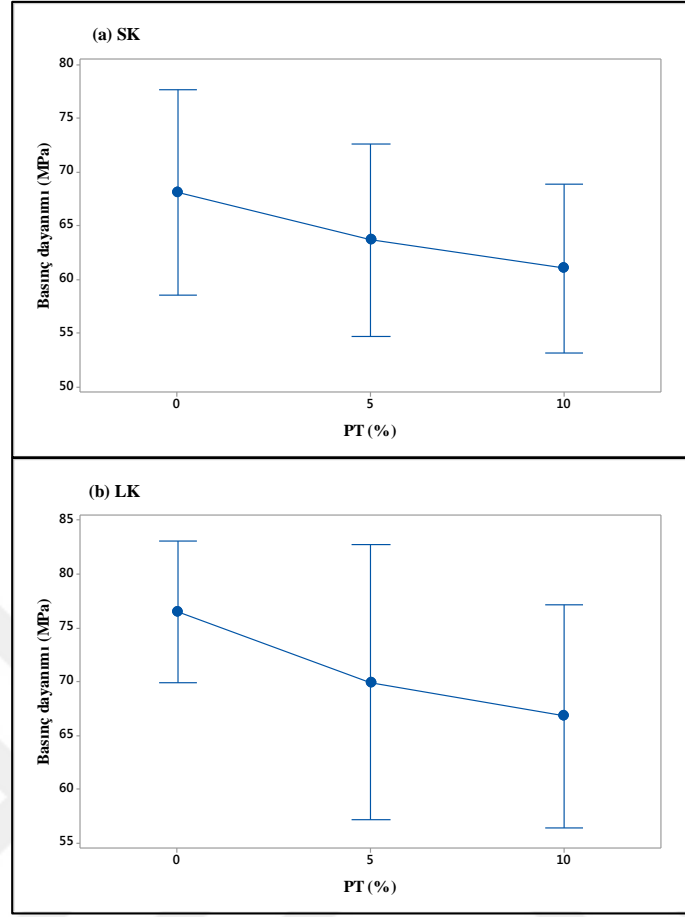
UK oranında ki artış, her iki kür koşulunda da basınç dayanımı değerlerini arttırmıştır. Material ve Moh (2005) çimento hamuru içerisinde yer alan daha ince yapıdaki UK'nın, UK katkılı çimento hamurunun basınç dayanımı üzerinde, hidrasyon gelişimi, packing effect ve puzolanik reaksiyon etkileri ile etkili olduğunu ifade etmiştir. Daha yüksek incelikteki UK çimento hamuruna, daha hızlı puzolanik reaksiyon gelişimi ve sıkılaştırma etkisi sağlayarak, daha yüksek mekanik dayanım kazandırır.



Şekil 4.17 GYFC'nin 7 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi

GYFC oranında ki artışın, 7 günlük basınç dayanım değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir (Şekil 4.17). GYFC'nin düşük reaksiyon hızı basınç dayanım değerlerini üzerinde olumsuz bir etki oluşturmuştur. Ramezianpour, (2014), GYFC'nin, karışım tasarımı, puzolanik aktivite, kimyasal kompozisyon, kür süresi ve incelik gibi özellikleri ile betonun basınç dayanımını etkilediğini belirtmiş, Kuder vd. (2012)'de, mineral katkıların puzolanik reaksiyonun yavaş geliştiğini ifade etmişlerdir.

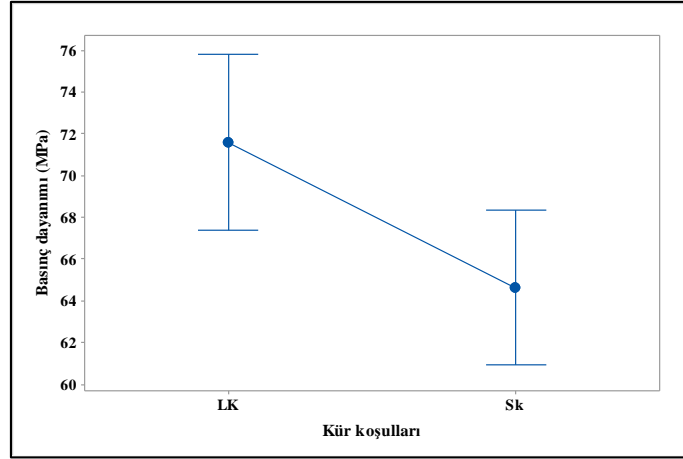
Şekil 4.18'de, değişen PT oranlarının her iki kür koşulunda da KYB numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi verilmiştir. PT ikamesi 7 günlük basınç dayanımı değerlerini olumsuz etkilemiştir, ancak LK'de basınç dayanımı değerlerinin arttığı, %5 PT katkı oranının basınç dayanımları üzerinde daha olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir. Motahari vd. (2018), ilk günlerde PT ikame oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğünü, Ramezianpour vd. (2016)'de, PT katkılı karışımların boşluklu yapıları nedeniyle, daha düşük yoğunluk ve basınç dayanımına neden olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.18 PT'nin 7 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi

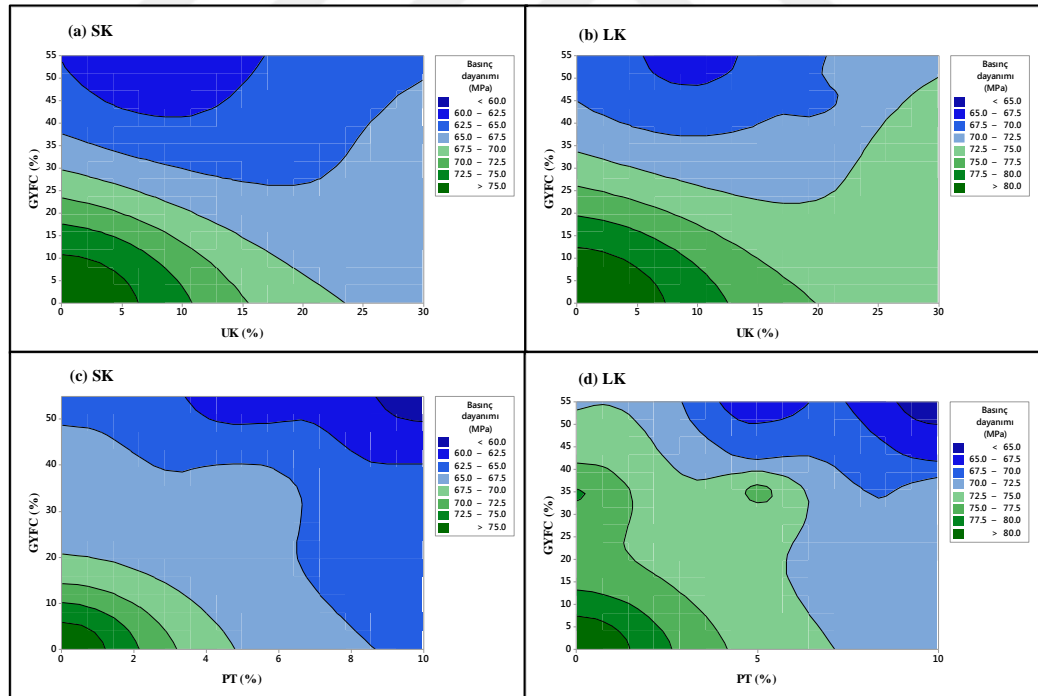
Kür koşullarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.19'da verilmiştir. LK, basınç dayanım değerleri üzerinde daha etkili olmuştur. Bu durum, kür sıcaklığının hidrasyon gelişimi üzerinde oluşturduğu hızlandırma etkisi ile açıklanabilir (Narmluk ve Nawa, 2011). Barnett vd. (2006), GYFC katkılı karışımların erken yaş dayanımlarının önemli ölçüde kür sıcaklığına bağlı olduğunu, standart kür koşullarında GYFC katkılı harçların PÇ harçlardan daha yavaş dayanım kazandığını, bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda erken yaş dayanımlarının arttığını, standart kür sıcaklığının 10 °C üstündeki kür koşullarının yüksek oranda GYFC katkılı harçların dayanımlarını önemli ölçüde arttırdığını ifade etmişlerdir.

U30C35P serisi numunelerin 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarının hem SK, hem de LK'de diğer serilerden yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.19 Kür koşullarının 7 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi

SK ve LK koşullarında olgunlaştırılan KYB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları Şekil 4.20'de, hedef basınç dayanımı 67,5 - >80,0 MPa aralığında alındığında optimum GYFC, UK ve PT oranları Tablo 4.3'de verilmiştir.



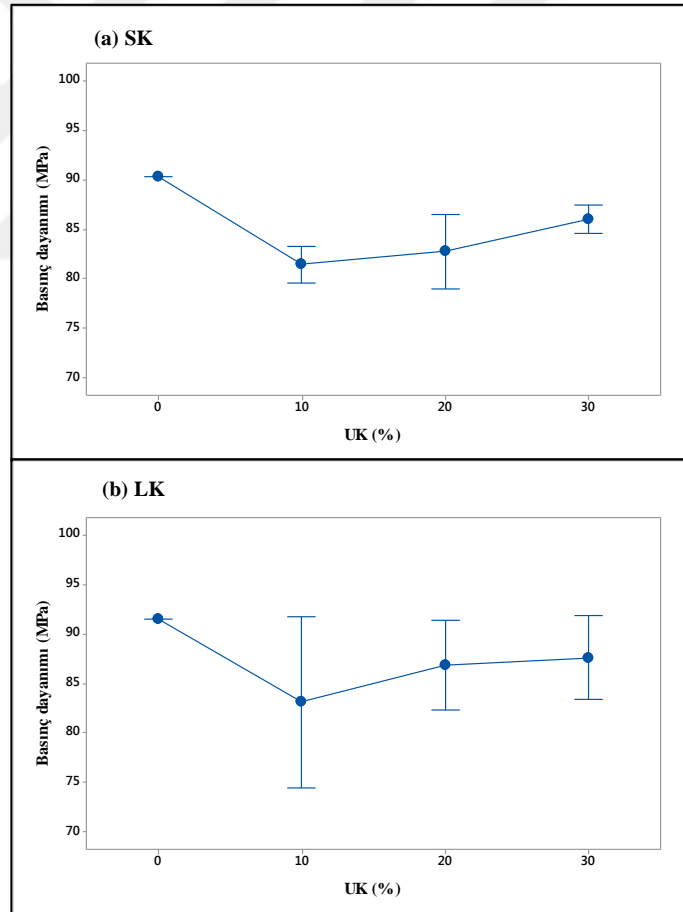
Şekil 4.20 7 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları

Tablo 4.3 7 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları

Kür koşulu	İkame malzeme bileşenleri	7 günlük		
		GYFC (%)	UK (%)	PT (%)
SK	GYFC-UK	30,0	24,0	
	GYFC-PT	20,0		5,0
LK	GYFC-UK	50,0	30,0	
	GYFC-PT	53,0		7,0

3.3.3 28 Günlük Basınç Dayanımı

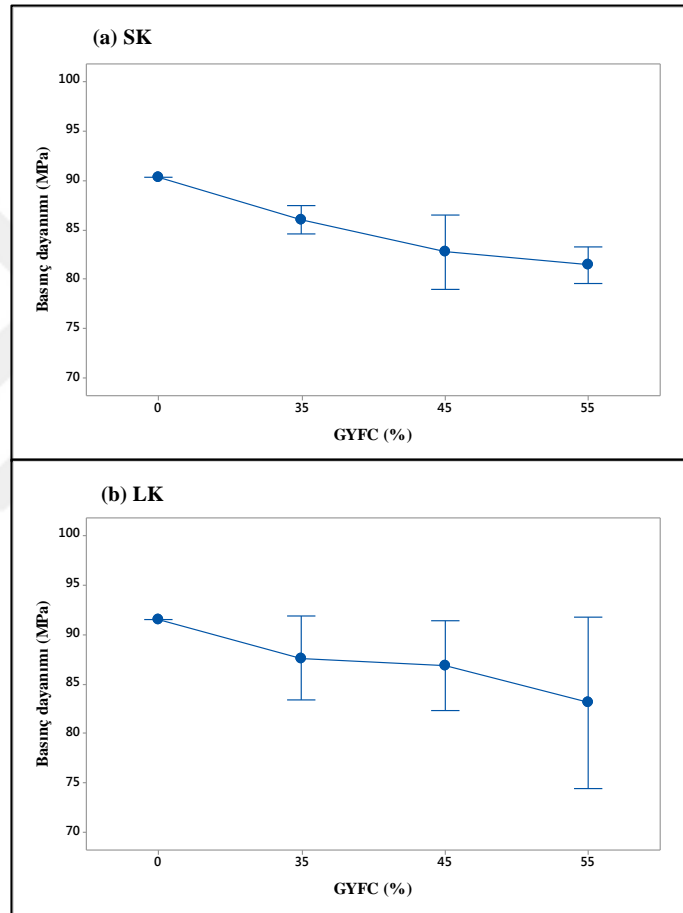
Mineral katkılı KYB numunelerinin farklı kür koşulları etkisindeki 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'te görülmektedir.



Şekil 4.21 UK'nın 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi

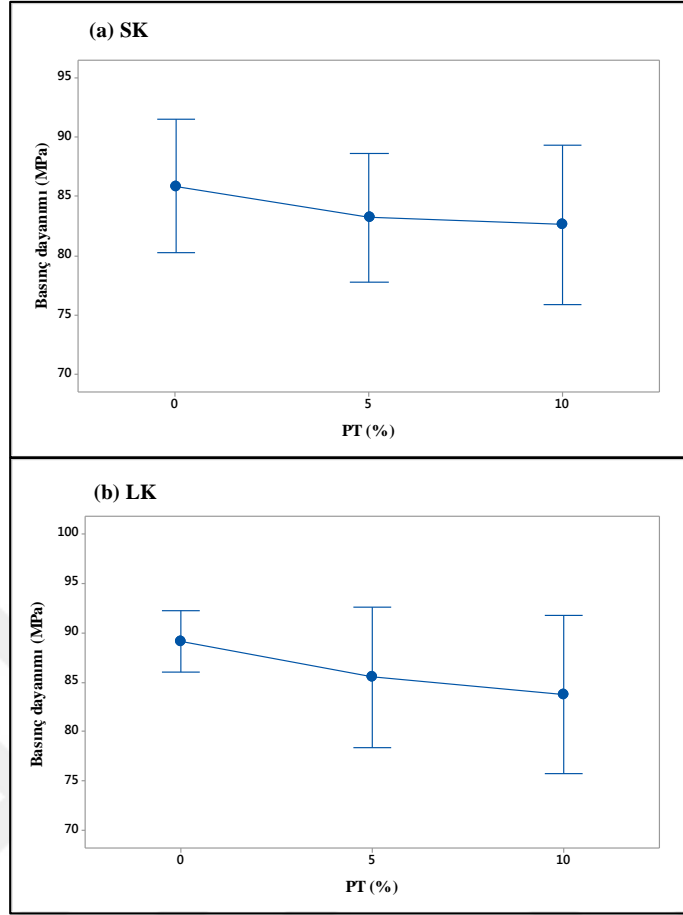
SK ve LK'nin, UK ikame oranlarına bağlı olarak KYB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.21'de gösterilmiştir. UK oranlarındaki

artışın, her iki kür koşulunda da basınç dayanım değerleri üzerinde olumlu etki oluşturduğu gözlenmiştir. En yüksek mekanik dayanım SK ve LK'de U30C35P0 kodlu numunelerde sırasıyla, 86,71 MPa ve 89,53 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler R'nin basınç dayanımının yaklaşık %98'ine eşdeğerdedir. Gönen (2007), UK içeriğinin artması ile basınç dayanımında sağlanan iyileşmenin, UK katkılı çimentolu sistemlerde gerçekleşen puzolanik reaksiyonların 28 gün sonra baskın hale gelmesinden kaynaklanabileceğini ifade etmiştir.

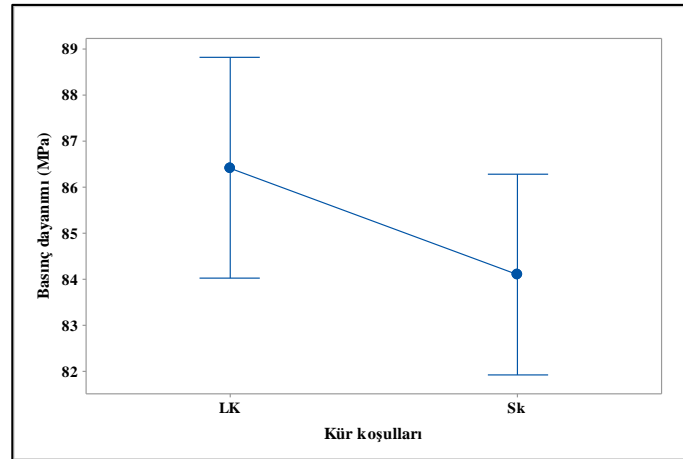


Şekil 4.22 GYFC'nin 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi

GYFC ikame oranında ki artışın 28 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkisi Şekil 4.22'de görülmektedir. GYFC içeriğindeki artışın, her iki kür koşulunda da basınç dayanım değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. GYFC ikameli KYB serileri arasında oluşan basınç dayanımı değişimlerinin SK uygulanan numunelerde daha belirgin olduğu, LK uygulanan numunelerde %35, %45 ikame oranlarında hemen hemen aynı değerleri aldığı, %55 GYFC katkılı numunelerde ise farkın arttığı belirlenmiştir.



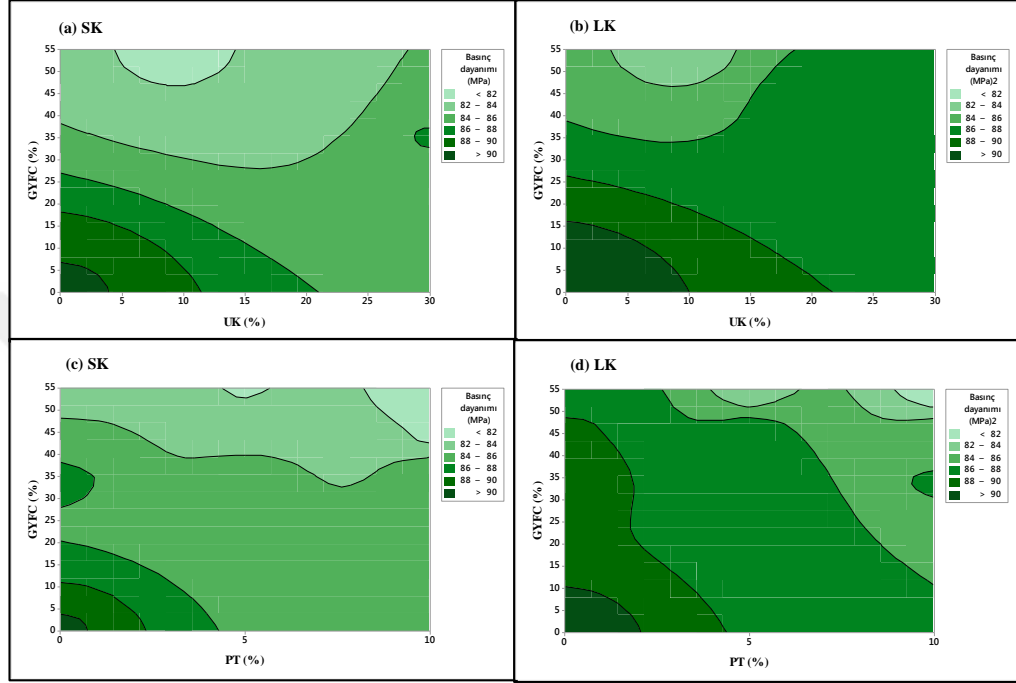
Şekil 4.23 PT'nin 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi



Şekil 4.24 Kür yöntemlerinin 28 günlük basınç dayanımına etkisi

PT ikame oranlarının 28 günlük basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkisi Şekil 4.23'te gösterilmiştir. PT oranlarındaki artış sınırlı düzeyde de olsa her iki kür koşulunda da basınç dayanım değerlerini düşürmüştür.

LK'nin 3 ve 7 günlük PT katkıli numunelerde oluşturduğu etkinin 28 günlük numunelerde aynı düzeyde gerçekleşmediği belirlenmiştir. LK'nin 28 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımları üzerinde daha etkili olduğu Şekil 4.24'te görülmektedir.



Şekil 4.25 28 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları

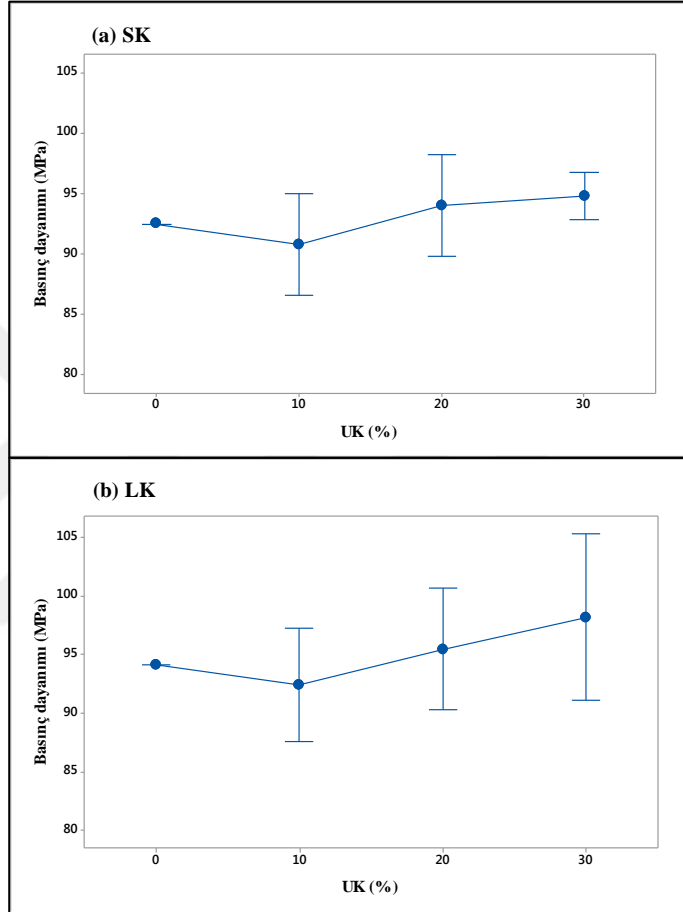
SK ve LK koşullarında olgunlaştırılan KYB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları Şekil 4.25'te, hedef basınç dayanımı 84,0 - > 90,0 MPa aralığında alındığında optimum GYFC, UK ve PT oranları Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4 28 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları

Kür koşulu	İkame malzeme bileşenleri	28 günlük		
		GYFC (%)	UK (%)	PT (%)
SK	GYFC-UK	55,0	30,0	
	GYFC-PT	48,0		10,0
	GYFC-UK	55,0	30,0	
	GYFC-PT	55,0		10,0

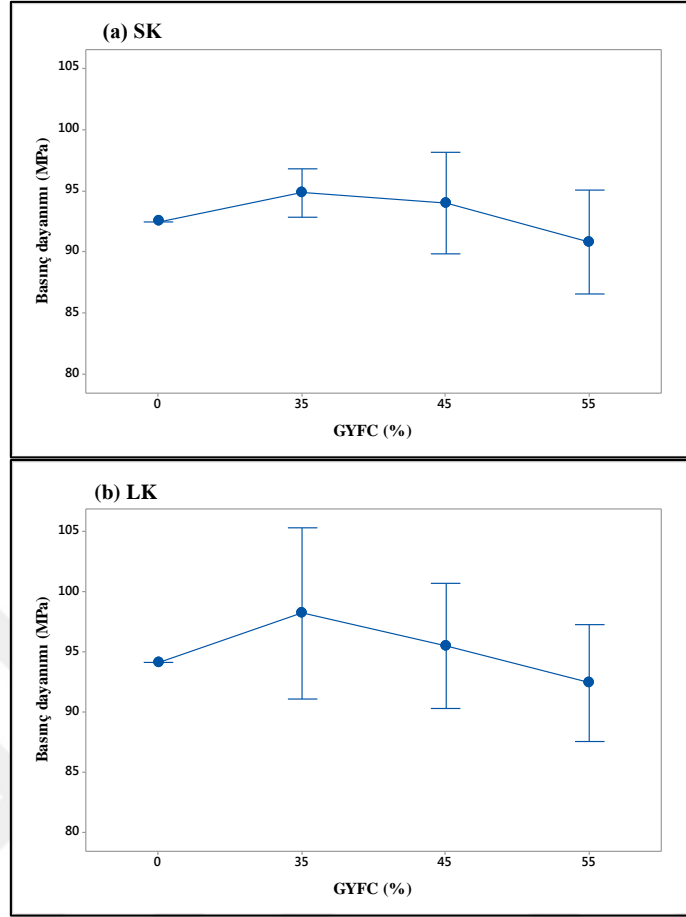
3.3.4 90 Günlük Basınç Dayanımı

Farklı GYFC, UK ve PT ikame oranları ile kür koşulları arasındaki ilişki ve buna bağlı olarak gerçekleşen KYB numunelerinin basınç dayanım değerleri Şekil 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.26 UK'nın 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

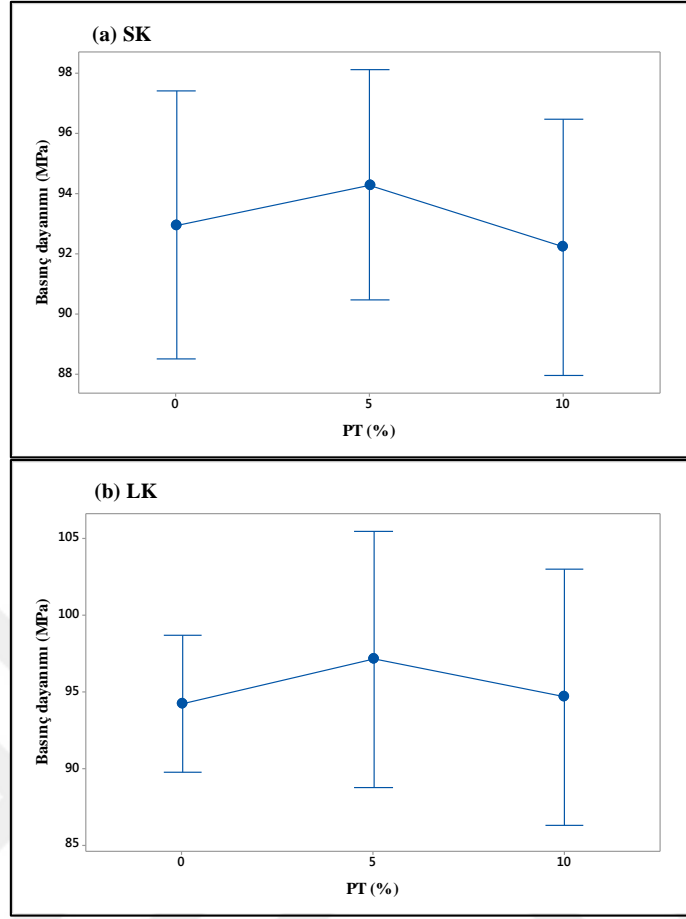
UK'nin 90 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.26'da gösterilmiştir. SK ve LK'nin KYB numuneleri üzerinde oluşturduğu etkinin benzerlik gösterdiği, aynı serideki numuneler arasındaki basınç dayanımı farklılıklarının azaldığı belirlenmiştir. U10C55P0 ve U10C55P10 kodlu numunelerin haricindeki diğer numunelerin basınç dayanımı değerlerinin Referans numuneye yakın veya üzerinde gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4.27 GYFC'nin 90 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.27, GYFC'nin 90 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. %35 GYFC ikame oranı KYB numunelerinin basınç dayanımlarını arttırmış, %45 ve %55 ikame oranları ise basınç dayanımı değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Öner ve Akyüz (2007), GYFC oranlarının aşırı artışından dolayı reaksiyona giremeyen GYFC'nin, maksimum bir noktadan sonra dayanım eğrilerinde düşme eğilimine neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, reaksiyona giremeyen GYFC'lerin, ince agrega gibi davrandığını göstermektedir.

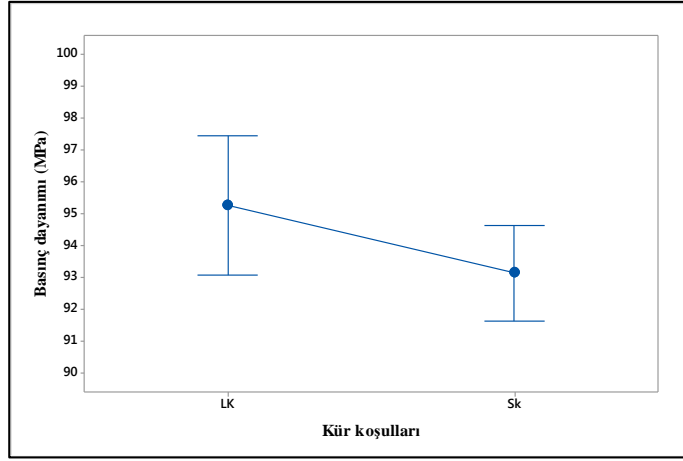
SK, LK ve PT ikame oranlarındaki değişimin 90 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.28'de görülmektedir. Her iki kür koşulunda da %5'lik PT ikame oranının basınç dayanımı değerlerini arttırdığı, U30C35P10 serisi numunelerin LK'de PT katkısız numunelerden daha yüksek basınç dayanımları verdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.28 PT 'nin 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

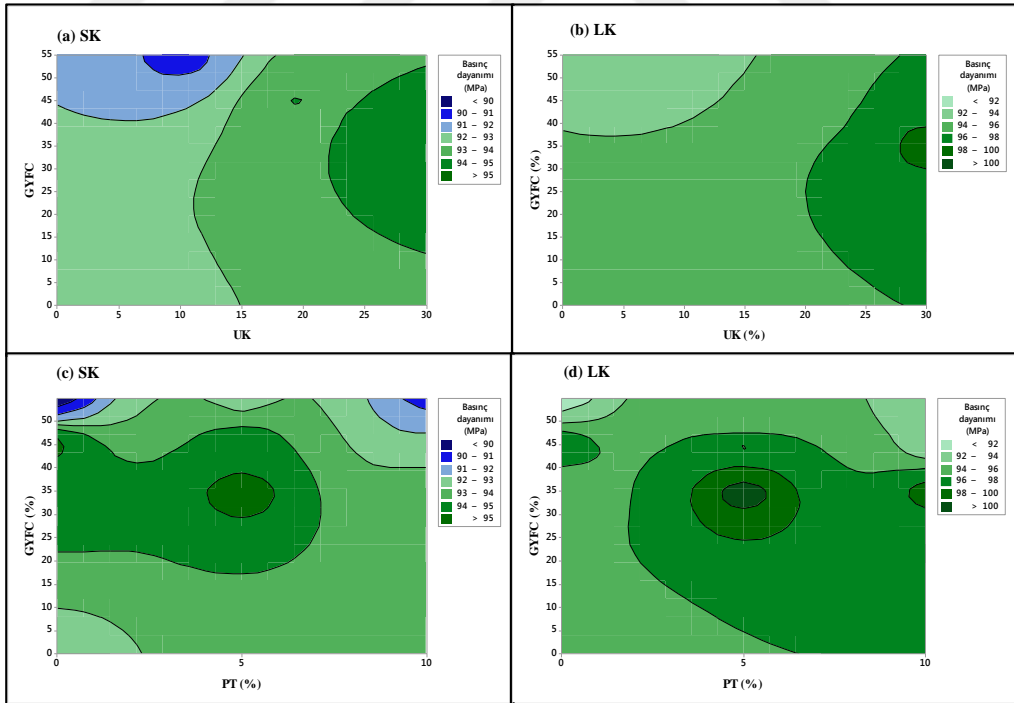
LK'nin 90 günlük basınç dayanımları üzerinde sınırlı bir etki oluşturduğu Şekil 4.29'da görülmektedir. Aparicio vd., (2016), kür sıcaklığının, hidrasyon süreci üzerinde olumlu etki oluşturarak basınç dayanım değerlerini arttırdığını ve bunun çok sayıda çalışmada görüldüğünü ifade etmişlerdir.

U20C45P ve U30C35P serisinde ki numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri U10C55P serisi numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek gerçekleşmiştir. En yüksek basınç dayanımı 100,89 MPa olarak U30C35P5 kodlu numunede LK'de elde edilmiş, bunu 98,55 MPa değerle LK uygulanan U30C35P10 kodlu numune izlemiştir. Bu değerler, PT'nin ileri yaşlarda oluşturduğu puzolanik etki ile açıklanabilir.



Şekil 4.29 Kür yöntemlerinin 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisi

SK ve LK koşullarında olgunlaştırılan KYB numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları Şekil 4.30'da, hedef basınç dayanımı $> 95,0$ MPa alındığında, optimum GYFC, UK ve PT oranları Tablo 4.5'de verilmiştir.



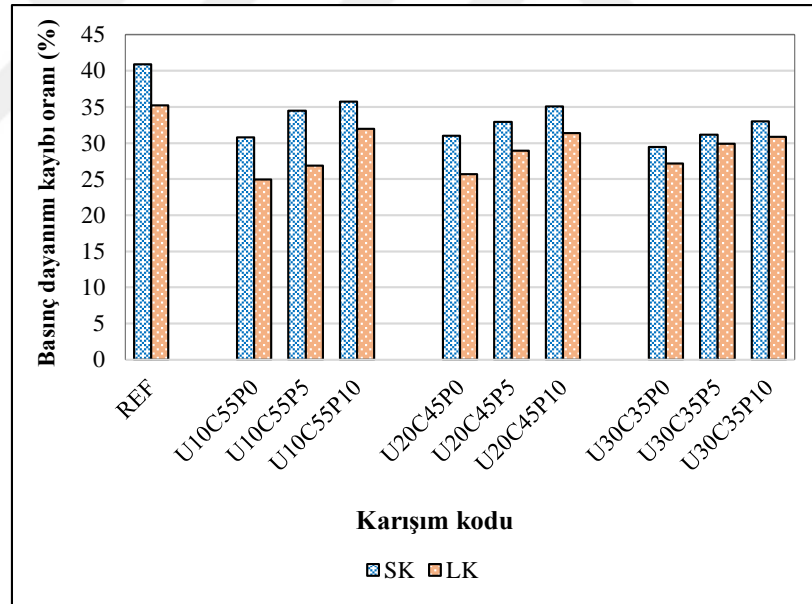
Şekil 4.30 90 Günlük basınç dayanımları için optimum GYFC-UK ve GYFC-PT oranları

Tablo 4.5 90 Günlük basınç dayanımı için optimum GYFC, UK ve PT oranları

Kür koşulu	İkame malzeme bileşenleri	GYFC (%)	UK (%)	PT (%)
SK	GYFC-UK	11,0 - 52,0	22,0 - 30,0	
	GYFC-PT	16,0 - 48,0		0,0 - 7,0
LK	GYFC-UK	0,0 - 55,0	20,0 - 30,0	
	GYFC-PT	0,0 - 48,0		3,0 - 10,0

4.4 Donma-Çözülme Sonuçları

UK, GYFC ve PT katkılı ve Referans KYB numunelerinin durabilite performansını değerlendirmek amacıyla, KYB numunelerine 3. Bölümde tanımlandığı gibi 250 donma-çözülme çevrimi uygulanmış ve daha sonra da numunelerin basınç dayanımları test edilmiştir.



Şekil 4.31 KYB numunelerinin 250 döngü sonrası basınç dayanım kaybı oranları

UK, GYFC ve PT'nin farklı çimento ikame oranlarına bağlı olarak, REF ve deneme numunelerinin basınç dayanımı kayıp oranları Şekil 4.31'de gösterilmiştir.

Şekil 4.31'de verildiği gibi en yüksek basınç dayanımı kayıpları her iki kür koşulunda da REF numunelerde gerçekleşmiştir. Genel olarak SK uygulanan tüm numunelerin basınç dayanım kayıp oranlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Her iki kür koşulu ve tüm karışımlarda UK, GYFC ve PT ikamesinin basınç dayanımı kayıplarını azalttığı görülmektedir. Bu durum, geliştirilmiş ve daha yoğun bir mikroyapı oluşumunun yanı sıra, arayüzey geçiş bölgesinin porozitesinin azalması sonucu donma-çözülme etkisi üzerinde daha iyi bir direnç sağlamasıyla açıklanabilir (Alimohammad vd., 2019). Puzolanik aktivite artan miktarda C-S-H jeli oluşturularak mikroyapıyı iyileştir, boşlukları azaltır (Abed ve Nemes, 2019).

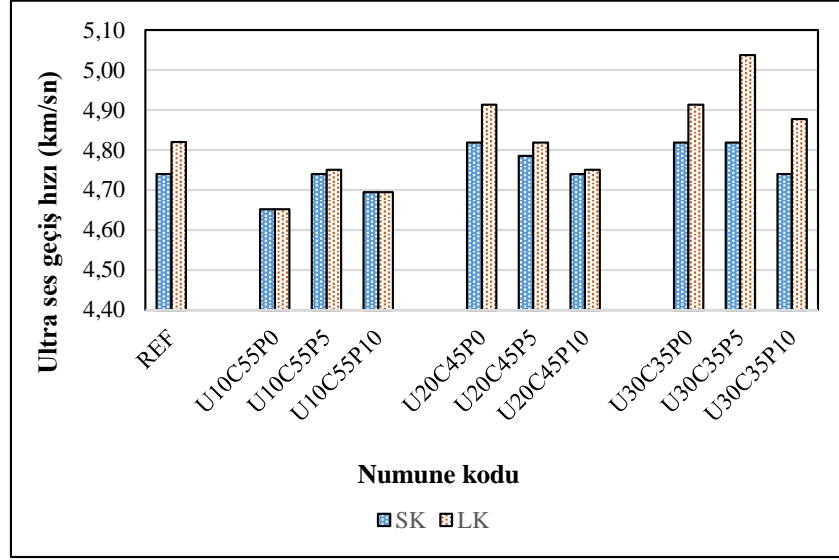
Referans karışım ile elde edilen basınç dayanım kaybı oranı, SK ve LK'de sırasıyla %40,9 ve %35,2. KYB'nin çimento ikamesi ile deneme numunelerinin, SK'de kaydedilen en yüksek basınç dayanım kaybı U20C45P10 kodlu numunelerde, en düşük basınç dayanım kaybı U30C35P0 kodlu numunelerde %29,4 olarak kaydedilmiştir. LK'de en yüksek basınç dayanım kaybı U30C35P0 kodlu numunelerde %34,4, en düşük basınç dayanım kaybı U10C55P5 kodlu numunelerde %24,8 olarak kaydedilmiştir.

4.5 Ultra Ses Geçiş Hızı Test Sonuçları

SK ve LK kür koşullarında olgunlaştırılan KYB numunelerinin ultrases geçiş hızı test sonuçları Şekil 4.32'de gösterilmiştir.

SK dikkate alındığında en yüksek değer U20C45P0, U30C35P0 ve U30C35P5 kodlu numunelerde 4,82 km/sn, en düşük değer ise U10C55P0 kodlu numunede 4,65 olarak belirlenmiştir. U30C35P serisi numunelerin ultrases değerlerinin diğer serilerdeki numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

LK uygulanan numunelerde en düşük ultrases değeri 4,65 km/sn olarak U10C55P0 kodlu numunede, en yüksek değer U30C35P5 kodlu numunede 5,04 olarak elde edilmiştir. U30C35P serisi numunelerin ultrases değerlerinin diğer serilerdeki numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4.32 KYB karışımlarının UGH sonuçları

Whitehurst (1951), ultrases geçiş hızlarına göre betonu Tablo 4.6’te tanımlandığı biçimde 5 kategoriye ayırmıştır (Vosoughi vd., 2015; Gesoğlu ve Özbay, 2007).

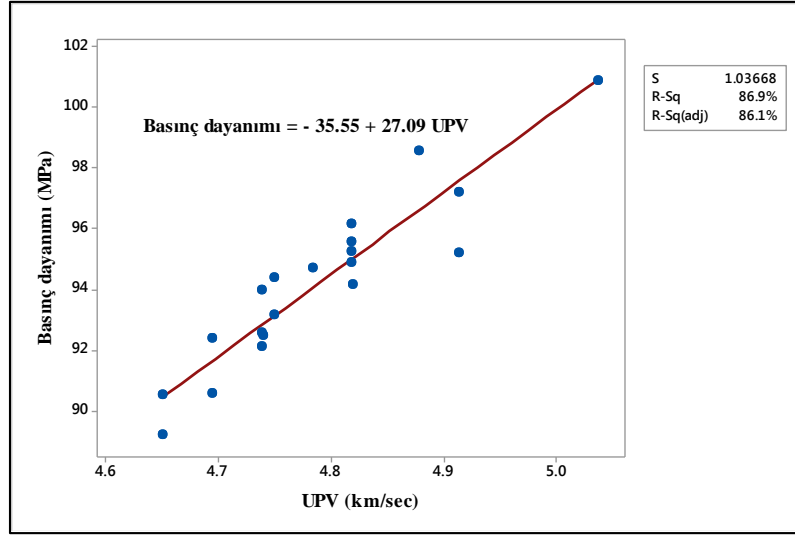
Tablo 4.6 Betonun UPV sonuçlarına göre sınıflandırılması

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

Bu değerlendirme dikkate alındığında, tüm KYB numunelerinin ultrases değerlerinin 4,5 km/sn'den yüksek olduğu görülmektedir.

4.5 Basınç Dayanımı ve Ultrases Geçiş Hızı Arasındaki İlişki

90 günlük basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları arasındaki ilişki Şekil 4.33'te tanımlanmıştır. Basınç dayanımı ile ultrases değerleri arasında güçlü bir korelasyonun olduğu, $R^2= 86,9$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.33 Basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Araştırmadan elde edilen sonuçlar, aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1. UK oranındaki artışın tüm karışımlarda yayılma çaplarını arttırdığı, YFC oranındaki artışların yayılma çapı değerlerini düşürdüğü, PT ikame oranında ki artışın yayılma çapı değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. En yüksek yayılma çapı değeri %30 UK, %35 GYFC ikame oranlarında, en düşük yayılma çapı değeri ise UK ve GYFC ikamesiz REF kodlu karışımda elde edilmiştir.
2. UK ve YFC ikamesinin, tüm KYB numunelerinin su emme değerini düşürdüğü, PT ikame oranlarındaki artışın su emme değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. En düşük su emme değeri %30 UK, %35 GYFC ikame oranlarında elde edilmiştir.
3. Her iki kür koşulunda da UK içeriğindeki artış, 3 günlük basınç dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturarak basınç dayanımlarının artmasını sağlamış, GYFC içeriğinin artmasıyla basınç dayanımı değerleri düşme eğilimi göstermiştir. PT içeriğindeki artış da basınç dayanımlarını düşürmüştür.
4. UK oranında ki artış, her iki kür koşulunda da 7 günlük basınç dayanımı değerlerini arttırdığı, GYFC oranında ki artışın basınç dayanım değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. PT ikamesi de 7 günlük basınç dayanımı değerlerini olumsuz etkilemiştir.
5. LK, 3 ve 7 günlük basınç dayanım değerleri üzerinde daha etkili olmuştur. Bu durum, kür sıcaklığının hidratasyon gelişimi üzerinde oluşturduğu olumlu etki ile açıklanabilir.
6. U30C35P serisi numunelerin 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarının hem SK, hem de LK'de diğer serilerden yüksek olduğu gözlenmiştir.
7. UK oranlarındaki artışın, her iki kür koşulunda da 28 günlük basınç dayanım değerleri üzerinde olumlu etki oluşturduğu gözlenmiş, SK ve LK'de U30C35P0 kodlu numunelerde sırasıyla, 86,71 MPa ve 89,53 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler REF'nin basınç dayanımının yaklaşık %98'ine eşdeğerdedir. UK içeriğinin artması ile basınç dayanımında sağlanan iyileşmenin, UK katkılı

çimentolu sistemlerde gerçekleşen puzolanik reaksiyonların 28 gün sonra baskın hale gelmesi ile açıklanabilir.

8. GYFC içeriğindeki artışın, her iki kür koşulunda da basınç dayanım değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. GYFC ikameli KYB serileri arasında oluşan basınç dayanımı değişimlerinin SK uygulanan numunelerde daha belirgin olduğu, LK uygulanan numunelerde %35, %45 ikame oranlarında hemen hemen aynı değerleri aldığı, %55 GYFC katkılı numunelerde ise farkın arttığı belirlenmiştir.
9. PT oranlarındaki artış sınırlı düzeyde de olsa her iki kür koşulunda da basınç dayanım değerlerini düşürmüştür.
10. LK'nin 28 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımları üzerinde daha etkili olduğu Şekil 4.28'de görülmektedir.
11. UK'nin 90 günlük KYB numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.31.'de gösterilmiştir. SK ve LK'nin KYB numuneleri üzerinde oluşturduğu etkinin benzerlik gösterdiği, aynı serideki numuneler arasındaki basınç dayanımı farklılıklarının azaldığı belirlenmiştir. U10C55P0 ve U10C55P10 kodlu numunelerin haricindeki diğer numunelerin basınç dayanımı değerlerinin Referans numuneye yakın veya üzerinde gerçekleştiği görülmüştür.
12. Her iki kür koşulunda da %5'lik PT ikame oranının basınç dayanımı değerlerini arttırdığı, U30C35P10 serisi numunelerin LK'de PT katkısız numunelerden daha yüksek basınç dayanımları verdiği belirlenmiştir.
13. U20C45P ve U30C35P serisinde ki numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri U10C55P serisi numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek gerçekleşmiştir. En yüksek basınç dayanımı 100,89 MPa olarak U30C35P5 kodlu numunede LK'de elde edilmiş, bunu 98,55 MPa değerle LK uygulanan U30C35P10 kodlu numune izlemiştir. Bu değerler, PT'nin ileri yaşlarda oluşturduğu puzolanik etki ile açıklanabilir.
14. 250 döngü sonrası en yüksek basınç dayanımı kaybı her iki kür koşulunda da REF numunelerde gerçekleşmiştir. Genel olarak SK uygulanan tüm numunelerin basınç dayanım kayıp oranlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Her iki kür koşulu ve tüm karışımlarda UK, GYFC ve PT ikamesinin basınç dayanımı kayıplarını azalttığı görülmektedir. Bu durum, geliştirilmiş ve daha yoğun bir mikroyapı oluşumunun yanı sıra, arayüzey geçiş bölgesinin porozitesinin

azalması sonucu donma-çözülme etkisi üzerinde daha iyi bir direnç sağlamasıyla açıklanabilir

15. KYB numunelerinin ultrases değerlerinin 4,5 km/sn'den yüksek olduğu görülmüştür.
16. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı değerleri arasında güçlü bir korelasyonun olduğu belirlenmiştir.

Araştırma sonucu elde edilen veriler çerçevesinde ileriki çalışmalar için öngörülen öneriler ise aşağıda sıralanmıştır.

1. Endüstriyel atık niteliği taşıyan ve önemli miktarlarda ortaya çıkan UK ve GYFC'nin beton üretiminde kullanımı ile ilgili özendirici/destekleyici faaliyetlerin yapılması, CO₂ emisyonlarının azaltılması, klinker kullanımının azaltılarak hammaddenin korunumu, enerji tüketiminin azaltılması, sürdürülebilirlik, toprak ve yeraltı su kaynaklarının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.
2. İleriki çalışmalarda PT'nin içsel kürlemeye olan etkisinin daha eksterm ortam koşullarında, özellikle uzun süreli kür gereksinimi gerektiren UK, GYFC gibi puzolanik katkılarla, iki bileşenli olarak yapılması yararlı olacaktır.
3. Yüksek incelikteki PT'nin betonun donma-çözülme direncine etkisi daha kapsamlı olarak araştırılmalıdır.
4. Yüksek oranda ikame malzemesi kullanımının betonun hidrasyon ısısı, rötre, sülfat ve asit etkilerine karşı direncinin incelenmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abed, M., & Nemes, R. (2019). Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials. *Construction and building materials*, 212, 350-361.
- Adesina, A., & Awoyera, P. (2019). Overview of trends in the application of waste materials in self-compacting concrete production. *SN Applied Sciences*, 1(9), 962.
- Ahmad, S., Adekunle, S. K., Maslehuddin, M., & Azad, A. K. (2014). Properties of self-consolidating concrete made utilizing alternative mineral fillers. *Construction and Building Materials*, 68, 268-276.
- Almuwbber, O., Haldenwang, R., Mbasha, W., & Masalova, I. (2018). The influence of variation in cement characteristics on workability and strength of SCC with fly ash and slag additions. *Construction and Building Materials*, 160, 258-267.
- Al-Rubaye, M. M. (2016). *Self-compacting concrete: Design, properties and simulation of the flow characteristics in the L-box* (Doctoral dissertation, Cardiff University).
- Al Saffar, D. M., Al Saad, A. J., & Tayeh, B. A. (2019). Effect of internal curing on behavior of high performance concrete: An overview. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00229.
- Aparicio, S., Martínez-Ramírez, S., Molero-Armenta, M., Fuente, J. V., & Hernández, M. G. (2016). The effect of curing relative humidity on the microstructure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 104, 154-159.
- Askarian, M., Fakhretaha Aval, S., & Joshaghani, A. (2018). A comprehensive experimental study on the performance of pumice powder in self-compacting concrete (SCC). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(6), 340-356.

- Aslani, F., & Ma, G. (2018). Normal and high-strength lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 04018328.
- Awoyera, P. O., Adesina, A., & Gobinath, R. (2019). Role of recycling fine materials as filler for improving performance of concrete-a review. *Australian Journal of Civil Engineering*, 17(2), 85-95.
- 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).
- Azzouza (2015) 'Effect of Sand Type on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete', *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, pp. 37–41. Available at: www.isbs2015.gazi.edu.tr/belgeler/bildiriler/37-41.pdf.
- Benli, A., Karataş, M., & Bakir, Y. (2017). An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 144, 552-562.
- 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.
- Bermejo, G., & Canovas, M. (2010). Influence Of The Mineral Addition On The Durability Of Medium Strength Self-Compacting Concrete. In *The 3rd FIB International Congress*.
- Bingöl, A. F., & Tohumcu, İ. (2013). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 51, 12-18.

- 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.
- Bradu, A. & Florea, N. (2015) 'Water Absorption of Self Compacting Concrete Containing Different Levels of Fly Ash', *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 61(4), pp. 107–114.
- Celik, A. G., Kilic, A. M. & Cakal, G. O. (2013) 'Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material', *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(2), pp. 689–700. doi: 10.5277/ppmp130227.
- 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*. Elsevier Ltd, 146, pp. 658–667. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.158.
- Deilami, S., Aslani, F. & Elchalakani, M. (2019) 'An experimental study on the durability and strength of SCC incorporating FA, GGBS and MS', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 172(5), pp. 327–339. doi: 10.1680/jstbu.17.00129.
- Dogan, U. A. & Ozkul, M. H. (2015) 'The effect of cement type on long-term transport properties of self-compacting concretes', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 96, pp. 641–647. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.097.
- El Mir, A. I. (2017). Influence of additives on the porosity related properties of self-compacting concrete.
- El Mir, A. & Nehme, S. G. (2017) 'Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 156, pp. 507–517. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.103.

- Erdem, T. K., Meral, C., Tokyay, M. U. S. T. A. F. A., & Erdogan, T. Y. (2007). Effect of ground perlite incorporation on the performance of blended cements. *Sustainable Construction Materials and Technologies, Taylor and Francis*.
- 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*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.measurement.2019.07.074.
- Foti, D., Lerna, M., Sabbà, M. F., & Vacca, V. (2019). Mechanical characteristics and water absorption properties of blast-furnace slag concretes with fly ashes or microsilica additions. *Applied Sciences*, 9(7), 1279.
- Garcia-Taengua, E. (2018). Fundamental Fresh State Properties of Self-Consolidating Concrete: A Meta-Analysis of Mix Designs. *Advances in Civil Engineering, 2018*.
- Geso, M., Güneyisi, E. & Öz, H. Ö. (2016) 'Using of Fly Ash and Blast Furnace Slag in the Production of Lightweight Aggregates through Cold-Bonding Process', (January 2012).
- Gözde Sezer (2017) 'effect of metakaolin and calcined kaolin on hardened properties of self compacting concrete', *m. sc. thesis*, 01(june), pp. 1–7.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özturan, T., Öz, H. Ö., & Asaad, D. S. (2014). Permeation characteristics of self compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 59, 1-9.
- 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.
- Okamura, H., & Ozawa, K. (1996). Self-compactable high-performance concrete in Japan. *Special publication*, 159, 31-44.

- Hunger, M. (2010). An integral design concept for ecological self-compacting concrete.
- Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., Ribakov, Y., & Bier, T. A. (2017). Effect of fly ash on properties of self-compacting high strength lightweight concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(1), 81-87.
- Jain, S. & Pradhan, B. (2019) 'Effect of cement type on hydration, microstructure and thermo-gravimetric behaviour of chloride admixed self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 212, pp. 304–316. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.001.
- Jalal, M., Pouladkhan, A., Harandi, O. F., & Jafari, D. (2015). Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 90-104.
- Jiang, Y. C., Huo, D., Teng, H. W., & Xu, J. E. (2015). A Study on the Influence of Coarse Aggregate on Rheological Properties of Self-Compacting Concrete. In *Key Engineering Materials* (Vol. 633, pp. 130-135). Trans Tech Publications Ltd.
- Joe, M. A. & Rajesh, A. M. (2015) 'Study on the Effect of Ggbs & M Sand in Self Compacting Concrete', *The International Journal of Engineering and Science*, 4(8), pp. 12–18.
- Kamal, M. M., Safan, M. A., Bashandy, A. A., & Khalil, A. M. (2018). Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 16, 79-93.
- Karakurt, C. & Bayazit, Y. (2015) 'Freeze-thaw resistance of normal and high strength concretes produced with fly ash and silica fume', *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015. doi: 10.1155/2015/830984.

- Karein, S. M. M., Joshaghani, A., Ramezaniyanpour, A. A., Isapour, S., & Karakouzian, M. (2018). Effects of the mechanical milling method on transport properties of self-compacting concrete containing perlite powder as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 172, 677-684.
- Khaleel, O. R. & Razak, H. A. (2011) 'The Effect of Coarse Aggregate on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 14, pp. 805–813. doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.102.
- Khayat, K. & Schutter, G. De (2014) *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)*, *RILEM State-of-the-Art Reports*. Available at: <https://biblio.ugent.be/publication/4343086>.
- Kurt, M., Gül, M. S., Gül, R., Aydin, A. C., & Kotan, T. (2016). The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 36-46.
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons.
- Li, X., Zhou, Z., & You, Z. (2016). Compaction temperatures of Sasobit produced warm mix asphalt mixtures modified with SBS. *Construction and Building Materials*, 123, 357-364.
- Long, W. J., Khayat, K. H., Lemieux, G., Xing, F., & Wang, W. L. (2015). Factorial design approach in proportioning prestressed self-compacting concrete. *Materials*, 8(3), 1089-1107.
- 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, Foiato, M. & Prudêncio, L. R. (2019) 'Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 203, pp. 282–293. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.074.
- Mirgozar Langaroudi, M. A., & Mohammadi, Y. (2019). Effect of nano-clay on the freeze–thaw resistance of self-compacting concrete containing mineral admixtures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-20.
- 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.
- Mohamed, O. A. (2019). Effect of Mix Constituents and Curing Conditions on Compressive Strength of Sustainable Self-Consolidating Concrete. *Sustainability*, 11(7), 2094.
- Mohamed, O. A. & Najm, O. F. (2017) 'Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS', *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(4), pp. 1–6. doi: 10.1007/s11709-016-0350-1.
- Narmluk, M. & Nawa, T. (2011) 'Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 41(6), pp. 579–589. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.02.005.
- Nochaiya, T., Wongkeo, W. & Chaipanich, A. (2010) 'Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete', *Fuel*. Elsevier Ltd, 89(3), pp. 768–774. doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.003.
- Okuyucu, D., Turanlı, L., Uzal, B., & Tankut, T. (2011). Some characteristics of fibre-reinforced semi-lightweight concrete with unexpanded perlite. *Magazine of concrete research*, 63(11), 837-846.

- Ovbeniyekede, O. S., Adenan, D. S. Q. A., Ahmad, M., & Kamaruddin, K. Water Absorption and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash and Quarry Dust.
- Ovbeniyekede, O. S., Adenan, D. S. Q. A., Ahmad, M., & Kamaruddin. (2018) 'Water Absorption and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash and Quarry Dust', *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 8(10). doi: 10.29322/ijsrp.8.10.2018.p8248.
- Öz, H. Ö., Yücel, H. E. & Güneş, M. (2016) 'Freeze-Thaw Resistance of Self Compacting Concrete Incorporating Basic Pumice', *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1, pp. 285–291.
- Panesar, D. K., Aqel, M., Rhead, D., & Schell, H. (2017). Effect of cement type and limestone particle size on the durability of steam cured self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites*, 80, 175-189.
- Patel, Y. J. & Shah, N. (2018) 'Enhancement of the properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag based Self Compacting Geopolymer Concrete by incorporating Rice Husk Ash', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 171, pp. 654–662. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.166.
- Pineaud, A., Pimienta, P., Rémond, S., & Carré, H. (2016). Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. *Construction and Building Materials*, 112, 747-755.
- Ramezaniapour, A. A. (2014). Cement replacement materials. *Springer, Berlin. doi, 10, 978-3.*
- Rashad, A. M. (2016) 'A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for Civil Engineer', *Construction and Building Materials*, 121, pp. 338–353. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001.

- Ronitkumar Patel & Jayeshkumar Pitroda, J. J. B. (2014) 'self compacting concrete : qualitative growth for construction self compacting concrete : qualitative growth for construction industry', (september 2015).
- Roussel, N., Nguyen, T. L. H., Yazoghli, O., & Coussot, P. (2009). Passing ability of fresh concrete: a probabilistic approach. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 227-232.
- Sabet, F. A., Libre, N. A. & Shekarchi, M. (2013) 'Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 44, pp. 175–184. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.069.
- 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.
- Saleh Ahari, R., Erdem, T. K. & Ramyar, K. (2015) 'Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 79, pp. 326–336. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.053.
- Salhi, M., Ghrici, M., Li, A., & Bilir, T. (2017). Effect of curing treatments on the material properties of hardened self-compacting concrete. *Advances in concrete construction*, 5(4), 359.
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S., & Maghsoudi, A. A. (2018). Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. *Construction and Building Materials*, 165, 247-263.

- Sengul, O., & Tasdemir, M. A. (2009). Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag. *Journal of materials in civil engineering*, 21(9), 494-501.
- Shetty, M. S. (2015). Textbook on Concrete Technology–Theory and Practice. *Chand & Company Ltd.*
- Shi, C., Wu, Z., Lv, K., & Wu, L. (2015). A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 387-398.
- Siddique, R., Aggarwal, P. & Aggarwal, Y. (2012) ‘Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 29, pp. 73–81. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.035.
- Sonebi, M., Grünewald, S. & Walraven, J. (2007) ‘Filling ability and passing ability of self-consolidating concrete’, *ACI Materials Journal*, 104(2), pp. 162–170. doi: 10.14359/18579.
- Sooriyaarachchi, H. P. & Lasintha, E. D. L. (2016) ‘Influence of Fine Aggregate Types on the Performance of Self - Compacting Concrete’, *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 49(1), p. 9. doi: 10.4038/engineer.v49i1.6914.
- Subbarayalu, R., Vasumathi, A. M. & Selvi, P. K. (2017) ‘Performance analysis of self compacting concrete without super plasticizer’, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. Springer International Publishing, 2(1). doi: 10.1007/s41024-017-0029-6.
- Sugiladevi, G. & Lavanya, S. (2019) ‘Partial replacement of perlite powder with cement in concrete’, pp. 2912–2918.
- Gonen, T., & Yazicioglu, S. (2007). The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Building and Environment*, 42(8), 3080-3085.

- Tavasoli, S., Nili, M., & Serpoush, B. (2018). Effect of GGBS on the frost resistance of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 717-722.
- Uysal, M. (2012) 'The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 37, pp. 533–540. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.085.
- Uysal, M., & Sumer, M. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building materials*, 25(11), 4112-4120.
- 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).
- Wawrzeńczyk, J., Molendowska, A., & Kłak, A. (2016). Effect of ground granulated blast furnace slag and polymer microspheres on impermeability and freeze-thaw resistance of concrete. *Procedia engineering*, 161, 79-84.
- Whitehurst, E. A. (1951, February). Soniscope tests concrete structures. In *Journal Proceedings* (Vol. 47, No. 2, pp. 433-444).
- Yahia, A., & Aïtcin, P. C. (2016). Self-consolidating concrete. In *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 491-502). Woodhead Publishing.
- Yahia, A., Mantellato, S. & Flatt, R. J. (2015) *Concrete rheology: A basis for understanding chemical admixtures*, *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-08-100693-1.00007-2.
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87(12), 2401-2407.
- Zeeshan Adib Ahmed, S. H. M. (2016) 'High Strength Self-Compacting Concrete using', 4(Viii), pp. 489–497.

Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2012). Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete. *Materials & Design*, 35, 194-200.

Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, 95, 66-74.

Zulu, S. N. (2017). *Optimizing the usage of fly ash in concrete mixes* (Doctoral dissertation).



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Haytham H. A. ALHANGHARI
Doğum Yeri ve Yılı : 17.06.1983
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : haithem.alhengary@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Suaad Alhengary Lisesi, 1998
Lisans : Al-Zawiyah Yüksek Bilim ve Teknoloji Enstitüsü –
İnşaat Mühendisliği

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Al-Zawiyah Yüksek Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, 2007-2014
İş Yeri : Melta Petrol ve Gaz Şirketi, 2014-2020