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

HAFİF YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Mohammed A. Salem ELMEKAHAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR.ÖĞR.ÜYESİ GÖKHAN KAPLAN

TEMMUZ - 2021
KASTAMONU

TAAHHÜTNAME

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

Mohammed A. Salem ELMEKAHAL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAFİF YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

MOHAMMED A. SALEM ELMEKAHAL

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

DANIŞMAN:DR.ÖĞR.ÜYESİ GÖKHAN KAPLAN

Sera gazları ve CO_2 emisyonlarının neden olduğu çevresel zararı azaltmak için sürdürülebilir çözümler aranmaktadır. Çimento, sera gazlarından ve CO_2 emisyonlarından sorumlu bir yapı malzemesidir. Çimento yerine pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atıklar kullanılarak CO_2 emisyonları azaltılabilmektedir. Bu çalışmada, hafif ve yüksek performanslı, sürdürülebilir çimento esaslı kompozitlerin dayanıklılığı ve mekanik özellikleri incelemiştir. Karışımların birim ağırlığını azaltmak için köpük ajanı kullanılmıştır. Ayrıca, çimento esaslı kompozitlerin dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için pomza tozu (PP) ve pirinç kabuğu külü (RHA) kullanılmıştır. Karışımların yoğunluğu 1666-2205 kg/m^3 arasında değişmektedir. %12,5 RHA kullanan karışımların erken yaş dayanımı artmıştır. %25 RHA ve %50 PP ile karışımların basınç dayanımı (90 gün) 46.6 MPa olarak belirlenmiştir. Karışımların PP içeriği arttıkça kuruma büzülmesi değerleri artmıştır. Sülfata maruz karışımlarda başlangıç basınç dayanımı arttıkça genleşmeler azalmaktadır. RHA ve PP'nin oranı arttıkça, HCl'ye maruz kalan karışımlarda ağırlık kaybı azalırken, H_2SO_4'e maruz kalan karışımlarda ağırlık kaybı artmıştır. HCl'ye maruz kalan karışımlarda $CH(OH)_2$ içeriği, H_2SO_4'e maruz kalan karışımlarda ise geçirimsizliğin önemli olduğu belirlenmiştir. Başlangıç basınç dayanımının donma-çözülme etkisine maruz kalan karışımlarda da önemli olduğu gözlemlenmiştir. Karışımların köpük içeriği arttıkça, kuruma büzülmesi artarken basınç dayanımı azalmaktadır. Sonuç olarak, %25'e kadar RHA kullanmak çimento esaslı kompozitlerin performansını arttırmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Pirinç kabuğu külü, Sürdürülebilirlik, Durabilite, Asit direnci, Etrenjit

Temmuz 2021, 104 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

DEVOLOPMENT OF LIGHTWEIGHT HIGH PERFORMANCE CEMENT BASED-COMPOSITES

MOHAMMED A. SELAM ELMEKAHAL

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPAERTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

SUPERVISOR:Dr.Öğr.Üyesi Gökhan KAPLAN

Sustainable solutions are sought to reduce the environmental damage caused by greenhouse gases and CO_2 emissions. Cement is a building material responsible for greenhouse gases and CO_2 emissions. CO_2 emissions can be reduced by using industrial wastes such as rice husk ash instead of cement. In this study, the durability and mechanical properties of lightweight and high-performance sustainable cementitious composites were investigated. A foaming agent was used to reduce the unit weight of the mixes. In addition, pumice powder (PP) and rice husk ash (RHA) were used to improve cementitious composites' durability and mechanical properties. The density of the mixes varies between 1666-2205 kg/m^3. The early age strength of the mixes using 12.5% RHA increased. The compressive strength (90 days) of the mixes with 25% RHA and 50% PP was determined as 46.6 MPa. Drying shrinkage values increased as the PP content of the mixes increased. Expansions decrease as the initial compressive strength increases in m exposed to sulfate. As the ratio of RHA and PP increased, the weight loss decreased in the mixes exposed to HCl, while the weight loss increased in the mixes exposed to H_2SO_4. It was determined that the $CH(OH)_2$ content was important in the mixes exposed to HCl and the impermeability in the mixes exposed to H_2SO_4. It has been observed that the initial compressive strength is also important in the mixes exposed to the freeze-thaw effect. As the foam content of the mixes increases, the drying shrinkage increases, and the compressive strength decreases. As a result, using up to 25% RHA improves the performance of cementitious composites.

KEYWORDS: Rice husk ash, Sustainability, Durability, Acid resistance, Ettringite

July 2021, 104 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca danışmanlığımı yapan, bilgi birikimiyle çalışmama ışık tutan çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN'a şükranlarımı sunarım. Tez jürime katılan saygıdeğer hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR ve Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL'a teşekkür ederim. Çalışmam süresince desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme minnettarım. Yaptığım tez çalışmasının, bilim dünyasına yararlı olmasını temenni ederim..

Mohammed A. Selam ELMEKAHAL

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **x**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Durabilite ve Önemi 3
1.2 Sürdürülebilirlik ve Önemi 4
2. LİTERATÜR TARAMASI **6**
2.1 Hafif Betonun Türleri 6
2.1.1 İnce Agregasız Beton 6
2.1.2 Hafif Agregalı Beton 7
2.1.3 Gaz-Köpük Beton 8
2.2 AASHTO İçin YPB Tanımı 9
2.2.1 Strategic Highway Research Programına göre YPB Tanımı 9
2.2.2 Amerikan Beton Enstitüsünün (ACI) YPB Tanımı 10
2.2.3 Federal Highway Administration YPB Tanımı 10
2.2.4 Diğer YPB Tanımları 10
2.3 YPB Karışım Tasarımı ile İlgili Temel Bilgiler 11
2.3.1 Çimento Esaslı Malzemeler 11
2.3.2 Matris ve Mikroyapı 12
2.3.3 Malzeme Homojenitesi 13
2.4 YPB'de Malzeme Seçimi 13
2.4.1 Çimento Esaslı Malzemeler 14
2.4.1.1 Çimento 14
2.4.1.2 Silis dumanı 15
2.4.1.3 Uçucu kül (UK) 16
2.4.1.4 Yüksek fırın cürufu (YFC) 17
2.4.2 Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkılar (YOS) 17
2.4.3 Agrega 18
2.4.4 Lifler 18
2.4.5 Ultra Yüksek Performanslı Betonların (UYPB) Tasarımı ve Kompozisyonları 19
2.5 UYPB Özellikleri 21
2.5.1 İşlenebilirlik ve Fiziksel Özellikler 21
2.5.2 Mekanik Özellikler 23
2.5.3 Büzülme (Rötre) 24
2.5.4 Dayanıklılık 25
2.6 Kür Şartları 26

2.6.1 Kürleme Yöntemleri 27
2.7 Yapısal Hafif Beton (YHB) 27
2.7.1 Antik ve Modern Uygulamalar 27
2.7.2 Hafif Agregaların Özellikleri 29
2.7.3 Yapısal Hafif Betonun Üretimi 30
2.7.4 Yapısal Hafif Betonun Mühendislik Özellikleri 31
2.7.4.1 Mekanik özellikler 31
2.7.4.2 Sünme ve büzülme 32
2.7.4.3 Dayanıklılık 33
3. MALZEME VE YÖNTEM 35
3.1 Malzemeler 35
3.1.1 Çimento 35
3.1.2 Pirinç Kabuğu Külü (PK) 36
3.1.3 Pomza Agregası ve Pomza Tozu 37
3.1.4 Köpük Katkısı 38
3.1.5 Süper Akışkanlaştırıcı 38
3.1.6 Su 39
3.2 Karışım Oranları ve Kompozitlerin Üretimi 39
3.3 Deneysel Yöntemler 42
3.3.1 Mini Çökme-Yayılma Deneyi 42
3.3.2 Fiziksel Özellikler 42
3.3.3 Eğilme Dayanımı 43
3.3.4 Basınç Dayanımı 43
3.3.5 Kuruma Büzülmesi 44
3.3.6 Kapilerite 45
3.3.7 Sülfat Dayanıklılığı 46
3.3.8 Asit Dayanıklılığı 47
3.3.9 Donma-Çözülme Dayanıklılığı 48
3.3.10 Mikroyapı Araştırmaları 49
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR 50
4.1 Çimento Esaslı Kompozitlerin Taze Özellikleri 50
4.2 Çimento Esaslı Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri 52
4.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri 54
4.4 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmesi 62
4.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kapilerite Özellikleri 66
4.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Sülfat Dayanıklılığı 70
4.7 Çimento Esaslı Kompozitlerin Asit Dayanıklılığı 73
4.8 Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma Çözülme Dayanıklılığı 78
4.9 Mikroyapı 83
5. SONUÇLAR 87
KAYNAKLAR 90
ÖZGEÇMİŞ 104

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Yapay ve Doğal Hafif Agregalar. 7
Şekil 2.2 Köpük/Gaz otoklav sürecine göre sınıflandırılması. 8
Şekil 2.3 SHRP Yüksek Performanslı Beton Kriterleri 9
Şekil 2.4 Kumsuz Beton 30
Şekil 2.5 LWAC. 31
Şekil 2.6 Gaz/Köpük Beton. 31
Şekil 3.1 PK'ya ait XRD grafiği 36
Şekil 3.2 Scoria agregasının temin edildiği Uşak ilinin fiziki haritası 37
Şekil 3.3 Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler 39
Şekil 3.4 Bazı çimento esaslı kompozitlerin mini çökme-yayılma testi sonuçları 42
Şekil 3.5 Üç noktalı eğilme testi 43
Şekil 3.6 Basınç dayanımı testi 44
Şekil 3.7 Dijital komparatör 45
Şekil 3.8 Kapilarite deneyinde kullanılan numuneler 46
Şekil 3.9 Na_2SO_4'e maruz çimento esaslı kompozitler 47
Şekil 3.10 Ultrasonik geçiş hızı ölçümü 48
Şekil 4.1 Çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları 50
Şekil 4.2 Fiziksel özellikler 52
Şekil 4.3 Çimento esaslı kompozitlerin kuru birim hacim ağırlıkları 53
Şekil 4.4 Fiziksel özelliklerin korelasyonu 54
Şekil 4.5 Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları 57
Şekil 4.6 Çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları 59
Şekil 4.7 Basınç dayanımı korelasyonları 61
Şekil 4.8 Karışımların kuruma büzülmesi 64
Şekil 4.9 Kuruma büzülmesinin basınç dayanımı ve gözeneklilik ile ilişkisi 65
Şekil 4.10 Çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri 67
Şekil 4.11 Su işleme derinliği korelasyonu 68
Şekil 4.12 Çimento esaslı kompozitlerin sülfat dayanıklılığı 71
Şekil 4.13 Sülfatın neden olduğu genleşmenin korelasyonları 72
Şekil 4.14 H_2SO_4'e maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin kütle değişimleri 74
Şekil 4.15 Kütle değişimi ve basınç dayanımı arasındaki ilişki 75
Şekil 4.16 HCl'ye maruz bırakılan çimento esaslı kompozitlerin ağırlık değişimleri 76
Şekil 4.17 Ağırlık kaybı korelasyonu 77
Şekil 4.18 Çimento esaslı kompozitlerin D-Ç sonrası BDEM ve basınç dayanımı 81
Şekil 4.19 Su işleme derinliği-bağıl dinamik elastisite modülü 82
Şekil 4.20 Na_2SO_4'e maruz bırakılan çimento esaslı kompozitlerin mikro yapısı 84
Şekil 4.21 HCl'ye maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin mikro yapısı 85
Şekil 4.22 H_2SO_4'e maruz çimento esaslı kompozitlerin mikroyapıları 86

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Beton bileşenlerin dayanıklılık özellikleri 34
Tablo 3.1 Çimentoya (CEM I 42,5R) ait özellikler 35
Tablo 3.2 PK'nın teknik özellikleri 36
Tablo 3.3 Scoria agregasının özellikleri 37
Tablo 3.4 PT'ye ait özellikler 38
Tablo 3.5 Köpük katkısının özellikleri 38
Tablo 3.6 Deneysel çalışmaya ait değişkenler 39
Tablo 3.7 Karışım Özellikleri 41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

W	**:** Su
Ç	**:** Çimento
D	**:** Yoğunluk
K	**:** Karışım
kg	**:** Kilogram
t	**:** Ton
km	**:** Kilometre
m	**:** Metre
cm	**:** Santimetre
mm	**:** Milimetre
dm	**:** Desimetre
µm	**:** Mikrometre
g	**:** Gram
µs	**:** Mikrosaniye
°C	**:** Santigrat derece

Kısaltmalar

Al_2O_3	**:** Alüminyum oksit
CaO	**:** Kalsiyum oksit (kireç taşı)
C	**:** Karbon
C_3S	**:** Trikalsiyum silikat
C_2S	**:** Dikalsiyum silikat
C_3A	**:** Trikalsiyum alüminat
C_4AF	**:** Tetrakalsiyum alüminoferrit
$CaCO_3$	**:** Kalsiyum karbonat
$CaSO_4$	**:** Kalsiyum sülfat
$Ca(OH)_2$	**:** Kalsiyum hidroksit
$CaMg(CO_3)_2$	**:** Kalsiyum magnezyum karbonat
CO_2	**:** Karbondioksit
$CaMg(CO_3)_2$	**:** Kalsiyum magnezyum karbonat
F	**:** Köpük içeriği
Fe_2O_3	**:** Demir oksit
MgO	**:** Magnezyum oksit
$MgSO_4$	**:** Magnezyum sülfat
PK	**:** Pirinç kabuğu külü
PT	**:** Pomza Tozu

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe en çok kullanılan ve güvenilen yapı malzemesi beton olduğundan, sürdürülebilirlik açısından belirlenen ilkeler genellikle çimento miktarının azaltılması ve ekonomik olarak daha avantajlı hale getirilmesi üzerinedir. Bu kapsamda çimento tüketimi azaltılmaya çalışılırken göz önünde bulundurulması gereken en büyük faktör hiç şüphesiz betonun performansının göstergesi olan basınç dayanımıdır. Küresel çapta çimento kullanımı sürekli artmakta ve bunun sonucunda CO_2 salınımı yaklaşık 2 milyon tonu bulmaktadır (Schneider vd., 2011). Bu artışın aynı hızla devam etmesi durumunda çimento sanayisine bağlı CO_2 salınımının 2025 yılında 3,5 milyon ton gibi bir miktara ulaşması beklenmektedir (Gregg ve Andres, 2008). Bunun sonucunda, hafif beton gibi sürdürülebilirlik gereksinimlerini karşılayan, çevre dostu ve zararsız, diğer beton türlerine göre daha çok avantajlara sahip malzemelerin araştırılması ön plana çıkmıştır.

İnşaat ile mimarlık tarihine ve şehirlerin kuruluşunun başlangıcına bakıldığı zaman hafif betonun İndus Vadisindeki uygarlıklar tarafından kullanıldığı ve dönemin ünlü şehirlerinin inşa edildiği tarihin milattan önce üç bin yıla kadar dayandığı görülmektedir (Yu vd., 2015). Avrupa'da bu tür betonun ilk kullanımı ise 2000 yıl önce Roma dönemindeki kanal yapımlarına kadar uzanmaktadır (Hajar vd., 2004). Bunun yanında modern Avrupa'da özellikle İtalya, Almanya, İzlanda, Japonya, Malezya ve Amerika'da yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Erken Roma İmparatorluğu ve Yunan uygarlıkları tarafından inşa edilmiş, çoğu hala kültürel mirası temsil etmekte olan yapılarda hafif beton kullanılmıştır. Bu yapılar arasında, Akdeniz bölgesindeki Cosa limanı, Pantheon Kubbesi (Zareef, 2010) ve Aziz Sofya Katedrali (İstanbul Ayasofya Müzesi/Camisi - Miletli Isidore ve Tralles Anthemius tarafından inşa edilmiş ve MS 4. yüzyılda İmparator Justinianus tarafından yaptırılmıştır) ve M.S. 70 ile 82 yılları arasında inşa edilen büyük Roma amfi tiyatrosu Colosseum bulunmaktadır.

Bu tip betonun üretiminin başlangıcında, kullanılan tüm malzemeler doğal kökenlidir, çünkü bunların çoğu süngertaşı, cüruf, tüf gibi volkanik malzemelerdir. Bahsi geçen

malzemeler, iri ve ince olmak üzere iki tür agrega olarak kullanılmıştır. Ayrıca bu malzemeler, hidratasyon sırasında bağlayıcının oluşturduğu kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidratları oluşturmaktadır. Olumlu özelliklerinden dolayı hafif betona olan talebin artması ve bu doğal malzemelerin tüm dünyada bulunmamasının anlaşılmasından sonra, AR-GE çalışmaları artış göstermiştir. Genleştirilmiş kil, arduaz gibi doğal hammaddeler, uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünler bu bağlamda kullanılmaya başlanmıştır (Chandra, 2002).

Hafif beton, birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır; uzun açıklıklı köprüler, yüksek yapılar, zemin koşullarının zayıf olduğu binalar veya açık deniz yapıları gibi oldukça özel uygulamalarda kullanımına rastlamaktadır (César Maruyama ve Camarini, 2015). En yaygın kullanım alanı ise, betonun yoğunluğunu azaltılması önemli olan yapı endüstrisidir. Geleneksel betonun yoğunluğu yaklaşık 2300-2500 kg/m³ aralığındadır fakat hafif betonun yoğunluğu yaklaşık olarak 1840 kg/m³ seviyesindedir. Ayrıca hafif beton, erişimin sınırlı olduğu veya zemin koşullarının problemli olduğu yerlerde kullanım maliyetlerini azaltmak için, prekast ve ön gerilmeli bileşenler için özellikle avantajlı görünmektedir.

Bu tür betonun yaygın kullanımıyla sürdürülebilirliğinin yanı sıra, yüksek performanslı beton (YPB) ve yüksek dayanımlı betona (YDB) nasıl dönüştürüleceği hakkında da ciddi olarak düşünülmeye başlanmış ve çalışmalar yürütülmüştür. Çünkü YPB, dayanım, süneklik ve dayanıklılık olmak üzere üç ana özellikle karakterize edilmiştir. YPB'nin, karakteristik basınç dayanımı 70 MPa'dan fazla olduğundan günümüzde sıkça tercih edilmektedir. YPB, normal dayanımlı betona kıyasla doğası gereği daha gevrektir ve bu durum daha yüksek miktarda çimento kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Fakat daha düşük su çimento (s/ç) oranıyla işlenebilirlikten ödün vermeden yüksek performans elde edilebilmektedir. Bu nedenle kimyasal, mineral katkılar ve liflerin kullanımının yanı sıra daha düşük su/bağlayıcı (s/b) oranı ile YPB'nin sünekliğinde iyileşme sağlanabilmektedir (Dhinakaran vd., 2017). Hafif beton ise, düşük yoğunluk, iyi ısı yalıtımı, yangına dayanıklılık, yeterli dayanım ve sürdürülebilirlik gibi çeşitli avantajlara sahiptir.

Özetle, hafif beton ekonomik ve çevreyi korumaya yönelik avantajlar sunan ve içinde bulunduğumuz yüzyılda geniş kullanım alanına sahip bir yapı malzemesi olmaya aday alternatif yöntemdir (Kayali ve Haque, 2000).

1.1 Durabilite ve Önemi

Beton ve çimento esaslı kompozitlerin durabilite özelliği, zararlı ve agresif ortamlarda yüzyıllar boyunca büyük bir bozulma olmadan mühendislik özelliklerini koruma potansiyeli olarak tanımlanabilir (Taylor vd., 2013). Beton, gözeneklerden içeri giren nem ve kimyasal maddeler açısından boşluklu bir mühendislik kompoziti olarak adlandırıldığından, durabilite mikro ve makroyapı için önemlidir (Page vd., 2007). Betonun bozulmasına neden olan başlıca nedenler şu şekilde sınıflara ayrılabilir: fiziksel etkenler (donma-çözülme ve aşınma hareketleri) ve kimyasal etkenler (sülfat saldırısı ve korozyon) (Song vd., 2011). Betonun donma-çözülme etkisi ve kimyasal dirençlerinin değerlendirilmesi için bazı standart bulunmaktadır, ASTM C1.202 (ASTM, 2012), ASTM C666 (Villanueva, 2015) ve ASTM C672 (Barrett ve Grizzle, 1999) sırasıyla sülfat direnci, donma-çözülme direnci ve klorür iyonu geçirgenliğinin değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Betonla ilgili tokluk ve kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerin azalması, durabilite özelliklerini de etkilemektedir.

Yapı malzemesi olarak beton, son yıllarda yaşam kalitesinin iyileştirilmesinde çok önemli ve etkin bir rol oynamıştır, betonun en benzersiz özelliklerinden biri, çok çeşitli renk özellikleri, yoğunluğu, dayanımı ve dayanıklılığıdır. Farklı malzemelerden pek çok şekilde imal edilebilen beton yirmi yılı aşkın bir süredir büyük gelişmelerden geçmiştir. İlk dönemlerde sadece 25-30 MPa olan basınç dayanımı 150 MPa'ya arttırılmış ve yüksek performanslı bir malzemeye dönüşmüştür.

İnşaat endüstrisi, günümüzün en önemli konusu olan sürdürülebilirlik kavramından diğer tüm endüstrilere göre daha fazla etkilenmektedir. Yapı malzemelerinin üretimi, binaların ve diğer yapıların inşası ve bu yapıların daha sonra kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan belirgin çevresel etkiler sürdürülebilirlik için önemli bir husustur. Ancak betonun performansı ve dayanıklılığı arttırıldığında servis süresi de arttırılacaktır. Bu nedenle, yapılarının sürdürülebilirliğini artırmak, hem montaj, bakım ve işletim

süreçleri ile birlikte çevresel etkinin azaltılmasını hem de yapının maksimum teknik performansta dayanıklılığının artırılmasını gerektirmektedir (Lippiatt ve Ahmad, 2004a).

1.2 Sürdürülebilirlik ve Önemi

Sürdürülebilirlik, dünyadaki inşaat hareketinin dramatik bir şekilde gelişmesi nedeniyle gelecekteki yaşamı belirleyecek küresel bir sorun olarak tanımlanmak ve yaşam tarzımızı korumak ve iyileştirmek amacıyla içinde bulunduğumuz kalıbı değiştirmemiz gerektiği belirtilmektedir. 2002 yılında ABD Yeşil Bina Konseyi, sürdürülebilir tasarım ve inşaat faaliyetlerine ve konuya olan ilgisini arttırmıştır. Günümüzde popüler olan "LEED" derecelendirme sistemi de bu sürece büyük bir katkı vermektedir. Gelecek nesillere sağlıklı bir yaşam sağlayan enerji verimli bina tasarımlarının önemi bu kapsamda artış göstermiştir. Konsey, bu ilgiye dayanarak betonun kullanım ömrünü uzatacak, enerji ve hammaddelerin daha verimli kullanımına katkı sağlayacak şekilde çeşitli konuları önermektedir (Barrett ve Grizzle, 1999).

1987 BM Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından sunulan genel kabul görmüş "sürdürülebilir kalkınma" tanımı hala günümüzde kullanılmaktadır: "Sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılamaktır" (Emas, 2015).

Geçen yüzyılın ortalarından bu yana dünyada benzeri görülmemiş değişikliklere şahit olunmuş ve inşaat sektörü de bu değişikliğe uyum sağlamıştır. Şüphesiz bu değişikliklerin olumlu bir etkisi olmuştur fakat karşılığında göz ardı edilemeyecek derecede olumsuz etkileri de mevcuttur. İnşaat sektörü; kaynakları, enerji tüketimini ve CO_2 emisyonlarını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, Portland çimentosu hem doğal kaynakları hem de enerjiyi yoğun bir şekilde kullanan yapı malzemesidir. 1 ton çimento üretim için yaklaşık 1,5 ton hammadde ve yaklaşık 4.000 ile 7.500 MJ enerji gerekmektedir. Bir ton çimento üretmek için gereken enerji maliyetinin, toplam fabrika üretim maliyetlerinin %40-45'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir. Daha da önemlisi, 1 ton çimento üretimi esnasında çevreye 1,0 ile 1,2 ton CO_2 salınmaktadır

(Swamy, 1998). Yaşadığımız dünyada kaynakların ve enerjinin kullanımı ve yol açtığı atmosferik kirlilik derecesi en önemli konulardan birisidir. Dünyada yaşanan her krizin inşaat sektörü üzerinde doğrudan etkisi vardır ve inşaat sektörü enerji, kaynaklar ve çevre ile yakından bağlantılı olduğundan, telafisi mümkün olmayan çevresel sorunlara yol açmaktadır.

Hafif beton üretiminde çimento yüzdesine kıyasla büyük oranda endüstriyel atıklar kullanıldığı için çevresel gereksinimler sağlanmaktadır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi çimento ikame malzemeleri, betondaki çimento içeriğini azaltmak için elli yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Çimento ikame malzemelerinin kullanımının artmasıyla, çimentodaki ortalama klinker oranı 2003 yılında %85'ten daha aşağı seviyeye düşmüştür. 2010 yılında %77'ye yükselen oranın gelecekte %71 seviyelerine düşmesi beklenmektedir (Juenger ve Siddique, 2015). Hidratasyon esnasında oluşabilecek büzülme çatlakları betonun ilerleyen süreçte bozulmasına neden olabileceğinden, çimento ikame malzemeleri bu riski azaltmaktadır. Ayrıca beton bünyesinde oluşan çatlakların sürdürülebilirlik açısından da önemli olduğu bilinmektedir.

Sürdürülebilirliği iyileştirmek için bir yapının hizmet ömrünü iki katına çıkarmak, inşaat kaynaklarında önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Fakat unutulmamalıdır ki, sürdürülebilir beton üretiminde en önemli husus çimento içeriğini en aza indirmektir. Beton bileşenlerin çevresel etkilerine ilişkin bilgilerin çoğu, yaşam döngüsü analizlerinden (LCA) elde edilmektedir (Van den Heede ve De Belie, 2012).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Hafif beton, yapıların ölü yükünü azaltarak, karışımın hacmini arttırdığı için genleştirici içeren bir beton türü olarak da tanımlanabilir. Kuru yoğunluğu 300 kg/m³ ile 1840 kg/m³ arasında değişen hafif beton geleneksel betondan daha hafiftir. İlk kez Romalılar tarafından ikinci yüzyılda MS 118-128 arasında inşa edilen Roma tapınağında kullanıldığı düşünülmektedir. Pantheon, o yıllarda kullanılan en yaygın agrega türü olan pomza kullanılarak inşa edilmiştir (Samidi, 1997). İlk kullanımdan ve sonrasında yaygınlaşmasından itibaren, hafif beton kullanımı, ABD, İngiltere gibi diğer ülkelerde ve tüm Avrupa'da geniş ölçüde tercih edilmiştir.

Hafif betonun göze çarpan ana özellikleri, düşük yoğunluğu ve ısıl iletkenliğidir. Ölü yüklerin azalması, inşaat süresinin kısalması ve daha düşük nakliye ve taşıma maliyetleri hafif betonun ön plana çıkan olumlu özellikleridir. Hafif betondan Ramalılar tarafından üretilen 'The Pantheon' binası şimdiye kadar birçok sismik etkiye rağmen hâlâ varlığını korumaktadır. Bu durum hafif yapı malzemelerinin beton yapımında kullanılabileceğini ve kalıcı bir tasarıma sahip olabileceğini göstermektedir.

2.1 Hafif Betonun Türleri

Hafif beton, hava kabarcıkları ile oluşturulabildiği gibi hafif agregalar kullanılarak da üretilmektedir. Beton bünyesinde ince agrega kullanılmadan da hafif beton üretimi mümkündür. Özelliklerine göre hafif betonlar üç ana sınıfa ayrılabilir: İnce agregasız beton, Hafif agregalı beton ve gaz yada köpük beton.

2.1.1 İnce Agregasız Beton

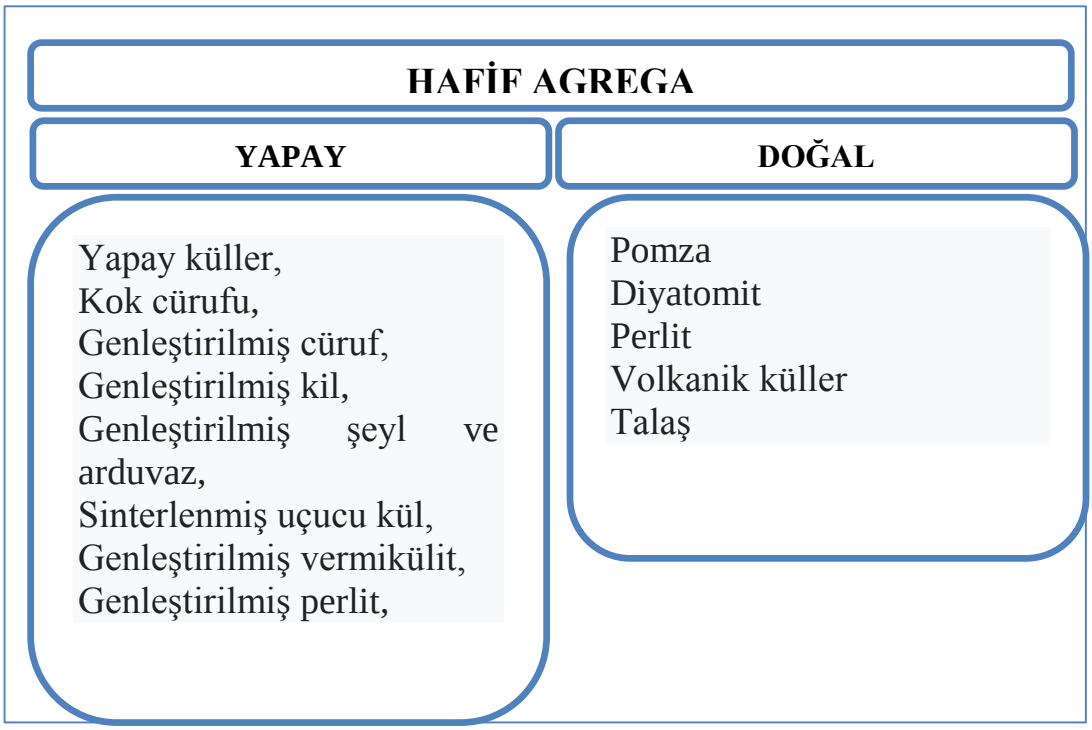
Bu beton türünde ince agregalar kullanılmadan boşluklu bir yapı elde edilmektedir. Bu beton türünde hacimce eşit dağılmış boşluklar mevcuttur. Bu tür hafif betonun temel özelliği, geniş boşluklarını korumasıdır (Ismail vd., 2004).

Dış duvarlar ve bölmeler için hem yük taşıyan hem de yük taşımayan kısımlarda genellikle ince agregasız beton kullanılabilir. İnce agregasız betonun dayanımı,

çimento içeriği arttıkça artmaktadır. Ayrıca yetersiz su içeriği, parçacıklar arasında kohezyon eksikliğine ve dolayısıyla betonun dayanımında azalmaya yol açabilir. Aynı şekilde, çok fazla su içeriği, çimento-agrega arasındaki aderansı azaltacağı için dayanım kaybı oluşacaktır.

2.1.2 Hafif Agregalı Beton

Hafif agregalı betonda geleneksel beton yerine düşük özgül ağırlıklı gözenekli hafif agregalar kullanılmaktadır. Hafif agregalar doğal olmakla beraber genellikle özgül ağırlığı 2,6'dan azdır (Mehta ve Monteiro, 2006). Hafif agregalar; pomza, perlit, vermikülit, diyatomit, volkanik küller gibi doğal malzemelerdir (Concrete, 1987; Neville, 2000; Miled vd., 2004). Şekil 2.1 hafif agrega türlerini göstermektedir (Hamad Mohammed ve Hamad, 2014).



Şekil 2.1 Yapay ve Doğal Hafif Agregalar.

Bu hafif betonun ana özelliği, düşük özgül ağırlık ile sonuçlanan yüksek gözeneklilikdir. Hafif betonun özelliği agrega tipine bağlıdır, yapısal hafif betonlar 35 MPa'dan daha fazla basınç dayanımına sahiptir. Literatürde 48MPa'dan 69MPa'ya kadar silindir basınç dayanımına sahip hafif betonlarda mevcuttur (Walraven, 2002).

2.1.3 Gaz-Köpük Beton

Gazbeton, iri agrega kullanılmadan ve hava içeriği yüksek bir harç olarak kabul edilmektedir. Tipik olarak, gazbeton, hava veya başka bir gazın bir çimento bulamacına katılmasıyla yapılmaktadır. Ticari uygulamada, kumun yerini pülverize yakıt külü veya diğer silisli malzemeler kullanılabilir (Samidi, 1997).

Gazbetona benzeyen bir bir hafif beton türüde köpük betondur. Köpük beton ilk olarak önceden hazırlanmış köpüğün karışıma ilave edilmesiyle veya köpürtücü ajan olarak bilinen özel bir hava sürükleyici katkı maddesinin bir çimento pastası veya harca eklenmesiyle üretilir (çimento+su veya çimento+kum+su). İlk yöntem, makul bir yüksek mukavemete ve düşük kuruma büzülmesine sahip beton üretmek için prekast beton fabrikalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci yöntemde önceden belirlenmiş miktarda alüminyum tozu ve diğer katkı maddelerinin öğütülmüş yüksek silisli agrega, çimento veya kireç ve su bulamacına eklenmesiyle üretilir (Li, 2011). İkinci yöntem çoğunlukla yerinde beton için kullanılır. Yalıtım, çatı şapları veya boru yalıtımları için çok tercih edilmektedir. Gazbeton yada köpük beton üretiminde otoklav sürecine göre de sınıflandırma yapılabilmektedir. Şekil 2.2'de otoklav sürecine göre yapılan sınıflandırmayı göstermektedir.



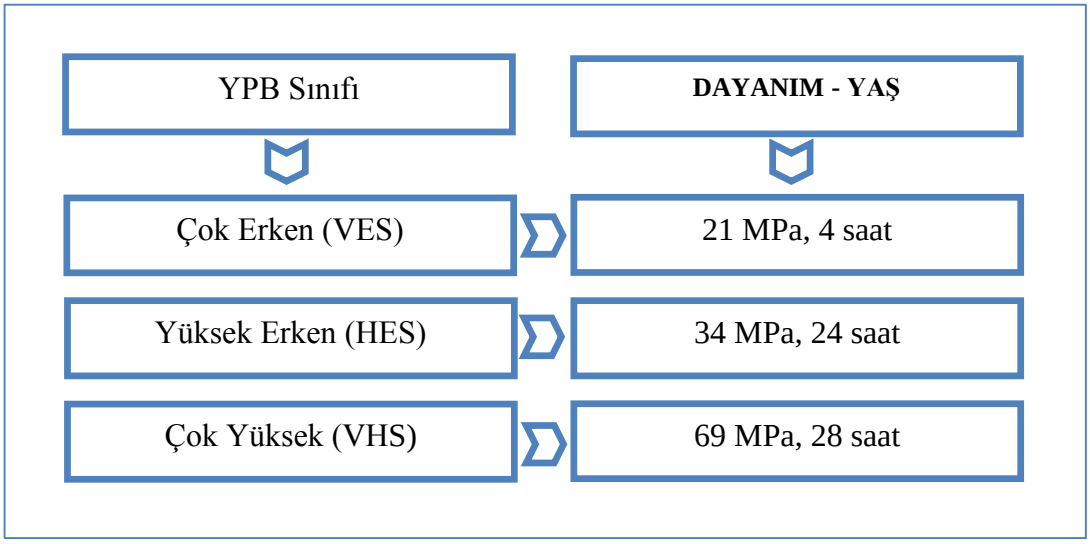
Şekil 2.2 Köpük/Gaz otoklav sürecine göre sınıflandırılması.

2.2 AASHTO İçin YPB Tanımı

Yüksek Performanslı Beton (YPB) için birkaç ana tanım önerilmektedir. Genel olarak YPB, geleneksel betonla elde edilemeyen belirli performans gereksinimlerini karşılayan özel bir betona verilen isimdir (Dwairi vd., 2010). YPB basitçe yüksek dayanımlı beton anlamına gelmez, aynı zamanda yüksek erken yaş dayanımı, yüksek akışkanlık, yüksek E-Modulü, düşük geçirgenlik ve çevresel etkenlere karşı dayanıklılık gibi özellikleri kapsamaktadır. YPB genellikle yüksek dayanımlı betondur (YDB), ancak YDB her zaman yüksek performanslı beton olmayabilir (Zia vd., 1997). YPB'nin tanımının yıllar içinde önemli ölçüde değiştiği de unutulmamalıdır. Halen, YPB 'nin tanımı konusunda bir fikir birliğine varılmamıştır ancak, YPB birkaç yolla tanımlanabilmektedir.

2.2.1 Strategic Highway Research Programına göre YPB Tanımı

Strategic Highway Research Program (SHRP), YPB'yi "geleneksel betonların sınırlamalarının üstesinden gelmek için önerilen belirli kriterleri karşılayan herhangi bir beton" olarak tanımlamıştır (Zia vd., 1997). SHRP'nin tasarım oranları, maksimum 0,35'lik bir S/Ç oranını önermektedir ve performans kriterleri olarak %80'lik bir minimum dayanım faktörünü içermektedir. Şekil 2.3'de gösterilen kriterler YBP tasarımı için önemlidir. Ayrıca bu kriterlere göre sınıflandırmada yapılmaktadır.



Şekil 2.3 SHRP Yüksek Performanslı Beton Kriterleri

2.2.2 Amerikan Beton Enstitüsünün (ACI) YPB Tanımı

Amerikan Beton Enstitüsüne (ACI) (Mousavi vd., 2012) göre YPB, geleneksel betondan daha iyi performansa sahip bir beton sınıfıdır. Ayrıca ACI, YPB'yi geniş bir şekilde "sadece geleneksel malzemeler ve normal karıştırma, yerleştirme ve sertleştirme uygulamaları kullanılarak her zaman rutin olarak elde edilemeyen özel performans ve gereksinimlerini karşılayan beton" olarak tanımlamıştır (Acketing, 2001). Geleneksel betonun sınırlamalarının üstesinden gelmek için üretilen ve belirli kriterleri karşılayan herhangi bir beton, YPB olarak adlandırılabilir. YPB'nin gereksinimleri arasında, segregasyon olmadan yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin yapılması, uzun vadeli mekanik özellikler, erken yaş dayanımı, hacimsel kararlılık veya zararlı ortamlarda uzun hizmet ömrü gibi özellikler yer almaktadır.

2.2.3 Federal Highway Administration YPB Tanımı

FHWA, YPB'nin (Goodspeed vd., 1996) dört farklı kriter derecesi için performansa dayalı şartnameler önermektedir. Bu şartnameler, dayanım, süneklik, donma-çözülme dayanıklılığı, klorür geçirgenliği, aşınma direnci, pullanma direnci, büzülme ve sünme gibi 8 performans özelliği ile ifade edilir. Tanım uzun vadeli performans kriterleriyle sınırlandırılmaktadır.

2.2.4 Diğer YPB Tanımları

Forster, YPB'yi "seçilen bir karışım tasarımına göre uygun malzemelerle birleştirilmiş ve elde edilen betonun maruz kalacağı yapıda mükemmel performans göstermesi için uygun şekilde karıştırılmış, taşınmış, yerleştirilmiş, sıkıştırılmış ve kürlenmiş bir beton olarak tanımlamaktadır" (Forster, 1994). YPB'nin tanımı, 56 günde 90MPa'dan fazla minimum basınç dayanımı, bir günde 60 MPa'dan fazla basınç dayanımı, minimum E-modülü en az 41,3 GPa gibi önemli kriterleri içerecek şekilde özetlenebilir. Ayrıca betonun yüksek işlenebilirliğe sahip olması gerektiği de belirtilmiştir (Myers ve Carrasquillo, 2000).

2.3 YPB Karışım Tasarımı ile İlgili Temel Bilgiler

YPB, üstün özelliklere sahip modern bir yapı malzemesidir. Yüksek basınç dayanımı bu üstün özelliklerinin en önemlisidir (Ragalwar vd., 2016). Basınç dayanımına, yüksek E-modülü, düşük geçirgenlik ve mükemmel dayanıklılık YPB'yi geleneksel betondan ayırmaktadır. Tüm bu özellikler, tasarım sırasında dikkate alınabilecek bazı temel prensipler ve özel üretim yöntemleriyle elde edilebilir: Bir beton matrisinde kusur oluşumunu en aza indirmek ve parçacık boyutu dağılımını optimize ederek maksimum yoğunluk elde etmek, s/ç oranını en aza indirmekle ilgilidir. Daha büyük partiküller arasındaki boşlukları doldurmak, reolojik özellikleri iyileştirmek ve ikincil kalsiyum silikat hidrat oluşumunu artırmak için puzolanik malzemeler kullanılmalıdır. Ayrıca, su azaltıcı katkıların kullanılması ve çatlak gelişimini önlemek için çeşitli liflerin karışıma dahil edilmesi önerilmektedir (Justs vd., 2013).

2.3.1 Çimento Esaslı Malzemeler

Gözeneklilik, boşlukların toplam hacim üzerindeki oranı olarak tanımlanabilir. Bu bakımdan beton gözenekleri üç ana kategoriye ayrılmıştır. Birincisi, kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelinde oluşan jel gözenekleridir. 0,0018–0,0025μm boyutunda olan bu gözenekler, betonun mekanik veya transfer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir; ancak hapsolmuş su bu gözeneklerden uzaklaştığında betonda büzülme meydana gelmektedir. İkincisi, çimento matrisinde oluşan kılcal gözeneklerdir. Bu gözeneklerin boyutu 10 ile 50 nm arasındadır. Üçüncüsü, beton karıştırma sırasında kasıtlı olarak sürüklenen hava nedeniyle oluşan hava boşluklarıdır; sürüklenmiş hava daha çok donma-çözülme etkisine maruz yapı elemanları için kullanılmaktadır. Bu hava boşluklarının normal aralığı 50–20μm'dir; ancak bu gözeneklerin boyutu 3 mm'ye kadar olabilmektedir. Kılcal ve hava boşlukları betonun dayanımını azaltabilir. Ancak sürüklenmiş hava betonun donma-çözülme direncini arttırabilir. Betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerinde gözeneklilik ve gözenek yapısı çok önemlidir (Sohail vd., 2018). Gözenek hacmini ve boyut dağılımını etkileyen faktörler, başlangıçtaki s/ç oranı, hidratasyon derecesi, çimentonun inceliği ve kür süresi ile ilişkilidir.

Yüksek dayanımlı beton elde etmek için, agrega ile çimento matrisi arasında 30-50 μm genişliğinde bir bölge olan arayüzey geçiş bölgesi (ITZ) mevcuttur (Diamond ve Huang, 2001; Hu, 2004), ayrıca iri agregaların çimento gibi ince taneciklerüzerindeki etkisi içsel terlemeden dolayı daha fazla gözeneklilik gösterir. ITZ, beton mekanik özelliklerinde en zayıf halka olarak kabul edilmektedir. ITZ'deki gözeneklilik, agrega yüzeyinin yakınında artar ve agregadan uzaklaştıkça azalır.. Düşük s/ç oranı ve akışkanlaştırıcıların kullanımı ITZ genişliğini ve gözenekliliği azaltmanın etkili yolları olabilir (Jiang ve Roy, 1994; Scrivener, 1999).

Gözeneklilik ASTM C1.754/C1.754M-12 (ASTM, 2012) veya RILEM CPC11,3 (RILEM, 1994) ile ölçülebilmektedir. Yöntemler arasında, kuru beton parçalarının basınç altında suya veya cıva içine daldırılması ve beton gözenekliliğini hesaplamak için ağırlık değişiminin ölçülmesi yer almaktadır. Betonlar için daha yüksek dayanım ve akışkanlık elde etmek için, sıfıra yaklaşan gözenekliliğe ulaşmak oldukça önemlidir. Araştırmacılar, seramik malzemeler için %10'a kadar gözenekliliğin dayanımı %50 oranında azaltabileceğini kanıtlamışlardır (Sohail vd., 2018).

2.3.2 Matris ve Mikroyapı

YPB'nin birçok avantajına ve araştırmacıların bu tip betona olan ilgisinin artmasına rağmen, beton karışımındaki yüksek çimento içeriği en büyük sorun olmaya devam etmektedir. Çünkü çimento oranı metreküp başına toplamın üçte ikisinden fazlasına ulaşabilmektedir. 2013 yılında, Çin'de yaklaşık dört milyar ton Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento endüstrisinden kaynaklanan CO_2 emisyonları, küresel antropojenik CO_2 emisyonlarının %5'inden fazlasını oluşturmaktadır (Gartner ve Hirao, 2015). CO_2 emisyonlarının azaltılması için en ideal yöntemin çimento ikame malzemelerinin kullanılması olduğu vurgulanmaktadır. Beton karışımındaki yüksek çimento içeriği, mikroyapı üzerindeki en etkili özelliklerden birisidir.

Ayrıca, yüksek katkı dozajı ve yüksek çimento içeriği kombinasyonu ile iri agregaların ortadan kaldırılması ve düşük s/b oranı sayesinde yüksek mekanik özellikler ve dayanıklılık sağlanabilir. Çok yüksek çimento içeriğinin dayanıklılık ve sürdürülebilirlikle ilgili zorluklar yarattığı bilinmektedir (Arora vd., 2018). Uçucu kül,

yüksek fırın cüruf, silis dumanı ve metakaolin (Alsalman vd., 2017; Huang vd., 2017) gibi malzemeler YPB'de çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilmektedir.

2.3.3 Malzeme Homojenitesi

Homojenlik için, agregalar ve çimento arasındaki ilişkiyi gösteren arayüzey geçiş bölgesine (ITZ) odaklanılması gerekmektedir (Mehta vd., 2017). Bu nedenle YPB, çimento esaslı malzemelerde hidratasyon ve puzolanik reaksiyonların yanı sıra katı partiküllerin paketlenme etkisi (packing effect) yanı sıra çok yoğun ve üniform bir mikroyapıya sahiptir. Düşük s/b oranı da gözenekliliği azaltmada önemli bir role sahiptir, bu nedenle kalsiyum hidroksit (CH) kristallerinin büyümesi için mevcut alanı kısıtlamaktadır. Yüksek sıcaklıkta kürleme, çimento hidratasyonunu hızlandırmada aktif bir rol oynayabilir ve mineral katkıların puzolanik etkilerini arttırır. Yüksek sıcaklıkta kürleme, çimentonun hidratasyonundan kaynaklanan CH ile çimento ikame malzemeleri arasındaki puzolanik reaksiyonlar için faydalıdır. Yüksek sıcaklıkta yapılan kür mikroyapıyı iyileştirir ve dolayısıyla daha yüksek dayanım sağlar.

Geleneksel betondaki agregalar genellikle çimento hamurundan daha yüksek sertliğe sahiptir ve iskelet görevi görmektedir. Bununla birlikte, agregalar ve pasta arasındaki termal ve mekanik özelliklerdeki farktan dolayı, kesme ve çekme gerilmeleri meydana gelebilir. Bu etkiler ITZ'de mikro çatlaklara neden olabilir. Bu sorun, YPB'nin ilk gelişimi sırasında 400 mikron çapında kuvars kumu kullanılarak çözülmüştür (Wang vd., 2015). YPB'deki ITZ, matris kadar yoğun görünmektedir. Homojen yapı, YPB'nin mükemmellik performansı için oldukça önemlidir.

2.4 YPB'de Malzeme Seçimi

YPB, dayanım, süneklik ve dayanıklılık olmak üzere üç ana özellikle ele alınmaktadır. Bu tür bir beton, karakteristik basınç dayanımı 70MPa ve üzerinde arandığı takdirde tercih edilmektedir. YPB, geleneksel normal mukavemetli betona kıyasla doğası gereği daha gevrektir (Dhinakaran vd., 2017) ve bu durum daha yüksek miktarda çimento kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Daha düşük s/ç oranıyla ve işlenebilirlikten ödün vermeden yüksek performans elde edilebilir. Bu nedenle kimyasal, mineral katkılar ve lifler, daha düşük s/b oranı, süneklik ve yüksek

işlenebilirlik sağlamak için kullanılmaktadır (Dhinakaran vd., 2017). YPB'den farklı yollarla daha iyi performans elde etmek mümkündür. Pek çok çalışma esas olarak çimento ve onun özelliklerine odaklanmıştır ancak karbon ayak izinde bir azalma sağlamak için endüstrilerden açığa çıkan atık ürünlerde kullanılmalıdır.

2.4.1 Çimento Esaslı Malzemeler

2.4.1.1 Çimento

Özellikleri kullanım amacına göre değişen çeşitli çimento türleri bulunmaktadır. Örneğin, fiziksel veya kimyasal gereksinimler gibi farklı gereksinimlere uyacak şekilde üretilmiş sekiz tip Portland çimentosu bulunmaktadır. Bunlar; yüksek erken dayanımlı çimento, düşük ısılı çimento ve sülfata dayanıklı çimento bunlardan bazılarıdır. Bu tür çimentolar tercihen temellerde ve yeraltı yapılarında tercih edilmektedir. Amerikan Petrol Enstitüsü (API) (Bett, 2010) tarafından yer altı uygulamalarında bu çimento türlerinin sınıflandırılmasına karar verilmiştir.

Ayrıca, CO_2 emisyonu ve sera etkisi nedeniyle tüm dünyanın maruz kaldığı ciddi bir çevresel sorun meydana gelmiştir. 992'deki Rio de Janeiro Dünya Zirvesi'nden ve 1997'deki Kyoto Protokolü'nün ardından, birçok ülke CO_2 emisyonunu en aza indirmeyi taahhüt ve kabul etmiştir. Bu, çimento endüstrisindeki klinker üretiminin ancak yüksek fırın cürufu, uçucu kül, doğal puzolan, silis dumanı, kalsine şist, kalker tozu gibi ikame malzemeleri kullanılarak azaltılmasını gerektirmektedir (En, 2007). Bu tip bağlayıcılar, kompoze çimento olarak adlandırılabilir, çimentonun bir veya iki tip çimento malzemesi ile karıştırılması daha az gözenekli, daha dayanıklı, daha az ısı üretimi imkanı sunmaktadır.

Kalkerli ve traşlı çimentolar CO_2 emisyonlarını azaltmak için kullanılan en yaygın çimentolardandır. Traslı çimentolarda genellikle puzolanik malzemeler kullanılmaktadır (Ramezanianpour ve Malhotra, 1995). Türkiye, dünyadaki puzolan açısından zengin ülkelerden biri olarak kabul edilmektedir.

2.4.1.2 Silis dumanı

Silis dumanı (SD), Ferro-krom, Ferro-manganez, kalsiyum silikon vb. silikon alaşımlarının üretimindeki yan ürün olarak tanımlanabilir. Silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı ile birlikte yeni nesil YPB'nin en önemli bileşenidir. Bilinen üstün özelliklerinden dolayı çeşitli avantajları vardır; mikro gözenekleri doldurma kabiliyeti, yağlama etkisi ile reolojik özelliklerinin arttırılması bunlardan en önemlileridir. Ayrıca birincil hidratasyondan kaynaklanan CH ile reaksiyona girerek ikincil C-S-H üretilmesini sağlamaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1995a).

Son zamanlarda SD, puzolanik bir malzeme olarak kullanılmıştır ve bu malzeme dayanıklılık, dayanım ve geçirimsizlik gibi beton özelliklerini artırabilmektedir. Yapılan çalışmalarda, sabit s/ç oranında çimento içeriğindeki azalmanın taze ve sertleşmiş beton özelliklerine zarar vermediği ve çimento içeriğinin ağırlıkça %10'u olarak silis dumanı eklendiğinde performansı gerçekten artırabileceği gözlemlenmiştir (Husk ve Steel, 2012). Silis duman, yüksek aşınma direncinin ve düşük geçirgenliğin çok önemli olduğu ve yüksek kohezif karışımların gerekli olduğu yerlerde kullanılabilmektedir.

Mumbai'deki J.J hastanesi ile Crawford arasındaki viyadük inşaatında, yapının dayanıklılığını sağlamak için SD'nin ağırlıkça %10 çimento ile yer değiştirilmiştir. YPB'nin 28 günlük basınç dayanımının 79,6 ile 81,3MPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Dhanalakshmi ve Ganesan, 2017). Bir başka araştırmada, Kanada'da alkali-silika reaksiyonunu (ASR) kontrol etme üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada, SD ile karıştırılmış düşük alkali Portland çimentosu içeren kompoze çimento kullanımının betondaki genleşmeyi kontrol etmenin uygun bir yolu olacağı sonucuna varılmıştır (Naresh ve Dadapeer, 2017). SD kullanımının sadece YPB için değil, düşük/orta performanslı beton üretiminde de bir zorunluluk olduğu söylenebilir, kimyasal etkilerin olduğu inşaat alanlarında kullanılabilir. Genel olarak, iyi kalite kontrol ile SD kullanılarak yüksek erken dayanım elde edilebilir, bu da yüksek yapılar, köprüler, derin temeller, koşu yolları gibi çeşitli inşaat yapılarında yararlı olabilir.

2.4.1.3 Uçucu kül (UK)

Kömürle çalışan elektrik santrallerinin ana yan ürünü olan uçucu kül UK, kompoze Portland çimentolarının bir bileşeni veya betonda bir mineral katkı olarak kullanılabilen puzolanik malzeme olarak kabul edilmektedir. Ticari uygulamada, UK oranı çimentonun kütlece yüzde 15 ile 20'si ile sınırlıdır (Bendapudi ve Saha, 2011). Normalde, bu oran betonun işlenebilirliği ve maliyeti üzerinde yararlı bir etkiye sahiptir, ancak sülfat saldırısına, alkali-silika reaksiyonu genleşmesine ve termal rötreye karşı dayanıklılığı yeterince iyileştirmek için yeterli olmadığı belirlenmiştir. Bu sorunları önlemek için yüzde 25 ile 35 oranından daha yüksek miktarlarda uçucu kül kullanılmaktadır.

Yüksek hacimli uçucu kül sistemi, sürdürülebilir YPB karışımları üretmek için tercih edilmektedir. Bu sistemde yüzde 25 ile 35 oranında UK kullanımı önerilmektedir, ancak bu oranlar yüksek hacimli UK betonu olarak sınıflandırmaya yeterli olmamaktadır. Araştırmacılar, %50 veya daha fazla UK ikamesi ile, yüksek işlenebilirlik, nihai dayanım ve dayanıklılık sunan sürdürülebilir, YPB karışımları üretmenin mümkün olduğunu belirlemişlerdir. Yüksek hacimli UK içerikli, beton karışımını belirleyen özelliklerin bazıları aşağıdaki gibidir (Lippiatt ve Ahmad, 2004b):

- UK çimento yerine kütlece minimin %50 oranında kullanılmalı;
- 30MPa'dan fazla 28 günlük basınç dayanımına sahip beton karışımları için süperakışkanlaştırıcıların kullanılması zorunludur;
- 30MPa'nın altında 28 günlük basınç dayanımına sahip beton karışımları için, s/b oranı 0,40 mertebesinde olan yüksek hacimli UK beton karışımları süperakışkanlaştırıcılar olmadan üretilebilinir;
- Düşük su içeriği için su miktarının genellikle 130 kg/m³'ten az olması zorunludur;
- Genellikle 200kg/m³'ten fazla olmayan çimento içeriği tercih edilir;

- Donma ve çözülme ortamlarına maruz kalan betonlar için, yeterli hava boşluğu hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılması ile sağlanmalıdır.

2.4.1.4 Yüksek fırın cürufu (YFC)

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC), yüksek fırınlarda oluşan yan ürününden elde edilen camsı bir malzemedir. Esas olarak yüksek reaktiviteye sahip kalsiyum silikoalüminat içermektedir (Gao vd., 2005). Ayrıca alternatif bir malzeme olarak suyla doğrudan reaksiyona girebilen gizli bir hidrolik malzeme olarak tanımlanabilir (Christina Mary ve Kishore, 2015). Ayrıca YFC'nin çeşitli avantajları bulunmaktadır. Örneğin, taze betonun akışkanlığını arttırabilir, betonun terlemesini azaltabilir, su geçirmsizliği artırabilir, klor geçirgenliğini azaltabilir, deniz suyu ve sülfat iyonlarının kimyasal saldırılarına karşı direnci arttırabilir, hidrasyon ısısını azaltabilir (Ogawa vd., 2008).

Çalışmalarda YFC'li betonun erken yaş dayanımı referans betona oldukça yakındır çünkü YFC'nin puzolanik reaksiyonu çok erken yaşta başlarken, daha sonraki yaşlarda dayanım zamanla artış göstermektedir.

YFC agrega ve pasta arasındaki ITZ'yi güçlendiren bir etkiye sahiptir. ITZ, betonun mikroyapısında zayıf bir alan olarak tanımlanmakta ve performansını etkileyen önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir. YFC, agrega-pasta arasındaki ITZ'de yer alan $Ca(OH)_2$ kristallerinin içeriğini önemli ölçüde azaltır, bu da ITZ'nin mikroyapısını daha yoğun hale getirir (Gao vd., 2005).

2.4.2 Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkılar (YOS)

Beton, malzemelerin oranlanması ve özel gereksinimlerden dolayı çeşitli polimer kökenli katkılar kullanılmaktadır. YPB'nin ekonomik duruma gelmesi için çimento ikame malzemesi olarak da adlandırılan büyük miktarda mineral katkılar kullanılmaktadır. YPB'nin ana noktası, esas olarak, gerekli özellikleri elde etmek için özel katkıların kullanılmasıdır. Örneğin, ticari olarak süperplastikleştiriciler (Akhnoukh ve Elia, 2019) olarak bilinen yüksek oranda su azaltıcılar (YOS), önceden belirlenmiş düşük s/b oranı nedeniyle yeterli reolojinin sağlanması ve geçiş

kabiliyetini korumak için kullanılmaktadır. Ayrıca, YOS kullanımı, YPB'ye karşı yüksek derecede akışkanlık ve ayrışma direnci sağlayabilir ve bu etki YPB için belirgin bir avantajdır.

2.4.3 Agrega

Dünya çapında yapı sektöründeki hızlı büyüme ve yapı malzemelerine olan talebin artması, doğal kaynakları olumsuz etkilemektedir. Bu kaynakların hızlı tüketimi, uzun vadede çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bunun iyi bir örneği, nehir yataklarının doğal agrega kaynağı olarak kullanılmasıdır. Bu durum yeraltı suyu özelliklerini etkilediği gibi nehir yataklarındaki doğal bitki örtüsünün kaybolmasına da neden olmaktadır (Suresh ve Revathi, 2016).

Deniz kumunun beton üretiminde kullanılması dayanıklılık problemleri nedeniyle uygun değildir. Deniz kumunun beton üretiminde kullanılması için dayanıklılık özellikleri dikkate alınarak iki iyileştirme yöntemi önerilmiştir. Birinci yaklaşım, deniz kumunun alkali içeriğinin azaltılması yada iyileştirilmesidir. İkinci yaklaşım ise agrega bünyesindeki klorür içeriğini azaltmaktadır. Beton içindeki alkali oranı ortam nemi ile yakından ilişkilidir. Ortamdaki em ne kadar düşükse, alkali ortam o kadar zayıftır. Bu nedenle, beton örtü tabakasının sızdırmazlığının iyileştirilmesi, içsel alkali ortamın şiddetini azaltabilmektedir.

Bu iki yöntem kullanılarak deniz kumunun zararlı etkisi azaltılsa bile çok uygun olmamaktadır. Çünkü bu defa deniz kumunda iyileştirme süreçleri maliyeti arttıracaktır. Klorür içeriğinin azaltılması için etkili bir yıkama süreci uygulanmalıdır. Klorür etkisini azaltmak için kimyasalların kullanılması durumunda, betonun diğer özelliklerini etkileyebileceği görüşü mevcuttur (Suresh ve Revathi, 2016).

2.4.4 Lifler

YPB başta olmak üzere her beton türü için çekme dayanımı, E-modülü, termal genleşme, ve yüksek ısı oluşumu, büzülme, işlenebilirlik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık gibi beton özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Beton karışımına liflerin eklenmesi, özellikle çekme dayanımı için mekanik özellikleri önemli ölçüde

iyileştirebilir (Tadepalli vd., 2013). Liflerle güçlendirilmiş YPB, dayanım, tokluk ve dayanıklılık özellikleri açısından iyileşme göstermektedir. Tek lif ilavesi, betonun yalnızca tek bir yönünün performansını artırabilir ve betonun genel performansını artırma, farklı liflerle karıştırılarak elde edilmelidir (de Camba, 2009).

Araştırmalar sonucunda YPB üzerinde olumlu etkileri olduğu gösterilen ve üretimde kullanılabilecek birçok lif türü mevcuttur. Örneğin bazalt lifi, yeni nesil çevre dostu, ve yüksek performanslı lif türüdür. Bazalt liflerinin ilk kullanımı 1998 yılında başlamıştır. Bazalt kayalarının, küçük parçacıklara bölündükten sonra, lif formunda veya doğranmış olarak üretilmesi mümkündür. Ek olarak, bazalt lifler üretim sürecinde başka hiçbir katkı maddesi içermemekte ve bu da maliyet açısından ek avantaj sağlamaktadır. Bazalt lifi, beton karışımının içinde ayrışmaya neden olmadan kolayca dağılır (Ayub vd., 2014). Bazalt lifler birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, yüksek performanslı fiber takviyeli betonlar havaalanı pistlerinin ve otoyol kaplamalarının yapımında kullanılmaktadır. Bazalt lifler, basınç dayanımı, E-modülü ve çekme dayanımı açısından birçok avantaja sahiptir. Bazalt liflerin nispeten maliyeti düşüktür ve beton için yeni nesil bir lif tipidir. Bazalt lif, çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımını, tokluğunu ve kırılma enerjisini arttırmaktadır. Bazalt lifin E-modülü, polipropilen, PVA ve benzeri liflerden önemli ölçüde daha yüksek olan 93-115 GPa'ya ulaşabilmektedir (Wang vd., 2019).

2.4.5 Ultra Yüksek Performanslı Betonların (UYPB) Tasarımı ve Kompozisyonları

UYPB'da yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılığa ulaşma açısından dört ilkeye dikkat edilmelidir. Bunlar;

1) Yaklaşık 0,20 ile 0,25 arasında düşük bir s/ç oranı, mikroyapıyı iyileştirerek kılcal gözenekleri en aza indirir.

2) Özellikle matrisdeki ince tanelerin yüksek paketleme yoğunluğu, taze karışımın su ihtiyacını azaltır ve betonun gevrekliğinin yanı sıra basınç dayanımını da arttırır.

3) Çekme, eğilme ve kesme dayanımını yükseltmek ve betonu yeterince sünek hale getirmek için çelik veya diğer liflerin kullanılması önemlidir.

4) İşlenebilirliği düzenlemek için daha yüksek miktarlarda etkili süperakışkanlaştırıcıların kullanılması gerekmektedir (Schmidt ve Fehling, 2005).

Dayanıklılık ve işlenebilirlik için istenen karışıma ulaşmak için, birçok araştırmacı malzemelerin oranlarını değiştirerek basınç ve çekme dayanımını arttırmak için süperakışkanlaştırıcılar ve katkı maddelerinin UYPB'ye etkilerini incelmiştir. Bir UYPB karışımının içerikleri farklılık gösterebilir. UYPB'nin ilk uygulamalarında karışımlar genellikle yaklaşık 700 kg/m^3 Portland çimentosu, %25 silis dumanı, %25 kuvars tozu ve tane boyutu 0,8 mm'den 0,03 mm'ye kadar olan ince agregalardan oluşmaktaydı. Bununla beraber 0,16 ile 0,20 gibi çok düşük bir su bağlayıcı oranı kullanılmaktaydı. Akıcılık için, yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmalıdır. Hacimce yaklaşık %2 ile 2,5 oranında çelik elyaf kullanılmaktadır. Kullanılan lifler çok ince tellerden kesilmektedir (Voo ve Tadros, 2016). Bunların yanında diğer karışımlar da geliştirilmiştir; örneğin, bazı araştırmacılar, yerel agregaları kullanarak UYPB karışımlarının maliyetini yaklaşık %10 azaltmıştır (Maher vd., 2009). Ancak, yapılan bu karışım UYPB tanımına tam olarak uymamaktadır çünkü basınç dayanımı 124 MPa olarak belirlenmiştir. UYPB için basınç dayanımının en az 150 MPa olması bazı çalışmalarda belirtilmiştir.

UYPB tasarımı, iyi işlenebilirlik ve dayanıma sahip, yoğun bir çimentolu matris elde etmeyi amaçlamaktadır. UYPB karışım tasarımı için çeşitli modeller sunulmuştur. Örneğin, araştırmacılar UYPB karışım tasarımı için doğrusal bir paketleme yoğunluğu modeli (LPDM) önermektedirler. Bununla birlikte, bu model, doğrusal yapısı nedeniyle malzeme oranları ve paketleme yoğunluğu arasındaki ilişkiyi ele alamadığı için bazı dezavantajları bulunmaktadır. Daha sonra bu model, katı süspansiyon modeli (SSM) olarak bilinen sanal yoğunluk teorisi dikkate alınarak geliştirilmiştir. Bu yeni model, 0,14 s/b oranı olmasına rağmen akışkan kıvamda üretilmektedir. Karışım 90°C'de 4 günlük kür işleminin sonucunda 236 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır (de Larrard ve Sedran, 1994). Aynı araştırmacılar, sıkıştırma indeksi kavramına ve sanal paketleme yoğunluğuna dayalı olarak ikinci modelde daha fazla iyileştirme

yapmışlardır. Sıkıştırılabilir paketleme modeli (CPM) olarak bilinen bu üçüncü nesil paketleme modelleri, UYPB tasarımı için önerilmiştir (De Larrard ve Sedran, 2002). Sonuç olarak araştırmacılar, CPM kullanarak karışımı optimize ederek iki UYPB ürünü (RPC 200 - RPC 800) geliştirmişlerdir (Richard ve Cheyrezy, 1995b).

Tasarım, partikül şekli, boyutu ve yoğunluğuna dayalı olarak yerel olarak üretilen bir UYPB karışımı daha tanıtılmıştır. Çok taneli ince parçacıkların kullanılmasının çimento içeriğini azaltabileceği açıklanmıştır. Başka bir araştırmada, partikül paketleme teknolojisine dayalı ekolojik bir UYPB karışımı geliştirilmiştir. Benimsenen yaklaşımla, çimento içeriğinin %50'den fazla azaltıldığı belirtilmiştir (Fennis vd., 2009). Bazı araştırmacılar ise, s/t oranına dayanarak istenen işlenebilirliği elde etmek için süperakışkanlaştırıcı ve su talebi yaklaşımına dayalı bir UYPB karışımı önermişlerdir (Azmee ve Shafiq, 2018).

Tipin, dolgu maddesi ve farklı s/b oranları ile UYPB'lerde, 180 MPa'ya kadar basınç dayanımı elde etmiştir. Yeterli akışkanlığa sahip karışımlarda yerel malzemelerle ve özel ısıl işlem kullanılmadan 200 MPa'dan daha fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. UYPB'nin basınç dayanımını tahmin etmek için, hava boşlukları ve s/ç oranının birleşik etkisi dikkate alınarak istatistiksel bir ilişki önerilmiştir (Azmee ve Shafiq, 2018).

2.5 UYPB Özellikleri

UYPB, çimento esaslı en gelişmiş yapı malzemelerinden birisidir ve s/b oranı 0,3'ün altına düşürülerek ve partikül dağılımı optimize edilerek çok yoğun matris olarak kabul edilen 150MPa'dan yüksek basınç dayanımı ile sınıflandırılabilir (Naaman ve Wille, 2012). Genel olarak, UYPB oldukça yüksek dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Yapıların servis ömrünü arttırmak için UYPB tasarımı birçok araştırmacının dikkatini çekmiş ve aşağıda verilen özelliklere göre tasarım ilkelerini benimsemişlerdir.

2.5.1 İşlenebilirlik ve Fiziksel Özellikler

UYPB'nin işlenebilirliği mekaniz ve dayanıklılık özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Yayılma çapı, priz süresi, otojen büzülme, gözeneklilik, kapiler su

emme, basınç dayanımı gelişimi, elastik modülü ve Poisson oranı fiziksel özelliklerden bazılarıdır. Yapı endüstrisi, diğer tüm endüstrilerden göre sürdürülebilirlik kavramından etkilenmektedir. Her şeyden önce, yapı malzemelerinin üretimi, binaların ve yapıların inşası ve bu yapıların daha sonra kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan çevresel sorunlar artış göstermektedir. Beton üretimi sırasında, performans üzerindeki etkisine bakmadan çevresel etkiyi azaltma çok kabul edilemez. Bu nedenle, maddi imkanlar açısından iki farklı yöntem önerilmiştir:

Birinci yöntem; malzemelerin kullanım ömrünü uzatmayı amaçlayan yüksek dayanıklılığa ve dayanıma sahip yapı malzemelerinin geliştirilmesidir (Ghafari vd., 2015). İkinci yöntem, endüstriyel yan ürünleri (Yazici vd., 2010) kullanarak veya inşaat ve yıkım atıklarının geri dönüştürülmesiyle daha az enerji ile üretilen yapı malzemelerinin geliştirilmesidir (Rao vd., 2007). Betonarme yapıların servis ömrü normalde 50 ile 100 yıl arasında değiştiğinden ve bu nedenle uzun bir süre boyunca çevresel etkilere maruz kalacağı bilinmektedir. Bu nedenle, yapıların sürdürülebilirliğini artırmak, hem montaj, bakım ve işletim süreçleri ile birlikte çevresel etkinin azaltılmasını hem de yapının maksimum teknik performansta dayanıklılığının artırılmasına katkı sağlayacaktır. UYPB, genellikle çimento da dahil olmak üzere yüksek enerji ihtiyacı duyduğundan, ekolojik açıdan sürdürülebilir bir malzeme olmayabilir. Sonuç olarak, daha az enerji ve endüstriyel yan ürünlerin çeşitli biçimlerini içeren çevre dostu UYPB geliştirilmesi oldukça önemlidir (Ghafari vd., 2014). 180 MPa'lık basınç dayanımına ulaşan UYPB'lerde yüksek oranda mineral katkılar kullanılmıştır (Park vd., 2008).

Diğer bir çalışma, yüksek yoğunluklu bir paketleme yöntemi (Teichmann ve Schmidt, 2004) yoluyla 200 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına ulaşılmıştır. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda geliştirilen çeşitli yöntemlere rağmen, bu yöntemler, taze haldeki tutarlılığı veya sertleştirilmiş haldeki dayanımı tahmin etmede etkili değildir. Bu çalışmalarda kürlemenin etkisi dikkate alınmalıdır. Ayrıca, bu çalışmalar yüksek akışkanlık ve yüksek basınç dayanımı sağlamak için bileşenlerin optimum dozajı hakkında kesin sonuçlar sunmamaktadır (Ghafari vd., 2015).

Şu anda, UYPB performansını tahmin etmek için yapay sinir ağları (YSA) ve istatistiksel karışım tasarımı (SMD) yöntemi gibi analitik modeller kullanılmaktadır. SMD yöntemiyle karşılaştırıldığında YSA modeli doğrusal olmayan yapısı nedeniyle basınç dayanımını (su ile sertleştirme) ve işlenebilirlik özelliklerini daha yüksek doğrulukla tahmin edebilmektedir (Ghafari vd., 2015).

Tüm çalışmalar, kürlemenin fiziksel ve mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir. UYPB'nin kürlenmesi, karakteristiği üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Hava ile kürlenen UYPB'nin özellikleri, geleneksel betonlara göre hala etkileyici olmakla birlikte, buharla kürlenen UYPB'den önemli ölçüde farklıdır (Graybeal ve Hartmann, 2016).

2.5.2 Mekanik Özellikler

UYPB, çimento ve mineral katkılar kullanılarak 150 MPa'dan fazla basınç dayanımı ile karakterize edilse de 250 MPa'dan fazla basınç dayanımı sağlayabilir. Bu özellikler, kaliteli bir çimento seçimi ve paketleme yoğunluğunun optimizasyonu ile elde edilmektedir (Wille vd., 2012). Araştırmacılar, kabul edilebilir bir işlenebilirliğe sahip olmak için düşük alkali içerikli (K_2O ve Na_2O) bir çimentonun seçilmesi gerektiğini önermişlerdir (Sakai vd., 2008). Alkalilerin yüksek oranda çözünür olan Na_2SO_4 ve K_2SO_4 formunda olmasından işlenebilirlik üzerinde oldukça etkilidir. Sülfatlar, C_3A ile reaksiyona girdiği için için süperakışkanlaştırıcı ile etkileşim halindedir. Bu nedenle, uygun bir işlenebilirliğe sahip olmak için, orta düzeyde SO_3 ve alkali içerikli bir çimento önerilmektedir (Sakai vd., 2008; Zingg vd., 2009). Diğer özellikler süperakışkanlaştırıcının eklenme süresi ve uygun karıştırma yöntemidir. Süperakışkanlaştırıcı tipi ve özelliklerinin önemli olduğu düşünülmektedir. Çimento hidratasyonunun gecikmesini azaltmak için uzun yan zincirlere sahip bir polikarboksilat eter (PCE) tercih edilmektedir (Zingg vd., 2009). Aynı yan zincir yoğunluğu ve yan zincir uzunluğu için daha kısa ana zincir uzunluğu en etkili polimeri vermektedir (Plank vd., 2006; Schrfl vd., 2008) Çimentonun dispersiyonu için ve diğeri mineral katkıların dispersiyonu için süperakışkanlaştırıcı kullanımı zorunludur (Plank vd., 2009). Süperakışkanlaştırıcıların ilave süresi ve yan zincirlerin uzunluğu, işlenebilirlik üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Tue vd., 2008). Çimento ve

süperakışkanlaştırıcı kombinasyonu iyi seçilmediğinde, işlenebilirlik ve reolojide bir azalma meydana gelmektedir. Bu nedenle, yayılma değerinde bir azalma ve UYPB içeriğinde artan hava içeriği oluşacaktır. Bunun sonucunda da klorür ve sülfat etkisine karşı daha zayıf bir kompozit üretilecektir. Ayrıca karışımda, lif varsa liflerin ayrılmasına ve kümelenmesine yol açacaktır (Wang ve Gao, 2016).

UYPB, diğer betonlara kıyasla mekanik, reolojik ve dayanıklılık özellikleri iyileştirilmiştir. UYPB, diğer beton türlerinden (Jo, 2011) daha yüksek viskoziteye sahiptir ve bu da yerleştirme işlemlerinde zorluklara yol açabilir. Düşük viskozite UYPB'de karıştırma, yerleştirme, sıkıştırma ve bitirme işlemleri için yeterli işlenebilirliğe sahiptir. Bununla birlikte, kendiliğinden yerleşme özelliği olan UYPB karışımlarının daha yüksek viskozite seviyeleri, UYPB'nin mekanik özelliklerini arttırarak daha iyi lif dağılımı sağlayacaktır (Khayat vd., 2019).

2.5.3 Büzülme (Rötre)

ASTM C1.856'ya (Yang vd., 2019) göre UYPB, en az 120MPa'lık basınç dayanımına, agreganın nominal maksimum tane boyutu 5 mm'den az ve mini çökme testinde en az 200 ve 250 mm'ye sahip olmalıdır. UYPB tasarımı için, genellikle gözeneklilikte azalma, mikroyapıda gelişme, homojenlikte ve toklukta artış gibi dört teorik ilke izlenmektedir (Shi vd., 2015). UYPB, yüksek bağlayıcı içeriği ve yaklaşık 0,2'lik s/b oranı nedeniyle erken yaşta nispeten yüksek otojen büzülmeye sahiptir (Wang vd., 2015). Yüksek büzülme, potansiyel çatlamaya ve sonunda betonun dayanımının ve dayanıklılığının azalmasına neden olabilir. Otojen büzülme, kendi kendine kuruyan ve çimento hidratasyonunun kimyasal sürecinden kaynaklanan kapiler basınca bağlı makroskopik hacim değişikliği olarak tanımlanabilir (ACI, 2010).

Otojen büzülme betonda s/b oranı azaldığında meydana gelebilir, s/b oranı azaldıkça büzülme artmaktadır. Erken yaşlarda gelişen yüksek otojen büzülme potansiyel çatlamalara neden olabilir ve bu nedenle sertleştirilmiş çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını etkileyebilir. s/b oranına ek olarak, otojen büzülmenin kürleme süresine, kürleme yöntemine ve karışımın bileşimine bağlı olduğu da belirtilmiştir (Liu vd., 2019).

Son yıllarda çimento esaslı malzemelerin otojen büzülmesini azaltmak için, çimento ikame malzemelerinin özellikleri ve kimyasal katkıların türleri, agrega hacmi, liflerin özellikleri, kürleme şartlarının değişmesi dahil olmak üzere kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. UYPB'nin otojen büzülmesi, çimento ve ikame malzemelerinin hidratasyon reaksiyonlarına ve oluşan gözenek yapısına bağlıdır. Bu nedenle, çimento yüzdesini ikame malzemeleri veya inert malzemelerle değiştirerek hidratasyonu kontrol etmek gereklidir (Rong vd., 2018; Shaikh vd., 2018; Mishra ve Singh, 2019).

İkame malzemeleri kimyasal bileşime göre değişkenlik gösterebilmektedir. Genel olarak ikame malzemelerinin kimyası, Portland çimentosununkine kıyasla daha düşük Ca içeriği ile karakterize edilir. Bu malzemelerin reaktivitesi ayrıca büyük ölçüde gözenek çözeltisinin alkalinitesine bağlıdır. Ayrıca, ikame oranı UYPB 'de çimentonun ilk hidrasyonunu da etkilemektedir. Hidratasyon işleminin neden olduğu kimyasal büzülme ve kendi kendine kuruma durumu azalır. Bununla birlikte, ikame malzemelerinin daha da artmasıyla, UYPB'nin mikroyapısının ve dayanımının olumsuz olarak etkilenebileceği gibi büzülme gerilmelerine karşı koyabilecek rijit bir iskeletin oluşumunun azalacağı da unutulmamalıdır (Soliman ve Nehdi, 2013; Wang vd., 2018). Ayrıca puzolan olarak doğal zeolitler de yüksek adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle iç kürleme maddesi olarak betona ilave edilebilmektedir. Genel olarak, hidratasyonun kontrolü, çimento esaslı malzemelerin reaksiyon hızını azaltabilir ve böylece otojen büzülme azalabilir (Tran vd., 2019).

2.5.4 Dayanıklılık

Kılcal gözenekler beton matrisindeki sıvıların hareketinden sorumlu olduğundan, betonun dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. UYPB sadece ultra yüksek basınç dayanımı sunmakla kalmaz, aynı zamanda ultra yoğun yapısı ve dolayısıyla oldukça düşük gözenekliliği nedeniyle ultra yüksek dayanıklılık sergiler. UYPB aynı zamanda betonarme yapılarla ilişkili çevresel hasarlara karşı da direnç gösterir. UYPB'nin ilk birim maliyeti, geleneksel betondan daha fazla olsa da, daha uzun servis ömrü, yüksek dayanımı, yeterli sünekliği ve dayanıklılığı nedeniyle yapısal elemanlar için daha hafif ve daha ince kesitler oluşturabilir (*Association Française de Génie Civil*, 2002).

UYPB, çok düşük hava, su ve klorür iyonları geçirgenliğine sahip çok dayanıklı bir çimentolu malzeme bilinmektedir (Wille vd., 2012; Alkaysi vd., 2016). Çimento matrisinin partikül paketleme yoğunluğunun optimizasyonu yoluyla birinci sınıf dayanım özelliklerine ulaşılır, bu yüksek partikül paketleme yoğunluğu aynı zamanda yüksek dayanıklılığa da yol açar (de Castro ve Pandolfelli, 2009). UYPB'de lif kullanımı sünek davranışı arttırdığı gibi dayanıklılığıda arttırmaktadır. Mevcut ve planlanan altyapının servis ömrünün arttırılması betonun dayanıklılığını son yıllarda giderek daha kritik bir hale getirmiştir (Wille vd., 2011).

2.6 Kür Şartları

Geçtiğimiz yıllarda beton, yapı malzemesi olarak yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Günümüzdeki önemi ise her zamankinden daha fazladır. Günümüzde betonun bazı dezavantajlarının ve zayıflıklarının üstesinden gelmek ve aynı zamanda yeni yapıların standartlara ve yönetmeliklere uygun olması için, betonun performansının iyileştirilmesine büyük ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek performanslı beton tasarımının en kilit noktalarından bir tanesi kür sürecidir.

Kürleme ve çevre koşulları betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Betonun fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesi, betonarme yapı sonrasındaki koşullara, kürleme süresine ve türüne bağlıdır. Taze betonun kalıba dökülmesinden sonra ve beton sertleşirken sıcaklığın yükselmesi ve ortamın nem içeriğinin azalması hatta rüzgar etkisi beton suyunun buharlaşmasına neden olmaktadır. Bu, hidratasyon sürecinin gelişmesini ve tamamlanmasını engelleyecektir. Ayrıca su ve nemin buharlaşma oranının düşürülmesi, hedef dayanımın elde edilme sürecine olumlu etki edeceği gibi büzülme, geçirgenlik ve aşınma direncine de katkı sağlayacaktır. Betonun nemini koruyarak ve hidratasyon işlemi için mevcut su miktarını arttırarak kürleme, dayanım ve dayanıklılık artışına neden olan çimento hidratasyon reaksiyonunu iyileştirecek ve hızlandıracaktır (Sajedi, ve Razak, 2011; Bingöl ve Tohumcu, 2013; Benli vd., 2017).

2.6.1 Kürleme Yöntemleri

Betonun dayanım kazanması ve doğru kürlenmesi için ideal yöntem 28 gün boyunca su kürünün yapılmasıdır. Bu yöntemde betonun doygunluk koşulları bir su havuzu kullanılarak veya beton yüzeyine sürekli su püskürtülerek sağlanmaktadır. İnşaat sektöründe, uygulama ve yüksek hızlı yapım koşullarına göre telis bezi, plastik veya polietilen levhalar ve sıvı kür malzemeleri kullanımı yaygındır. Kür malzemeleri ile beton yüzeyini koruyarak suyunun buharlaşması engellenmektedir (Al-Gahtani, 2010).

Alternatif olarak, betonda suyun buharlaşmasını önlemek ve betondaki suyu tutma kapasitesini artırmak için ek olarak hidrofilik malzemeler kullanılmaktadır (Chand vd., 2015; Nagaratnam vd., 2015). Bununla birlikte, şantiyelerde su kaynaklarının problemli olmaması, suyun alındığı yerden tüketim yerine taşınmasının zor olması, yüksek inşaat hızı gibi çeşitli nedenlerle kürleme süreci tam olarak gerçekleşemez. Betonun tabi tutulduğu çeşitli kürleme yöntemleri vardır. Bunlar; su kürü, kimyasal kür, Buhar kürü, otoklav kürü ve içsel kürleme olarak sıralanabilir.

2.7 Yapısal Hafif Beton (YHB)

Yapısal YHB günümüz yapı tasarımlarında önemlidir ve yapıdaki ölü yükleri azaltmaktadır. YHB, hafif agregadaki hava boşluklarından dolayı yüksek dayanım/ağırlık oranı, yeterli çekme dayanımı, düşük ısıl genleşme katsayısı ve üstün ısı ve ses yalıtım özelliklerine sahiptir (Mouli ve Khelafi, 2008).

2.7.1 Antik ve Modern Uygulamalar

YHB, 19. yüzyılın sonlarında ABD ve İngiltere'de sıkça kullanılmıştır. YHB, Birinci Dünya Savaşı sırasındaki inşaatlarda da sıkça kullanılmıştır. ABD ise bu malzemeyi esas olarak gemi yapımındaki beton bloklar için kullanmıştır. Blok yapımı için genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve pomza agregası 1930'larda İngiltere ve İsveç'te kullanılmaya başlanmıştır.

YHB’nin ABD'de resmi olarak ilk kullanım alanı 1960'lı yıllardan beri otoyol köprüleri olmuştur. ABD ve Kanada'da hafif agregalardan üretilen 200'ün üzerinde betonarme ve kompozit köprü bulunmaktadır. Doğu Avrupa'da, son on yılda hafif agregalarla 100'den fazla köprü inşa yapılmıştır. Batı Avrupa'da 1960 sonlarında ilk YHB köprüsünün inşa edilmesinden bu yana giderek üretim sayısı artmaktadır (Raithby ve Lydon, 1981).

FHWA, 1993 yılında, YPB’nin tasarımından hizmetteki köprülerin uzun vadeli izlenmesine kadar bütünleşmesini içeren bir dizi projeyi başlatmıştır (Acketing, 2001). Bugüne kadar, YPB köprüleri Amerika'da 12 farklı eyalette inşa edilmiştir. Basit betonarme yaya köprülerinden uzun açıklıklı ardgermeli kutu kiriş köprülerine kadar, YHB’nın etkin bir şekilde kullanıldığı köprüler bulunmaktadır. YHB sayesinde üst yapıda %25 ile 30 arasında ağırlık tasarrufu sağlanabilir, bazı durumlarda takviye ve öngerme çeliği ile ayak ve temellerde tasarruf sağlanabilir. Hafif agregaların daha yüksek başlangıç maliyeti olmasına rağmen ilerleyen süreçte yüzde 10 veya daha fazla genel maliyet tasarrufu sağlanabilir (Raithby ve Lydon, 1981). YHB köprüleri genellikle hizmette tatmin edici bir performans sergilemiştir ve dayanıklılığın en az geleneksel beton kadar iyi olduğuna dair kanıtlar mevcuttur.

Dünya çapında ciddi bir enerji sorununun varlığı hükümetler ve endüstri liderleri tarafından kabul edilmektedir. Binalar, AB'deki enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından ve CO_2 emisyonlarının %36'sından sorumludur (Hong vd., 2018). Bu konu, çevre ve sürdürülebilirlik konularında ciddi tartışmalara yol açmıştır. 2010 Enerji Performansı Direktifi (Záleská vd., 2018) ve 2012 Enerji Verimliliği Direktifi (Fijal, 2018), AB içindeki binaların enerji performansının iyileştirilmesini teşvik eden ana AB mevzuatıdır. 19 Aralık 2017'de onaylanan Binalarda Enerji Performansı Direktifi güncellemesine göre, yeni binaların 31 Aralık 2020'ye kadar neredeyse sıfır enerjili binalar olması gerekmektedir.

İnşaat endüstrisi, hem ekonomik büyümeyi hem de çevre korumayı birleştirebilecek çözümler sunmaya çalışmaktadır. Beton agregaları için doğal hammaddelerin tüketimine özellikle dikkat edilmektedir (Silva vd., 2013).

YHB, sismik faaliyetlere maruz kalan binalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Depremler sırasında yapı üzerindeki gerilmeler, yapının ağırlığı ile doğru orantılıdır. Pek çok araştırmacı, dinamik yükler altında YHB'nin daha yüksek sönümleme katsayılarına sahip olduğunu kanıtlamıştır. Bu nedenle, titreşim durumundaki yapı daha hızlı sönümleme gösterecektir (Tian vd., 2015).

2.7.2 Hafif Agregaların Özellikleri

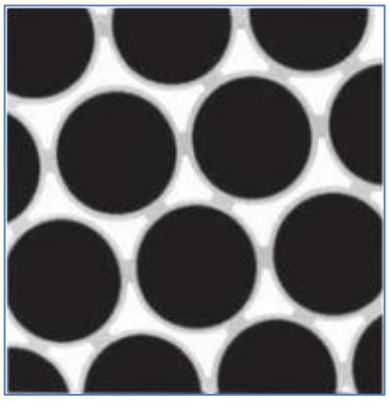
Hafif agregalı beton ilk olarak 1928'de yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Beton, Kansas City'deki Bell Telephone Company gökdeleninin 8 ek katında kullanılmıştır. Bir yıl sonra Saint Louis'de aynı malzemeden 28 katlı Park Plaza Hotel gökdeleni inşa edilmiştir. Binanın tüm yapısı YHB'dan yapılmıştır (Szydlowki ve Mieszcak, 2017).

Hafif beton, agrega ve çimento matrisinin benzer E-modülü, daha iyi aderans ve ITZ ile homojen agrega dağılımı gibi üstün özelliklere sahiptir. YHB, yük altında farklı tepki gösterir ve geleneksel betona göre farklı kırılma mekanizmalarına sahip olabilir. YHB'da normal betona kıyasla çatlak gelişiminin 3 aşaması yoktur, yani ilk çatlaklar çekme gerilmesi beton dayanımının yaklaşık %85 ile 90'ına ulaştığında ortaya çıkar (Szydlowki ve Mieszcak, 2017). Yük sırasında depolanan elastik enerji, malzemenin tahrip olmasına yol açan çatlakların hızlı yayılmasına neden olur. Sonuç olarak, YHB elemanları büyük gerilme altında çatlaksız durumda kullanılabilir ve bu durum YHB'nin en önemli özelliklerden birisidir. YHB'nin büzülme davranışı geleneksel betona göre fazladır (Domagała, 2007). Bu yüzden içsel kürlenme yöntemi YHB tasarımında tercih edilmektedir. Büzülmede, içsel kürleme zaman ve koşulların yanı sıra dış sıcaklık ve nem koşullarına daha az bağımlıdır. Düşük yoğunluk nedeniyle, YHB, geleneksel betondan daha düşük mekanik özelliklere sahip olabilir. Araştırmacılar, 1.580 ve 1.710 kg/m³ yoğunluğa sahip uçucu kül agregalı hafif beton için E-modülü değerinin, geleneksel betona göre %30 daha düşük olduğunu belirtmiştir (Domagała, 2011). Bununla birlikte hafif beton düşük yoğunluk, ısı yalıtımı ve dinamik etkilere direnç gibi belirli özellikleri iyileştirmektedir.

2.7.3 Yapısal Hafif Betonun Üretimi

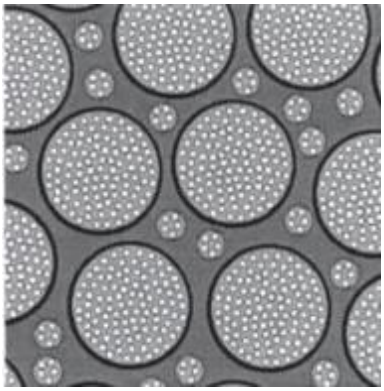
YHB, yaklaşık 300 ile 2.000 kg/m³ kuru yoğunluk aralığında, yaklaşık 1 ile 60 MPa basınç dayanımında ve termal iletkenlik katsayıları 0,2 ile 1,0 W/mK arasında üretilebilir. Bu değerler, yaklaşık 2.100–2.500 kg/m³ kuru yoğunluk, 15 ile 100 MPa basınç dayanımı ve 1,6-1,9 W/mK termal iletkenlik katsayılarına sahip normal betonlar için karşılaştırılabilir (Owens vd., 2003). Üretim yöntemine göre sınıflandırılan farklı YHB türleri mevcuttur ve bu türlerden daha önce de detaylı olarak bahsedilmiştir.

İlk olarak, 1924'te Birleşik Krallık'ta Wimpey'nin normal agreganın daha ince taneleri karışımdan çıkartılarak bir üretim yapılmıştır ki bu kumsuz/ince agregasız beton olarak bilinmektedir. Bu üretim şematik olarak aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.4).



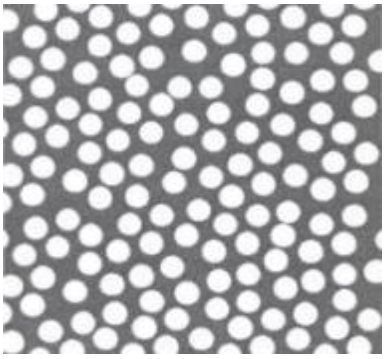
Şekil 2.4 Kumsuz Beton

İkinci olarak, bir beton karışımındaki doğal ve normal ağırlıktaki agregaların tamamen veya hafif agrega olarak bilinen ve büyük oranda boşluk içeren agregalarla yer değiştirilmesidir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 LWAC.

Son yöntem ise şematik olarak gösterilen, gaz veya köpük beton olarak bilinen, yaklaşık yüzde 30-50 boşluk içeren hücresel bir yapı oluşturmak için çimento pastası veya harç matrisine gaz kabarcıklarının dahil edilmesiyle yapılmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Gaz/Köpük Beton.

Yapısal YHB, normal ağırlıklı betona kıyasla neredeyse %20 daha düşük yoğunluğa sahiptir ve birçok yapısal amaç için yeterli olan dayanıma sahiptir.

2.7.4 Yapısal Hafif Betonun Mühendislik Özellikleri

2.7.4.1 Mekanik özellikler

Betonun özellikleri açısından, yeterli işlenebilirliği sağlamak için tasarım yapılırken dikkate alınması gereken en temel faktörlerden birisidir. İşlenebilirlik, karışım bileşenlerinden etkilendiği için betondan betona farklılık göstermektedir. Genel olarak, tasarımda önceden planlanan amaca göre performans ve kaliteyi sağlamak için beton sertleştikten ve testler yapıldıktan sonra bu özellikler belirlenebilir.

Basınç dayanımı, betonun en temel fiziksel özelliğidir ve tasarımda en çok kullanılanıdır. YHB içinde kalite kontrol amacıyla kullanılan temel özelliklerden birisi basınç dayanımıdır. Basınç dayanımını belirlemek için genellikle küp ve silindir numuneler kullanılmaktadır (Reynolds vd., 1999). Beton kalitesi ve kürleme yönteminin etkinliği, genellikle test numunelerinin basınç dayanımını doğrudan etkilemektedir.

Hem taze hem de sertleştirilmiş betonun yoğunluğu, dayanıklılık, dayanım ve geçirgenlik üzerinde etkili olmaktadır. Sertleşmiş betonun yoğunluğu, basit boyutsal kontroller, tartma ve hesaplama veya Arşimet terazisi yöntemleri ile belirlenir (Trevisan vd., 1993).

Su emme özelliği beton dayanıklılığı için oldukça önemlidir. Korozyon direnci betonun dayanıklılığını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Su emme kapasitesi, agregaların gözenekliliğinin bir ölçüsü olarak da kabul edilmektedir (Ismail vd., 2004).

2.7.4.2 Sünme ve büzülme

YHB'nin büzülmesi ve sünmesi normal betona göre daha yüksek kabul edilir çünkü çoğu YHB gözeneklidir ve daha düşük bir E-modülüne sahiptir. Betonun büzülmesi, s/ç oranına, çimento tipine, çimento hidratasyon derecesine, kullanılan agreganın özelliklerine, içeriğine, E-modülüne ve agrega nem içeriği bağlıdır. Bazı araştırmacılar, hafif aregaların daha yüksek gözenekliliği nedeniyle ilk altı ayda normal betondan daha düşük büzülmeye sahip olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte, bir yıl sonra, hafif agregalı betonların normal betondan biraz daha yüksek büzülmeye sahip olduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2005). YHB büzülmesi, %5 silis dumanı ve %1,5'e kadar çelik elyaf takviyesiyle azaltılabilmektedir.

Betonun sünmesi ayrıca kullanılan agrega türlerine ve betonun dayanımına bağlıdır. Araştırmacılar, 75,4 MPa'ya kadar basınç dayanımı ve 1.905 kg/m³'e kadar kuru birim hacim ağırlığa sahip olan YHB'nin sünme ve büzülmesini araştırmış ve geleneksel betona göre biraz daha fazla büzülme meydana geldiğini bildirmişlerdir (Lopez vd., 2004). Özetle, betonun sünme ve büzülmesini etkileyen faktörler çok kompleks bir

yapıya sahiptir. Çoğunlukla, YHB'nin büzülmesi ve sünmesi, kullanılan agreganın yoğunluğu ile ilgilidir. Daha düşük mukavemetli hafif agregalar, daha fazla büzülme ve sünme değeri sergileyebilmektedir.

2.7.4.3 Dayanıklılık

Günümüzde, araştırma ve geliştirme çalışmaları betonun inşa edilebilirliğini, dayanıklılığını ve dayanım/ağırlık oranını iyileştirmeye yoğunlaşmıştır. Buna göre, yüksek dayanımlı hafif betonlar, hafiflik, azaltılmış ölü yük, enerji tasarrufu ve yalıtım özelliklerini nedeniyle büyük umut vadeden bir yapı malzemesi olarak ortaya çıkmıştır. İnşaat sırasında genellikle servis ömrünün nasıl uzatılacağı ve maliyetli olabilecek onarımlardan nasıl kaçınılacağı ön plana çıkmaktadır. Son yirmi yılda, geleneksel betondan daha yüksek işlenebilirlik, dayanıklılık ve dayanıma sahip olan ve uzun ömürlü ekonomik yapılar sağlayan YPB'ler piyasaya sürülmüştür.

Kirişler için, yüksek dayanım ile birlikte azaltılmış ölü yükler, daha uzun mesafelerin geçilmesine imkan sağlayacaktır. Agrega ve pasta arasındaki iyileştirilmiş ITZ YHB tasarımı için oldukça önemlidir (Holm ve Ries, 2006). Su miktarı ve kür kalitesi, betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli özelliklerden birisidir. Su içeriğindeki azalma, kuruma büzülmesi ve geçirgenliği azaltırken, düşük çimento pastası sülfat saldırısını ve alkali-agrega reaksiyonunu engelleyebilir. Çimento pastasının otojen büzülmesini önlemek için s/ç oranı 0,42'den büyük olmalıdır (Hwang ve Hung, 2005).

Yapı malzemelerinin dayanıklılık performansı tasarım açısından önemlidir ve beton, kimyasal ve fiziksel etkilere karşı dirençli olmalıdır. Betonun büyük ölçüde bakım gerektirmediği ve uzun bir servis ömrü sağladığı varsayılmaktadır.

Beton, çeşitli zararlı ortamlara ve hizmet koşullarına maruz kalır; kimyasal ortamlara maruz kalma koşulları, betonun dayanıklılığı üzerinde oldukça olumsuz bir etkiye sahiptir. Daha ağır hizmet koşullarına maruz kaldığında, son derece karmaşık olabilen çeşitli farklı mekanizmalar yoluyla betonda bozulmalar meydana gelebilmektedir. En yaygın bozulma biçimlerinden bazıları; korozyon, alkali silika reaksiyonu, asit ve sülfatların kimyasal etkileri, donma-çözülme etkisi ve yüksek sıcaklık nedeniyle

oluşan fiziksel etkenlerdir. Tablo 2.1, çeşitli beton bileşenlerin dayanıklılık özellikleri gösterilmektedir (Mackechnie ve Alexander, 2009).

Tablo 2.1 Beton bileşenlerin dayanıklılık özellikleri

Betonun Bileşeni	Karakteristiği	Dayanıklık Geliştirmesi
Sertleşmiş Çimento Pastası	Düşük geçirgenlik, yüksek basınç dayanımı	Düşük s/ç oranı, Çimento ikame malzemeleri ve etkili kür
Gözenek Yapısı	Kılcal gözeneklilik, sıvıların ve iyonların girişine izin verir	Tasarım ve doğru uygulamalar (Vibrasyon ve kür gibi)
Agregalar	Yüksek dayanım ve sertlik, inert malzemeler	Uygun gradasyon ve tane dağılımı
Donatı	Yüksek pH sayesinde korozyon direnci	Etkili pas payı ve geçirimsizlik

Günümüzde, betonun farklı ortamlarda dayanıklılığı garanti edemeyeceği kabul edilmektedir ve bünyesinde çeşitli bozulması meydana gelebilmektedir (Phair, 2006). Bu performans eksikliği nedeniyle üretiminde farklı malzemeler kullanılmaktadır. Betonun mikroyapısını, potansiyel bozulma mekanizmalarını anlayarak ve uygun malzemeler seçerek betonun performansını arttırmak mümkündür. Mikroyapı hem fiziksel hem de kimyasal olarak güçlendirilirse betonun performansı artacaktır. Böylece, daha uzun servis ömrü için betonun sürdürülebilirliği iyileştirilecektir. Yüksek performanslı betonlar yoluyla binaların ve altyapının servis ömrü uzatılabilir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, hafif ve yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin birim ağırlıklarını azaltmak için üç farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde bağlayıcı olarak çimentodan daha düşük özgül ağırlığa sahip pomza tozu (doğal puzolan) kullanılmıştır. İkinci yöntemde, çimento esaslı kompozitlerin üretiminde bir köpük ajan kullanılmıştır. Üçüncü yöntemde, daha düşük özgül ağırlığa sahip scoria agregası kullanılmıştır. Bu kapsamda birim ağırlığı 2000 kg/m^3'ün altında ancak dayanıklılığı yüksek kompozitler üretmeyi amaçlamaktadır. Kompozitlerin dayanıklılığını arttırabilmek için pirinç kabuğu kullanılmıştır.

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento

Bu çalışmada, yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin üretilmesi için TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. CEMI 42,5R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Çimentoya (CEM I 42,5R) ait özellikler

	Oksit	**(%)**
Kimyasal özellikler	CaO	63,2
	SiO_2	20,2
	Al_2O_3	5,2
	Fe_2O_3	3,3
	MgO	1,7
	Na_2O	0,3
	K_2O	0,7
	SO_3	3,2
	LOI	2,2
Fiziksel özellikler	Özgül ağırlık	3,13
	Blaine (cm^2/g)	3300
	Hacimsel genleşme (mm)	1,7
	Priz başlangıcı (dk)	160
	Priz sonu (dk)	200

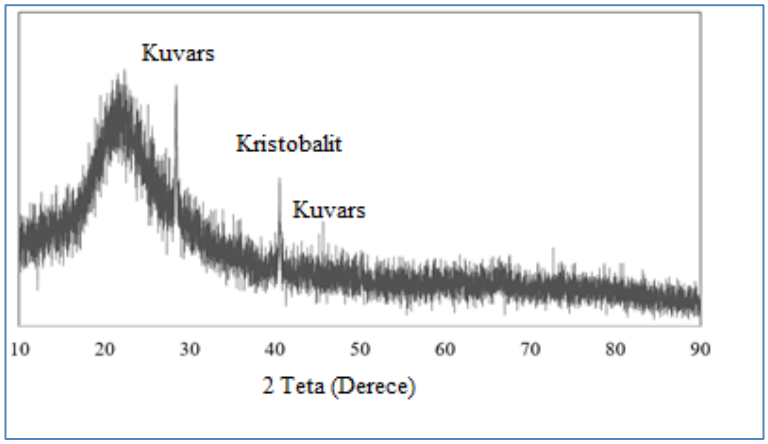
3.1.2 Pirinç Kabuğu Külü (PK)

Çimento esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılan pirinç kabuğu külü (PK) çeltik atıklarının yakılmasından sonra elde edilmiştir. Çeltik atıkları Kastamonu'da faaliyet gösteren TOSPİR firmasından temin edilmiştir. PK laboratuvar bölgesinde oluşturulan bir sobada doğal yanma (kontrolsüz) sonucunda elde edilmiştir. Yanma sonucunda elde edilen PK'deki yabancı maddeler uzaklaştırıldıktan sonra bilyalı değirmende 30 dakika süre ile öğütülmüştür. PK'ya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.1'de PK'ya ait XRD sonucu verilmiştir.

Tablo 3.2 PK'nın teknik özellikleri

Oksit	**%**
CaO	0,8
SiO_2	93,6
Al_2O_3	0,2
Fe_2O_3	0,3
MgO	0,4
Na_2O	0,7
K_2O	1,1
SO_3	0,1
LOI	2,5
Özgül ağırlık	2,17
Blaine (cm^2/g)	13200

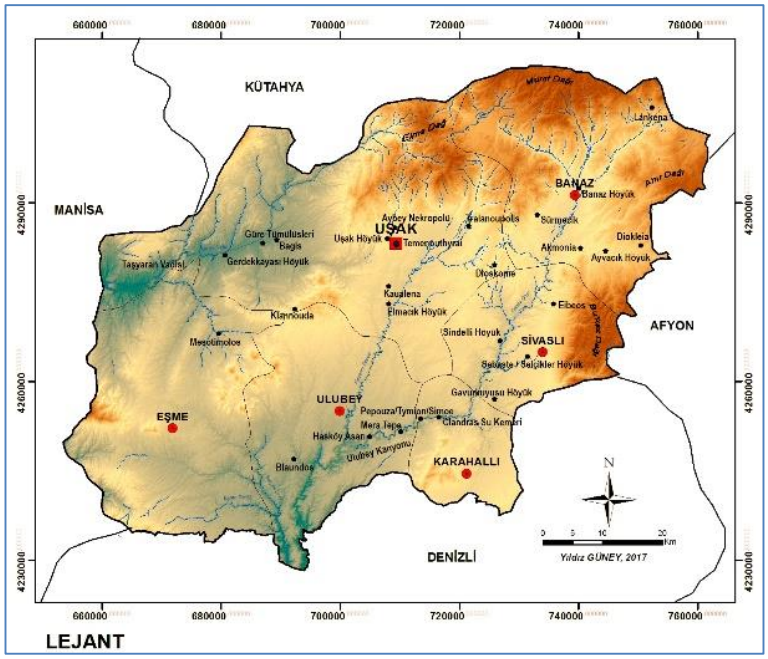
Şekil 3.1'de görüldüğü PK'nın oldukça amorf bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bünyesinde kuvars, kristobalit gibi minerallerin olduğu da görülmektedir.



Şekil 3.1 PK'ya ait XRD grafiği

3.1.3 Pomza Agregası ve Pomza Tozu

Karışımlarda agrega olarak scoria kullanılmıştır. Scoria normal agrega yerine hafif agrega olarak kullanılmıştır. Scoria, Türkiye'nin güneybatısındaki Uşak bölgesinden temin edilmektedir (Şekil 3.2). İnce agrega olan Scoria'nın elek boyutu 0-4 mm arasındadır. Scoria'nın fiziksel özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Scoria agregasının temin edildiği Uşak ilinin fiziki haritası

Tablo 3.3 Scoria agregasının özellikleri

Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık	2,42
Su emme (%)	0,85
İncelik modülü	3,12
Silt içeriği (%)	0,58
SiO_2+Al_2O_3 (%)	56,7

Pomza tozu (PT) ise hafif agrega olarak kullanılan pomzaların bilyalı değirmende 1 saat öğütülmesi sonucunda elde edilmiştir. Bilyalı değirmende öğütülen pomza agregaları 0-1 mm olarak sınıflandırılmıştır. Öğütme sonucunda elde edilen PT 0,125 mm'lik elekten elendikten sonra karışımlarda kullanılmıştır. PT'na ait özellikler Tablo 3.4'de sunulmuştur.

Tablo 3.4 PT'ye ait özellikler

Oksit	%
CaO	2,1
SiO_2	67,3
Al_2O_3	11,1
Fe_2O_3	1,8
MgO	0,6
Na_2O	2,1
K_2O	3,9
SO_3	0,1
LOI	6,8
Özgül ağırlık	1,34
Blaine (cm^2/g)	3900

3.1.4 Köpük Katkısı

Çimento esaslı kompozitlerin birim ağırlığını azaltmak için köpük katkısı kullanılmıştır. Köpük katkısı organik reçine esaslıdır. Köpük katkısının özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir. Üretilen köpük ile kompozit içerisinde kapalı hücrelerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tablo 3.5 Köpük katkısının özellikleri

Kimyasal içerik	Organik reçine	
Renk	Açık kahverengi	
Yoğunluk	1,03 ± 0,02 kg/l,	ISO 758
pH değeri	5,0 ± 1	TS 6.365 EN 1.262
Klorür içeriği (Cl)	< %0,1	TS EN 480-10
Alkali içeriği	< %5	TS EN 480-12
Donma noktası	- 5 ºC	

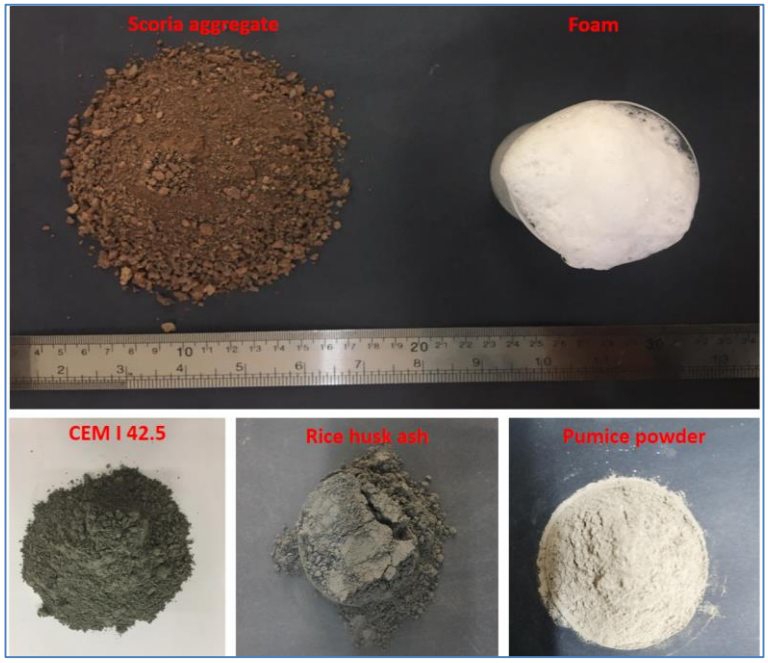


3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı

Su/bağlayıcı (s/b) oranı, çimento esaslı kompozitlerin mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmak için azaltılmıştır. s/b oranının azalması nedeniyle işlenebilirlik kaybını önlemek için polikarboksilat easlı süperakışkanlaştırıcı (SP) kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcının özgül ağırlığı 1,05'tir ve katı madde içeriği %35'tir. Süperakışkanlaştırıcı toplam bağlayıcı miktarına göre karışıma ilave edilmiştir.

3.1.6 Su

Karışımların hazırlanmasında ve kür işlemlerinde içilebilir nitelikteki Kastamonu şebeke suyu kullanılmıştır. Malzemelerin genel görünümleri Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler

3.2 Karışım Oranları ve Kompozitlerin Üretimi

Karışımların hazırlanmasında köpük içeriği 12,5 ve 25,0 kg/m^3 olarak seçilmiştir. PK ve PT ise çimento yerine ağırlıkça kullanılmıştır. PK %12,5 ve 25 oranlarında, PT ise %25 ve 50 oranlarında kullanılmıştır. Deneysel çalışmada toplam 18 farklı karışım üretilerek değişkenler ve oranları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Deneysel çalışmaya ait değişkenler

	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Köpük içeriği (kg/m^3)	12,5	25,0	-
Pirinç Kabuğu Külü (%)	0	12,5	25,0
Pomza Tozu (%)	0	25	50

Tüm karışımların s/b oranı 0,35 ve bağlayıcı dozajı 450 kg olarak seçilmiştir. Köpük ajanı ile hazırlanan köpüğün yoğunluğu 120 g/l'dir. PT ve PK'sız karışımların hariç

süper akışkanlaştırıcı bağlayıcı miktarının %3'ü kadar kullanılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin tüm testleri üç numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Karışımların hazırlanmasında Hobart tipi mikser kullanılmıştır. İlk olarak bağlayıcı malzemeler (Çimento+PT+PK) 1 dakika düşük devirde (140 devir/dakika) karıştırılmıştır. Daha sonrasında karışım suyunun 2/3'ü ve süper akışkanlaştırıcı karışıma ilave edilerek 1 dakika düşük devirde karıştırılmıştır. Düşük devir sonunda 2 dakika yüksek devirde (285 devir/dakika) karıştırma işlemi ile devam edilmiştir. Karışım 1 dakika dinlendirildikten sonra 2 dakika daha yüksek devirde karıştırılmıştır. Daha sonrasında Scoria ve karışım suyunun 1/3'ü karışıma ilave edilmiş ve 1 dakika düşük devirde karıştırılmıştır. Son olarak karışım 5 dakika boyunca yüksek devirde karıştırılarak tamamlanmıştır. Karışımlar kalıplarına yerleştirildikten sonra bir ıspatula yardımıyla yüzeyleri düzeltilmiştir. Çimento esaslı kompozitler, dökümden sonra 24 saat laboratuvar koşullarında saklanmıştır. Kalıplarından çıkarılan kompozitler deney gününe kadar su kürüne tabi tutulmuştur. Karışım oranları ve malzeme miktarları Tablo 3.7'de verilmiştir.

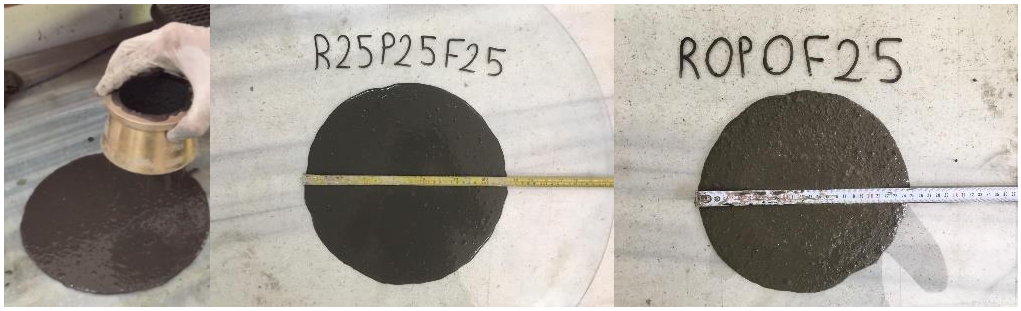
Tablo 3.7 Karışım Özellikleri

Mix No,	Karışım Oranları			Malzeme Miktarları (kg/m^3)						
	Köpük (kg/m^3)	PK (%)	PT (%)	Çimento	PT	PK	Scoria	Su	SA	Köpük
1	12,5	0	0	450,0	0,0	0,0	382,8	157,5	2,7	12,5
2			25	337,5	112,5	0,0	287,0	157,5	13,5	12,5
3			50	225,0	225,0	0,0	217,1	157,5	13,5	12,5
4		12,5	0	393,8	0,0	56,3	338,5	157,5	13,5	12,5
5			25	281,3	112,5	56,3	268,5	157,5	13,5	12,5
6			50	168,8	225,0	56,3	198,5	157,5	13,5	12,5
7		25,0	0	337,5	0,0	112,5	319,9	157,5	13,5	12,5
8			25	225,0	112,5	112,5	249,9	157,5	13,5	12,5
9			50	112,5	225,0	112,5	179,9	157,5	13,5	12,5
10	25	0	0	450,0	0,0	0,0	278,6	157,5	2,7	25,0
11			25	337,5	112,5	0,0	182,9	157,5	13,5	25,0
12			50	225,0	225,0	0,0	112,9	157,5	13,5	25,0
13		12,5	0	393,8	0,0	56,3	234,3	157,5	13,5	25,0
14			25	281,3	112,5	56,3	164,3	157,5	13,5	25,0
15			50	168,8	225,0	56,3	94,3	157,5	13,5	25,0
16		25	0	337,5	0,0	112,5	215,8	157,5	13,5	25,0
17			25	225,0	112,5	112,5	145,8	157,5	13,5	25,0
18			50	112,5	225,0	112,5	75,8	157,5	13,5	25,0

3.3 Deneysel Yöntemler

3.3.1 Mini Çökme-Yayılma Deneyi

Çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirliği ve akıcılığını ölçmek için EFNARC tarafından önerilen mini çökme-yayılma deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney yönteminde, alt çapı 10 cm, üst çapı 7 cm ve yüksekliği 6 cm boyutlarında olan kesik koni şeklinde bir kalıp kullanılmıştır. Kalıbın alttaki geniş ağzı taze harcın akabileceği pürüzsüz ve temiz bir yüzeye yerleştirilir. Karışım, şişleme yada sarsma yapmadan kalıbın üst yüzeyinden doldurulur. Daha sonra kesik koni yukarı doğru kaldırılarak harcın bulunduğu yüzeyde kendiliğinden yayılması incelenir. Kendiliğinden yayılma tamamlandıktan sonra harcın çapı iki farklı noktadan (birbirine dik olmak koşuluyla) ölçülür ve ortalamaları alınarak harcın yayılma çapı hesaplanır. Kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip harçlarda yayılma çapı değerin 24 ile 26 cm arasında olması önerilmektedir. Bazı karışımlara ait mini çökme-yayılma deneyi sonuçları Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Bazı çimento esaslı kompozitlerin mini çökme-yayılma testi sonuçları

3.3.2 Fiziksel Özellikler

Çimento esaslı kompozitlerin su emme ve görünür porozite gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Fiziksel özellikler ASTM C 642 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Fiziksel deneylerin gerçekleştirilmesi arşimed terazisi yöntemi kullanılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin fiziksel özellikleri 90 günlük kür süresinden sonra belirlenmiştir. Fiziksel özellikler 50x50x50 mm küp numunelerde belirlenmiştir. Numuneleri etüv kurusu yapmak için 50 ℃'de 3 gün boyunca bekletilmiştir.

Numuneleri birim hacim ağırlık (BHA) değerleri ise kumpas yardımıyla yaklaşık ölçülerin belirlenmesi sonucunda elde edilmiştir. Kumpas ile yaklaşık hacim belirlenerek numunelerin BHA değerleri belirlenmiştir. BHA değerleri etüv kurusu numunelerde ölçülmüştür.

3.3.3 Eğilme Dayanımı

Hafif çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları ASTM C348 standardına göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımı testleri 40x40x160 mm prizma numunelerde gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde 3 noktalı eğilme deneyi (100 mm mesnet açıklığında) gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımının belirlenmesinde kullanılan test yöntemi Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5 Üç noktalı eğilme testi

3.3.4 Basınç Dayanımı

Eğilme dayanımı testinde iki parçaya ayrılan numuneler ASTM C349 standartlarına göre basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı 200 ton kapasiteli hidrolik test makinesinde belirlenmiştir. Eğilme deneyinden elde edilen kırılmış numuneler 40x40 mm cihaz başlığı arasına yerleştirilerek basınç dayanımı belirlenmiştir. Basınç dayanımında 6 adet numunenin ortalaması alınmıştır. Ayrıca karışımların basınç ve eğilme dayanımları 1, 7, 28 ve 90. günlerde belirlenmiştir.

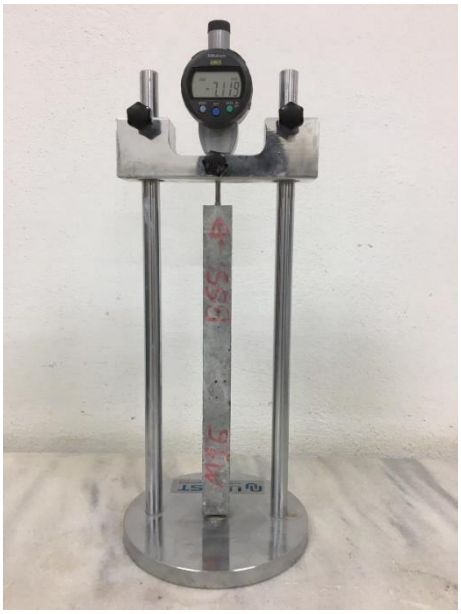
Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları Şekil 3.6'daki test yöntemi ile belirlenmiştir.



Şekil 3.6 Basınç dayanımı testi

3.3.5 Kuruma Büzülmesi

Çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmesi 120 gün boyunca ölçülmüştür. Kuruma büzülmelerinin zamana bağlı değişimi 25x25x285 mm harç çubuklarında ölçülmüştür. Çimento esaslı kompozitler, yedi günlük su küründen sonra laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Kuruma büzülme testi ASTM C596 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Harç çubuklarındaki boy değişimi her yedi günde bir ölçülmüştür. Çimento esaslı kompozitlerin boy değişimleri dijital bir komparatör ile belirlenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Dijital komparatör

3.3.6 Kapilerite

Kompozitlerin zamana bağlı su işleme derinlikleri (I) ASTM C 1585 standardına göre belirlenmiştir. Su işleme derinlikleri için 50x50x50 mm küp numuneler kullanılmıştır. Kılcallık testi etüvde üç gün boyunca 50 ℃'de kurutulmuş numunelerde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yan yüzeylerine (yaklaşık 1 cm yüksekliğinde) bir su yalıtım maddesi uygulanmıştır. Bu şekilde, suyun sadece dikey doğrultuda hareket etmesi sağlanmıştır. 90 gün boyunca kür uygulanan numunelerde su işleme derinlikleri belirlenmiştir. Su işleme derinliği 28. güne kadar ölçülmüştür. Karışımların su işleme derinlikleri Şekil 3.8'de gösterildiği gibi zamana bağlı olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.8 Kapilarite deneyinde kullanılan numuneler

3.3.7 Sülfat Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin sülfat direnci ASTM C1012 standardına göre belirlenmiştir. Numunelerin sülfat direnci için Na_2SO_4 (%5) çözeltisi kullanılmıştır. Çimento esaslı kompozitlere 90 gün kür uygulandıktan sonra Na_2SO_4'e maruz bırakılmıştır (Şekil 3.9). Na_2SO_4 çözeltisi her ay (her 30 günde) yenilenmiştir. Sülfat direncinin belirlenmesi için 25x25x285 mm'lik harç çubukları kullanılmıştır. Harç çubuklarının boy değişimi 150 gün boyunca her 7 günde bir ölçülmüştür. Na_2SO_4 çözeltisinin neden olduğu genleşmeler dijital komparatör ile ölçülmüştür (Şekil 3.7).



Şekil 3.9 Na_2SO_4'e maruz çimento esaslı kompozitler

3.3.8 Asit Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin asit direnci HCl ve H_2SO_4 çözeltileri kullanılarak belirlenmiştir. HCl ve H_2SO_4 çözeltileri %5 oranında hazırlanmıştır. Numunelerin asit direnci ASTM C1152 standardına göre araştırılmıştır. Asit çözeltilerindeki numunelerin kütle değişimleri 150 gün boyunca ölçülmüştür. Asit çözeltileri her ay (her 30 gün) yenilenmiştir. Kütle kayıpları 40x40x160 mm prizma numunelerde belirlenmiştir. Çimento esaslı kompozitler, 90 günlük kür uygulamasından sonra asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin kütle kayıpları Eşitlik (1) kullanılarak belirlenmiştir.

$(m_i-m_t)/m_i*100$ (3.1)

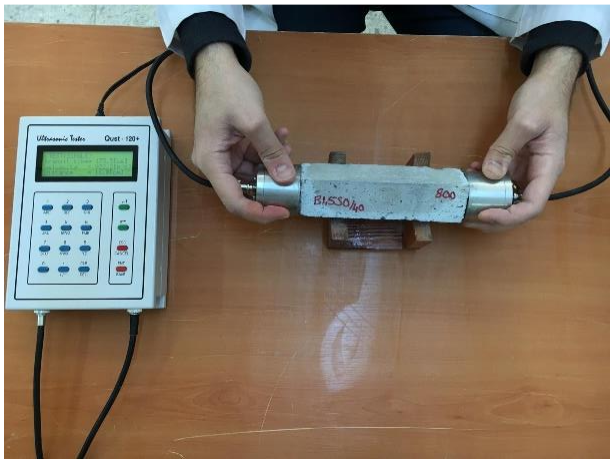
Burada;

m_i: numunenin başlangıç kütlesi

m_t: t gün sonra numunenin kütlesi

3.3.9 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme direnci için ASTM C666 (standardı kullanılmıştır. Donma-çözülme direnci 40x40x160 mm boyutundaki prizma numuneler kullanılmıştır. Çimento esaslı kompozitlere 100 ve 200 donma-çözülme döngüsü maruz uygulanmıştır. Numunelerin her döngü için bağıl dinamik elastisite modülü (RDEM) ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, numunelerin hasar derecesini belirlemek için Şekil 3.10'da görüldüğü gibi ultrasonik geçiş hızı da ölçülmüştür. Ultrasonik geçiş hızları ASTM C597 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çimento esaslı kompozitler, 90 günlük kürün sonrasında donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Döngülerde, donma süresi 7, çözülme süresi 5 saat (günde iki döngü) olarak seçilmiştir. Donma sıcaklığı, -20℃ ± 2℃ ve çözülme sıcaklığı ise, 5℃ ± 2℃ aralığındadır.



Şekil 3.10 Ultrasonik geçiş hızı ölçümü

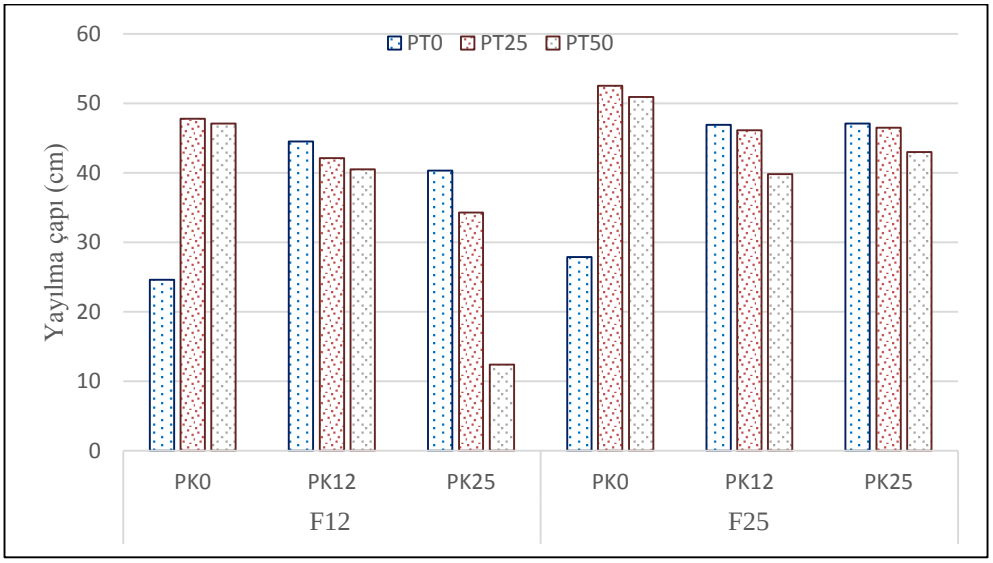
3.3.10 Mikroyapı Araştırmaları

Sülfat ve asit etkilerine maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. SEM görüntüleri farklı büyütmelerde elde edilmiştir. Mikroyapı araştırmaları Atatürk Üniversitesi DAYTAM biriminde gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

4.1 Çimento Esaslı Kompozitlerin Taze Özellikleri

Şekil 4.1'te köpük içeriği arttıkça yayılma çaplarının arttığı görülmektedir. Pirinç kabuğu külü oranının artması sonucunda kompozitlerin yayılma çapları azalmıştır. Bununla birlikte, pirinç kabuğu külü oranının %0 olduğu karışımarda, pomza tozu oranındaki artış işlenebilirliği iyileştirmiştir. Pomza tozu oranı ne kadar yüksek olursa pasta hacmi artacağından işlenebilirliğin o kadar iyi olacağı gözlemlenmiştir. Köpük içeriği 12,5 kg/m^3 olan kompozitlerde pirinç kabuğu külü oranı %25 ve pomza tozu oranı %50 ise yayılma çapı 12,4 cm olarak ölçülmüştür. Gözenekli ve çimentodan daha ince olan yüksek pomza tozu ve pirinç kabuğu külü kullanımı, referansa (PK 0- PT 0) kıyasla yayılma çapını yaklaşık %50 azaltmıştır. Köpük içeriği 25 kg/m^3 olduğunda benzer bir etki gözlemlenmemiştir. Çünkü köpük içeriğindeki artış genellikle işlenebilirliği arttırır. Köpük içeriği 12,5 kg/m^3 ise, yayılma çapı 12,4-47,8 cm ve köpük içeriği 25 kg/m^3 27,9-52,5 cm arasında değişmektedir. 25 kg/m^3 köpük içeriğinde PK 12 ve PK 25 numunelerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu karışımlarda %50'lik PT oranı, yayılma çapını %13-15 oranında azaltmıştır. PT oranı %50 ise kıvam kaybı daha fazla olmuştur. Özellikle düşük köpük içeriğinde PT oranındaki artış işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir.



Şekil 4.1 Çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları

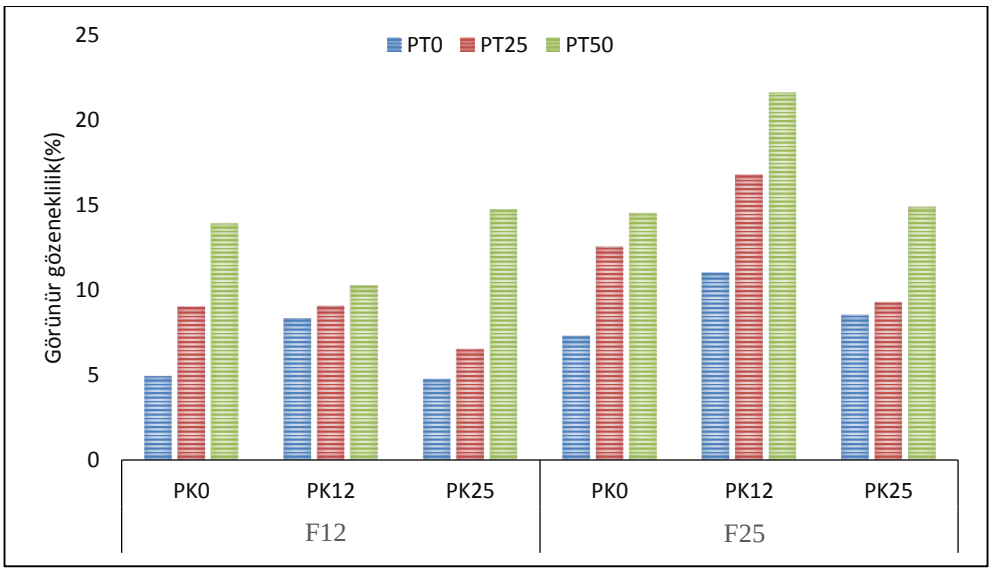
Karataş vd. %5 ve %10 PT kullanımında işlenebilirliğin azaldığını ancak %25 PT kullanıldığında işlenebilirliğin arttığını gözlemlemiştir (Karataş vd., 2017). PT'nin küresel olmayan parçacık şekli ve gözenekli yapısının işlenebilirliği azalttığı kaydedilmiştir (Granata, 2015). Zeyad ve Almalki tarafından yapılan çalışmada, PT oranındaki artışa bağlı olarak yayılma çapları artmıştır (Zeyad ve Almalki, 2021). Literatür, çimento yerine mineral katkıların kullanılması durumunda işlenebilirliğin arttığını çünkü ara yüzeydeki boşlukların azaldığını, agrega partikülleri arasındaki sürtünmenin azaldığını belirtmektedir. Sabit s/b oranına sahip çimentoya kısmi ikame olarak mineral katkıların kullanılması, yüksek çimento pastası sağlar ve böylece işlenebilirlik iyileşir. Ayrıca karışımdaki çimento miktarının azaltılması, elektrik yüküne bağlı aglomerasyonu azaltır (Jiang ve Malhotra, 2000; Mehta, 2004). Abbas ve arkadaşları, çimento yerine %40'a kadar PK kullanmıştır. Deneysel çalışmanın bir sonucu olarak, PK'nın yüksek kullanımına rağmen kıvam kayıpları gözlememişlerdir (Abbas vd., 2017). Bununla birlikte, PK'nın yüksek özgül yüzey alanı ve higroskopik özellikleri nedeniyle su talebini artıracağı belirtilmiştir (Hossain vd., 2011). Chandni ve Anand, karışımların yoğunluğunu azaltmak için daha fazla köpük kullanmışlardır. Karışımın köpük içeriğinin artması sonucunda yayılma çapları azalmıştır (Chandni ve Anand, 2018). Çünkü köpük içeriğindeki artış, kabarcık sayısını arttırır ve işlenebilirliği azaltmaktadır (Nambiar ve Ramamurthy, 2006). She vd. betonlarda köpük içeriği arttıkça yayılma çaplarının arttığını belirlemiştir (She vd., 2018). Growri ve Anand, köpük içeriği arttıkça karışımın su ihtiyacının arttığını belirtmiştir (Gowri ve Anand, 2018). Eltayeb ve arkaşları tarafından yapılan çalışmada, köpük içeriği arttıkça yayılma çaplarının iyileştiği belirtilmiştir (Eltayeb vd., 2020).

Bu çalışmada, köpük içeriği arttıkça yayılma çapları iyileşmiştir. Köpük ajanı, hava sürükleyici bir karışım olarak hareket ederek pastanın genleşmesine neden olmuştur. Pastanın genleşmesi sonucu işlenebilirliği artırmıştır. PT, agrega taneleri arasındaki sürtünmeyi azalttığı için optimum oranın %25 olduğu tespit edilmiştir. %50 PT kullanımı, düşük köpük içeriğinde yayılma çapını önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca düşük köpük içeriğinde %12,5 PK kullanılması tavsiye edilmiştir. Yüksek PK seviyeleri (%25) çevre kirliliğini azaltmaktadır bu yüzden yüksek PK içeriğinde köpük içeriği arttırılmalıdır.

4.2 Çimento Esaslı Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri

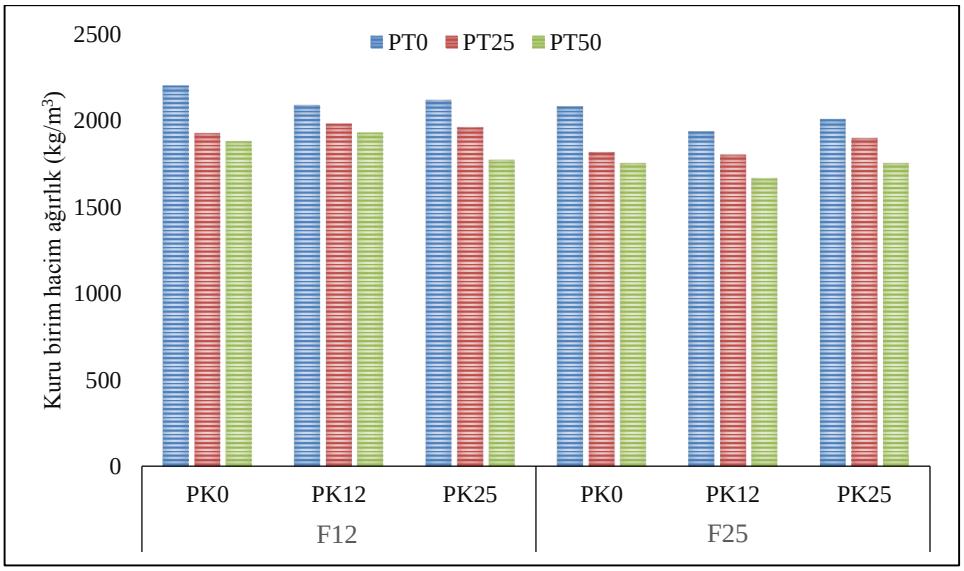
Köpük içeriği 12,5 kg/m^3 olan karışımlarda PK içeriği %12,5 olduğunda porozite ve su emme değerleri azalmıştır. Köpük içeriği 12,5 kg/m^3 olan karışımların porozite değerleri %4,8 ile %14,8 arasında değişmektedir. Köpük içeriği 12,5 kg/m^3 olan karışımların su emme değerleri %2,4 ile %8,9 arasında değişmektedir. Köpük içeriği 12,5 kg/m^3 olan karışımlarda, PK oranı %25, PT oranı %50 ise porozite ve su emme değerleri artmıştır. Bu karışımların işlenebilirliği çok düşük olduğu için porozite ve su emme değerleri artmıştır. Düşük köpük içeriğinde PK içeriği %25 ise, PT maksimum %25 olmalıdır.

Köpük içeriği 25 kg/m^3 ise görünen porozite değeri %7,3 ile 21,6 arasında değişmektedir. Köpük içeriği 25 kg/m^3 ise su emme oranı %3,7-13,6 arasında değişmektedir. Köpük içeriği 25 kg/m^3 olan karışımlarda PK oranı %12,5 olduğunda porozite ve su emme oranları artmaktadır. Ancak PK %25 ise porozite ve su emme oranları nispeten azalır. Düşük işlenebilirliğe sahip karışımlarda, optimum oran ve yüksek özgül yüzey alanına sahip malzemeleri kullanmak porozite ve su emme değerlerini azaltabilir. Yüksek köpük içeriklerinde, yüksek oranlarda çimento ikame malzemeleri kullanmak poroziteyi azaltabilir. PT oranı arttıkça porozite ve su emme oranları artar çünkü PT'nın bünyesel gözenekliliği fiziksel özellikleri etkiler. Karışımların işlenebilirliği azaldıkça genellikle porozite ve su emme oranları artmıştır.



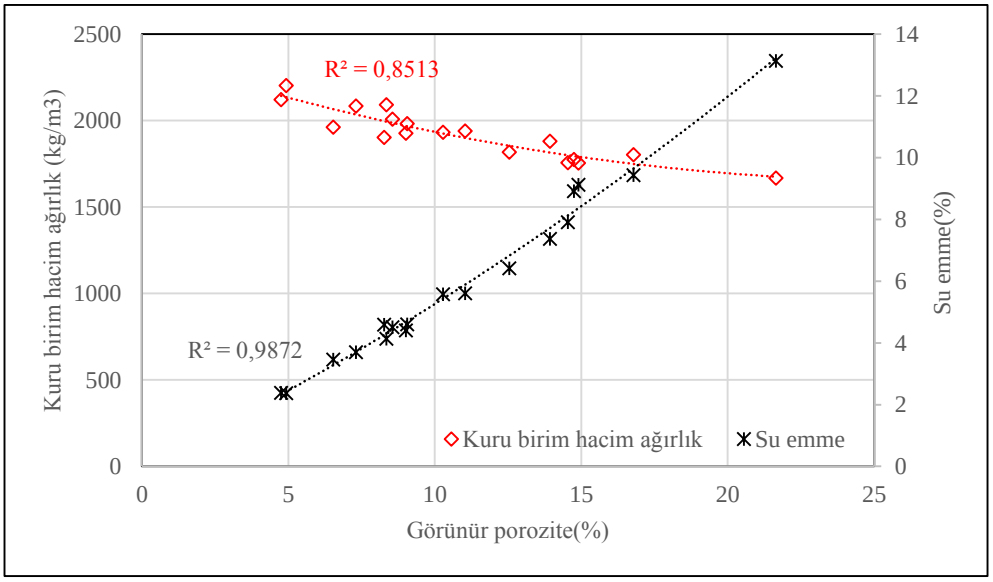
Şekil 4.2 Fiziksel özellikler

Şekil 4.3, köpük içeriği ve PT oranı arttıkça, çimento esaslı kompozitlerin birim hacim ağırlıklarının azaldığını göstermektedir. Çimento esaslı kompozitlerin birim hacim ağırlıkları 1666-2205 kg/m^3 arasında değişmektedir. PK oranının arttırılması, birim hacim ağırlıkları değerlerini fazla etkilememiştir. Bununla birlikte, PT %25 ve üzerinde kullanılırsa, birim hacim ağırlıkları 2000 kg/m^3'ün altına inmiştir. %50 PT'de kullanılan karışımların birim hacim ağırlıkları genellikle 1800 kg/m^3'ün altındadır. PT %50 ve köpük içeriği 25 kg/m^3 ise kuru birim hacim ağırlık değerleri %16-19 azalmaktadır. %12,5 yerine %25 PK kullanıldığında, birim hacim ağırlığı değerleri biraz artmıştır. PK çimento parçacıkları arasındaki boşlukları doldurdukça birim hacim ağırlık değerleri artmıştır.



Şekil 4.3 Çimento esaslı kompozitlerin kuru birim hacim ağırlıkları

Şekil 4.4'de görünür porozite ve su emme arasında yüksek bir R^2 değeri (0,98) gözlenmiştir. Karışımların porozite değerleri arttıkça su emme oranları artma eğilimindedir. Görünür porozite ve birim hacim ağırlık arasında R^2 değeri 0,86 olarak elde edilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin porozitesi arttıkça karışımların birim hacim ağırlığı azalmıştır. Birim hacim ağırlığı 1800 kg/m^3'ün altında olan karışımların porozite değerleri %14,5 ve üzerindedir.



Şekil 4.4 Fiziksel özelliklerin korelasyonu

Chindaprasirt ve Rukzon, PK içeriği arttıkça porozitenin arttığını göstermiştir (Chindaprasirt ve Rukzon, 2008). Karışımlarda PK gibi ince taneli malzemelerin kullanılması büyük gözeneklerin kapatılmasına yol açar (Mehta, 1989). Xu vd. yeterli incelikte PK'nın karışımlarda kullanıldığında poroziteyi azalttığını belirtmiştir (Xu vd., 2015). Rodrigues ve Ghavami tarafından yapılan çalışmada PK içeriği arttıkça porozite değerleri azalmıştır (de Souza Rodrigues vd., 2006). Karataş vd. PT oranı arttıkça porozitenin arttığı ve birim hacim ağırlığın azaldığını belirlemiştir (Kabay vd., 2015). Zeyad vd. PT içeriği arttıkça karışımların su emme oranının azaldığı tespit edilmiştir (Zeyad vd., 2019). Bu etki, volkanik külle üretilen harç ve betonlarda da gözlenmiştir (Siddique, 2012). Pasupathy'nin çalışmasında köpük içeriği arttıkça porozite değerleri de artmıştır (Pasupathy vd., 2020). Köksal vd. köpük içeriği arttıkça porozite ve su emme oranının arttığı ancak yoğunluğun azaldığını belirtmişlerdir (Koksal vd., 2020). Köpük içeriği arttıkça karışımdaki hava kabarcıklarının sayısı da artmaktadır. Bu nedenle, karışımların porozitesi artarken, birim hacim ağırlıkları azalma eğilimi gösterir. Ayrıca mineral katkı maddeleri, işlenebilirliği etkilediği için fiziksel özelliklere dolaylı olarak etki etmektedir.

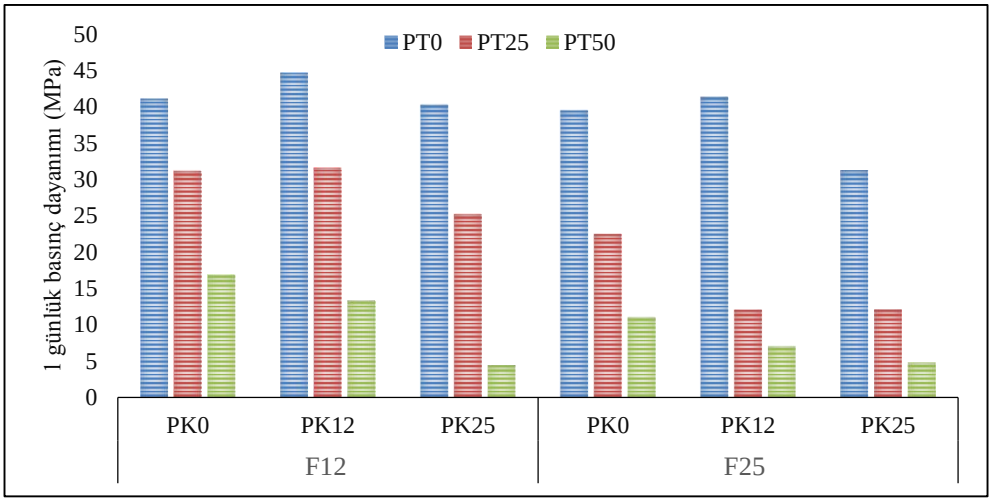
4.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Şekil 4.5a, çimento esaslı kompozitlerin bir günlük basınç dayanımının 4,8-44,7 MPa arasında değiştiğini göstermektedir. Düşük köpük içerikli (12,5 kg/m^3) karışımlarda,

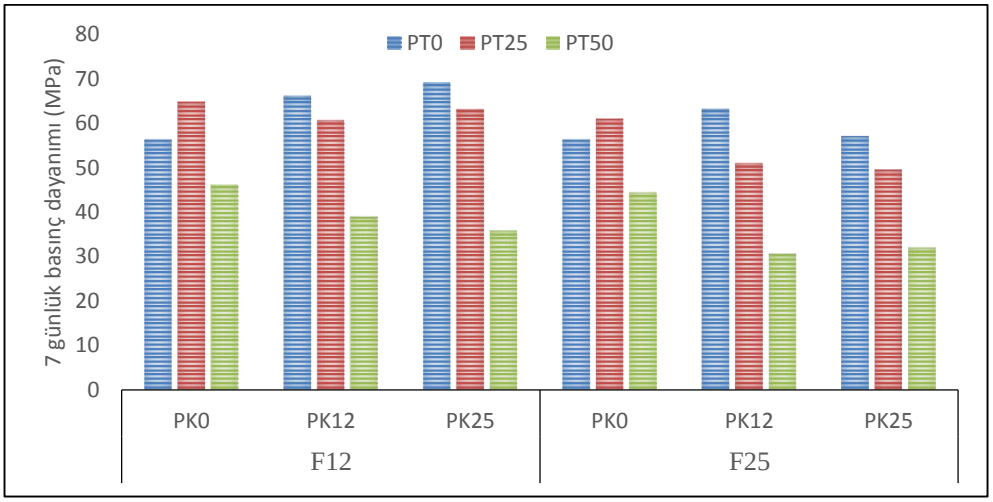
%12,5'lik PK içeriği basınç dayanımını artırabilir. Ancak bu karışımlarda PT oranı %50 ise basınç dayanımı 15 MPa'nın altına düşmüştür. PK oranı %25 ve PT oranı %50 olan karışımların basınç dayanımı, PK ve PT içermeyen karışımlara (Referans karışım) kıyasla %89,3 oranında azalmıştır. PT içermeyen karışımlarda %12,5 PK kullanıldığında yaklaşık 45 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. PT oranı %50 ise 1 günlük basınç dayanımı genellikle 15 MPa'nın aldındadır.

Yüksek köpük içerikli (25 kg/m^3) PT içermeyen karışımlarda 1 günde 30 MPa ve üzeri basınç dayanımı elde edilmiştir. PT oranı %50 olan karışımların basınç dayanımı genellikle 10 MPa'nın altındadır.

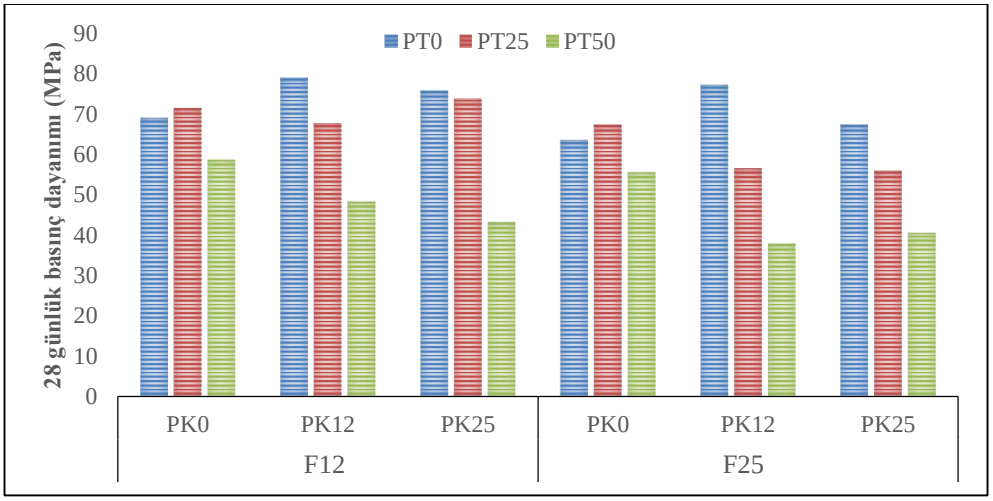
Düşük köpük içerikli karışımların 1 günlük eğilme mukavemeti 1,5-5,7 MPa arasında değişmiştir. PT içermeyen karışımlarda PK oranı arttıkça, karışımların eğilme dayanımı artmıştır. PT oranı %25 ve %50 ise PK oranı arttıkça eğilme dayanımı azalmıştır. Özellikle %50 PT oranına sahip karışımların eğilme dayanımı 3,5 MPa'dan azdır. %25 PK oranına sahip PT içermeyen karışımların eğilme dayanımı, PT ve PK içermeyen karışımlara kıyasla %23,9 artmıştır. Karışımlarda köpük içeriğin arttırılması eğilme dayanımı azaltmıştır. Özellikle çimento ikame malzemeleri oranı yüksek olan karışımlarda (PT%50-PK%25) eğilme dayanımı 0,8 MPa'ya kadar düşmüştür. PK oranındaki artış eğilme dayanımı üzerinde daha etkili olmuştur. Böyle bir etki, yüksek SiO_2 içeriği ve PK'nın özgül yüzey alanı agrega-pasta arayüzünü iyileştirdiğinden gözlemlenmiştir. PT'nin düşük puzolanik özelliklerinden dolayı mekanik özellikler olumsuz etkilenmiştir.



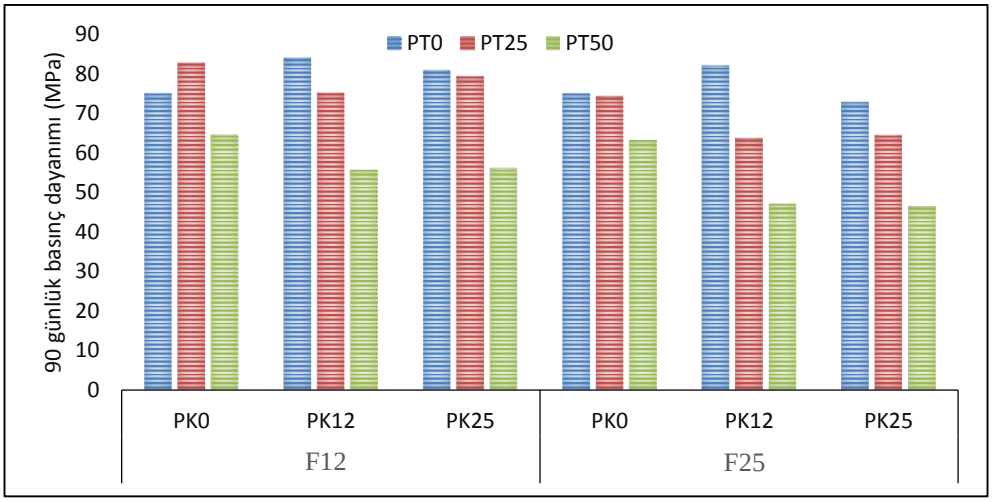
a) 1 günlük



b) 7 günlük

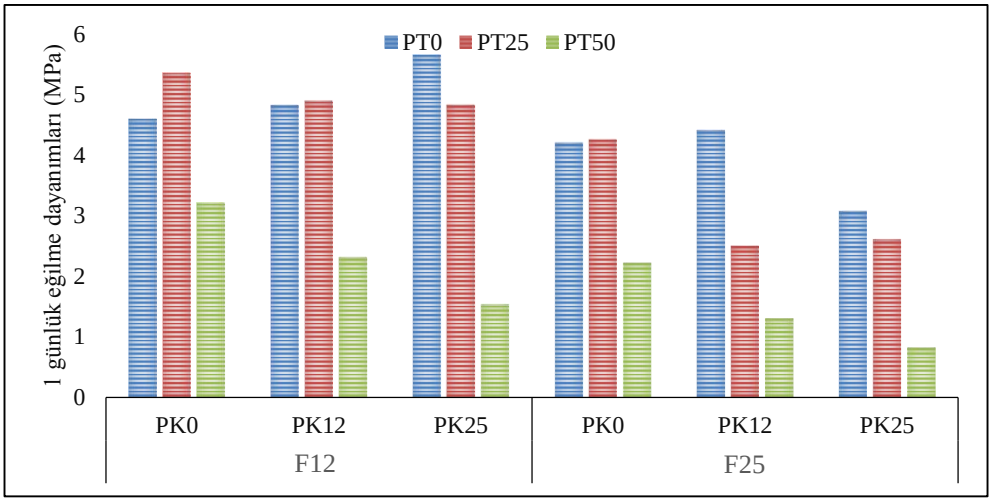


c) 28 günlük

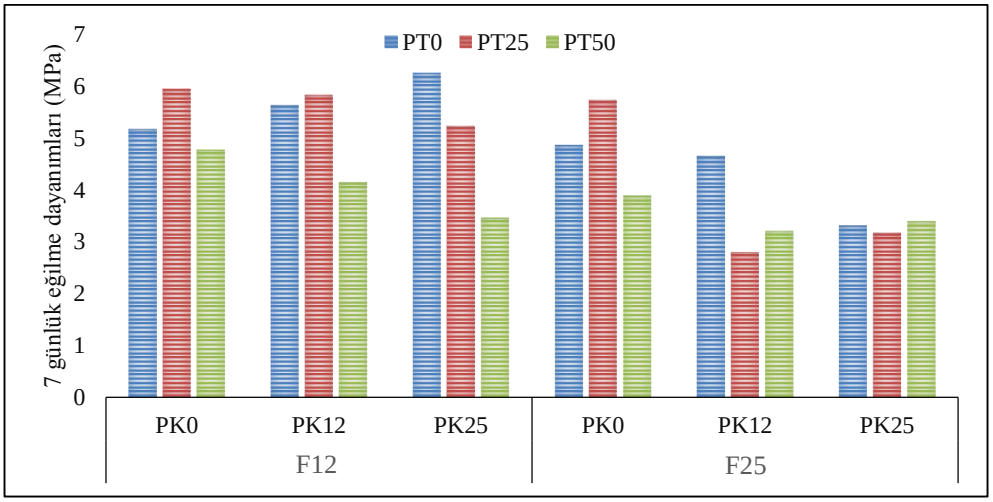


d) 90 günlük

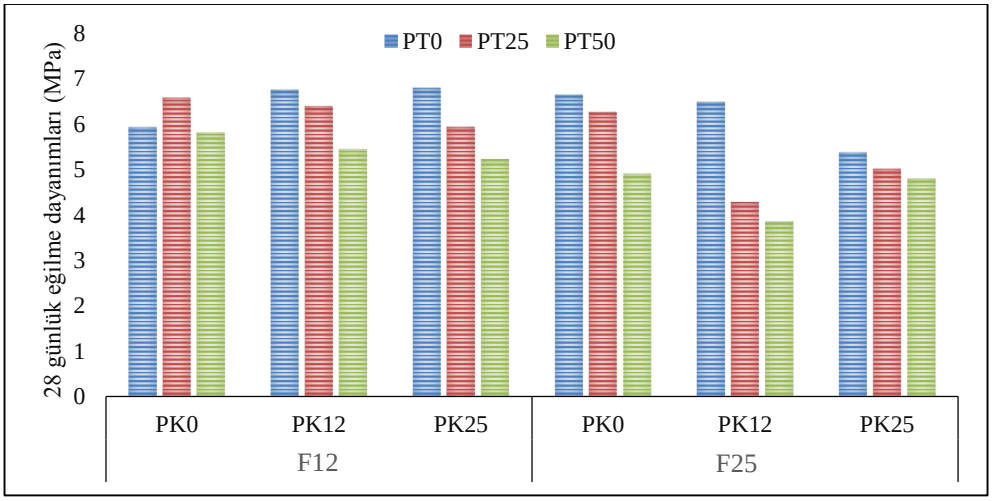
Şekil 4.5 Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları



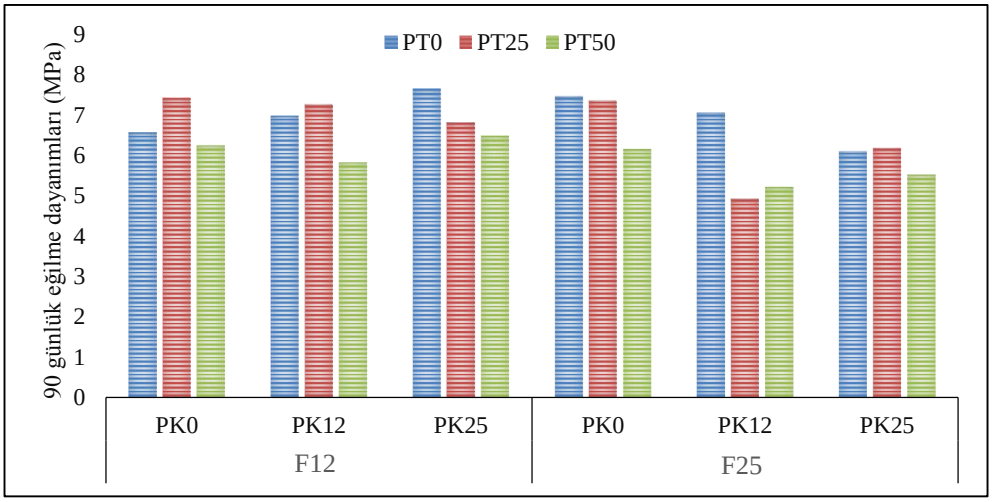
a) 1 günlük



b) 7 günlük



c) 28 günlük



d) 90 günlük

Şekil 4.6 Çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları

Şekil 4.5b'de gösterildiği gibi köpük içeriği arttıkça 7 günlük basınç dayanımı azalmıştır. 25 kg/m^3 köpük içerikli karışımların 7 günlük basınç dayanımı 35,7-69,3 MPa arasında değişmektedir. PT içermeyen karışımlarda PK içeriği arttıkça, basınç dayanımı artar. PK içermeyen karışımlarda PT %25 ise, basınç dayanımı referans karışıma göre %15,1 artmıştır. PT'nin %50 kullanıldığı karışımlarda, PK içeriği arttıkça basınç dayanımı azalır. Yüksek köpük içerikli (25 kg/m^3) karışımlarda da benzer sonuçlar gözlenmiştir. %50 PT karışımları dışındaki tüm çimento esaslı kompozitlerde 50 MPa ve üzeri basınç dayanımı elde edilmiştir.

Çimento esaslı kompozitlerin 7 günlük eğilme dayanımı 2,8-6,3 MPa arasında değişmektedir. Düşük köpük içeriğinde PK içeriği arttıkça eğilme dayanımı artarken, yüksek köpük içeriğinde eğilme dayanımı azalmaktadır. PT oranı düşük köpük içeriğinde %25 ise, eğilme dayanımı genellikle artar. Yüksek köpük içeriğinde PK oranının %25 olması durumunda PT'nin eğilme dayanımını etkilemediği tespit edilmiştir.

Şekil 4.5c'de gösterildiği gibi çimento esaslı kompozitlerin 28 günlük basınç dayanımı 37,9-78,9 MPa arasında değişmektedir. Kürlenme süresinin artması, basınç dayanımını büyük ölçüde iyileştirmiştir. Köpük içeriğini artırmak, basınç dayanımını biraz azaltmıştır. Düşük köpük içerikli karışımlarda PK içeriği %12,5 ve PT %0 olduğunda, basınç dayanımı referans karışıma göre %14,3 artmıştır. Köpük içeriği 25

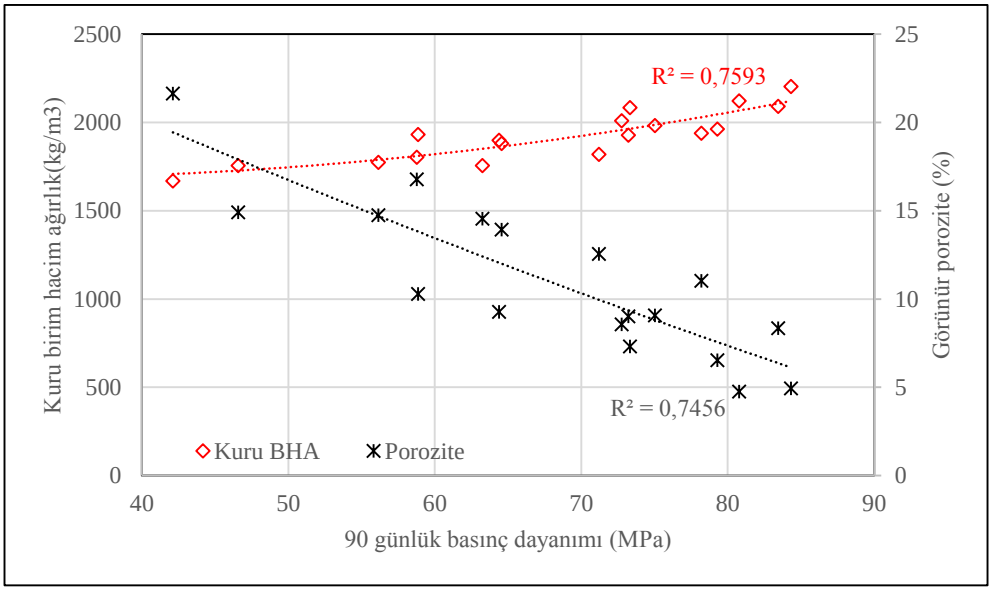
kg/m^3 olmasına rağmen, PK %12,5 ve PT %0 ise, yaklaşık 78 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. PK içermeyen karışımlarda %25 oranında PT kullanılması, basınç dayanımını arttırmıştır.

Şekil 4.6c'de gösterildiği gibi PT içermeyen çimento esaslı kompozitlerin 28 günlük eğilme dayanımı 5,4-6,8 MPa arasında değişmektedir. PT oranı ve köpük içeriği arttıkça, eğilme dayanımı genellikle azalır. PT içermeyen karışımlarda, %12,5'lik bir PK içeriği eğilme dayanımı arttırmaktadır.

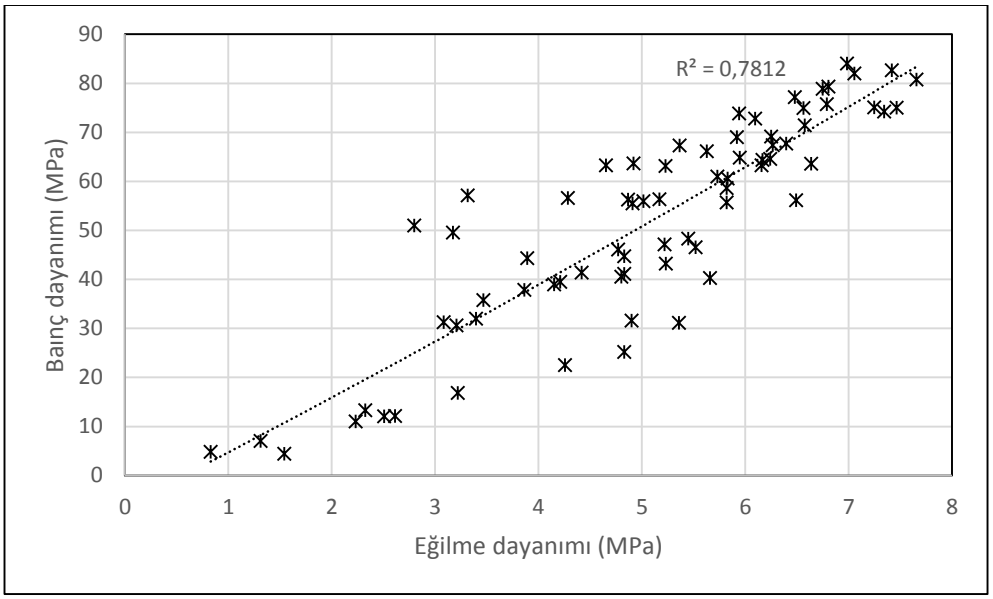
Şekil 4.6d, köpük içeriği arttıkça karışımların 90 günlük basınç dayanımının azaldığı göstermektedir. Karışımların basınç dayanımı 42,1-84,3 MPa arasında değişmektedir. Düşük köpük içeriğindeki PK oranındaki değişim, basınç dayanımını fazla etkilemediği gözlenmiştir. PT içermeyen karışımlarda PK kullanılırsa, 80 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilir. Yüksek köpük içeriğinde bu değer 70 MPa'dır. Yüksek köpük içeriğinde %25 PK ve %50 PT kullanılırsa, basınç dayanımı referans karışıma göre 1,6 kat azalmıştır.

Şekil 4.6d'de gösterildiği gibi PT oranı %25 ise, 90 günlük eğilme dayanımı genellikle artar. Özellikle PT içermeyen ve düşük köpük içeriği ile üretilen %25 PK içerikli karışımlarda eğilme dayanımı 7,6 MPa olarak elde edilmiştir. Yüksek köpük içeriğinde %12,5 PK ve %25 PT kullanarak, eğilme dayanımı referans karışıma göre 1,5 kat azalmıştır. PT kullanılan karışımlarda %12,5 PK kullanılması eğilme dayanımını azaltırken, %25 PK ile eğilme dayanımı tekrar artmıştır.

PT, puzolonik aktivite nedeniyle erken yaş dayanımlarında azalmaya neden olmuştur. Bununla birlikte, PK'nın yüksek SiO_2 içeriği ve özgül yüzey alanı nedeniyle, erken yaşlarda dayanım artışları gözlenmiştir. Köpük içeriği arttıkça, hava kabarcıklarının sayısı yükselmiş ve bu da dayanım kaybına neden olmuştur. Ancak, köpük içeriğindeki artış işlenebilirliği iyileştirdiğinden, dayanım kayıpları minimum düzeydedir.



a) Basınç dayanımı-fiziksel özellikler



b) Basınç dayanımı-eğilme dayanımı

Şekil 4.7 Basınç dayanımı korelasyonları

Şekil 4.7a'da görüldüğü gibi karışımların porozite değerleri azaldıkça basınç dayanımı artar. Porozite ve basınç dayanımı arasındaki R^2 değeri 0,75 olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı 80 MPa ve üzeri olan karışımların porozite değerleri %10'un altındadır. Çimento esaslı kompozitlerin kuru birim hacim ağırlığı azaldıkça basınç dayanımı azalmıştır. Kuru birim hacim ağırlık değeri 1667 kg/m^3 olan çimento esaslı kompozitler, yaklaşık 43 MPa basınç dayanımına sahiptir. Geleneksel betonların kuru birim hacim ağırlığı 2400-2500 kg/m^3 arasında değişmektedir. Bu çalışmada,

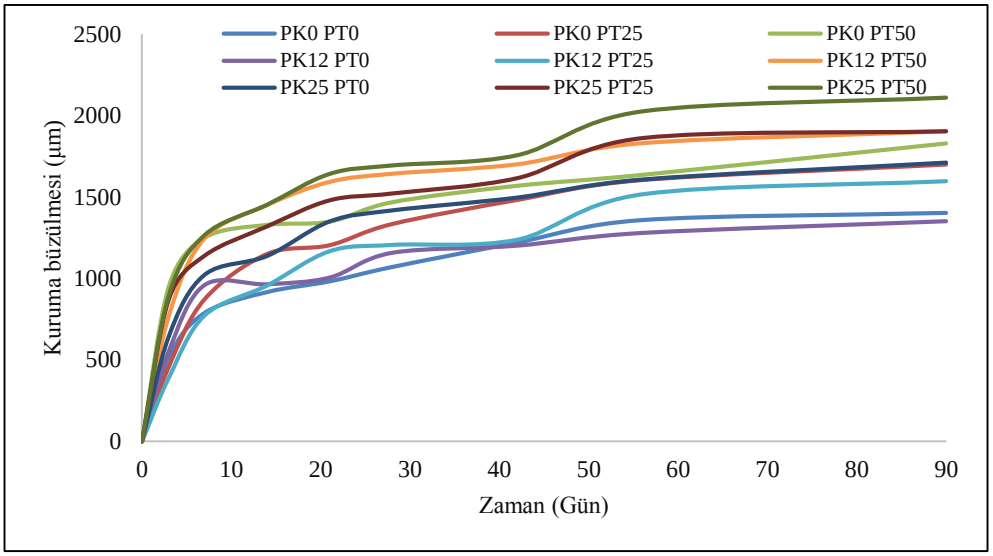
geliştirilen kompozit sayesinde ölü yükler yaklaşık %30 azaltılacaktır. Ayrıca birim hacim ağırlığın düşürülmesine rağmen 43 MPa'lık yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Şekil 4.7b, basınç ve eğilme dayanımı arasındaki R^2 değerinin 0,79 olduğunu göstermektedir. Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı arttıkça, eğilme dayanımı da iyileşmiştir. 80 MPa basınç dayanımına sahip karışımların eğilme dayanımı yaklaşık 8 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca, basınç ve eğilme dayanımı arasında 1/9 oranında bir oran gözlenmiştir.

Younes vd. PK içeriği arttıkça harçların basınç dayanımının arttığını tespit etmiştir. Dayanım artışı, PK'nın alkali ortamındaki aktivitesi ve amorf yapısı ile açıklanmaktadır (Younes vd., 2018). Kanthe vd. PK'nın basınç dayanımını %10'a kadar arttırdığı gözlenmiştir. PK'nın puzolonik özellikleri ve gelişen mikro yapı, basınç dayanımını artırmıştır (Kanthe vd., 2018). Mohseni vd. %10 PK kullanımında basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek PK oranlarının kullanılması, basınç dayanımını düşürmüştür. Yüksek oranda PK kullanımı homojen hidratlı mikro yapı oluşumunu engellemiştir. Ayrıca mikroyapı da aşırı silis içeriği basınç dayanımını azaltmıştır (Mohseni vd., 2017). Karataş ve arkadaşlarına göre %15'e varan PT kullanımı basınç ve eğilme dayanımını arttırmaktadır. PT'nın sağladığı dayanım gelişimi, puzolonik aktivite ile açıklanmaktadır (Karataş vd., 2017). Zeyad ve arkadaşlarının çalışmasında %10'a kadar PT kullanımı 28 ve 90 günlük basınç dayanımını arttırmaktadır (Zeyad ve Almalki, 2021). PT, aktif SiO_2 içeriği ve puzolonik aktivite özellikleri nedeniyle basınç dayanımını arttırmıştır (Kılıç ve Sertabipoğlu, 2015). Lesovik vd. köpük içeriği arttıkça köpük betonlarının basınç dayanımının azaldığını göstermiştir (Lesovik vd., 2020). Eltayeb ve arkadaşları tarafından üretilen köpük betonlarda da benzer sonuçlar gözlenmiştir (Eltayeb vd., 2020).

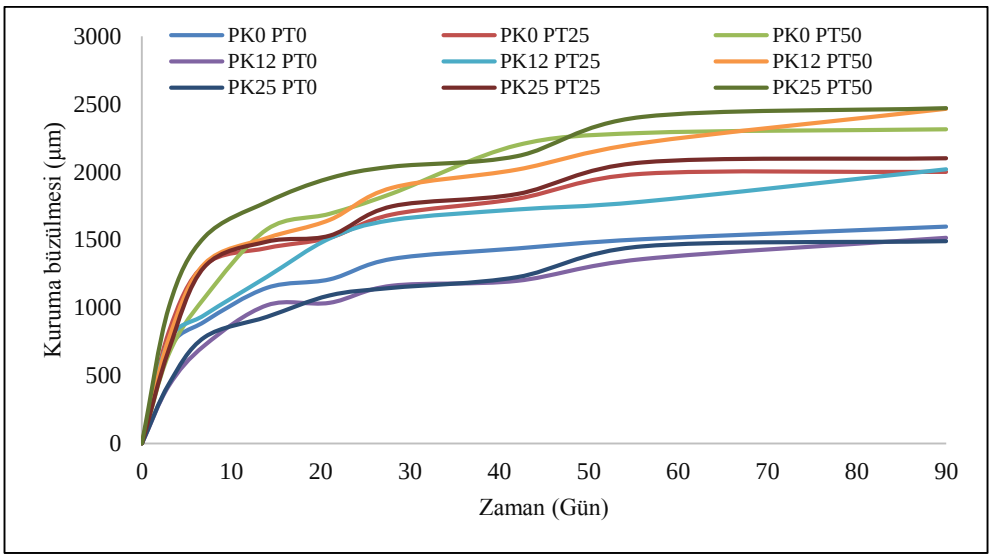
4.4 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmesi

Şekil 4.8a'da görüldüğü gibi 25 kg/m^3 köpük içerikli karışımların kuruma büzülme değerleri genellikle $2.000x10^{-6}$'nın altındadır. Karışımların 120.günde PT ve PK olmadan kuruma büzülmesi değeri $1.444x10^{-6}$ olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, %50 PT ve %25 PK kullanılmasıyla, karışımların büzülme değeri %52,2 artmıştır.

Genellikle %50 PT oranı karışımların kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. Bu karışımların kuruma büzülmesi değerleri $1.900x10^{-6}$ ve üzeridir. Karışımların kuruma büzülmesi değerleri 56.günden itibaren pek değişmemiştir. PT oranı arttıkça kuruma büzülmesi değerleri atmıştır. Genellikle PK oranındaki artış kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. %25 PK kullanılan çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmesi değeri $1.700x10^{-6}$'dan fazladır. PT kullanılmayan ancak %25 PK kullanılan karışımların kuruma büzülmesi değeri referans karışıma göre 1,2 kat artmıştır. Düşük köpük içerikli karışımlarda kullanılan çimento ikame malzemeleri genel olarak kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. Çimento esaslı kompozitler, kuruma büzülmesinin %90'ını ilk 56 günde meydana gelmiştir.



a) Köpük içeriği: 12,5 kg/m^3

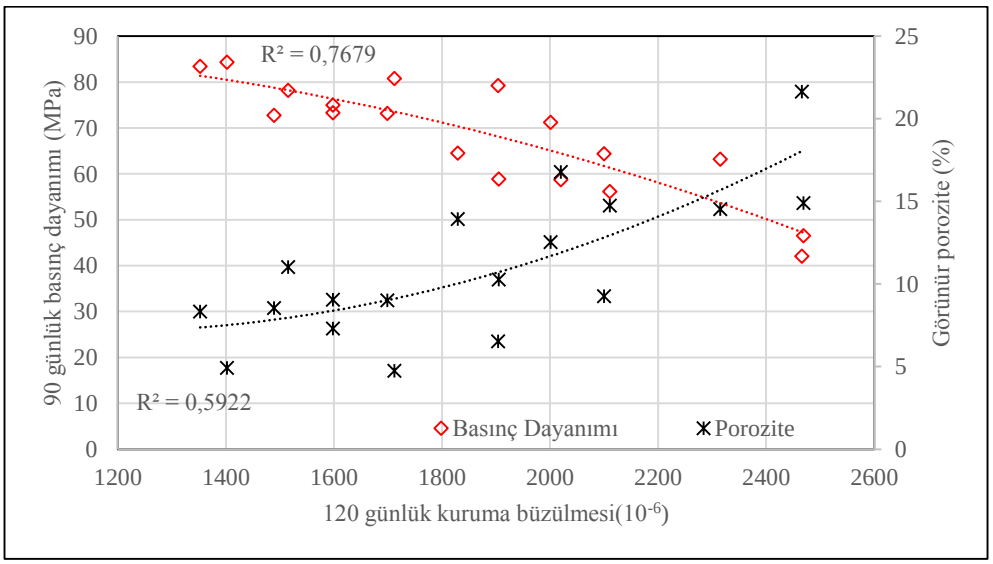


b) Köpük içeriği: 25 kg/m^3

Şekil 4.8 Karışımların kuruma büzülmesi

Şekil 4.8b'de görüldüğü gibi, köpük içeriği arttıkça, karışımların kuruma büzülmesi değeri de artmıştır. Yüksek köpük içerikli karışımların kuruma büzülmesi değerleri 1.532-2.512x10^{-6} arasındadır. PT'nın %50 kullanıldığı karışımlarda, kuruma büzülmesi değeri referans karışıma göre yaklaşık 1,5 kat artmıştır. %25 PK ve %50 PT kullanılan karışımların kuruma büzülmesi değeri 120.günde 2.515x10^{-6} olarak ölçülmüştür. PT içermeyen karışımlarda PK'nın %12,5 olması durumunda, kuruma büzülmesi biraz azalmıştır. Yüksek köpük içerikli karışımlarda 56.günden itibaren kuruma büzülmesi yavaşlamıştır.

Şekil 4.9'de gösterildiği gibi karışımların 90 günlük basınç dayanımı ile 120 günlük kuruma büzülme değerleri arasındaki R^2 değeri 0,78'dir. Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı arttıkça kuruma büzülmesi değerleri düşmüştür. Özellikle basınç dayanımı 80 MPa'nın üzerinde olan karışımların 120 günlük büzülmesi değerleri $1.400x10^{-6}$'nın altındadır. Basınç dayanımı 40 MPa olan karışımların kuruma büzülmesi değeri yaklaşık olarak $2.500x10^{-6}$ olarak ölçülmüştür. PT oranındaki artış basınç dayanımını azaltırken kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. Kuruma büzülmesi ve porozite arasında biraz düşük bir korelasyon (R^2=0,61) gözlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin görünen porozite değerleri arttıkça, genellikle kuruma büzülmesi değerleri artmaktadır. Daha yüksek porozite oranına sahip karışımların daha fazla büzülmeye neden olduğu gözlenmiştir. Özellikle köpük içeriği arttıkça karışımdaki hava kabarcıklarının sayısı da artmıştır. Porozite oranı arttıkça makro ve mikro yapıdaki suyun buharlaşması kolaylaşmaktadır. Böylelikle, çimento esaslı kompozitlerde su buharlaşma oranı artarak daha fazla büzülme meydana gelmektedir. Ayrıca, %50 PT ve %25 PK kullanımı genellikle işlenebilirliği azaltmıştır. İşlenebilirliğin azalması sonucu karışımların porozite değerleri artmıştır. Bu nedenle, %50 PT içerikli karışımlarda daha fazla kuruma büzülmesi gözlenmiştir. %25 PK kullanan karışımlarda da benzer bir etki meydana gelmiştir.



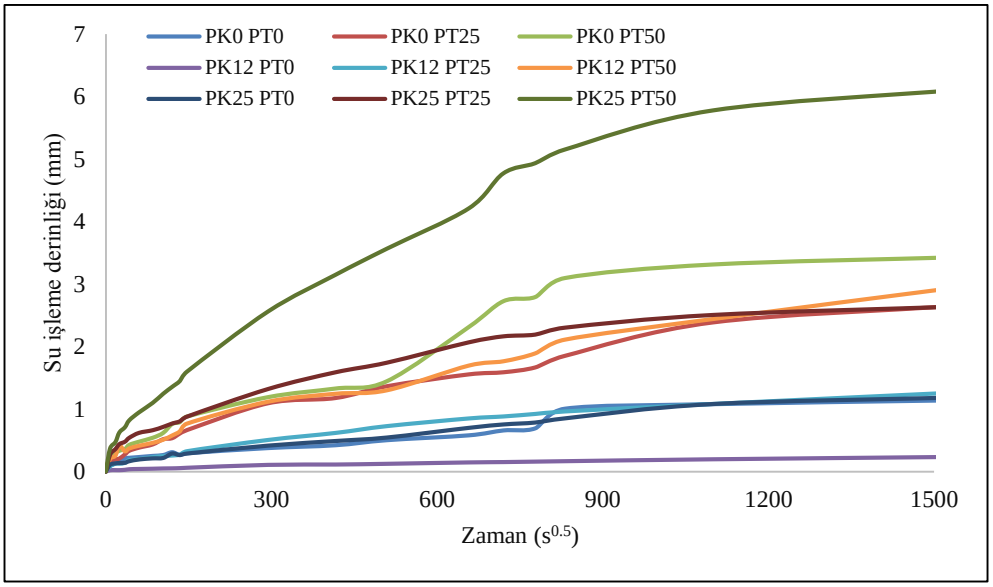
Şekil 4.9 Kuruma büzülmesinin basınç dayanımı ve gözeneklilik ile ilişkisi

Chatveera ve Lertwattanaruk, %20 PK kullanımının kuruma büzülmesini biraz artırdığını gözlemiştir. Kuruma büzülmesinin pasta hacmi ve kılcal boşluk yapısı ile

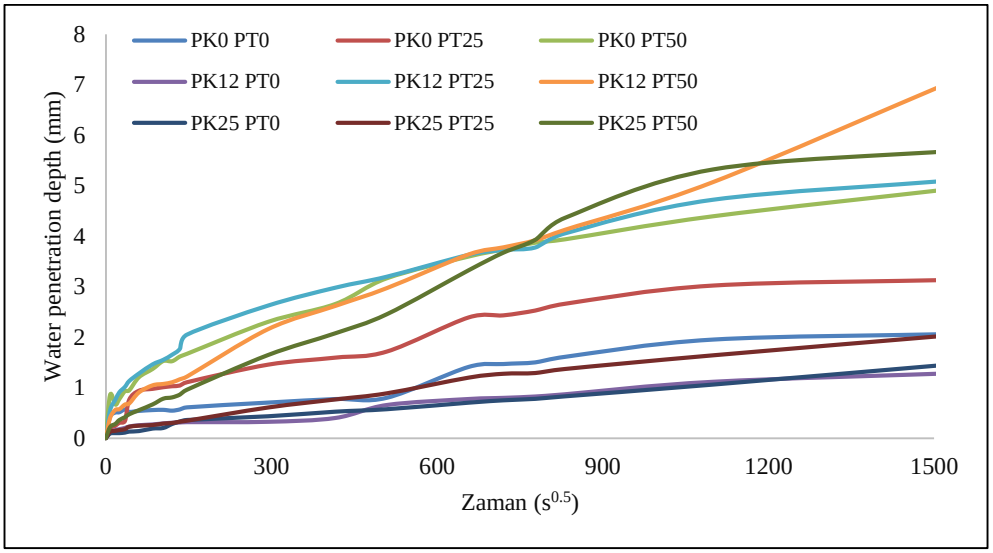
ilişkili olduğu vurgulanmıştır (Chatveera ve Lertwattanaruk, 2011). Sadrmomtazi ve arkadaşları silis dumanından farklı olarak pirinç kabuğu külünün kuruma büzülmesinde artışa neden olduğunu belirtmiştir (Sadrmomtazi vd., 2012). Kızılkanat vd. PT içeriği arttıkça harçların kuruma büzülmesinin azaldığını belirtmiştir (Kizilkanat vd., 2016). Özbay ve arkadaşları hidratlanmamış puzolan partiküllerinin büzülme deformasyonunu azaltmak için ince agrega gibi davrandığını belirtmiştir. Ayrıca puzolanik reaksiyona bağlı olarak buharlaşabilen su miktarı azaldıkça büzülmenin de azaldığı tespit edilmiştir (Özbay vd., 2012). Bu çalışmada PT oranı arttıkça işlenebilirlik azalmıştır, dolayısıyla kılcal boşluk içeriği artmıştır. Kılcal boşluk oranındaki artışlar sonucunda büzülme değerleri artmıştır. Ayrıca PK, yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle hidratasyon sırasında PT'den daha fazla su tüketmiştir. PK'nın erken yaşta hidratasyona katılımı da bu süreçte etkili olmuştur. PT, 7 günlük kürleme süresi boyunca puzolanik aktiviteyi tamamlamadığı için mikroyapıya olumlu bir katkı yapmamıştır. Bu nedenle PT oranı arttıkça büzülme değerleri de yükselmiştir. Nambiar ve Ramamurthy, köpük içeriği arttıkça büzülmenin azaldığını çünkü pasta hacminin azaldığını belirtmişlerdir (Nambiar ve Ramamurthy, 2009). Ancak bu çalışmada köpük içeriği arttıkça agrega hacmi azalmaktadır. Bunun sonucunda da karışımların kuruma büzülmesi değerleri artmıştır.

4.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kapilerite Özellikleri

12,5 kg/m^3 köpük içerikli karışımların zamana bağlı su işleme derinlikleri Şekil 4.10a'da verilmiştir. En düşük su işleme derinliği, 0,20 mm değeri ile, PT kullanılmayan ama PK oranının %12,5 olduğu bir karışımda elde edilmiştir. Referans karışımın su işleme derinliği yaklaşık 0,60 mm'de ölçülmüştür. PK %12,5 oranında kullanıldığında, su işleme derinliği %66 oranında azalmıştır. En yüksek su işleme derinliği (6,1 mm) %25 PK ve %50 PT kullanılan karışımlarda gözlenmiştir. Su işleme derinliği, referans karışıma göre yaklaşık 5 kat artmıştır. PT içeriği arttıkça, karışımların işlenebilirliği azalmıştır ve su işleme derinliği artış göstermiştir. Özellikle %50 PT içerikli karışımların su işleme derinliği 2 mm'yi aşmıştır. PK içeriğindeki artış genellikle su işleme derinliğini azaltmıştır.



a) Köpük içeriği: 12,5 kg/m^3

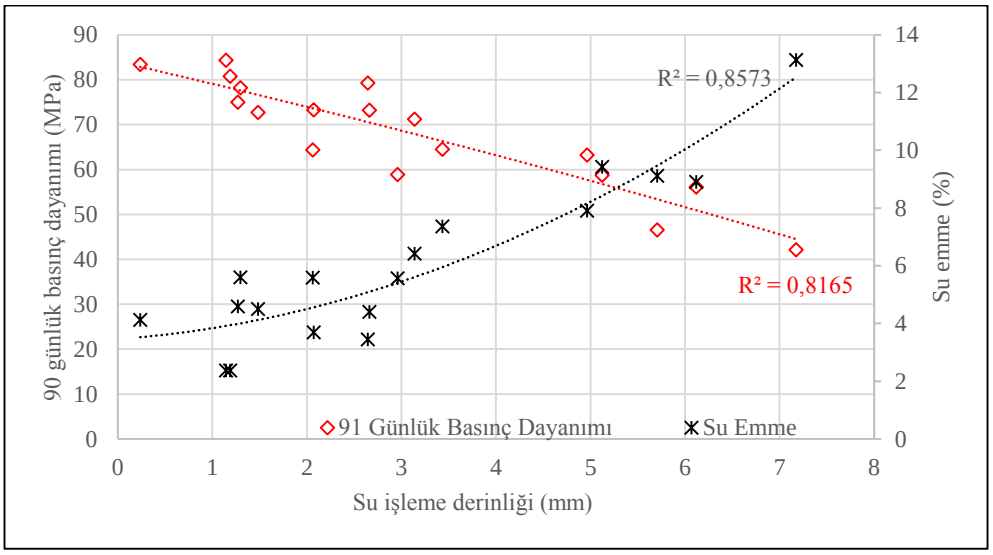


b) Köpük içeriği: 25 kg/m^3

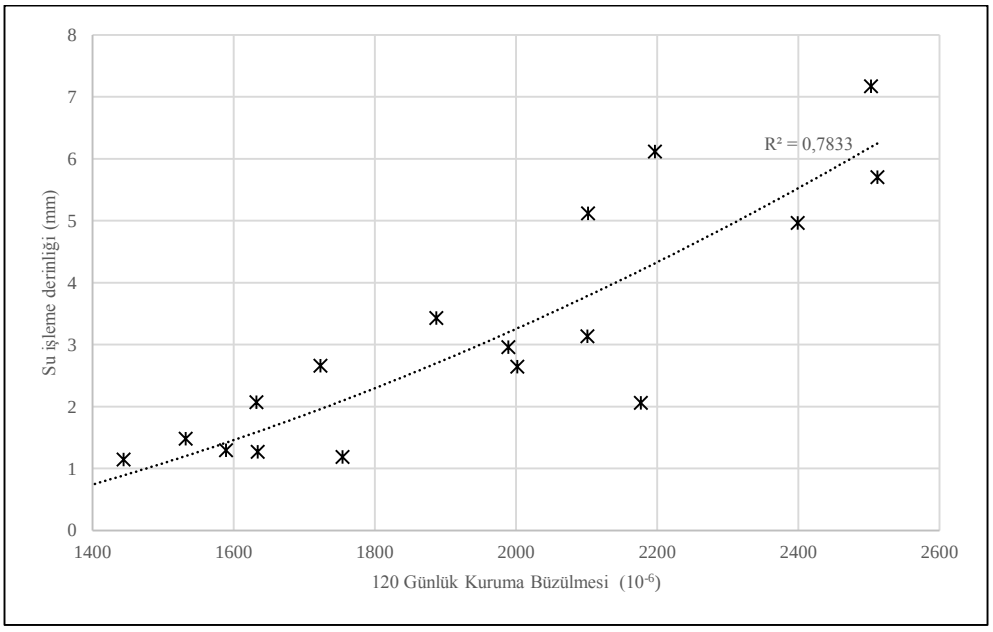
Şekil 4.10 Çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri

Şekil 4.10b, karışımların köpük içeriği arttıkça, su işleme derinliğinin arttığını göstermektedir. Köpük içeriği 25 kg/m^3 olan karışımların su işleme derinlikleri 1,3-7,2 mm arasında değişmektedir. Özellikle %50 PT oranına sahip çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinliği 5 mm'den fazladır. En yüksek su işleme derinliği (7,2 mm) %50 PT ve %12,5 PK içeren karışımlarda görülmüştür. Su işleme derinliği referans karışıma göre %243 artmıştır. En düşük su işleme derinliği (1,3 mm) yine %0 PT ve %12,5 PK içerikli karışımlarda elde edilmiştir. PT oranı azaldıkça, PK'nın %25 kullanımı su işleme derinliğini azaltmıştır. Karışımdaki hava kabarcıklarının sayısının

artması, su işleme derinliğini arttırmıştır. Genellikle, düşük işlenebilirliğe sahip karışımların su işleme derinlikleri oldukça fazladır. PK'nın su işleme derinliğini azaltmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



a) Su işleme derinliği-basınç dayanımı



b) Su işleme derinliği-Kuruma büzülmesi

Şekil 4.11 Su işleme derinliği korelasyonu

Şekil 4.11a'da görüldüğü gibi karışımların basınç dayanımı arttıkça su işleme derinliği azalmaktadır. Basınç dayanımı 70 MPa'nın üzerinde olan karışımların su işleme derinlikleri 1,50 mm'den azdır. Kılcal boşlukların azalmasının bir sonucu olarak basınç dayanımı artar. Yüksek özgül yüzey alanına sahip PK oranını artırmak

genellikle kılcal boşlukları azaltmıştır. Karışımların su emme değerleri arttıkça su işleme derinliği artmıştır. Şekil 4.11b, su işleme derinliği arttıkça kuruma büzülme değerlerinin arttığını göstermiştir. Kuruma büzülmesi için kılcal boşluk ve ağ miktarı önemli bir faktördür. Çünkü kılcal boşluk oranı arttıkça makro ve mikro yapıdaki suyun buharlaşması kolaylaşmıştır. İlk olarak çimento esaslı kompozitlerde kılcal boşluklardaki su ve jel (CSH) buharlaşmaktadır. PK genellikle kılcal boşlukları azalttığı için kuruma büzülmesini de azaltmıştır. PK, karıştırma suyunun bir kısmını kendi bünyesinde tutmaktadır. Ancak hidratasyon aşamasında emdiği suyun bir miktarını serbest bırakmaktadır. Bu etki, çimento esaslı kompozitlerin mikroyapısını iyileştirir. Bu nedenle, PK içeren karışımların kılcal boşluk oranı daha düşüktür.

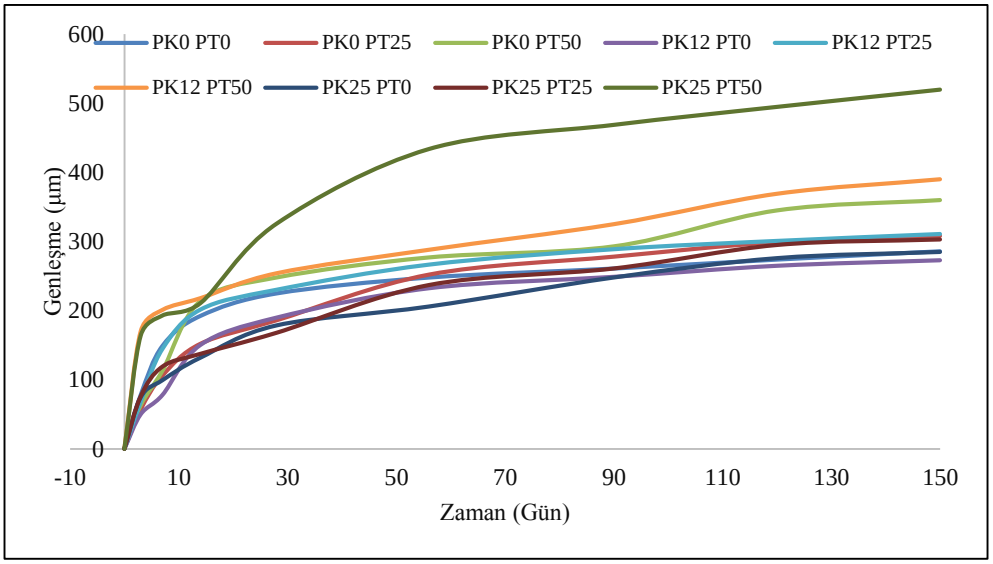
Patel ve Sha, jeopolimer üretiminde farklı PK oranlarını kullanmıştır. %5 Pk kullanımı, jeopolimer karışımlarının kılcallık katsayılarını düşürmüştür. Geçirgenliğin gözenek yapısına ve boyut dağılımına bağlı olduğu belirtilmiştir. Suyun emilmesi boşlukların sürekliliğine bağlıdır. Hidratasyon ile oluşan jeller bu boşlukları kapatarak geçirgenliği azaltır. Ayrıca, PK'nın yüksek oranda kullanılması durumunda bazı tanelerin reaksiyona giremeyeceği ve daha gözenekli bir mikro yapı oluşturacağı belirlenmiştir (Patel ve Shah, 2018). Kameshwar vd. çimento harçlarında %20 PK ile su işleme derinliğinin azaldığını belirlemişlerdir. Puzolanik aktivitenin su işleme derinliğini azaltmada etkili olduğu belirtmişlerdir (Kameshwar vd., 2020). Priya ve arkadaşları tarafından yapılan yüksek mukavemetli betonlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Priya vd., 2021). Kabay vd. çimento harçlarında %10 PT kullanımının kılcallığı etkin bir şekilde azalttığını belirlemiştir. PT'nin kılcal boşlukları doldurarak kılcal ağı azalttığı gözlenmiştir (Kabay vd., 2015). Panesar, farklı içerikteki köpük maddeleri kullanarak köpük betonlar üretmiştir. Köpük içeriği arttıkça köpük betonun kılcallık katsayıları artmıştır (Panesar, 2013). Nambiar vd. kılcal su emme sırasında gözenek sayısının kılcallıktan etkilendiğini bildirmişlerdir. Gözenekler birbiriyle bağlanırsa su emme yüksektir ancak süreksiz gözeneklerde su emme daha azalır (Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Ahmad ve Chen tarafından yapılan çalışmada, köpük hacmi arttıkça köpük betonlarının kılcallığı artmıştır (Ahmad ve Chen, 2019). Bu çalışmada köpük içeriği yüksek karışımlarda gözeneklerin birbirine çok yakın olması kılcallığı etkilemiştir. Gözenekler birbirine yakın olduğu için süreksiz

gözeneklilik sağlanamamıştır. Sonuç olarak, köpük içeriği arttıkça su işleme derinliği artmıştır.

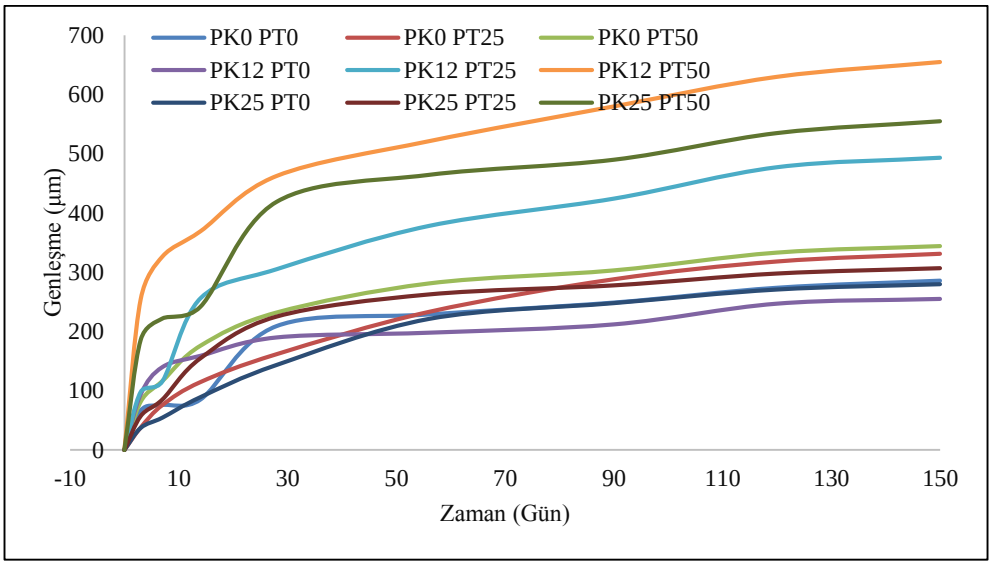
4.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Sülfat Dayanıklılığı

Şekil 4.12a, köpük içeriği 12,5 kg/m^3 olan karışımların zamana bağlı genleşmesini göstermektedir. 150.günde referans karışım (%0PT- %0PK) genleşmesi 286x10^{-6} olarak ölçülmüştür. %12,5 PK ve %0 PT içeren karışımlarda, genleşme değeri 273x10^{-6}'ya düşmüştür. %50 PT kullanılan karışımların genleşme değeri 350x10^{-6} değerini aşmıştır. Özellikle, %25 PK ve %50 PT kullanılan karışımların genleşme değeri, referans karışıma göre %82 artmıştır. PT oranındaki artışın bir sonucu olarak, karışımların genleşmesi yükselmiştir. PT içermeyen ancak PK içeren karışımlar, referans karışımdan daha az genleşmeye sahiptir. PK'nın sülfat bazlı genleşmeleri azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür.

Yüksek köpük içerikli (25 kg/m^3) karışımların genleşmesi genellikle artmıştır. Bununla birlikte, PK içermeyen karışımların genleşme miktarı, düşük köpük içeriği ile üretilen karışımlardan daha az olduğu gözlenmiştir. Bu karışımların yüksek işlenebilirliği, karışımı daha homojen hale getirmiştir. Bu etki sayesinde sülfat bazlı genleşmeler azaltılmıştır. PT içermeyen karışımlarda %12,5 PK kullanıldığında, genleşme referans karışıma kıyasla %11 azalmıştır. Yüksek köpük içerikli karışımların genleşme değerleri 255-655x10^{-6} aralığındadır. Yüksek köpük içeriğinde, maksimum genleşme (655x10^{-6}) %12,5 PK ve %50 PT içeren karışımlarda gözlenmiştir. Genleşme değeri, referans karışıma göre 2,3 kat artmıştır.



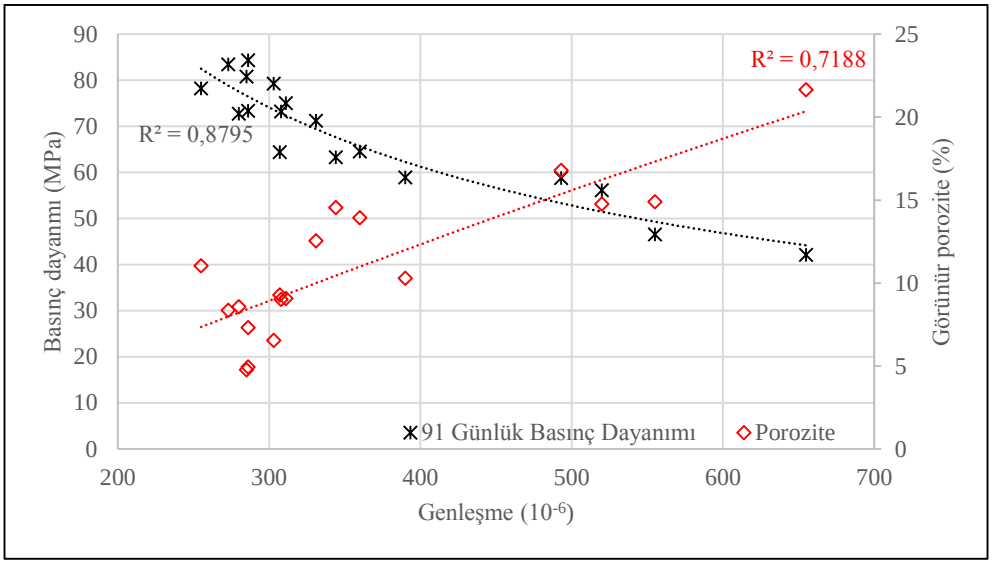
a) Köpük içeriği: 12,5 kg/m^3



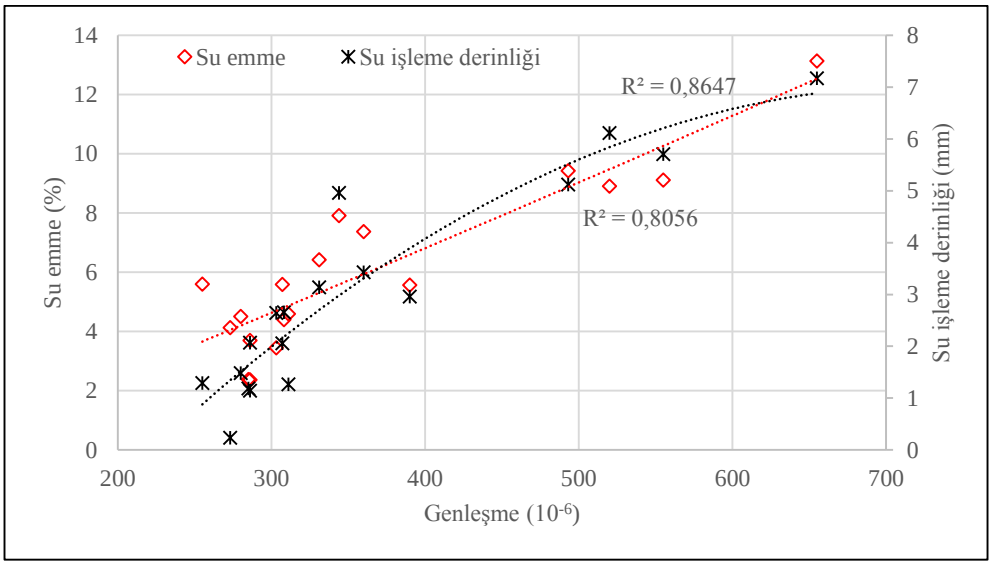
b) Köpük içeriği: 25 kg/m^3

Şekil 4.12 Çimento esaslı kompozitlerin sülfat dayanıklılığı

Şekil 4.12a'da görüldüğü gibi basınç dayanımı ile genleşme arasındaki R^2 değeri 0,89 olarak belirlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı arttıkça sülfatın neden olduğu genleşme azalmıştır. Sülfat çözeltisine maruz kalmadan önce düşük basınç dayanımına sahip karışımlar, bu süreçte daha fazla zarar görmüştür. Karışımların görünen porozite arttıkça genleşmenin de arttığı gözlenmiştir. Sülfat esaslı kimyasal saldırılarda boşluk yapısının çok önemli olduğu görülmektedir. İşlenebilirlik boşluk yapısını etkilediğinden, %50 PT içeren karışımlar daha fazla genleşme yapmıştır.



a) Genleşme-porozite



b) Genleşme-su emme

Şekil 4.13 Sülfatın neden olduğu genleşmenin korelasyonları

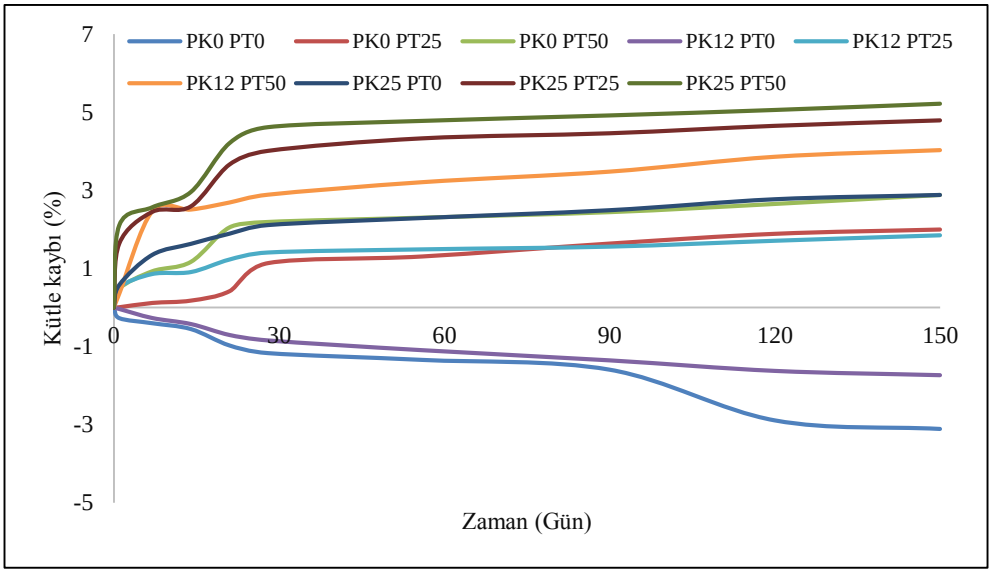
Şekil 4.13b'de görüldüğü gibi, su işleme derinliği ve su emme oranı arttıkça karışımların genleşmesi artmaktadır. Köpük içeriğindeki artış, boşlukların birbirine yakın olmasına neden olmuştur. Bu etkinin bir sonucu olarak karışımların su işleme derinliği artmıştır. Boşluk oranı arttıkça sülfat iyonlarının çimento esaslı kompozitlere girişi daha kolaydır. PT %50 kullanılırsa, işlenebilirlik azaldıkça porozite artmıştır. Bu nedenle, %50 PT'li karışımlarındaki yüksek porozite nedeniyle genleşmeler çok fazla meydana gelmiştir. Karışımların sülfat etkisinden önce puzolanik aktivite tamamen tamamlanmadığı için CH tam olarak tüketilmemiştir. Böylelikle yüksek miktarda PT kullanılması basınç dayanımını düşürmüştür ve sülfat hasarını arttırmıştır. PT'nın

PK'ya göre daha yavaş olan puzolanik aktivitesi sülfat dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir. PT ile üretilecek çimento esaslı kompozitlerde, sülfat etkisine karşı dayanıklılığı arttırmak için kürleme işlemine dikkat edilmelidir.

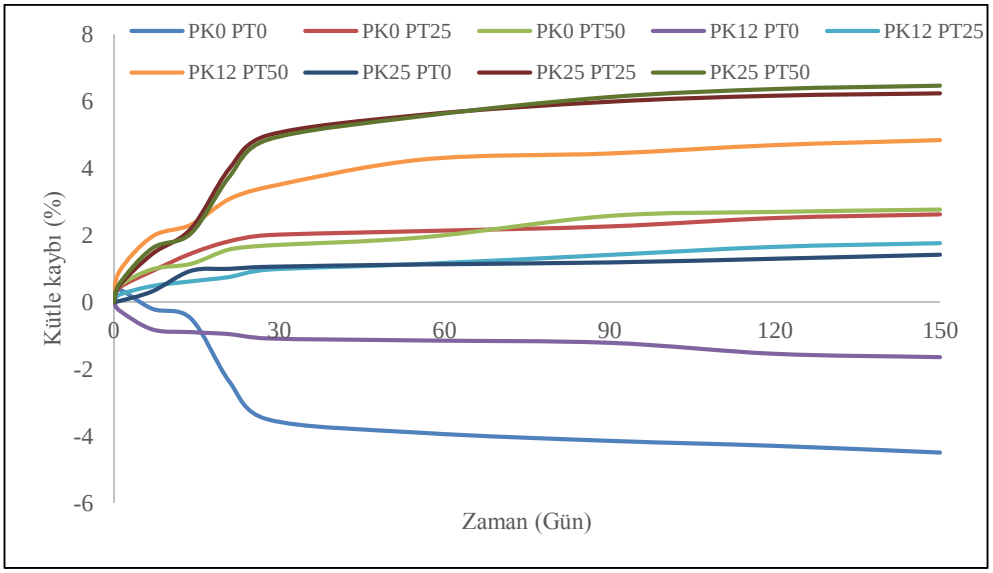
Chindaprasirt ve arkadaşları %40'a kadar PK kullanarak çimento harçları üretmiştir. PK içeriği arttıkça genleşmelerin azaldığı belirlenmiştir (Chindaprasirt vd., 2007). Pastanın Ca/Si oranının sülfat direnci açısından çok önemli olduğu vurgulanmıştır. CSH jelinin düşük bir Ca/Si oranında koruyucu silika jeli oluşturduğu görülmüştür (Shi ve Stegemann, 2000). Kabay vd. PT kullanımı ile betonun magnezyum sülfat dayanımının arttığı gözlenmiştir. Ancak bu betonlar sabit yayılma değerlerine sahiptir (Kabay vd., 2015). Bu çalışmada karışımların PT oranı arttıkça yayılma çapları azalmıştır. İşlenebilirlik ile boşluk yapısı arasındaki ilişkinin sülfat direnci açısından önemli olduğu belirlenmiştir. Literatürde köpük betonun sülfat etkisine karşı dayanıklılığını gösteren kapsamlı çalışmalar bulunmamaktadır. Ancak 90 günlük yüksek basınç dayanımına sahip çimento esaslı kompozitler sülfat etkisinden daha az etkilenmiştir.

4.7 Çimento Esaslı Kompozitlerin Asit Dayanıklılığı

H_2SO_4 etkisi altındaki 12,5 kg/m^3 köpük içerikli karışımların kütle değişimleri Şekil 4.14a'da verilmiştir. Referans karışımın kütlesi, H_2SO_4'e 150 gün maruz kalma nedeniyle yaklaşık %3,1 artmıştır. %12,5 PK içeren ve PT içermeyen karışımlarda da benzer bir kütle artışı (%1,7) gözlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerde en yüksek kütle kaybı (%5,2) %25 PK ve %50 PT içeren karışımlarda meydana gelmiştir. %25 PK kullanılan karışımların kütle kaybı %3'ten fazladır. %50 PT kullanılan çimento esaslı kompozitlerde de benzer bir etki gözlenmiştir. %12,5 PK ve %25 PT içeren karışımların kütle kaybı %1,8 olarak belirlenmiştir. Genellikle yüksek oranda çimento ikame malzemeleri kullanmak H_2SO_4 etkisi altında kütle kaybını artırmıştır.



a) Köpük içeriği: 12,5 kg/m^3

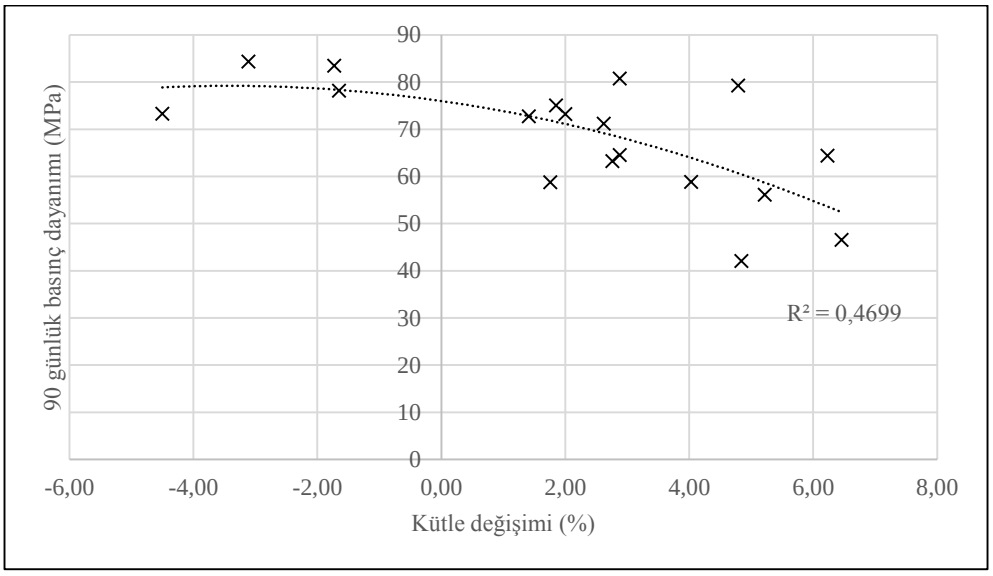


b) Köpük içeriği: 25 kg/m^3

Şekil 4.14 H_2SO_4'e maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin kütle değişimleri

Şekil 4.14'de görüldüğü gibi yüksek köpük içeriği ile üretilen karışımların kütle kayıpları, düşük köpük içeriği ile yapılanlara benzerdir. Köpük içeriğindeki artış, karışımların kütle kayıplarını nispeten artırmıştır. Düşük köpük içeriğinde olduğu gibi 150 gün boyunca H_2SO_4'e maruz kalan referans karışımda kütle artışı meydana gelmiştir. Referans karışımın kütlesi H_2SO_4'ün etkisiyle %4 artmıştır. %12,5 PK ve PT içermeyen karışımlarda kütle artışı %1,7 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda %50 PT kullanılması genellikle kütle kaybını arttırmıştır. Özellikle 150. günde %25 PK ve %50 PT kullanılan karışımlarda kütle kaybı %6,5 olarak ölçülmüştür. PT oranındaki

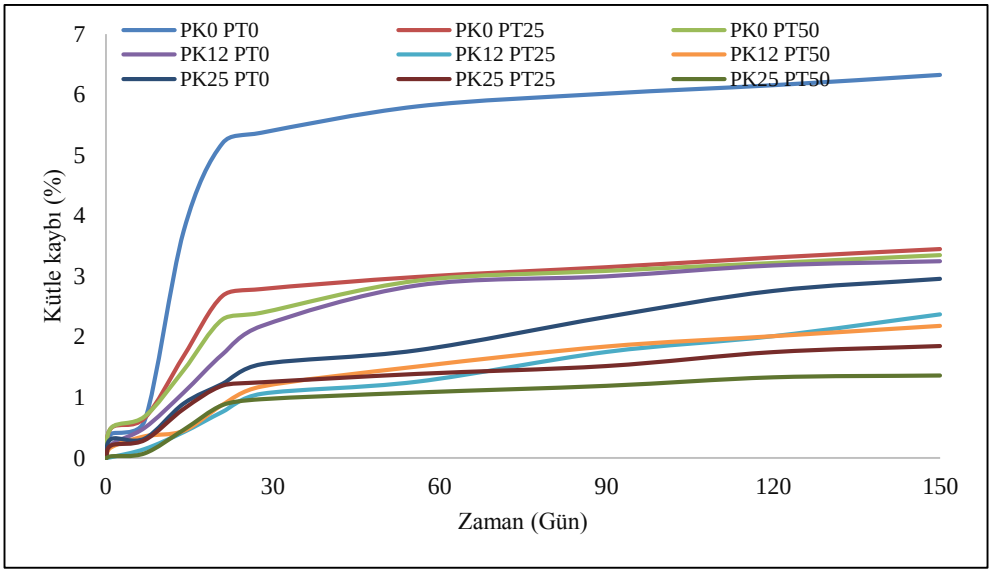
artış genellikle basınç dayanımını düşürdüğü için H_2SO_4 ile kütle kaybı artmıştır. H_2SO_4 etkisine karşı çimento ikame malzemeleri kullanılırsa düşük oranlar kullanmak daha etkili olabilmektedir.



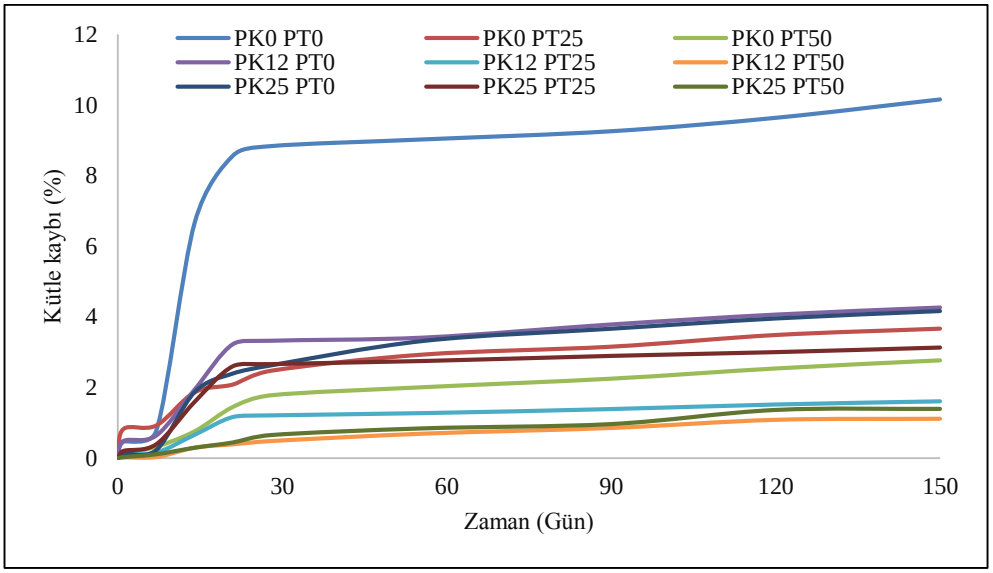
Şekil 4.15 Kütle değişimi ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.15, 90 günlük basınç dayanımı ile kütle değişimi arasındaki R^2 değerinin düşük olduğunu göstermektedir. Ancak 90 günlük basınç dayanımı yüksek karışımlarda kütle kaybının daha az olduğu görülmektedir. Kütle artışı, referans ve %12,5 PK içerikli karışımlarda meydana gelmiştir. Bu karışımların basınç dayanımı 70 MPa'nın üzerindedir.

Chang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, %1 H_2SO_4'e maruz kalan betonlarda da kütle artışı gözlenmiştir. Kütle artışı, çimentonun sürekli hidratasyonu sonucunda alçıtaşı oluşumu ve emilen çözeltinin miktarındaki artışla açıklanmıştır (Chang vd., 2005). H_2SO_4 etkisine maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin yüzeyinde alçıtaşı oluşumu belirlenmiştir. Yüzeyde oluşan alçıtaşı geçirgenliği biraz azalttığı için asit dayanıklılığına olumlu katkıda bulunabilir (Barbhuiya ve Kumala, 2017).



a) Köpük içeriği: 12,5 kg/m^3

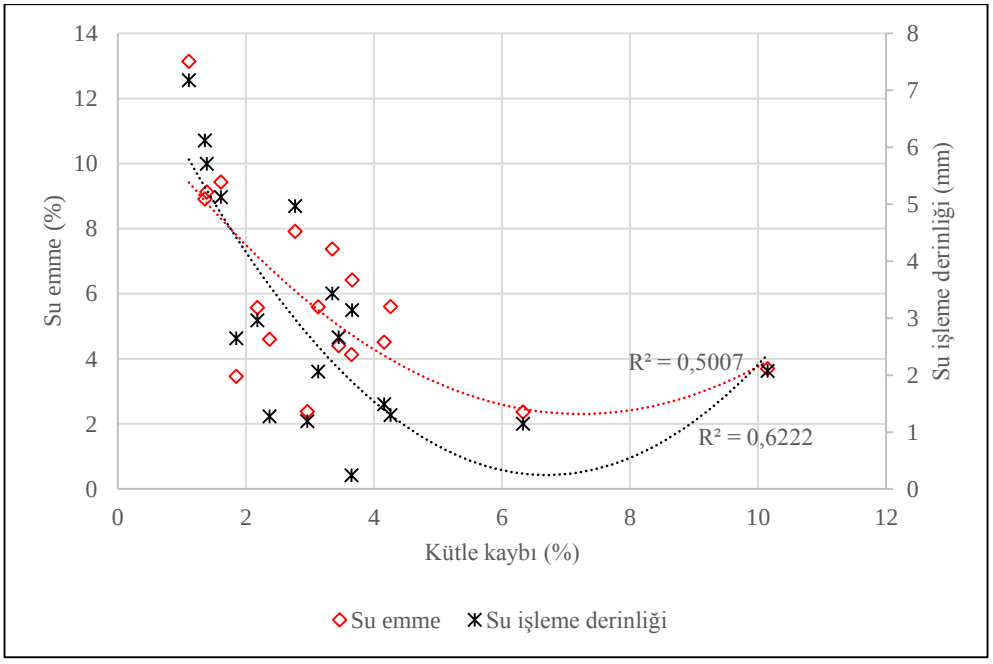


b) Köpük içeriği: 25 kg/m^3

Şekil 4.16 HCl'ye maruz bırakılan çimento esaslı kompozitlerin ağırlık değişimleri

Şekil 4.16a, HCl'ye maruz bırakılan 12,5 kg/m^3 köpük içeriğine sahip karışımların kütle kaybını göstermektedir. Çimento esaslı kompozitlerin kütle kayıpları %1,4-6,4 arasında değişmektedir. 150.günde yüksek CH içerikli referans karışımın kütle kaybı %6,4 olarak belirlenmiştir. %25 PK ve %50 PT kullanılan karışımların kütle kaybı, referans karışıma kıyasla %78,1 azaltılmıştır. HCl'ye maruz kalan çimento esaslı kompozitler için CH içeriğinin önemli olduğu tespit edilmiştir. Düşük köpük içerikli karışımlarda %25'lik PK içeriğinin kullanılması, kütle kaybını etkili bir şekilde azaltmıştır.

Çimento esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılan köpük içeriğinin artması genel olarak kütle kayıplarını artırmaktadır. Ancak köpük içeriğindeki artış, bazı karışımlarda hasarın derecesini azaltmıştır. %12,5 PK ve %25 PT içeren karışımlarda, düşük köpük içeriğinde %2,2 ağırlık kaybı meydana gelirken, yüksek köpük içeriğinde %1,1 ağırlık kaybı ölçülmüştür. Karışımların işlenebilirliği köpük içeriğinin artmasıyla arttığı için daha homojen bir matris elde edilmiştir. Sonuç olarak, karışımların HCl'ye karşı direnci artmıştır. %12,5 PK ve %50 PT kullanılan karışımların kütle kaybı, referans karışıma göre %89,2 azalmıştır. Çimento ikame malzemelerinin yüksek oranda kullanılması, genellikle kütle kaybını %2'nin altına düşürmüştür.



Şekil 4.17 Ağırlık kaybı korelasyonu

Şekil 4.17, su emme veya su işleme derinliğinin ağırlık kaybında nispeten etkili olduğunu göstermektedir. Örneğin, su emme oranı %13,1 olan bir karışımın ağırlık kaybı %1,1 olarak ölçülmüştür. Aynı karışımın su işleme derinliği 7,7 mm olarak belirlenmiştir. Su işleme derinliği 2,1 mm olan bir karışımda ağırlık kaybı %10,1 olarak ölçülmüştür. Bu nedenle, CH içeriği, HCl etkisine maruz kalan çimento esaslı kompozitlerde çok önemlidir. Çimento ikame malzemeleri, yüksek oranlarda pasta içerisinde CH olarak tüketilmelidir.

Meddah vd. %3,5 HCl'ye maruz kalan betonlarda %10 PK kullanarak kütle kaybını azalttığını belirtmiştir (Alam ve Al Riyami, 2018). Khan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada betonların asit direnci PK kullanımı ile artmıştır (Khan vd., 2012). Ayrıca doğal puzolanların kullanılması sonucu oluşan ikincil CSH jelleri asit direncini arttırmıştır. Çimento ikame malzemeleri mikro yapıyı iyileştirerek, asit dayanıklılığı için önemli katkı sağlamaktadır (Ghrici vd., 2007). Joshaghani ve Moeini, çimento harçlarında %30'a kadar PK kullanarak H_2SO_4 (%1) direncini arttırmıştır (Joshaghani ve Moeini, 2018). Literatür taramasında köpük betonlarda H_2SO_4 veya HCl etkisine karşı dayanıklılık deneyleri gözlenmemiştir. Ancak bu çalışmada optimum oranlarda PK veya PT kullanılan karışımların asit direncini arttıracağı tespit edilmiştir.

4.8 Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma Çözülme Dayanıklılığı

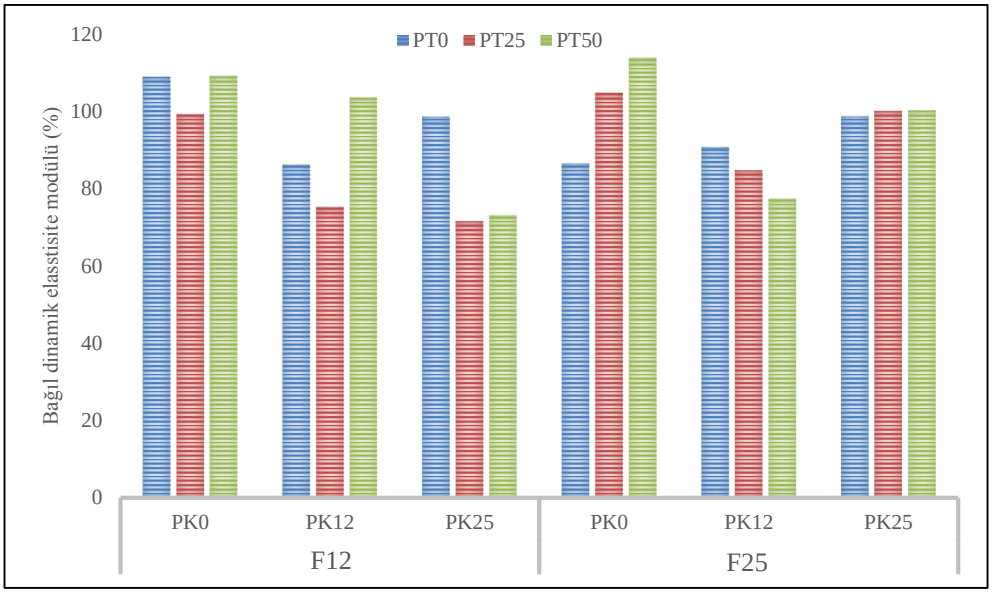
Şekil 4.18a-b, 100 D-Ç döngüsünden sonra bağıl dinamik esneklik modüllerini ve basınç dayanımlarını göstermektedir. Düşük köpük içeriğinde referans karışımın bağıl dinamik elastisite modülü (BDEM) değerinin %108,9 olduğu görülmüştür. PK kullanılmayan ancak %50 PT içeren karışımda da benzer bir etki gözlenmiştir. Karışımlarda %12,5 PK ve %50 PT kullanılarak BDEM değeri %103,6 olarak ölçülmüştür. %12,5 PK (PT içermeyen) kullanılan karışımın 90 günlük yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen BDEM değeri 100 D-Ç'den sonra %86 olarak belirlenmiştir. Özellikle PT oranı %25 olan karışımlarda daha düşük BDEM değerleri elde edilmiştir. %25 PT ve %25 PK kullanılan karışımlarda BDEM değeri, referans karışıma göre %34,3 azalmıştır. %25 PK kullanılan karışımlarda PT içeriğindeki artış, BDEM değerlerini önemli ölçüde düşürmüştür. Bununla birlikte, %12,5 PK içeren karışımlarda PT %50 oranında kullanılırsa, BDEM değeri referans karışıma göre %4,9 azalmıştır.

Yüksek köpük içeriğinde, PK içermeyen karışımlarda PT oranındaki artış BDEM değerlerini artırmıştır. Referans karışımın BDEM değeri köpük içeriği 25 kg/m^3 olduğunda %86,5 olarak elde edilmiştir. %25 ve %50 PT kullanılan karışımların BDEM değerleri, 100 D-Ç'den sonra %4,8-11,3 artmıştır. %12,5 PK kullanılan karışımların BDEM değerleri diğer karışımlara göre daha fazla azalmıştır. %12,5 PK ve %50 PT kullanılan karışımların BDEM değeri, referans karışıma göre %11,7

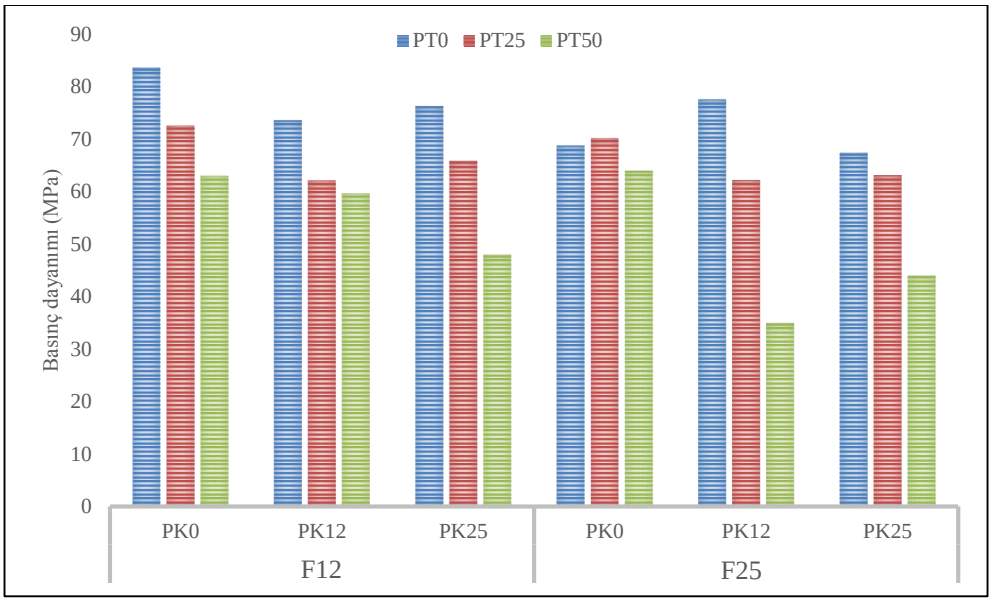
azalmıştır. %25 PK kullanılan karışımlarda BDEM değerleri birbirine çok yakın gözlenmiştir.

100 D-Ç'den sonra düşük köpük içeriği ile üretilen çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı 83,6-48,1 MPa arasında değişmektedir. %50 PT içeren karışımlarda PK içeriğindeki artış, D-Ç sonrası basınç dayanımını azaltmıştır. %50 PT ve %25 PK kullanılan karışımların basınç dayanımı, referans karışıma göre %42,2 azalmıştır. Genel olarak, PT ve PK içeriğindeki artışla birlikte basınç dayanımı azalmıştır. Ancak 100 D-Ç etkisine rağmen çimento esaslı kompozitlerde 70 MPa ve üzeri dayanım gözlenmiştir.

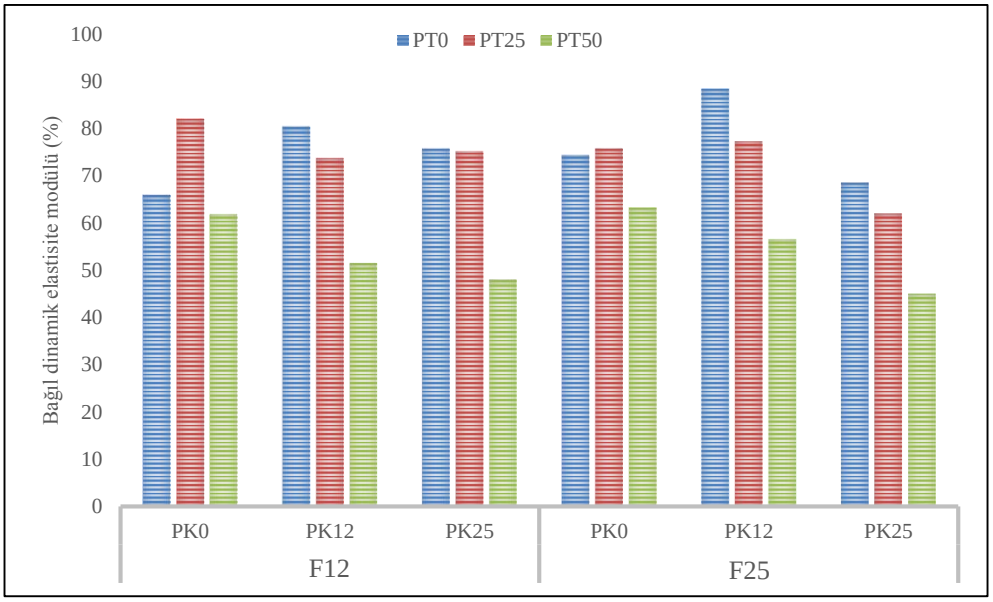
Yüksek köpük içerikli karışımlarda, 100 D-Ç sonrasında 77,6-44,0 MPa arasında basınç dayanımı elde edilmiştir. PT içermeyen karışımlarda %12,5 PK kullanılırsa, basınç dayanımı referans karışıma göre %13 artmıştır. PT kullanılan karışımlarda %12,5 PK kullanılırsa, basınç dayanımı azalmıştır. 100 D-Ç'den sonra en düşük basınç dayanımı (44,0 MPa) %50 PT ve %25 PK içeren karışımlarda gözlenmiştir. Ayrıca, köpük içeriğindeki artış genellikle 100 D-Ç'den sonra basınç dayanımını düşürmüştür.



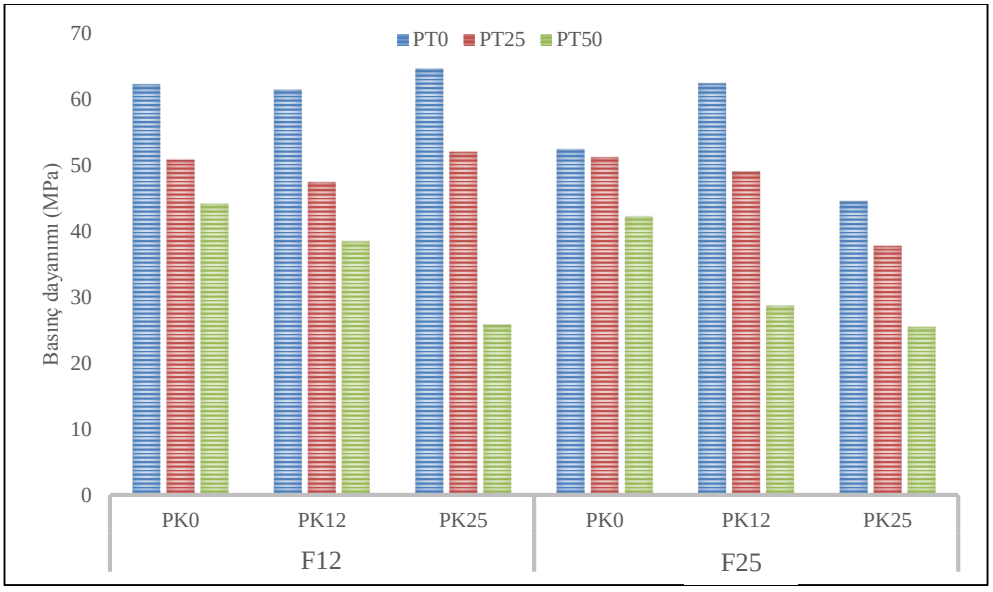
a) 100 döngü D-Ç sonrası bağıl dinamik elastisite modülü



b) 100 döngü D-Ç sonrası basınç dayanımı



c) 200 döngü D-Ç sonrası bağıl dinamik elastisite modülü



d) 200 döngü D-Ç sonrası basınç dayanımı

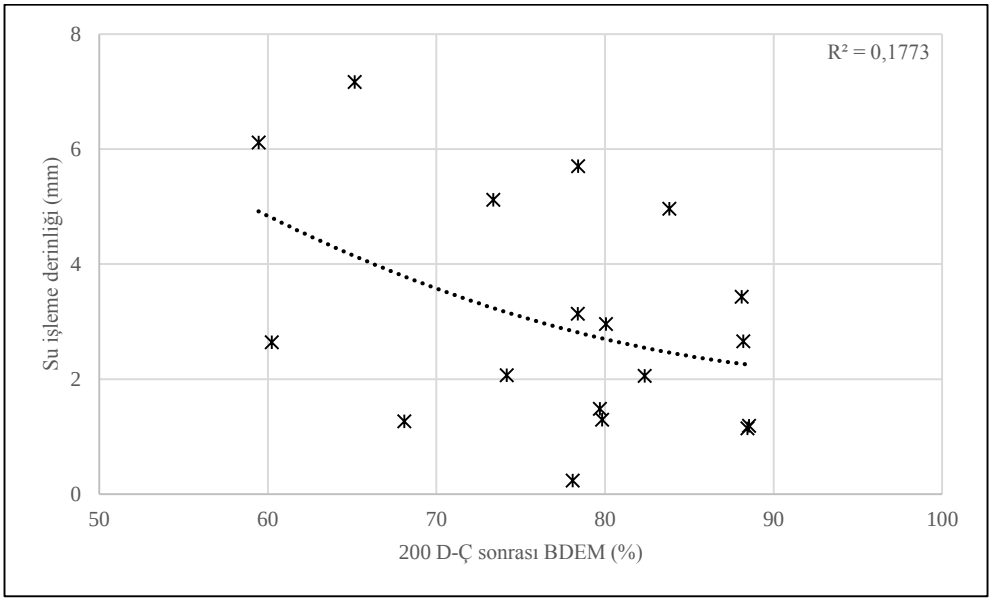
Şekil 4.18 Çimento esaslı kompozitlerin D-Ç sonrası BDEM ve basınç dayanımı

Şekil 4.18c-d'de, 200 D-Ç sonrasındaki çimento esaslı kompozitlerin BDEM ve basınç dayanımları verilmiştir. Döngü sayısındaki artış, BDEM ve basınç dayanımında bir azalmaya neden olmuştur. Referans karışımın BDEM değeri düşük köpük içerikli karışımlarda %66 olarak elde edilmiştir. PK içermeyen karışımlarda %25 PT kullanıldığında, BDEM değeri referans karışımına göre %24,3 artmıştır. 200 D-Ç'den sonra %25 PK ve %50 PT içeren karışımların BDEM değeri %48,1 olarak bulunmuştur. BDEM değeri referans karışıma göre %27,2 azalmıştır.

Yüksek köpük içeriğinde PT oranındaki artış genellikle BDEM değerlerini düşürmüştür. Referans karışımın BDEM değeri %74,4 olarak belirlenmiştir. BDEM değeri %12,5 PK ve %0 PT karışımlarında referans karışıma göre %18,9 artmıştır. BDEM değeri %25 PK ve %50 PT karışımlarında referans karışıma göre %39,5 azalmıştır.

Çimento esaslı kompozitlerde döngü sayısı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Düşük köpük içerikli karışımların basınç dayanımı 200 D-Ç'den sonra 64,6-25,8 MPa arasında değişmektedir. 200 D-Ç'den sonra, PT içermeyen karışımlarda 60 MPa ve üzeri basınç dayanımı elde edilmiştir. PT ile üretilen karışımlarda artan PK içeriği genellikle basınç dayanımını azaltmıştır. %50 PT ve %25 PK ile üretilen karışımların basınç dayanımı, referans karışıma göre %58,5 azalmıştır.

200 D-Ç'den sonra yüksek köpük içerikli karışımların basınç dayanımı 25,5-62,4 MPa arasında değişmektedir. PT ve PK içeriğindeki bir artış genellikle basınç dayanımını azaltmıştır. Bununla birlikte, %12,5 PK ve %25 PT içeren karışımlarda, 200 D-Ç'den sonra yaklaşık 50 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir. Çimento esaslı kompozitler 200 D-Ç'ye maruz kalmasına rağmen, 50 MPa ve üzeri basınç dayanımları gözlenmiştir. %50 PT ile üretilen çimento esaslı kompozitlerde nispeten daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir.



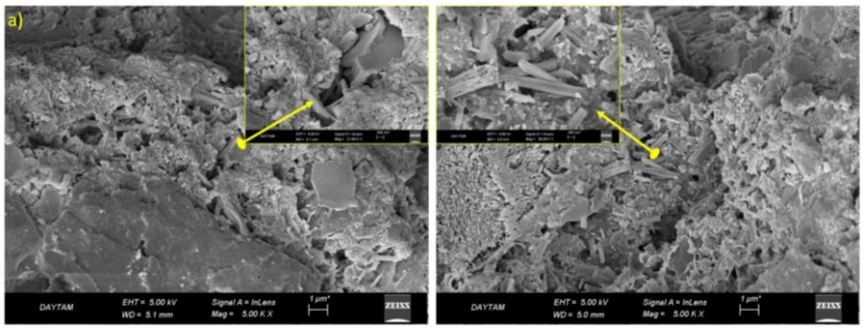
Şekil 4.19 Su işleme derinliği-bağıl dinamik elastisite modülü

Şekil 4.19'de görüldüğü gibi çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinliği ile BDEM değerleri arasında düşük bir korelasyon elde edilmiştir. Ancak, karışımların su işleme derinliği arttıkça BDEM değerleri düşme eğilimindedir. Su işleme derinliği yüksek olan karışımların daha fazla zarar gördüğü tespit edilmiştir.

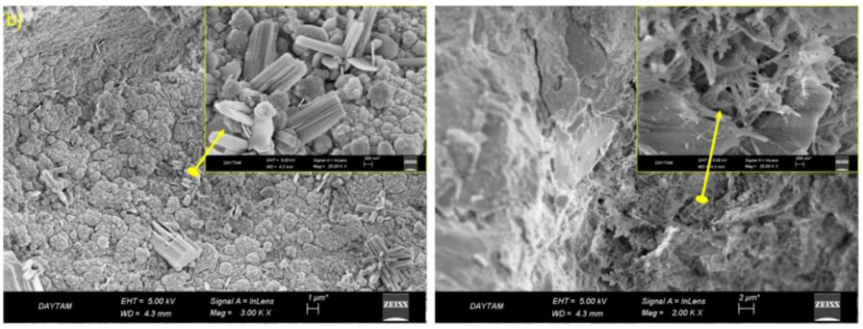
Yang vd. çimento esaslı kompozitlerde PK kullanılarak artan D-Ç direncini gözlemiştir. PK'nın karışımların hava içeriğini azaltarak D-Ç direncini artırdığını belirtmişlerdir (Yang vd., 2016). Donmadan kaynaklanan içsel basınç etkisinin porozite ile yakından ilişkili olduğu kaydedilmiştir (Netinger vd., 2014). Tikalsky vd. basınç dayanımı, ilk su işleme derinliği ve su emme gibi özelliklerinin donma direncinde çok etkili olduğu gözlenmiştir (Tikalsky vd., 2004). Bu çalışmada da benzer sonuçlar gözlenmiştir. Yüksek başlangıç basınç dayanımına sahip çimento esaslı kompozitler D-Ç etkisinden daha az etkilenmiştir. 100 D-Ç'den sonra, referans karışım gibi bazı karışımlarda dayanım kaybı olmamıştır. Nitekim 100 D-Ç'den sonra BDEM değerlerinin arttığı görülmüştür. Hidratasyonun D-Ç ile devam etmesi bu etkiyi açıklayabilmektedir. Özellikle düşük döngülerde puzolanik aktivitenin devam etmesi dayanım kayıplarını oldukça azaltmıştır. Literatürde BDEM değerlerinin D-Ç etkisine bağlı olarak arttığını gösteren başka çalışmalar da vardır (Nehdi ve Bassuoni, 2008; Gheni vd., 2017). Karışımlardaki %25 PK içeriğinden dolayı, 200 D-Ç sonrasında 45 MPa ve üzeri basınç dayanımları gözlenmiştir.

4.9 Mikroyapı

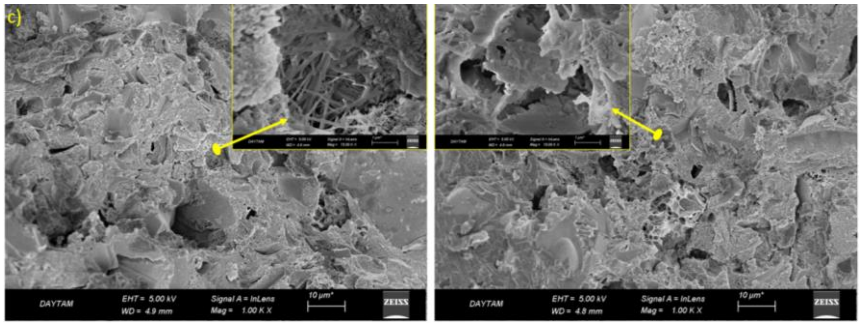
Sodyum sülfata maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin mikro yapı özellikleri Şekil 4.20'de verilmiştir.



a) 0%PK- 0%PT- Köpük 12,5 kg/m^3



b) 12,5%PK- 25%PT- Köpük 12,5 kg/m^3

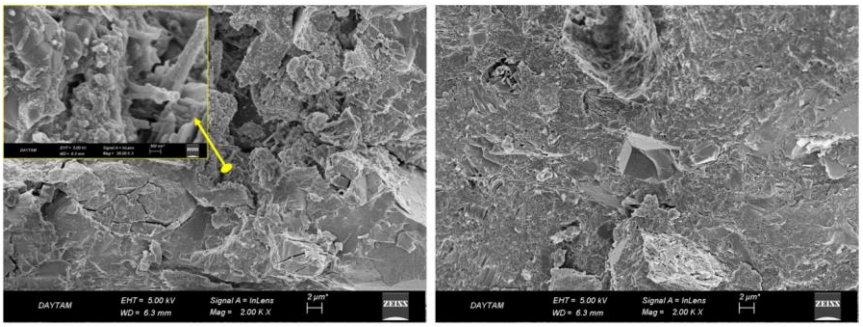


c) 25%PK- 50%PT- Köpük 25,0 kg/m^3

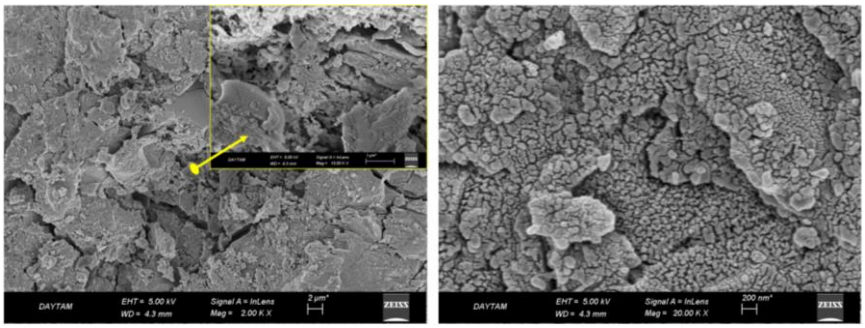
Şekil 4.20 Na_2SO_4'e maruz bırakılan çimento esaslı kompozitlerin mikro yapısı

Şekil 4.20(a-c)'de görüldüğü gibi, sodyum sülfata maruz bırakılan karışımlarda etrenjit ve alçıtaşı gibi yapılar gözlenmektedir. Şekil 4.20c'de etrenjit çaplarının daha ince (daha çok iğneye benzer) olduğu görülmektedir. Karışımlarda doğal ve yapay puzolan kullanılmasına rağmen etrenjit varlığı tespit edilmiştir.

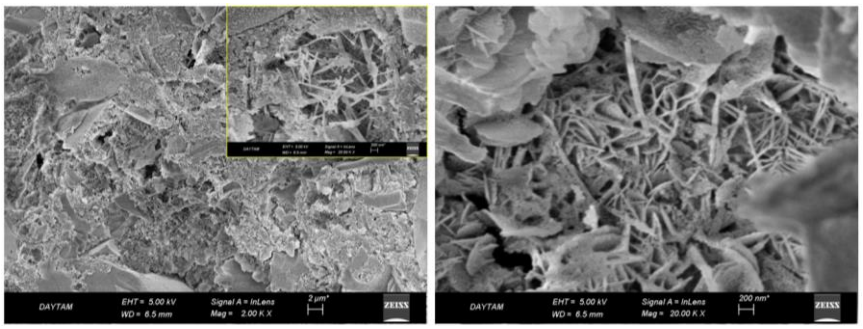
Şekil 4.21a ve b'de gösterildiği gibi, çimento esaslı kompozitlerin matrisinde mikro çatlaklar gözlenmiştir. Ancak matrisin bazı alanlarında hasar oluşmadığı da tespit edilmiştir. Şekil 4.21b'de matrisin gözenekli (süngerimsi) bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Plaka benzeri kristaller Şekil 4.21c'de görülmektedir.



a) 0%PK- 0%PT- Köpük 12,5 kg/m^3



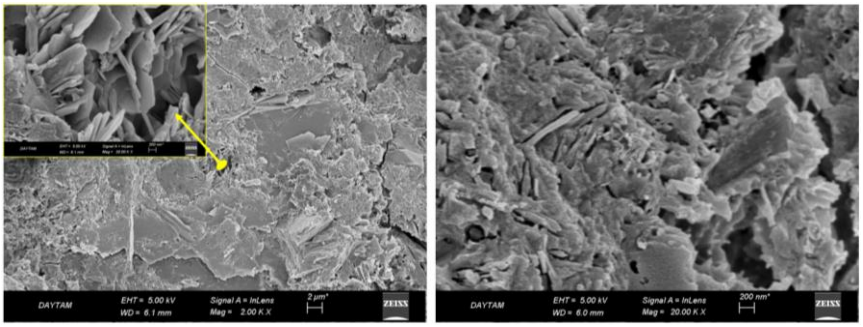
b) 12,5%PK- 25%PT- Köpük 12,5 kg/m^3



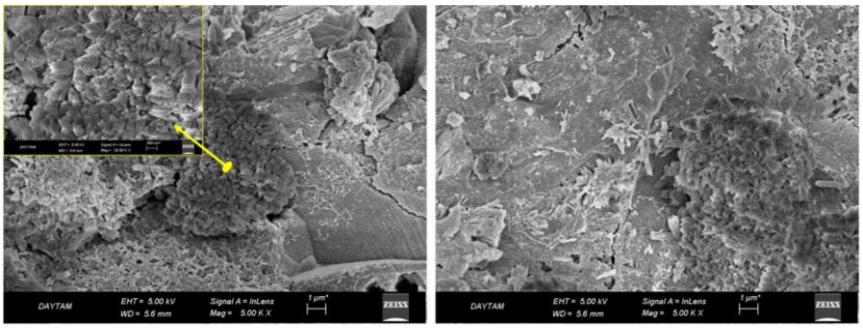
c) 25%PK- 50%PT- Köpük 25,0 kg/m^3

Şekil 4.21 HCl'ye maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin mikro yapısı

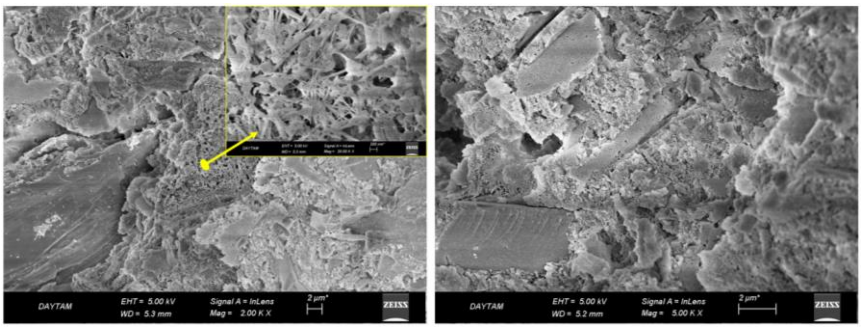
Şekil 4.22 a ve b'de matris içinde yoğun olarak alçıtaşı oluştuğu görülmüştür. Matristeki çatlakların yanı sıra süngerimsi (gözenekli) yapılarda da gözlenmiştir. Şekil 4.22c'de sülfürik asit etkisiyle matrisin bazı kısımlarında etrenjit kristalleri bulunmuştur.



a) 0%PK- 0%PT- Köpük 12,5 kg/m^3



b) 12,5%PK- 25%PT- Köpük 12,5 kg/m^3



c) 25%PK- 50%PT- Köpük 25,0 kg/m^3

Şekil 4.22 H_2SO_4'e maruz çimento esaslı kompozitlerin mikroyapıları

5. SONUÇLAR

PK ve PT içeriği arttıkça, karışımların yayılma çaplarını azalmıştır. PK ve PT'nin gözenekli yapısı genellikle işlenebilirliği azaltır. Karışımlardaki PK ve PT pasta hacmini artırdığı için, işlenebilirlik referans karışıma göre nispeten artmıştır. Köpük içeriğindeki artış, karışımların yayılma çaplarını iyileştirmiştir. Köpüğün hava sürükleme özelliği, karışımların işlenebilirliğini geliştirmiştir.

PK ve PT kullanıldığında, görünür porozite ve su emme değerleri referans karışıma göre artmıştır. Karışımlarda artan PT içeriği, su emme ve poroziteyi arttırmıştır. Köpük içeriğindeki artış, su emme ve görünür porozite değerlerini arttırmıştır. Karışımların yoğunlukları 1666-2205 kg/m^3 arasında değişmektedir. Çimento esaslı kompozitlerin yapısal ve yarı yapısal elemanlarda kullanılabileceği belirlenmiştir. Köpük ve PT içeriği arttıkça, karışımların birim hacim ağırlığı azalmıştır.

Karışımlarda %12,5 PK kullanılması erken yaşlarda basınç dayanımını artırmıştır. Karışımlarda kullanılan PT içeriği arttıkça 90 günlük basınç dayanımı azalmıştır. %50 PT kullanılan karışımlarda 40 MPa ve üzeri basınç dayanımı gözlenmiştir. %25 PK kullanılan karışımlarda 45 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilmiştir. Köpük içeriğinin arttırılması, karışımların görünen porozite değerlerini arttırmış ve dolayısıyla basınç dayanımı azalmıştır. Buna rağmen 1666 kg/m^3 birim ağırlığa sahip karışımlarda basınç dayanımı 42,1 MPa olarak belirlenmiştir.

Karışımlarda %50 PT kullanılması genellikle kuruma büzülmesini arttırmıştır. %12,5 PK kullanılması (PT kullanılmadan), referans karışıma kıyasla kuruma büzülmesini azaltmıştır. Yüksek köpük içeriği (25 kg/m^3) ile üretilen çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmesi artmıştır. Karışımların porozitesi arttıkça, pasta içindeki suyun buharlaşması kolaylaşmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı arttıkça kuruma büzülmesi azalmıştır.

%50 PT kullanılan karışımların su işleme derinlikleri artmıştır. Karışımlarda PK kullanılması, su işleme derinliğini azaltmada PT'den daha etkili olmuştur. PT içeriğindeki artış işlenebilirliği azalttığı için su işleme derinliği artmıştır. Köpük

içeriğindeki artışın bir sonucu olarak, hava kabarcıkları birleşmiştir. Böylece, köpük içeriği arttıkça su işleme derinliği de artmıştır.

Çimento esaslı kompozitlerin görünen porozitesi arttıkça, sülfat kaynaklı genleşmeler de artmıştır. Yüksek basınç dayanımına sahip karışımların sülfattan daha az etkilediği gözlenmiştir. Köpük içeriğindeki artış geçirgenliği artırdığı için sülfatla ilgili genleşmeler artmıştır. Özellikle, %50 PT karışımlarının genleşmesinin biraz daha yüksek olduğu gözlenmiştir. PT düşük oranda kullanılırsa PK karışımların genleşmesini azaltmada daha etkili olmuştur.

HCl'ye maruz kalan karışımlarda PT ve PK içeriği arttıkça kütle kaybı azalmıştır. HCl'ye maruz kalan karışımlarda CH içeriğinin önemli olduğu görülmüştür. Çimento ikame malzemelerinin içeriği arttıkça, pastadaki CH içeriği azalmaktadır. Bu etki çimento esaslı kompozitlerin HCl'ye karşı direncini artırmıştır. H_2SO_4'e maruz kalan karışımlarda geçirmsizlik önemlidir.

D-Ç'ye maruz kalan çimento esaslı kompozitlerde başlangıç dayanımının önemli olduğu görülmüştür. Bazı çimento esaslı kompozitlerin BDEM değerleri 100 D-Ç'den sonra artmıştır. Düşük D-Ç döngülerinde hidratasyon devam ederken, bazen BDEM ve basınç dayanımı artış gösterebilmektedir. 200 D-Ç'ye maruz kalan çimento esaslı kompozitlerde 20 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilmiştir. %50 PT kullanılan karışımlar, 200 D-Ç döngüsünden daha fazla etkilenmiştir. Karışımlarda PT kullanılmadan %12,5 ve %25 PK kullanılması daha uygundur.

Mikroyapı incelemeleri, sodyum sülfat ve sülfürik asidin daha fazla etrenjit ve alçıtaşı oluşumuna neden olduğunu göstermiştir. Hidroklorik ve sülfürik asitlerin etkisiyle matriste gözenekli (süngerimsi) bir yapı oluştuğu belirlenmiştir. Hidroklorik asidin genellikle matriste mikro çatlaklar oluşturduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada organik atik olan PK'nın, %25'e kadar kullanıma uygun olduğu görülmüştür. Ancak karışımlarda %25 PK kullanılıyorsa, PT'nin maksimum %25 olması gerekmektedir. %25 PK içeren karışımlarda %50 oranında PT kullanılması işlenebilirliği oldukça azaltmaktadır. Böylece çimento esaslı kompozitlerin performansı olumsuz etkilenmektedir. %50 PT kullanıldığında PK kullanılmaması

daha uygun olmaktadır. Deneysel çalışma sonucunda, PK ile daha sürdürülebilir çimento esaslı kompozitlerin üretilebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Abbas, S., Kazmi, S. M. S., & Munir, M. J., (2017). Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates. *Construction and Building Materials*, *132*, 61-70. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.126

ACI, A., (2010). 231R--10 Report on Early-Age Cracking: Causes. *Measurement and Mitigation, American Concrete Institute*.

Acketing, P. R. C. O. J., (2001). S E I S M I C R Etrofit of Rc C Ircular C Olumns U Sing. *Engineering*, *6*(13339), 189-197. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6

Ahmad, M. R., & Chen, B., (2019). Experimental research on the performance of lightweight concrete containing foam and expanded clay aggregate. *Composites Part B: Engineering*, *171*, 46-60.

Akhnoukh, A. K., & Elia, H., (2019). Developing high performance concrete for precast/prestressed concrete industry. *Case Studies in Construction Materials*, *11*, e00290. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00290

Alam, M. A., & Al Riyami, K., (2018). Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates. *Construction and Building Materials*, *162*, 683-696.

Al-Gahtani, A., (2010). Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes. *Construction and Building Materials*, *24*, 308--314.

Alkaysi, M., & El-Tawil, Sherif and Liu, Zhichao and Hansen, W., (2016). Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*, *66*, 47--56.

Alsalman, A., Dang, C. N., & Hale, W. M., (2017). Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. *Construction and Building Materials*, *133*, 135-145.

Arora, A., Aguayo, M., Hansen, H., Castro, C., Federspiel, E., Mobasher, B., & Neithalath, N., (2018). Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, *103*(February), 179-190. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.013

ASTM, C., (2012). 1202-12. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to resist Chloride Ion Penetration. *Annual Book of ASTM Standards*, *4*, 7.

Ayub, T., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F., (2014). InCIEC 2013. *InCIEC 2013*. https://doi.org/10.1007/978-981-4585-02-6

Azmee, N. M., & Shafiq, N., (2018). Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*, *9*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197

Barbhuiya, S., & Kumala, D., (2017). Behaviour of a sustainable concrete in acidic environment. *Sustainability*, *9*(9), 1556.

Barrett, C. B., & Grizzle, R., (1999). A holistic approach to sustainability based on pluralism stewardship. *Environmental Ethics*, *21*(1), 23-40. https://doi.org/10.5840/enviroethics199921139

Bendapudi, Sarath, C. K. & Saha, P., (2011). Contribution of fly ash to the properties of mortar and concrete. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, *4*, 1017-1023.

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.

Bett, E. K., (2010). Geothermal well cementing, materials and placement techniques. *Geothermal Training Programme-Report*, *10*, 99-130.

Bingöl, A. F., & Tohumcu, I., (2013). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials and Design*, *51*, 12-18. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.106

César Maruyama, R., & Camarini, G., (2015). Properties of Cellular Concrete for Filters. *International Journal of Engineering and Technology*, *7*(3), 223-228. https://doi.org/10.7763/ijet.2015.v7.796

Chand, M. S. R., Giri, P. S. N. R., Kumar, G. R. & Kumar, P. R., (2015). Paraffin wax as an internal curing agent in ordinary concrete. *Magazine of Concrete Research*, *67*, 82--88.

Chandni, T. J. & Anand, K. B., (2018). Utilization of recycled waste as filler in foam concrete. *Journal of Building Engineering*, *19*, 154-160. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.032

Chandra, S. & Berntsson. L., (2002). *Lıghtweıght aggregate concrete*. Elsevier.

Chang, Z. T., Song, X. J., Munn, R., & Marosszeky, M., (2005). Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and concrete research*, *35*(8), 1486-1494.

Chatveera, B., & Lertwattanaruk, P., (2011). Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. *Journal of environmental management*, *92*(1), 59-66.

Chindaprasirt, P., Kanchanda, P., Sathonsaowaphak, A., & Cao, H. T., (2007). Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, *21*(6), 1356-1361.

Chindaprasirt, P., & Rukzon, S., (2008). Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, *22*(8), 1601-1606. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.010

Christina Mary, V., & Kishore, C. H., (2015). Experimental investigation on strength and durability characteristics of high performance concrete using GGBS and msand. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *10*(11), 4852-4856.

Concrete, A., (1987). *Guide for Structural Lightweight*.

De Camba, A. H., (2009). Aspectos generales de la planificación tributaria en Venezuela. *Comercium et Tributum*, *2*, 31-47.

De Castro, A. L. & Pandolfelli, V., (2009). Concepts of particle dispersion and packing for special concretes production. *Cer{\^a}mica*, *55*, 18--32.

De Larrard, F., & Sedran, T., (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, *24*(6), 997-1009. https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1

De Larrard, F., & Sedran, T., (2002). Mixture-proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, *32*(11), 1699-1704. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00861-X

De Souza Rodrigues, C., Ghavami, K., & Stroeven, P., (2006). Porosity and water permeability of rice husk ash-blended cement composites reinforced with bamboo pulp. *Journal of Materials Science*, *41*(21), 6925-6937. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0217-2

Dhanalakshmi, K. & Ganesan, K., (2017). Investigation on Fly Ash based High Performance Concrete with Alccofine/Silica Fume-Ternary System. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, *7*, 871-883.

Dhinakaran, G. & Kumar, K. R., Vijayarakhavan, S. & Avinash, M., (2017). Strength and durability characteristics of ternary blend and lightweight HPC. *Construction and Building Materials*, *134*, 727-736.

Dhinakaran, G., Kumar, K. R., Vijayarakhavan, S., & Avinash, M., (2017). Strength and durability characteristics of ternary blend and lightweight HPC. *Construction and Building Materials*, *134*, 727-736. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.201

Diamond, S. & Huang, J., (2001). The ITZ in concrete—A different view based on image analysis and SEM observations. *Cement and concrete composites*, *23*, 179-188.

Domagała, L., (2007). Elasticity of lightweight aggregate concrete modified with steel fibers,". *Cement Wapno Beton*.

Domagała, L., (2011). The impact of the type of coarse aggregate on mechanical properties of structural concrete (in Polish),. *Magazyn Autostrady*, 94-98.

Dwairi, H. M., Wagner, M. C., Kowalsky, M. J., & Zia, P., (2010). Behavior of instrumented prestressed high performance concrete bridge girders. *Construction and Building Materials*, *24*(11), 2294-2311. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.026

Eltayeb, E., Ma, X., Zhuge, Y., Youssf, O., & Mills, J. E., (2020). Influence of rubber particles on the properties of foam concrete. *Journal of Building Engineering*, *30*, 101217. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101217

Emas, R., (2015). The concept of sustainable development: Definition and defining principles. *Brief for GSDR, 2015*.

En, B. S., (2007). *Cement—*. *3*.

Fennis, S. A. A. M., Walraven, J. C., & Den Uijl, J. A., (2009). The use of particle packing models to design ecological concrete. *Heron*, *54*(2-3), 183-202.

Fijal, T. vd., (2018). Actions for the greening of power engineering to improve energy efficiency. *Economic and Environmental Studies*, *18*, 127--146.

Forster, S. W., (1994). High-performance concrete: Stretching the paradigm. *Concrete Internationa*, *16*, 33--34.

Gao, J. M., Qian, C. X., Liu, H. F., Wang, B., & Li, L., (2005). ITZ microstructure of concrete containing GGBS. *Cement and Concrete Research*, *35*(7), 1299-1304. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.042

Gartner, Ellis & Hirao, H., (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cement and Concrete research*, *78*, 126-142.

Ghafari, E., Bandarabadi, M., Costa, H., & Júlio, E., (2015). Prediction of fresh and hardened state properties of UHPC: Comparative study of statistical mixture design and an artificial neural network model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *27*(11). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001270

Ghafari, E., Costa, H., Jlio, E., Portugal, A., & Dures, L., (2014). The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials & Design*, *59*, 1--9.

Ghafari, E., Costa, H., & Jlio, E., (2015). Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials. *Construction and Building Materials*, *101*, 201--208.

Gheni, A. A., ElGawady, M. A., & Myers, J. J., (2017). Mechanical Characterization of Concrete Masonry Units Manufactured with Crumb Rubber Aggregate. *ACI Materials Journal*, *114*(1).

Ghrici, M., Kenai, S., & Said-Mansour, M., (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, *29*(7), 542-549.

Goodspeed, C. H., Vanikar, S., & Cook, R., (1996). High-performance concrete defined for highway structures. *Concrete International*, *18*, 62-67.

Gowri, R., & Anand, K. B., (2018). Utilization of fly ash and ultrafine GGBS for higher strength foam concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *310*(1), 012070. https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012070

Granata, M. F., (2015). Pumice powder as filler of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *96*, 581-590.

Graybeal, B., & Hartmann, J. l., (2016). Strength and Durability of Ultra-High Performance Concrete Materials and Structures. *2003 Concrete Bridge Conference, December*, 1-20. https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2004.06.007

Gregg, J. S., & Andres, R. J., (2008). A method for estimating the temporal and spatial patterns of carbon dioxide emissions from national fossil-fuel consumption. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, *60 B*(1), 1-10. https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00319.x

Hajar, Z., Resplendino, J., Lecointre, D., Petitjean, J., & Simon, A., (2004). Ultra-high-performance concretes: First recommendations and examples of application. İçinde *Proceedings of the fib Symposium 2004—Concrete Structures: The Challenge of Creativity* (Sayı 3).

Hamad Mohammed, J., & Hamad, A. J., (2014). Materials, properties and application review of lightweight concrete. *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*, *37*(2), 10-15.

Holm, T. A., & Ries, J. P., (2006). Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. İçinde *Lightweight concrete and aggregates*. ASTM International.

Hong, T., Langevin, J. & Sun, K., (2018). Building simulation: Ten challenges. İçinde *Building Simulation* (ss. 871--898). Springer.

Hossain, T., Sarker, S. K., & Basak, B. C., (2011). Utilization potential of rice husk ash as a construction material in rural areas. *Journal of Civil Engineering*, 14.

Hu, J., (2004). *Porosity of concrete-morphological study of model concrete*.

Huang, W., Kazemi-Kamyab, H., Sun, W. & Scrivener, K., (2017). Effect of replacement of silica fume with calcined clay on the hydration and microstructural development of eco-UHPFRC. *Materials & Design*, *121*, 36-46.

Husk, R., & Steel, U., (2012). *Effect of Partial Replacement of Cement by Fly*. *3*(6), 1-9.

Hwang, C. L., & Hung, M. F., (2005). Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, *19*(8), 619-626. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.003

Ismail, K. M. & Fathi, M. S. & Manaf, N., (2004). Study of lightweight concrete behaviour. *Universiti Teknologi Malaysia*.

Jiang, W. & Roy, D., (1994). Strengthening mechanisms of high-performance concrete. *Special Publication*, *149*, 753-768.

Jo, S. D., (2011). Numerical Estimation on Robustness of Fiber Dispersion in UHPC. *Korea Concr. Inst. Conf. J.*, *2011*, 139-140.

Joshaghani, A., & Moeini, M. A., (2018). Evaluating the effects of sugarcane-bagasse ash and rice-husk ash on the mechanical and durability properties of mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *30*(7), 04018144.

Juenger, M. C. G., & Siddique, R., (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, *78*, 71-80. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018

Justs, J., Bajare, D., Korjakins, A., Mezinskis, G., Locs, J., & Bumanis, G., (2013). Microstructural Investigations of Ultra-High Performance Concrete Obtained by Pressure Application within the First 24 Hours of Hardening. *Construction Science*, *14*. https://doi.org/10.2478/cons-2013-0008

Kabay, N., Tufekci, M. M., Kizilkanat, A. B., & Oktay, D., (2015). Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials. *Construction and Building Materials*, *85*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.026

Kameshwar, P., Athira, G., Bahurudeen, A., & Nanthagopalan, P., (2020). Suitable pretreatment process for rice husk ash towards dosage optimization and its effect on properties of cementitious mortar. *Structural Concrete*.

Kanthe, V. N., Deo, S. V., & Murmu, M., (2018). Effect of fly ash and rice husk ash on strength and durability of binary and ternary blend cement mortar. *Asian Journal of Civil Engineering*, *19*(8), 963-970. https://doi.org/10.1007/s42107-018-0076-6

Karataş, M., Benli, A., & Ergin, A., (2017). Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, *150*, 467-479.

Kayali, O. & Haque, M., (2000). Status of structural lightweight concrete in Australia as the new millennium dawns. *Concrete Australia*, *25*, 22-25.

Khan, R., Jabbar, A., Ahmad, I., Khan, W., Khan, A. N., & Mirza, J., (2012). Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. *Construction and Building Materials*, *30*, 360-365.

Khayat, K. H. Meng, W., Vallurupalli, K., & Teng, L., (2019). Rheological properties of ultra-high-performance concrete—An overview. *Cement and Concrete Research*, *124*.

Kılıç, A., & Sertabipoğlu, Z., (2015). Effect of heat treatment on pozzolanic activity of volcanic pumice used as cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, *57*, 128-132. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.006

Kizilkanat, A. B., Oktay, D., Kabay, N., & Tufekci, M. M., (2016). Comparative experimental study of mortars incorporating pumice powder or fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *28*(2), 04015119.

Koksal, F., Sahin, Y., & Gencel, O., (2020). Influence of expanded vermiculite powder and silica fume on properties of foam concretes. *Construction and Building Materials*, *257*, 119547. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119547

Lesovik, V., Voronov, V., Glagolev, E., Fediuk, R., Alaskhanov, A., Amran, Y. H. M., Murali, G., & Baranov, A., (2020). Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder. *Journal of Building Engineering*, *31*, 101414. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101414

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

Lippiatt, B. C., & Ahmad, S., (2004a). Measuring the Life-Cycle Environmental and Economic Performance of Concrete: The Bees Approach. İçinde *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*.

Lippiatt, B. C., & Ahmad, S., (2004b). Measuring the Life-Cycle Environmental and Economic Performance of Concrete: The Bees Approach. İçinde *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*.

Liu, K., Yu, R., Shui, Z., Li, X., Guo, C., Yu, B. & Wu, S., (2019). Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on appropriate application of porous pumice. *Construction and Building Materials*, *214*, 369--381.

Lopez, M., Kahn, L., F. & Kurtis, K. E., (2004). Creep and shrinkage of high-performance lightweight concrete. *Materials Journal*, *101*, 391--399.

Mackechnie, J. R., & Alexander, M. G., (2009). Using durability to enhance concrete sustainability. *Journal of Green Building*, *4*(3), 52-60. https://doi.org/10.3992/jgb.4.3.52

Maher, K., Tadros, P., & Morcous, G., (2009). *Application of Ultra-High Performance Concrete to Bridge Girders Nebraska Transportation Application of Ultra-High Performance Concrete to Bridge Girders Maher K. Tadros , Ph. D ., P. E. College of Engineering*.

Mehta, P. K., (1989). Pozzolanic and Cementitious by-Products in Concrete—Another Look. *Special Publication*, *114*, 1-44. https://doi.org/10.14359/1835

Mehta, P. K. & Monteiro, P. J., (2017). *Concrete microstructure, properties and materials*.

Mehta, P. K. & Monteiro, P., (2006). Concrete Microestructure, properties, and Materials, Third Edit. *New York USA*, 644.

Miled, K., Le Roy, R., Sab, K. & Boulay, C., (2004). Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: Size effects and failure mode. *Mechanics of materials*, *36*, 1031-1046.

Mishra, O. & Singh, S., (2019). {An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, *8*, 97--143.

Mohseni, E., Yazdi, M. A., Miyandehi, B. M., Zadshir, M., & Ranjbar, M. M., (2017). Combined Effects of Metakaolin, Rice Husk Ash, and Polypropylene Fiber on the Engineering Properties and Microstructure of Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *29*(7), 04017025. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001867

Mouli, M. & Khelafi, H., (2008). Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and environment*, *43*, 31--36.

Mousavi, S. M., Aminian, P., Gandomi, A. H., Alavi, A. H., & Bolandi, H., (2012). A new predictive model for compressive strength of HPC using gene expression programming. *Advances in Engineering Software*, *45*(1), 105-114. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.09.014

Myers, J. J., & Carrasquillo, R. L., (2000). Mix Proportioning for High-Strength HPC Bridge Beams. *ACI Special Publication*, *189*(February), 37-56.

Naaman, A. E. & Wille, K., (2012). The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): Five decades of progress. *Proceedings of Hipermat*, 3--15.

Nagaratnam, B. H., Faheem, A., Rahman, M. E., Mannan, M. A. & Leblouba, M., (2015). Mechanical and durability properties of medium strength self-compacting concrete with high-volume fly ash and blended aggregates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *59*, 155--164.

Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K., (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, *28*(5), 475-480. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001

Nambiar, E. K., & Ramamurthy, K., (2007). Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and concrete research*, *37*(9), 1341-1347.

Nambiar, E. K., & Ramamurthy, K., (2009). Shrinkage behavior of foam concrete. *Journal of materials in civil engineering*, *21*(11), 631-636.

Naresh, K., & Dadapeer, A. B. S., (2017). A Study on the Properties of High Strength Concrete By Using the Nano Materials. *International Research Journal of Engineering and Tecchnology*, *4*(5), 2889-2894.

Nehdi, M. L., & Bassuoni, M. T., (2008). Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action. *Materials and structures*, *41*(10), 1657-1679.

Netinger, I., Vracevic, M., Ranogajec, J., & Vucetic, S., (2014). Evaluation of brick resistance to freeze/thaw cycles according to indirect procedures. *Gradevinar*, *66*(3), 197-209.

Neville, A., (2000). *Properties of Concrete, fourth and final ed*.

Ogawa, S., Hyodo, H., Hirao, H., Yamada, K., Matsui, A. & Hooton, D., (2008). Sulfate Resistance Improvement of Blended Cement Based on Ground Granulated Blast Furnace Slag. *3rd ACF Int. Conf*, 499-506.

Owens, P., Newman, J. & Choo, B., (2003). *Advanced Concrete Technology Processes*.

Özbay, E., Karahan, O., Lachemi, M., Hossain, K. M. A., & Duran Atiş, C., (2012). Investigation of Properties of Engineered Cementitious Composites Incorporating High Volumes of Fly Ash and Metakaolin. *ACI materials journal*, *109*(5).

Page, C. L. & Page, M. M., (2007). *Durability of concrete and cement composites*. Elsevier.

Panesar, D. K., (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and building materials*, *44*, 575-584.

Park, J. J., Kang, S. T., Koh, K. T. & Kim, S. W., (2008). *Proceedings of the second international symposium on ultra high performance concrete*.

Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J., (2020). Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, *264*, 120713. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120713

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*, *171*, 654-662.

Phair, J. W., (2006). Green chemistry for sustainable cement production and use. *Green Chemistry*, *8*(9), 763-780. https://doi.org/10.1039/b603997a

Plank, J., Dai, Z., Zouaoui, N. & Vlad, D., (2006). Intercalation of polycarboxylate superplasticizers in C3A hydrate stagees. *Special Publication*, *239*, 201--214.

Plank, J., Schroefl, C., Gruber, M., Lesti, M. & Sieber, R., (2009). Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete: The importance of PCE compatibility with silica fume. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *7*, 5--12.

Priya, T. S., Mehra, A., Jain, S., & Kakria, K., (2021). Effect of graphene oxide on high-strength concrete induced with rice husk ash: Mechanical and durability performance. *Innovative Infrastructure Solutions*, *6*(1), 1-16.

Ragalwar, K. A., Prieto, V., Fakhri, H., Heard, W. F., Williams, B. A., & Ranade, R., (2016). Systematic Development of environmentally sustainable Ultra-High

Performance Concrete. *Proceedings of Hipermat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials Kassel, March*.

Raithby, K. D., & Lydon, F. D., (1981). Lightweight concrete in highway bridges. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, *3*(2), 133-146. https://doi.org/10.1016/0262-5075(81)90007-5

Raithby, K. D. & Lydon, F., (1981). Lightweight concrete in highway bridges. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, *3*, 133--146.

Ramezanianpour, A. A. & Malhotra, V., (1995). Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cement and concrete composites*, *17*, 125-133.

Rao, A. Jha, K. N., Misra, S., (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, conservation and Recycling*, *50*, 71--81.

Association Française de Génie Civil, (2002).

Reynolds, P., Pavic, A., Waldron, P., (1999). Modal testing, FE analysis and FE model correlation of a 600 tonne post-tensioned concrete floor. İçinde *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SEMINAR ON MODAL ANALYSIS* (ss. 1129--1136).

RILEM, T., (1994). CPC 11.3 Absorption of water by concrete by immersion under vacuum, 1984. *RILEM Recommendation for the Testing and Use of Constructions Materials, E \& FN SPON: London*, 36-37.

Richard, P., & Cheyrezy, M., (1995a). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, *25*(7), 1501-1511. https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2

Richard, P., & Cheyrezy, M., (1995b). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, *25*(7), 1501-1511. https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2

Rong, Z., Jiang, G. & Sun, W., (2018). Effects of metakaolin on mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cement-based composites. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, *7*, 296--310.

Sadrmomtazi, A., Sobhani, J., Mirgozar, M. A., & Najimi, M., (2012). Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, *35*, 211-219.

Sajedi, F. & Razak, H. A., (2011). Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, *25*, 2036--2045.

Sakai, E., Akinori, N., Daimon, M., Aizawa, K. & Kato, H., (2008). *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.

Samidi, M. R., (1997). First report research project on lightweight concrete. *University Teknologi Malaysia, Skudai, Johor Bahru*.

Schmidt, M., & Fehling, E., (2005). Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe. *Seventh International Symposium on the Utilization of High Strength/High-Performance Concrete*, 51-78.

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H., (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research, 41*(7), 642-650. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019

Schrfl, C., Gruber, M., Plank, J., (2008). Structure performance relationship of polycarboxylate superplasticizers based on methacrylic acid esters in ultra high performance concrete. İçinde *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete* (ss. 383--390).

Scrivener, K., (1999). Characterisation of the ITZ and its quantification by test methods. *RILEM report*, 3-18.

Shaikh, F. U. A., Nishiwaki, T. & Kwon, S., (2018). Effect of fly ash on tensile properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites (UHP-FRCC). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 7*, 357--371.

She, W., Du, Y., Zhao, G., Feng, P., Zhang, Y., & Cao, X., (2018). Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds. *Construction and Building Materials*, *170*, 153-166. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.207

Shi, C., & Stegemann, J. A., (2000). Acid corrosion resistance of different cementing materials. *Cement and Concrete Research, 30*(5), 803-808.

Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z., (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, *101*, 741-751. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088

Siddique, R., (2012). Properties of concrete made with volcanic ash. *Resources, Conservation and Recycling*, *66*, 40-44. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.010

Silva, R. V., de Brito, J. & Saikia, N., (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, *35*, 23--31.

Sohail, M. G., Wang, B., Jain, A., Kahraman, R., Ozerkan, N. G., Gencturk, B., Dawood, M., & Belarbi, A., (2018). Advancements in concrete mix designs: High-performance and ultrahigh-performance concretes from 1970 to 2016. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *30*(3). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002144

Soliman, A. M. & Nehdi, M., (2013). Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC. *Construction and Building Materials*, *41*, 270--275.

Song, W., Li, X., & Ma, K., (2011). The effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties of concrete. *Advanced Materials Research, 163-167*, 3429-3432. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.3429

Suresh, S., & Revathi, J., (2016). Effect of M-Sand on Setting Time of High Performance Concrete. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, *6*, 1648-1654.

Suresh, S., & Revathi, J., (2016). Effect of M-Sand on Setting Time of High Performance Concrete. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, *6*(10), 1648. https://doi.org/10.5958/2249-7315.2016.01118.7

Swamy, R., (1998). Designing concrete and concrete structures for sustainable development. İçinde *Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry. Proceedings of CANMET/ACI International Symposium, Ottawa, Canada* (ss. 245--255).

Szydlowki, R. & Mieszcak, M., (2017). Study of application of lightweight aggregate concrete to construct post-tensioned long-span slabs. *Procedia Engineering, 172*, 1077--1085.

Tadepalli, P. R., Mo, Y. L., & Hsu, T. T. C., (2013). Mechanical properties of steel fibre concrete. *Magazine of Concrete Research, 65*(8), 462-474. https://doi.org/10.1680/macr.12.00077

Taylor, P., Tennis, P., Olba, K., Ram, P., Van Dam, T. & Dylla, H., (2013). Durability of Concrete. *Transportation research circular*.

Teichmann, T., Schmidt, M., (2004). *International symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, Germany*.

Tian, Y., Shi, S., Jia, K. & Hu, S., (2015). Mechanical and dynamic properties of high strength concrete modified with lightweight aggregates presaturated polymer emulsion. *Construction and Building Materials, 93*, 1151--1156.

Tikalsky, P. J., Pospisil, J., & MacDonald, W., (2004). A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete. *Cement and concrete research*, *34*(5), 889-893.

Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K., & Lee, S. S., (2019). Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering, 165*, 354--364.

Trevisan, C., Bigoni, M., Cherubini, R., Steiger, P., Randelli, G. & Ortolani, S., (1993). Dual X-ray absorptiometry for the evaluation of bone density from the proximal femur after total hip arthroplasty: Analysis protocols and reproducibility. *Calcified tissue international*, *53*, 158--161.

Tue, N. V., Ma, J., Orgass, M. vd., (2008). Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC. İçinde *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany* (ss. 93--100).

Van den Heede, P. & De Belie, N., (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green'concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, *34*, 431--442.

Villanueva, J. M., (2015). *Mixture proportioning and freezing and thawing durabilityof ultra high performance concrete mixtures using localmaterials*. New Mexico State University.

Voo, Y. & Tadros, M., (2016). Taking Ultra-High-Performance Concrete to New Heights The Malaysian Experience. *Magazine of Concrete Research*, 36-39.

Walraven, J., (2002). Self-Compacting Concrete in the Netherlands. *The Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Evanston, USA*, 355-360,.

Wang, D., Ju, Y., Shen, H., & Xu, L., (2019). Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, *197*, 464-473. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181

Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z. & Fang, Z., (2015). A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, *96*, 368--377.

Wang, R. & Gao, X., (2016). Relationship between flowability, entrapped air content and strength of UHPC mixtures containing different dosage of steel fiber. *Applied Sciences*, *6*, 216.

Wang, X., Yu, R., Shui, Z., Zhao, Z., Song, Q., Yang, B. & Fan, D., (2018). Development of a novel cleaner construction product: Ultra-high performance concrete incorporating lead-zinc tailings. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 172--182.

Wille, K., Naaman, A. E. & El-Tawil, S., (2011). Optimizing ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Concrete international*, *33*, 35--41.

Wille, K., Naaman, A. E. El-Tawil, S. & Parra-Montesinos, G. J., (2012). Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing. *Materials and structures*, *45*, 309--324.

Xu, W., Lo, Y. T., Ouyang, D., Memon, S. A., Xing, F., Wang, W., & Yuan, X., (2015). Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, *89*, 90-101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.030

Yang, L., Shi, C., & Wu, Z., (2019). Mitigation techniques for autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete – A review. *Composites Part B: Engineering*, *178*(May), 107456. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107456

Yang, W., Xue, Y., Wu, S., Xiao, Y., & Zhou, M., (2016). Performance investigation and environmental application of basic oxygen furnace slag–Rice husk ash based composite cementitious materials. *Construction and Building Materials, 123*, 493-500.

Yazici, H., Yardimci, M. Y., Yiğiter, H., Aydin, S., & Türkel, S., (2010). Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, *32*(8), 639-648. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005

Younes, M. M., Abdel-Rahman, H. A., & Khattab, M. M., (2018). Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites. *Journal of Building Engineering*, *20*, 42-50. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.001

Yu, Q. L., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H., (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, *61*, 18-28. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012

Záleská, M., Pavlikova, M., Pokorný, J., Jankovský, O., Pavlík, Z., & Černý, R., (2018). Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics. *Construction and Building Materials*, *180*, 1--11.

Zareef, M. A. M. El., (2010). *Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete*.

Zeyad, A. M., & Almalki, A., (2021). Role of particle size of natural pozzolanic materials of volcanic pumice: Flow properties, strength, and permeability. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(2), 1-11.

Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Yusuf, M. O., (2019). Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder based high strength concrete. *Construction and Building Materials*, *216*, 314-324. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.026

Zhang, M-H., Li, L. & Paramasivam, P., (2005). Shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete exposed to dry environment. *Materials Journal*, *102*, 86--92.

Zia, P., Ahmad, S. & Leming, M., (1997). *High-performance concretes: A state-of-art report (1989-1994)*.

Zingg, A., Winnefeld, F., Holzer, L., Pakusch, J., Becker, S., Figi, R. & Gauckler, L., (2009). Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts. *Cement and Concrete Composites*, *31*, 153--162.