

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

BEYAZ ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN MEKANİK VE
DAYANIKLILIK PERFORMANSINA SERAMİK ATIĞI VE
LİF KULLANIMININ ETKİSİ

Yüksek Lisans Tezi

BARAA ABDULJABBAR BADI AL-SHARHANEE

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Metin MEHMETOĞLU

Eş Danışman
Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

İstanbul – 2024

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı: BARAA ABDULJABBAR BADI AL- SHARHANEE

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Beyaz Çimento Esaslı Harçların Mekanik ve Dayanıklılık Performansına Seramik Atığı ve Lif Kullanımının Etkisi.

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 23/01/2024

Sayfa Sayısı : 71

Tez : 1. Dr. Öğr. Üyesi Metin MEHMETOĞLU

Danışmanları : 2. Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

Dizin Terimleri : Seramik atık tozu, beyaz çimento, çevre kirliliği, pirinç kaplı çelik lif, bazalt lifi, kancalı uçlu çelik lif, basınç dayanımı, eğilme dayanımı

Türkçe Özet : Beyaz çimento harcına %5, %10 ve %15 seramik tozu ve %0,4 oranında farklı lifler dâhil edilerek, elde edilen karışımın özelliklerindeki değişimleri incelemeyi amaçlamaktadır.

Dağıtım Listesi : 1.İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2.YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

BARAA ABDULJABBAR BADI AL- SHARHANEE

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

BEYAZ ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN MEKANİK VE
DAYANIKLILIK PERFORMANSINA SERAMİK ATIĞI VE
LİF KULLANIMININ ETKİSİ

Yüksek Lisans Tezi

BARAA ABDULJABBAR BADI AL-SHARHANEE

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Metin MEHMETOĞLU

Eş Danışman
Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

İstanbul – 2024

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

BARAA ABDULJABBAR

.../.../2024



T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Baraa Abduljabbar Badi AL-SHARHANEE' in “**Beyaz Çimento Esaslı Harçların Mekanik ve Dayanıklılık Performansına Seramik Atığı ve Lif Kullanımının Etkisi**” adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN

Üye

Doç. Dr. Anıl NİŞ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Metin MEHMETOĞLU

(Danışman)

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.... / / 2024

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu araştırma, seramik atık tozunun kısmen karışıma dâhil edildiği Beyaz Çimento harcının özelliklerinde meydana gelen değişimlerin incelenmesini amaçlamaktadır. İnşaatta kullanılan malzemelerin ekonomik ve çevresel faktörler de dikkate alınarak sürekli geliştirilmesi söz konusudur. Seramik atık tozunun Beyaz Çimento harcına kısmi katkı olarak kullanılması, kirlilik kaynaklarından biri olan çimento üretimini azaltarak çevre kirliliğini azaltan yapı malzemelerini iyileştirmenin yollarından birisidir. Beyaz Çimento karışımına %5, %10 ve %15 seramik tozu ikameleri ve %0,4 oranında farklı lifler (pirinç kaplı çelik lif, bazalt lif ve kancalı uçlu çelik lif) eklenmiştir. Kullanılan karışımların avantaj ve dezavantajlarını doğrulamak için bu numunelerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı incelenmiştir. Ayrıca numunelere yüksek sıcaklık, donma-çözülme ve sülfat etkileri uygulanarak 90 gün sonunda fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimler de incelenmiştir. Genel olarak sonuçlar, seramik atık tozu ilavesinin, karışımın basınç ve eğilme dayanımını artıracak; %5 seramik atık tozu ilavesinin ilave miktarları arasında maksimum dayanımı verdiğini; ilave yüzdesinin arttırılmasının dayanımın düşmesine neden olacağını göstermektedir. Ancak yine de seramik atığı ilavesi yapılmamış Beyaz Çimento karışımının dayanımından daha yüksektir, ayrıca daha fazla seramik tozu ilavesi numunenin homojen yapısını bozarak basınç ve eğilme dayanımını düşürmüştür.

Anahtar Kelimeler: Seramik atık tozu, Beyaz Çimento, çevre kirliliği, pirinç kaplı çelik lif, bazalt lif, kancalı uçlu çelik lif, basınç dayanımı, eğilme dayanımı

SUMMARY

There is an ongoing development process in the materials used in construction, taking into account economic and environmental factors. Using ceramic waste powder as a partial additive to White Cement mortar is one of the ways to improve building materials that reduce environmental pollution by reducing cement production, which is one of the sources of pollution. This thesis aims to examine the changes in the properties of the White Cement mortar, in which the ceramic waste powder is partially included in the mixture. 5%, 10% and 15% ceramic powder substituted and 0.4% different fibers (copper coated steel fiber, basalt fiber and hooked-end steel fiber) were added to White Cement mixture. In order to verify the advantages and disadvantages of the mixtures used, the compressive strength and flexural strength of these samples were investigated. In addition, after 90 days, the changes in physical and mechanical properties were investigated by applying high temperature, freeze-thaw and sulfate effects to the samples. In general, the results show that the addition of ceramic waste powder will increase the compressive and flexural strength of the mixture, the 5% ceramic waste powder addition gives the maximum strength among the addition quantities, increasing the addition percentage will cause to decrease the strength but still higher than the strength of the White Cement mixture without ceramic waste addition. Furthermore, more ceramic waste powder addition cause damage to the homogenous structure of the sample and decrease its compressive and flexural strength.

Keywords: Ceramic waste powder, White Cement, environmental pollution, copper coated steel fiber, basalt fiber, hooked-end steel fiber, compressive strength, flexural strength

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
SUMMARY	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM LİTERATÜR TARAMASI

1.1 Beyaz Çimento.....	2
1.2 Seramik Atık Tozu.....	4
1.3 Sülfat Etkisi	9
1.4 Termal Etki	11
1.5 Lifler	13
1.5.1 Bazalt Lifi	15
1.5.2 Kancalı Uçlu Çelik Lif.....	16
1.5.3 Bakır Kaplı Çelik Lif	17

İKİNCİ BÖLÜM MATERYAL VE METOT

2.1 Kullanılan Malzemeler	18
2.1.1 Beyaz Çimento.....	18
2.1.2 Kum	18
2.1.3 Seramik Atık Tozu.....	19
2.1.4 Lifler	19
2.2 Yöntem	21

2.3 Sülfat Testi.....	24
2.4 Yüksek Sıcaklık Testi.....	24
2.5 Donma-Çözülme Testi.....	25

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Durabilite Testleri Öncesi Sonuçlar.....	26
3.2 Yüksek Sıcaklık Testi.....	31
3.3 Sülfat Etkisi	36
3.4 Donma-Çözülme Etkisi	41

SONUÇLAR.....	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ	56

KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
°C	: Santigrat
MPa	: Megapaskal
m	: Metre
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
WC	: Beyaz Çimento
CW5	: Beyaz Çimento %5 Seramik Atık Tozu İlavesi ile
CW10	: Beyaz Çimento %10 Seramik Atık Tozu İlavesi ile
CW15	: Beyaz Çimento %15 Seramik Atık Tozu İlavesi ile
WCCC	: Beyaz Çimento %0.4 Pirinç Kaplı Çelik Lif İlavesi ile
WCB	: Beyaz Çimento %0.4 Bazalt Çelik Lif İlavesi ile
WCHE	: Beyaz Çimento %0.4 Kancalı Uçlu Çelik Lif İlavesi ile
CW5CC	: Beyaz Çimento %5 Seramik Atık Tozu ve %0.4 Pirinç Kaplı Çelik Lif İlavesi ile
CW5B	: Beyaz Çimento %5 Seramik Atık Tozu ve %0.4 Bazalt Lif İlavesi ile
CW5HE	: Beyaz Çimento %5 Seramik Atık Tozu ve %0.4 Kancalı Uçlu Lif İlavesi ile
CO ₂	: Karbon Dioksit
C-H	: Hidrokarbon
C ₃ A	: Trikalsiyum Alüminat
H ₂ O	: Su
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
NaOH	: Sodyum Hidroksit
KOH	: Potasyum Hidroksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
Na ₂ SO ₄	: Sodyum Sülfat
CaSO ₄	: Kalsiyum Sülfat
C	: Karbon
CaO	: Kalsiyum Oksit (Sönmemiş Kireç)
SO ₃	: Kükürt Trioksit

K₂O	:	Potasyum Oksit
N	:	Azot
S	:	Kükürt
H	:	Hidrojen
SiO₂	:	Silisyum Dioksit
Na₂O	:	Sodyum Oksit
pH	:	Potansiyel Hidrojen
Al₂O₃	:	Alüminyum Oksit
MgO	:	Magnezyum Oksit
Fe₂O₃	:	Demir (II) Oksit
Ca	:	Kalsiyum
H₂SO₄	:	Sülfürik Asit
Kg	:	Kilogram

Kısaltmalar

Açıklamalar

DSS	:	Dış Sülfat Saldırısı
GEO	:	Gecikmeli Etrenjit Oluşumu

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1 Beyaz çimento kimyasal bileşim	18
Çizelge 2.2 Kum için standart sınır değerler ve derecelendirme	19
Çizelge 2.3 Seramik atık tozunun kimyasal bileşimleri	19
Çizelge 2.4 Liflerin Özellikleri	19
Çizelge 2.5 Genel karışımların detayları	21
Çizelge 2.6 Numunelerin karışım oranları	22
Çizelge 3.1 28 ve 90 gün sonrası basınç dayanımı sonuçları	26
Çizelge 3.2 28 ve 90 gün sonrası eğilme dayanımı sonuçları	29
Çizelge 3.3 Yüksek sıcaklık etkisi sonrası ağırlık kayıpları	31
Çizelge 3.4 Yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimleri	33
Çizelge 3.5 Yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimleri	34
Çizelge 3.6 Sülfat etkisi sonrası ağırlık değişimleri	36
Çizelge 3.7 Sülfat etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimleri	38
Çizelge 3.8 Sülfat etkisi öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimleri	39
Çizelge 3.9 Donma-çözülme etkisi sonrası ağırlık kayıpları	41
Çizelge 3.10 Donma-çözülme etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimleri	43
Çizelge 3.11 Donma-çözülme etkisi öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimleri	45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Seramik atığı.....	6
Şekil 1.2 Seramik tozu	7
Şekil 2.1 Beyaz çimento	18
Şekil 2.2 Bazalt Lif.....	20
Şekil 2.3 Bakır kaplı çelik Lif	20
Şekil 2.4 Kanca uçlu çelik Lif	21
Şekil 2.5 Kalıplama işlemi	23
Şekil 2.6 Su kürü numuneleri.....	23
Şekil 2.7 Sülfat testindeki numuneler.....	24
Şekil 2.8 Yüksek sıcaklık testi sonrası numuneler	25
Şekil 2.9 Donma-çözülme testinden sonra numuneler	25
Şekil 3.1 Basınç dayanımı test sonuçları	27
Şekil 3.2 Eğilme dayanımı test sonuçları.....	30
Şekil 3.3 Ağırlık kayıplarındaki yüksek sıcaklık etkisi	31
Şekil 3. 4 Basınç dayanımı üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi	33
Şekil 3. 5 Eğilme dayanımı üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi.....	34
Şekil 3. 6 Sülfat testinden sonra ağırlık değişimleri	36
Şekil 3. 7 Sülfatın basınç dayanımı üzerindeki etkisi.....	38
Şekil 3.8 Sülfatın eğilme dayanımı üzerindeki etkisi	40
Şekil 3. 9 Ağırlık kaybında donma-çözülme etkisi	42
Şekil 3. 10 Basınç dayanımı üzerindeki donma-çözülme etkisi	43
Şekil 3. 11 Eğilme dayanımı üzerindeki donma-çözülme etkisi.....	45

ÖNSÖZ

Hamd, insanı yaratan ve ona belâgat öğreten, her dilin hamd ettiği Allah'a mahsustur. Sonsuz nimetleri, lütfu ve cömertliği için ona şükürler olsun.

Bu araştırmanın olgunlaşmasında, bilimin anahtarları hakkında beni bilgilendirmede, kavramları birbirine yaklaştırmada, ikilemlerini ve problemlerini çözmede temel bir rolü olan Yüksek lisans tez danışmanım **Dr. Öğr. Üyesi Metin MEHMETOĞLU** ve **Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ** hocama teşekkürlerimi sunarım.

"Babam"a. Bu anlarda yanımda olmasını umuyordum ve eminim ki bunu benden daha çok umuyordu, tek fark, şükran eli daha hızlıydı, bu yüzden Allah onu her şeyi kapsayan rahmetiyle örtsün.

"Annem" benim aydınlanmam için saatlerini, günlerini, yıllarını veren öğretmenim ve ilk rehberimdir, dolayısıyla en güçlü kadın odur.

Sonra hayatıma sevginin renklerini katan, görünmez elleriyle bana destek olmak için her türlü çabayı ve emeği esirgemeyen **"Amer, Akram ve Mustafa"** kardeşlerim ve **"Fatima ve Tuqa"** kardeşlerime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Babamdan sonra bana babalık yapan dayım **Abd al-Khaleq'e** ve bana ikinci anne olan, tüm adımlarımda bana destek olan teyzem **Entizar'a** teşekkür ediyorum.

Sonra içimize yeniden umut ve hayat üfleyen **Keyan'a** teşekkür ediyorum.

GİRİŞ

Beyaz çimento, mimari ve dekoratif beton için önemli bir bileşendir. Özellikle seramik atık tozu kullanılarak elde edilen beton, estetik özelliklerinden birini pekiştiren, sonsuz renk skalasına sahip etkileyici bir malzeme olduğu gibi, yüksek mekanik dayanımı sayesinde yapısal nitelikler açısından da dikkate değer bir geçerlilik kazanabilmektedir.

Günümüzde atmosferdeki CO₂ birikiminin arttığı bir iklim kuşağı mevcuttur. Bu konunun ciddiyeti, Kasım 2021'de Glasgow-İskoçya'da gerçekleşen iklim değişikliği konferansı (COP26) dâhil olmak üzere bir dizi küresel eylem yol açmıştır. Pierrehumbert (2016), “Biz karbondioksit salmaya devam ettiğimiz sürece dünya ısınmaya devam edecek” demiştir.

Seramik atık tozunun inşaat malzemelerinde kısmi çimento ikâmesi olarak kullanılması sürdürülebilir faydalar sağlamaktadır. Çimentoya kıyasla düzenli depolama atığını azaltmakta, mukavemeti ve dayanıklılığı artırmaktadır ve karbon ayak izini düşürmektedir. Seramik atıkları, uygun maliyetlidir ve ısı yalıtımını iyileştirmektedir. Bununla birlikte, parçacık boyutu, bileşim ve uyumluluk gibi faktörlerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi, istenen performans ve dayanıklılığı elde etmek için son derece önemlidir.

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

1.1 Beyaz Çimento

Yıllar geçtikçe, dünya çapında çeşitli yapı malzemeleri için beton bağlayıcı olarak Geleneksel Portland Çimentosu (GPC) yaygın bir şekilde kullanılmıştır. GPC üretiminin önemli miktarda sera gazı emisyonu açısından çevrede ciddi kirliliğe neden olduğu bilinmektedir (Duxson ve diğerleri, 2007; Huseien ve diğerleri, 2018; Rashad ve diğerleri, 2013; Teng ve diğerleri, 2018).

Belirli amaçlar için çeşitli normal fiziksel ve kimyasal gereksinimleri karşılamak üzere farklı Portland Çimentosu türleri üretilmiştir. Bu özel çimento; kimyasal, faz bileşimi ve özellikleri bakımından geleneksel Portland Çimentosundan farklılık göstermektedir. Özellikleri, modifiye edilmiş bir hammadde karışımı, bir öğütme karışımı kullanılarak veya çimentonun öğütme inceliği ayarlanarak elde edilebilmektedir.

Çimentonun kimyasal bileşimi ve işleme koşulları rengini belirlemektedir. Çimento renkleri, en yaygın olan açık veya koyu gri ve daha az yaygın olan kahverengi veya devetüyü rengi ile çok büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Ticari çimentonun yaygın gri ve kahverengimsi renklerine esas olarak; demir bileşikler ve klinkerin yanması ve söndürülmesi neden olmaktadır. Manganez, krom ve vanadyum gibi diğer geçiş metallerinin renk üzerinde etkisi çok az olmaktadır.

Beyaz Çimento, mimari ve dekoratif betonun önemli bir bileşenidir. Ortaya çıkan beton, yüksek mekanik mukavemeti nedeniyle, yalnızca sonsuz renk tonu yelpazesıyla ifade edici bir malzeme haline gelmekte ve estetik özelliklerinden birini yoğunlaştırmakla kalmamakta, aynı zamanda yapısal nitelikler açısından da dikkate değer bir geçerlilik kazanabilmektedir.

Beyaz Çimento, giderek daha fazla ve belirgin şekilde yüksek performanslı bir bağlayıcı haline getirilmiştir. Beyaz klinker varlığı Geleneksel Portland Çimentosuna ayırt edici gri rengini veren demirli kompozitlerin ve diğer ağır metal kompozitlerin içeriğinin %0,15'i geçmemesine dikkat edilerek üretilmektedir.

Beyaz Çimento kullanılan uygulama alanlarından bazıları; bozulmuş yüzeylerin estetik ve yapısal rehabilitasyonu için önceden karıştırılmış kuru harç, çimento bazlı boyalar, kaplama ve döşeme, kentsel ayarlar, sanat restorasyonu ve sıvalar ve spreycaplamalar için harçlardır.

Fotokatalizör içeren yapı malzemeleri kullanılarak kirliliğin giderilmesine yönelik strateji çerçevesinde, Titanyum Dioksit (TiO_2) ve Beyaz Çimentodan oluşan bir sistem araştırılmıştır. Organik kirleticilerin fotokatalitik bozunmasını içeren ilk teknoloji, beton yapıların estetik özelliklerini korumak için kullanılmıştır (Kasar, 2004). Uygun miktarlarda TiO_2 'nin çimento karışımlarına katılması, çimentolu yapıların yüzeyini fotokatalitik olarak aktif hale getirmeye izin vermiştir. Beton ürünlerin estetik özelliklerini, özellikle de rengini, agresif kentsel ortamlarda bile zaman içinde değişmeden koruması beklenmektedir.

Çimentolu malzemelerin, özellikle de Beyaz Çimento esaslı olanların estetik görünümünün korunması öncelikle arzu edilir. Nitekim çimentolu malzemelerde renk değişimine neden olan temel sebep, yüzeylerinde kalan renkli organik bileşiklerin varlığıdır.

İnorganik tozlar, organik ara yüzey veya mikro gözenekler varlığında çimentolu malzemenin yüzeyine yapışmakta; heterojen fotokataliz teknolojisi, yarı iletken bir fotokatalizörün ısınlanmasına dayanmaktadır.

Fotokataliz; düşük maliyetli bir yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş ışığını kullanan, hafif deneysel koşullar altında güvenilir bir azaltma yöntemi olarak son zamanlarda önemli ölçüde kabul görmüştür. Bu alandaki son gelişmelerin, TiO_2 gibi bir fotoaktif bileşenin adsorbanlar ile karıştırıldığı katalizörlerin kullanılmasını önermesi ilginçtir (Hashimoto ve diğerleri, 2001). Bildirildiği üzere, zeolitlerin yüksek emme kapasitesi TiO_2 'nin düşük emme gücünü telafi ettiğinden veya tamamladığından, bu durum eliminasyonunun genel verimliliğini artırmaktadır. Bu nedenle, karışık katalizörlerin kullanımı, fotokatalizde umut verici bir araştırma yönü olarak görülmektedir.

Çimentolu bir matris içinde dağılmış TiO_2 'den oluşan bir kompozit sistemin bu tür fotokatalizörlerden biri olduğunun farkına varılması, önemli pratik çıkarımlara sebep olmuştur. Laboratuvarlarda ve diğer araştırma kurumlarında devam eden çalışmalar, TiO_2

içeren betonun kirlilik kontrolünde bir çözücü teknoloji olarak çok iyi bir uygulama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Fotokataliz ile nitrojen oksidin giderilme mekanizması basit olmamakla birlikte katalizör ışığa maruz kaldığında havadaki NO'nun oksitlendiği varsayılmaktadır. Nitrojen Dioksit (NO₂) ara aşamada nitrata dönüştürülmekte, NO₂ oluştuğunda, gazın bir kısmı fotokatalitik yüzeyden kaçabilmekte, ancak çimento matrisinin mevcudiyetindeki gaz, oluşan nitrat tuzu ile birlikte etkili bir şekilde tutulabilmektedir (Murata, Y. er., 1999).

Beyaz çimento ile yapılan beton için karışım tasarımı, iki temel husus dikkate alınarak geliştirilmelidir:

- Estetik veya yüzey kalitesi (nihayetinde fotokatalitik özellikler dahil)
- Dayanım veya yapısal uygunluk

Başka bir deyişle, karışım bileşenleri arasında hassas bir denge oluşturmak ve elde edilen karışımın reolojik davranışını garanti etmek için doğru malzemelerin seçilmesi gerekmektedir. Özel Yüksek Performanslı Beton (HPC) durumunda ham maddeler; su, çimento ve agregalardır (geleneksel çimento karışımında olduğu gibi). Gerektiğinde mineral ve süperakışkanlaştırıcı katkı karışımları eklenebilir. Sonuç olarak, HPC sıradan betondan önemli ölçüde farklı bir mikro yapıya (yüksek yoğunluğa) sahiptir (Cassar ve diğerleri, 2003).

Nükleer spin gevşetme teknikleriyle sentetik Beyaz Çimento hamurunun hidrasyonu incelenmiştir. 15 dakikadan 200 saate kadar olan hidrasyon sürelerinde beş ayrı döndürme grubu çözülmüş; çimento hamuru içindeki her bir döndürme grubu; döndürme-döndürme gevşeme süresi ve manyetizasyon fraksiyonu ile karakterize edilmiş ve hidrasyon sırasında sürekli olarak izlenmiştir. Sonuç olarak, hidrasyon sırasında çimento yapısındaki bilinen kimyasal ve stokiometrik değişiklikler arasında iyi bir uyum bulunmuştur (Yeşil ve diğerleri, 2000).

1.2 Seramik Atık Tozu

Seramik atık bileşimi, seramiğin türüne ve ilgili üretim süreçlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Çanak-çömlek, taş eşya, porselen veya vitrifiye karolar gibi farklı seramik türleri, farklı bileşimlere ve atık özelliklerine sahiptir. Seramik atıkların bileşimi, kaolinit, montmorillonit veya illit gibi kil mineralleri, kuvars veya kristobalit gibi silika

bazlı bileşikler, ortoklaz, albit veya plajiyoklaz gibi feldispat mineralleri, titanyum dioksit (TiO_2) gibi metal oksitler, demir oksit (Fe_2O_3) içerebilmektedir. Fe_2O_3 veya kobalt oksit (CoO); seramik türüne bağlı olarak diğer mineraller ve seramik üretiminde istenilen renk, doku ve özellikleri elde etmek için kullanılan renklendirici ve katkı maddelerinin kalıntılarıdır (Bhavsar ve Panchal, 2022; García-Ten ve diğerleri, 2016; Lasseguette ve diğerleri, 2019; S.El-Dieb ve diğerleri, 2019).

Tüketici talebini karşılamak üzere kaynakların sonsuz kullanımı, dünya çapındaki en önemli çevre sorunlarından biri olan endüstriyel atıkların sürekli artmasına neden olmaktadır. Sürdürülebilir inşaatın sağlanması için endüstriyel ve tarımsal atık malzemelerinin azaltılması ve geri dönüştürülmesi çok önemli bir husus olarak kabul edilmektedir. Uçucu kül, silis dumanı, cüruf ve hurma yağı yakıt külü gibi yan ürün külleri son on yıldır incelenmekte ve bulgular beton üretimi için yeni ek çimentolama malzemeleri olarak kabul edilmektedir (Kathirvel ve diğerleri, 2013).

Artan sanayileşme, nüfus ve şehirleşme ile birlikte katı atık maddelerinin miktarı ve türleri de artmıştır. Bununla birlikte, çok sayıda biyolojik olarak parçalanamayan atık malzeme türü de çevrede yüzlerce veya binlerce yıl boyunca kalacaktır (Chindaprasirt ve diğerleri, 2015; Mohammadhosseini ve Yatim, 2017). Bu atık maddeler atık bertaraf felaketlerine neden olmakta ve dolayısıyla çevre için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Pacheco-Torgal ve Jalali, 2011).

Yerel bir tesiste üretilen ve 950–1000 °C'de pişirilen atık seramik çatı kiremitleri, çimento üretiminde karışıma dâhil edilmiştir. Zemin kiremit atıkları kil-çimento ve harçta puzolan olarak kullanılabilirse, bu atığın çevresel etkisi azaltılabilir ve bu metaların beton üretimindeki ekonomik faydaları arttırılabilir. Seramik karoların puzolanik aktivitesi üzerine daha önceki bazı makaleler (Ay ve Ünal, 2000) ve kalsine esaslı kil mineralleri, kil içeren harçların teknolojik özelliklerinin iyileştirilmesini onaylamaktadır (Oh ve diğerleri, 1995). Öte yandan, doğal puzolanlar üzerine yapılan çalışmalar da beton durabilitesinin önemini ortaya koymaktadır (Rodriguez-Camacho ve Uribe-Afif, 2002).



Şekil 1.1 Seramik atığı

Endüstriyel atıkları bertaraf etmek için, depolama alanlarının mevcudiyeti sınırlı olduğundan, bir geri dönüşüm süreci tercih edilen bir çözümdür. Sosyo-ekonomik sürdürülebilirlik açısından atıkların agrega olarak çimento esaslı malzemelerde geri dönüştürülmesi dikkat çekici bir yöntem olarak kaydedilmiştir. Seramik atıklar, seramik atık agregaları (CWA'lar) olarak adlandırılan, muhtemelen agrega olarak geri dönüştürülebilen malzemelerdir.

Test edilen seramik atıkların çoğu bloklardan, tuğlalardan, kiremitlerden ve sağlık gereçlerinden gelmektedir. Ancak, elektrik izolatörlerinden kaynaklanan seramik atıklara ilişkin raporlar oldukça sınırlıdır (Higashiyama, Yagishita ve diğerleri, 2012; R. Senthamarai ve diğerleri, 2011; RM Senthamarai ve Devadas Manoharan, 2005). İlginç bir şekilde, seramik yalıtkan atıklarının çimento esaslı malzemelerde agrega olarak kullanılmasının umut verici olduğu sonucuna varmışlardır. Ezilmiş seramik elektrik izolatör atıklarının iri agrega olarak kullanılması durumunda; geleneksel beton ile CWA betonu arasında mekanik ve geçirgenlik özellikler açısından bir fark bulunmamıştır (R. Senthamarai ve diğerleri, 2011). Bununla birlikte, ince agregaların kısmen seramik atık tozu (CWP) ile değiştirildiğinde, betonun basınç dayanımının arttığı bulunmuştur. Bunun da mikro dolgu etkisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca tüm ince agregaların CWA ve CWP ile değiştirilmesinin basınç dayanımını arttırdığı ve harçların kümülatif

gözenek hacmini azalttığı, ayrıca deniz ortamındaki betonarme yapıların dayanıklılığının temel bir özelliği olan klorür iyonlarının penetrasyonuna karşı iyi bir direnç gösterdiği görülmüştür (Higashiyama, Yagishita ve diğerleri, 2012).



Şekil 1.2 Seramik tozu

CWA harcının basınç dayanımının SSD nehir kumu harcından daha yüksek olduğu ve ince agrega sayısına orantılı olarak arttığı bulunmuştur. Bununla birlikte CWA ve çimento hamurları arasındaki kohezyonun daha yüksek olduğu ve CWA harcının gözenek yapısının iyileştirildiği, CWA harcının diğer harçlara göre önemli ölçüde daha düşük bir klorür iyonu penetrasyon derinliği gösterdiği sonucuna varılabilmektedir. Harçtaki CWA, klorür iyonlarının girişine karşı etkilidir, ayrıca hızlı klorür migrasyon testi sırasında, CWA harcının kararlı durum koşuluna ulaşması daha uzun zaman almıştır. Ayrıca, CWA harcının etkili difüzyon katsayısı, nehir kumu harcınınkinden %63 oranında azaltılmıştır (Higashiyama, Sappakittipakorn ve diğerleri, 2012).

Ayrıca, seramik atık agregalarından (CWA'lar) yapılan harçlar üzerindeki klorür iyonu penetrasyon testleri; gümüş nitrat (AgNO_3) solüsyon püskürtme yöntemi ve hızlı klorür migrasyon testi (kararlı durum koşulu) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan CWA'lar, ince agregalarla değiştirilmeden önce ezilip çeşitli boyutlarda öğütülen, Japonya'daki bir elektrik şirketi tarafından sağlanan seramik elektrik yalıtkan atıklardır. CWA'ların etkisi, aşağıdaki gibi dört dizi harç üzerinde yapılan testlerle değerlendirilmiştir:

- (1) Farklı ince agregalardan yapılan harçlar,
- (2) Farklı parçacık boyutlarına sahip CWA'dan yapılan harçlar,
- (3) Farklı bir miktarda CWA ve
- (4) CWA'dan farklı bir değiştirme oranında yapılmış harçlar.

Deneyisel sonuçlarında; CWA harçlarının, nehir kumundan yapılmış tipik bir harca göre klorür iyonu penetrasyon direncinde daha etkili olduğu bulunmuştur. CWA harçlarındaki klorür iyonu penetrasyon derinliği, CWA miktarı arttığında veya CWA'nın partikül boyutu azaldığında azalmaktadır. Ayrıca, CWA harcının etkili klorür difüzyon katsayısı nehir kumu harcından daha düşüktür (Higashiyama, Sappakittipakorn ve diğerleri, 2012).

Beton üretiminde, çimentonun yerini kısmen alabilecek tamamlayıcı bir çimentolama malzemesi olan seramik parlatma tozunun; betonun karbonatlaşma ve sülfat korozyonuna direnci üzerindeki etkilerini araştırılmış, seramik parlatma tozu ile karıştırılan betonun karbonatlaşma direnci kontrol betonuna göre daha düşük bulunmuştur. Ayrıca çimento ikâme oranının artmasıyla betonun karbonatlaşma direnci azalma eğilimi göstermiştir. Aynı çimento ikâme oranı koşullarında ise seramik parlatma tozu ile karıştırılan beton, kontrol betonuna benzer karbonatlaşma direnci göstermiştir. Üçüncü olarak; hem seramik parlatma tozu hem de uçucu kül ile karıştırılan betonun karbonatlaşma direnci, her ikisiyle karıştırılan betonunkine benzemektedir (Cheng ve diğerleri, 2014).

Aynı çimento ikâme oranı koşulları altında, uçucu kül ile karıştırılmış betonun sülfat korozyon direnci, seramik parlatma tozu ile karıştırılmış betondan daha iyidir. Hem seramik parlatma tozu hem de uçucu kül ile karıştırılmış betonun sülfat korozyon direnci ise bundan da iyidir.

1.3 Sülfat Etkisi

Portland Çimento betonu (PÇB) sülfat tuzlarına maruz kaldığında, sülfat iyonları gözenek sistemi boyunca hareket ederek hidratlı çimento hamurunun kimyasal bileşikleri ile reaksiyona girerek genişleyen ürünler üretmekte, parçalanma ve çatlama gibi hasarlara neden olmaktadır. Betona sülfat saldırısındaki mekanizmalar her zaman karmaşık ve kafa karıştırıcı olmuştur (Neville, 2004).

Ne deneysel ne de sayısal yaklaşımlar bu olguyu tam olarak açıklayamamaktadır. Sülfat saldırısını tanımlamayı amaçlayan tipik bir test, genellikle beton altyapıların karşılaştığı saha koşullarını tekrarlamaz. Sıcaklık genellikle sabittir ve numuneler, sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya kalsiyum sülfat (CaSO_4) gibi belirli bir sülfat tuzuna kısmen veya sürekli olarak daldırılabilir.

Genellikle, genişleme, kütle kaybı veya mukavemet azalması gibi tanımlanmış bir süre boyunca yalnızca makroskobik bozulma ölçülür. Saha koşulu standart testle aynı olmadığında, standart testle tanımlanan sülfata dayanıklı bir beton sahada iyi performans göstermeyebilir. Öte yandan, Kaliforniya, Sacramento'da bulunan saha gözlemi (Verbeck, 2019), belirli bir alanda betonun sülfat dayanımını "tam olarak" verebilse de bu geri bildirimi almak çok uzun zaman alır. Ek olarak, sülfat direnci zayıf olan beton sahada döküldüğünde, saha gözlemleri, bu tür betonun belirli bir alanda uygun olmadığını ve beton karışım oranı tasarımına rehberlik edemediğini bildirebilir.

Betonun mekanik bozunması, laboratuvar testleri ve saha gözleminde farklı olarak, sayısal analiz, iyon tipi ve konsantrasyonu, sıcaklık vb. mikroskobik bir bakış açısıyla incelenebilir; ek olarak böyle bir alternatif, çok fazla enerji tüketmeden betonun sülfat direncini hızlı bir şekilde değerlendirebilir.

Son yıllarda Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'daki ilgili davalar nedeniyle beton üzerindeki sülfat saldırılarına ilişkin araştırmalar artmıştır. Sonuç olarak, sülfat saldırısına ilişkin geleneksel görüşe meydan okunmuştur. Örneğin, mevcut test prosedürlerinin saha koşullarının göstergesi olmadığı ve saha yapılarında sülfat saldırılarının tahmin edilmesini sağlayabilecek başarısızlık kriterleri ve parametrelerinin geliştirilmesine ihtiyaç olduğu öne sürülmüştür (Bonen ve Cohen, 1992).

Tamamen batık koşullar altında kimyasal Na_2SO_4 saldırısının esas olarak genleşme yoluyla geliştiği sonucuna varılmıştır. Su/çimento oranı ne kadar yüksek olursa, genleşme de o kadar yüksek olacaktır. Genleşmeyi azaltmada %8 silis dumanı ilavesi en etkili olmuştur. Bunu sırasıyla %25 cüruf ve %25 F sınıfı uçucu kül izlemiştir. Na_2SO_4 'e maruz kalan numunelerin yüzey bozulması önemli düzeyde değildir. Ayrıca harç yapımında kullanılan bağlayıcıdan bağımsız olarak 0,45'lik bir su/çimento oranının çiçeklenme oluşumu için en şiddetli koşulları oluşturduğu bulunmuştur. Çimento tabanlı malzemelerin gözenek yapısını iyileştirdiği bilinen silis dumanı içeren numuneler,

referans Geleneksel Portland Çimento numunelerine göre çiçeklenme oluşumuna karşı biraz daha savunmasızdır (Nehdi ve Hayek, 2005).

Sülfat bakımından zengin ortamlarda beton sülfat saldırısına uğramaktadır. Uçucu kül ve cüruf gibi kullanılmış malzemeler, özelliklerini iyileştirmek için beton karışımına rutin olarak eklenir. Bununla birlikte, uçucu külün beton dayanıklılığı üzerindeki etkisi her zaman kesin değildir ve laboratuvar da veya saha gözlemi yoluyla beton dayanıklılığını test etmek zaman ve enerji tüketir. Çalışma, uçucu kül ile yapılan Portland çimento betonunun dayanıklılığının sayısal bir simülasyonunu sunmaktadır. Uçucu kül betonu üzerindeki sülfat saldırısının simülasyonu, iyon taşıma mekanizmasına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Hidratlı çimento hamurunun kimyasal bileşikleri ile sülfat iyonları arasındaki kimyasal reaksiyonlar dikkate alınmıştır. Ek olarak, uçucu külün etkisini dahil etmek için uçucu külün puzolanik ve hidrasyon reaksiyonları da dahil edilmiştir (Ni ve diğerleri, 2015).

Deneyimler, tuz ayrışmasının daha ince gözenekli kayalarda daha şiddetli olduğunu gösterdiğinden, daha düşük su/çimento oranına sahip ve/veya puzolanik ilaveler içeren betonun bu fiziksel tuz türüne karşı daha savunmasız olabileceğine dair bir endişe bulunmaktadır.

Sülfatların Geleneksel Portland Çimentosunun ilk ve son priz süreleri ile betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı deneysel bir araştırma yürütülmüştür. Sülfat cinsi ve iyon konsantrasyonunun priz sürelerini önemli ölçüde etkilediği, priz alma süresindeki artışın daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Parametreler, farklı yaşlardaki betonun basınç dayanımını azaltmaktadır (Kumar ve Kameswara Rao, 1994).

1.4 Termal Etki

Herhangi bir malzemede olduğu gibi, sıcaklık yükselip alçaldıkça beton da genişmekte ve büzülme ktedir. Hareketin boyutu, sıcaklıktaki değişime ve betonun termal genişleme katsayısına bağlıdır. Agreg a, beton hacminin %70-80'ini kapladığından, betonun ısı l genişleme katsayısı büyük ölçüde agregaların ısı l genişleme katsayısından etkilenmektedir.

Düşük sıcaklıklar, kürl e me sırasında mukavemet gelişim oranını azalttığından, beton sıcaklığının izlenmesi soğuk havalarda daha kritik hale gelmektedir. Bu nedenle, özellikle aşırı soğuk hava koşullarında beton için en uygun kürl e me koşullarını sağlamak

çok önemlidir. Yeni yerleştirilmiş betonun çok yüksek veya çok düşük sıcaklıklara maruz kalması durumunda, hidrasyon süreci büyük ölçüde etkilenebilmekte ve bu da karışım tasarımının mukavemet gelişimini tehlikeye atabilmektedir.

Ayrıca, sıcaklık farkları çok yüksek olduğunda termal çatlama meydana gelebilmektedir. Kurlenme sırasında beton elemanındaki sıcaklık değişimlerini yakından izleyerek, yapının mukavemetinin, kalitesinin ve dayanıklılığının kabul edilebilir olması sağlanabilir.

Termal çatlama, betonun çekme geriliminin çekme dayanımını aştığında meydana gelmektedir. Daha basit bir ifadeyle, betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkları termal çatlaklara yol açabilir. Ek olarak, çimento suyla karıştığında, hidrasyon adı verilen ve ısı üreten kimyasal bir reaksiyon meydana gelir. Bu süreçte, ısı çekirdeğin içinde tutulur ve yeterince hızlı kaçamaz. Sonuç olarak, yüzey soğurken çekirdek ısınmaya devam eder.

Çatlama, yapının geçirgenliğini artırarak su, hava ve klorürün betona nüfuz etmesini kolaylaştırmaktadır. Bu durum inşaat demiri korozyonuna yol açabilmekte ve tüm beton yapının dayanıklılığını ve bütünlüğünü ciddi oranda azaltabilmektedir. Bu nedenle beton karışım sıcaklığının, ortam sıcaklığının ve diferansiyel sıcaklığın izlenmesi ve termal çatlamayı önlemek için uygun şekilde ayarlanması çok önemlidir. Buna rastgele harita çatlakları, duvarlarda dikey çatlaklar (özellikle duvar tabanında) ve kırışlerde eşit aralıklı çatlaklar da dâhildir.

Düşük ısılı çimento, uçucu kül, kireçtaşı veya cüruf gibi agrega ikâmeleri ve düşük su-çimentolu malzemeler kullanarak beton karışımı soğuk havalarda ısı tutma açısından optimize edebilir.

Dayanım ve esnekliğin sıcaklığa bağımlılığı araştırılmış ve 450°C'ye kadar sıcaklıklarda betonun sünme ve deformasyon özellikleri incelenmiştir. Geçici akma verileri, yani geçici sıcaklık koşullarında elde edilen veriler, sabit yüksek sıcaklıklarda ölçülmüştür. Sonuçlar, bazı durumlarda geçici sünme değerlerinin ve sabit durum sünme değerlerinin aynı büyüklükte olabileceğini göstermektedir. Akma ölçümleri, diğer çalışanlar tarafından sunulan verilerle iyi bir uyum içinde görünmektedir. Tüm veriler de yükselen sıcaklıkla önemli ölçüde artmış ve %100'den fazla farklılıklar görülmüştür. Numuneler ortam sıcaklığına kadar soğutulduğunda yüklenen betonda olağanüstü büyük

bir basınç ve şekil değişimleri gözlemlenmiştir. Deneyler, normal yapısal betonun yüksek sıcaklıklarda hatırı sayılır gerinim kapasitesini göstermektedir (Schneider, 1976).

Ölçümler, bazı durumlarda normal yapısal betonun 100°C'den yüksek sıcaklıklarda kullanılabileceğini göstermektedir. Yüksek gerilme konsantrasyonlarının olduğu alanlarda, yüksek sıcaklıklarda betonun sünekliğinin daha fazla olması nedeniyle gerilme tepe noktalarında önemli bir azalma meydana gelebilmektedir. Öte yandan yapının bütünü ile ilgili olarak deformasyonların sınırlandırılması gerekmektedir. Sabit bir maksimum sıcaklık için, bu sadece kabul edilebilir gerilmeleri sınırlayarak yapılabilir. Test sonuçları, izin verilen maksimum gerilim ve sıcaklık değerlerinin ilk tahminine izin verebilmektedir.

Su ve sülfat çözeltilerinde donma-çözülme döngülerine maruz kalan betonun (%20 ilave uçucu kül ile) özellikleri araştırılmıştır. Korozyon solüsyonları, %5 sodyum sülfat solüsyonu ve %5 magnezyum sülfat solüsyonu olmak üzere iki tiptir. Deney yoluyla, yüzey hasarını değerlendirmek için görsel inceleme yapılmıştır (Jiang ve diğerleri, 2015).

Bağlantı etkisi altında betonun ağırlık kaybı ve elastisite modülü (RDME) kaybı ve basınç dayanımı kaybı dikkate alınarak bozulma da incelenmiştir. Sülfat atağı ile oluşan ürünleri belirlemek için donma-çözülme sirkülasyonu sonrasında seçilen numuneler üzerinde X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve termal analiz gibi analitik teknikler uygulanmıştır. Test sonuçları, donma-çözülme döngülerinin ve sülfat ataklarının birbirini etkilediğini göstermektedir. Bir yandan, donma-çözülme döngüleri sırasında daha düşük bir sıcaklık, sülfat iyonlarının betondaki difüzyonunu yavaşlatmış; öte yandan, bir sülfat saldırısı betonda mikro çatlakların oluşumunu hızlandırmış ve bu durum da donma-çözülme döngüleri altında daha ciddi hasarlara yol açmıştır. Betondaki hasar oranı önemli ölçüde sülfat çözeltilerinin türlerine bağlıdır ve magnezyum sülfatın neden olduğu beton bozulması, donma-çözülme döngülerine maruz kalan en agresif korozyonu kapsamaktadır. Ayrıca, sodyum sülfat çözeltisindeki betonun basınç dayanımı kaybı ve RDME kaybı, ilk donma-çözülme döngüleri sırasında sudakinden daha azdır, ancak sonraki test periyodunda hasar daha şiddetli olmuştur.

Bir beton yapıdaki değişen termal koşulları tahmin etmek ve oluşturmak için sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Modelin doğrulaması, modeli uzun süreler boyunca simülasyonlar için ve mevcut yerel termal verilerin bulunmadığı durumlar için

kullanabilmek üzere İsveç Meteoroloji ve Hidroloji Enstitüsünden iklim verileriyle birlikte bir beton levhada saha ölçümleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık dağılımındaki günlük değişimler model tarafından yakalanmaktadır ve meteoroloji istasyonlarından alınan iklim verilerine dayanan doğrusal sıcaklık farkları için uç değerleri tahmin etmek üzere kullanılmaya son derece uygundur (Larsson ve Thelandersson, 2011).

Daha uzun süreli simülasyonlar için uç değerlerin analizleri, Eurocode'daki pozitif doğrusal sıcaklık gradyanları incelenen koşullar için olduğundan düşük tahmin edildiğini göstermektedir. Daha önce dahil edilmeyen coğrafi farklılıklara yönelik bir eğilim de bulunmaktadır. Asfalt kaplama tabakası pozitif lineer sıcaklık gradyanlarını artırırken beton kaplama ise azaltmaktadır.

1.5 Lifler

Düz beton kırılımandır; bu nedenle, bu sorunu çözebilecek lifli malzemelerin kullanılması elzem görülmektedir. Betonda liflerin kullanılması, çeşitli yükler altında; özellikle basınç yükleri ve çekme yükleri altında betonun gevrek kırılmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Lifle güçlendirilmiş betonun davranışı sünek olmaktadır.

Betonun darbe, kırılma ve aşınma direncini artırmaya yardımcı olmakta, betonun ayrışmasını, plastik oturmasını ve rötre çatlamasını azaltmakta ve makro çatlamaya karşı üç boyutlu güçlendirme sağlamaktadır. Genel dayanıklılığı, yorulma direncini ve eğilme direncini de artırmaktadır. Ayrıca sıcaklık/büzülme çatlak kontrolü için tel örgüye kıyasla yerinde maliyeti azaltmakta ve yerleştirmeden önce herhangi bir zamanda beton karışımına kolayca eklenmektedir.

Çatlak kenarları arasında köprü kuran lifler, yüksek deformasyona kadar betonun entegrasyonunu koruma eğilimindedir ve bu nedenle gevrek kırılmayı önlemektedir. Günümüzde fiber takviyeli beton yol kaplamaları, kaldırımlar, köprüler, tünel segmentlerinin kaplamaları ve döşemeler dâhil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Khaloo ve Afshari, 2005).

Çelik liflerin betonda kullanılması betonun birçok özelliğini iyileştirebilir. Çelik liflerin genellikle belirli bir enine kesit boyunca dağıtılması, buna karşın takviye çubukları veya tellerin yalnızca gereken yerlere yerleştirilmesi, çelik liflerin sürekli takviye çubuklarına kıyasla nispeten kısa ve yakın aralıklı olmaları en önemli

faydalarındandır. Çelik lifler kullanarak beton alanına aynı donatı alanını elde etmek, tellerden oluşan bir takviye çubukları ağı kullanmakla karşılaştırıldığında genellikle mümkün olmamaktadır.

Çelik lifler tipik olarak betona düşük hacim dozajlarında (genellikle %1'den az) eklenir ve plastik büzülme çatlamasını azaltmada etkili olur. Tipik olarak betonun serbest büzülmesini önemli ölçüde değiştirmez, ancak yeterince yüksek dozajlarda çatlamaya karşı direnci artırabilir ve çatlak genişliğini azaltabilir.

Çelik lif takviyesi kullanırken kendiliğinden yerleşen özellikleri elde etmenin oldukça mümkün olduğunu bulunmuştur. Karışım bileşimi ve lif tipi betonun akışkanlığını büyük ölçüde etkileyebilirken, lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (FR-SCC) üretmek için kullanılabilecek bir maksimum lif içeriği bulunmaktadır (Khaloo ve Afshari, 2005).

Çelik lifler kullanan betonarme kirişlerin eğilme davranışı incelenmiş, her seri için betonarme kirişlerin içerikleri hacme göre %0 ila %2 arasında değişmiştir. Bu çalışma sayesinde fiberle güçlendirilmiş beton kirişlerin nihai direncinin arttırıldığı bulunmuştur. Mevcut çalışma aynı zamanda çelik liflerin eklenmesiyle süneklik ve enerji emme kapasitesinin önemli ölçüde arttığını da göstermektedir (Oh ve diğerleri, 1991).

Ayrıca, çelik geriliminin artmasıyla çatlak genişliğinin hemen hemen doğrusal olarak arttığı ve kirişteki lif miktarı arttıkça çatlak genişliğinin önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Çatlak aralığı ayrıca, çelik liflerin eklenmesinden etkilenmekte ve artan lif miktarlarıyla azalmaktadır. Fiber takviyeli beton kirişler, uygulanan aynı yükte önemli ölçüde daha az çatlama sergilemekte ve çekme çatlağına karşı dikkate değer bir dirence sahip olmaktadır (Oh ve diğerleri, 1991).

Son kırk yılda, çoğu çelik liflerin kullanımına ayrılmış olan, lif takviyeli beton üzerine çok sayıda araştırmaya tanık olunmuştur. Buna karşılık, az sayıda çalışma, liflerin tasarımı ve geliştirilmesi ile ilgilenmiştir. Gerçekten de, bugün piyasada bulunan çoğu çelik lif, otuz yılı aşkın bir süre önce tasarlanmış ve piyasaya sürülmüştür.

Çimento, seramik ve polimerik matrislerde kullanılmak üzere yeni nesil çelik liflerin geliştirilmesi ve tasarımının arkasındaki mantık ve teknik arka plan açıklanmıştır. Bu lifler şekil, boyut ve mekanik özelliklerin yanı sıra belirli bir karışımla uyumluluk açısından en uygun özellikleri elde etmek için tasarlanmıştır. Torex lifleri olarak tanımlanırlar. Tipik test sonuçları sağlanmış ve piyasadaki diğer çelik liflere kıyasla Torex liflerinin üstün performansını (2 ila 3 kat daha iyi) göstermiştir. Yeni fiberler, yüksek performanslı fiber takviyeli çimento kompozitlerinin patlamaya ve sismik dirençli yapılar gibi yapısal uygulamalarda ve ayrıca ince çimento levha ürünler gibi bağımsız uygulamalarda daha geniş kullanımını ilerletecektir (Naaman, 2003).

1.5.1 Bazalt Lifi

Bazalt, volkanik kayalarda bulunan doğal bir malzemedir. Esas olarak inşaat, endüstri ve karayolu mühendisliğinde (kıрма kaya olarak) kullanılmaktadır. Ayrıca bazalt (1300- 1700°C) eritilip ince lifler haline getirilebilir. Bazalt (sürekli) lifler olarak kullanıldığında, yeni bir dizi (plastik ve beton matris) kompoziti güçlendirebilir.

Bazalt lifleri, bazalt taşlarının erimesinden üretilebilir. Prensipte olarak iki farklı türde bazalt lifi ayırt edilir; ştapel lifler ve filamentler. Her iki tip için de farklı üretim yöntemleri bildirilmiştir.

Bazalt lif takviyeli beton üzerindeki mekanik özelliklerin ölçümünü gösteren bir çalışma yapılmış; bazalt lifinin betona eklenmesinin, lif miktarının artmasıyla betonun işlenebilirliğinin azalması anlamına geldiği sonucuna varılmıştır. Normal betonla karşılaştırıldığında, bazalt lif ile güçlendirilmiş beton, eğilme ve çekmede daha iyi dayanımlar gösterirken, basınç dayanımında daha az iyileşme olsa da artış göstermiştir. Normal betonun dayanımları ile karşılaştırıldığında bazalt lif takviyeli numunede basınç, çekme ve eğilme dayanımları 28 gün boyunca sırasıyla %3,36-9,82, %8,38-36,7 ve %6,82-18,83 artmaktadır. Bazalt lifli betonun mekanik özellikleri, bazalt lif oranının yükselişiyle artmaktadır (V. Biradar ve diğerleri, 2020).

Bazalt liflerinin UHPC matrisine dâhil edilmesinin, diyagonal çatlak yükünü çelik liflerden daha fazla artırmaya katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır. Çelik lif içeriğindeki artış diyagonal çatlak ve nihai kesme yüklerini artırmasına rağmen, çatlak yükünü artırma yüzdesi nihai kesme yükünden daha fazla olmuştur. %0,5 ve %1,0 hacim fraksiyonunda bazalt liflerinin kullanılması, eşit yüzdede çelik liflerin kullanılmasına göre diyagonal çatlak yükünü ve nihai kesme dayanımını daha fazla artırmıştır. Bununla birlikte, %1,5 çelik lif içeriği, diyagonal çatlak yükünü ve nihai kayma direncini bazalt liflerinden daha fazla artırmaya katkıda bulunmuştur (Jabbar ve diğerleri, 2021).

Jenifer ve Brindha (2021), üç farklı agrega karışımıyla %1,5 çelik lif ve %0,6 bazalt lifi içeren optimum hacim oranıyla geliştirilmiş hibrit lifle güçlendirilmiş betonun performansını incelemiştir. Bakır cürufu (C40) kontrol betonuna göre basınç dayanımında sadece çelik lifli karışım %6'ya kadar, bazalt lifli karışım yarmada çekme dayanımında %74'e kadar ve bazalt lifli karışım eğilme dayanımında %85'e kadar artış gözlenmiştir. Bazalt lifli karışım, eğilme altında en yüksek tokluk özellikleri sergilemiştir. Çelik ve bazalt liflerinin etkisi mekanik özelliklerde birbirini tamamlarken, çelik lifin geometrisi ve fiziksel özellikleri nedeniyle çeşitli davranışlar altında bazalt liflerinden daha üstün olduğu kabul edilmektedir.

1.5.2 Kancalı Uçlu Çelik Lif

Çengel uçlu çelik lifler, çekme dayanımını ve tokluğunu artırmak için betonda kullanılan bir takviye malzemesi biçimidir. Lifler genellikle yüksek kaliteli çelikten oluşmakta, bir veya her iki uçta kancalı bir konfigürasyon sergilemekte, böylece beton matris ile üstün yapışmayı kolaylaştırmaktadır.

Çengel uçlu tasarıma sahip liflerin beton karışımına dâhil edilmesinin, çekme kuvvetlerine karşı direnci arttırdığı bulunmuştur. Betona dâhil edildikten sonra, malzemenin çatlamaya ve darbelere dayanma yeteneğini artıran üç boyutlu bir çerçeve oluşturmuşlardır (Abdallah ve diğerleri, 2016).

Kancalı uçlu çelik liflerin kullanımı, endüstriyel zeminler, prekast elemanlar ve püskürtme beton gibi çeşitli beton uygulamalarında mümkündür. Kompozit malzemeler, inşaat demiri veya tel örgü gibi alternatif güçlendirme malzemelerine kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar, gelişmiş performansı, azalan işçilik giderlerini ve artırılmış tasarım uyurlanabilirliğini kapsar.

Gündüz ve diğerleri (2016) kancanın doğasının ve konfigürasyonunun çelik lif takviyeli betonun özellikleri üzerinde kayda değer bir etkisi olduğunu keşfetmiştir. Mevcut araştırmadan elde edilen ek bulgular, taze betonun özelliklerinin kancalı tipteki değişiklikten etkilenmediğini göstermektedir. Çökme değerleri lif içeriğinin artmasıyla düşüş göstermiştir.

1.5.3 Bakır kaplı çelik Lif

Pirinç kaplı mikro çelik lif, RTB'nin (Reaktif Toz Beton) en önemli malzemelerinden biridir, çok yüksek mukavemet, çok iyi dayanıklılık ve hacim kararlılığı özelliklerine sahiptir. İyi ve yeni bir yapı malzemesidir. Mikro Çelik Lif (MÇL), hızlı tren, otoban, RTB örtü levhaları ve yapı elemanlarının yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pirinç kaplı çelik takviyeli uçucu kül bazlı geopolimer, taze ve sertleştirilmiş haldeki mikro yapı ve mekanik özellikler açısından değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; diğer liflere benzer şekilde, MÇL ile güçlendirilmiş uçucu kül bazlı geopolimer kompozitlerin işlenebilirliği, akışa karşı daha yüksek kayma direnci nedeniyle lif içeriği artırılarak azaltılmıştır. Matris içine MÇL eklenmesi, kompozitin kuruma büzülmesini kontrol etmiş ve %2 MÇL ve üzerinde en aza indirmiştir (Ranjbar ve diğerleri, 2016).

Matrisin büzülmesi, fiber-matris bağının ve kenetleme basıncının artmasına neden olmuş; böylece kompozitlerin mekanik özelliklerinin gelişimini etkilemiştir. Büzülme, erken yaşlarda matrisin mekanik gelişimi ile çakıştığı için, büzülmenin etkisi, güçlendirilmiş çimentolu kompozitlerin malzeme modellerine nadiren dahil edilmiş, ancak önemli bir rol oynamıştır ve dikkate alınması gerekmektedir.

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1 Kullanılan Malzemeler

2.1.1 Beyaz Çimento

Bu çalışmada geleneksel Portland Çimentosu yerine Beyaz Çimento kullanılmıştır. Beyaz Çimento, Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş, tarafından bu çalışma için ana bağlayıcı olarak sağlanmıştır. Beyaz Çimento'nun en önemli özelliklerinden biri de doğal olarak beyaz olmasıdır. Uygun hammadde seçimi yapılırken bu durum zaten göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.1 Beyaz Çimento

Çizelge 2.1 Beyaz çimento kimyasal bileşim

Kimyasal bileşim %	Fe ₂ O ₃	CaO	Serbest CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	LOI	SO ₃
Beyaz Çimento	0,26	64.04	1.6	21.6	4.05	0.3	0,35	1.3	3.2	3.3

2.1.2 Kum

Kullanılan kum türü standart kum olup kombinasyonlarda kullanılan kumun özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.2 Kum için standart sınır değerler ve derecelendirme

Özellikler	Tane boyutu (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1	1,6	20
Kalan %	99	87	72	34	6	0
Sınır %	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0

2.1.3 Seramik Atık Tozu

Seramik atık tozunun özellikleri aşağıdaki tabloda kısaca verilmiştir.

Çizelge 2.3 Seramik atık tozunun kimyasal bileşimleri

Kimyasal bileşimleri %	Fe ₂ O ₃	CaO	Serbest CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	LOI	SO ₃
Seramik Atık	7.11	4.65	-	65.44	15.45	0.8	2.15	1.28	3.06	0,06

2.1.4 Lifler

Elde edilen matris içinde aynı hacim fraksiyonuna sahip üç farklı lif türü bu çalışmaya dâhil edilmiş, ilgili liflerin özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.4 Liflerin özellikleri

Tür	Çap/genişlik (mm veya µm)	Uzunluk (mm)	Nominal çekme dayanımı (MPa)	En-boy oranı	Özgül ağırlık (gr/cm ³)
Bazalt lif	20 mikron	12	4100	600	2.73
Kancalı uçlu çelik lif	0,75	30	2000	80	7.80
Pirinç kaplı çelik lif	0.17	6	2100	35.29	7.85



Şekil 2.2 Bazalt lif



Şekil 2.3 Bakır kaplı çelik Lif



Şekil 2.4 Kancalı uçlu çelik lif

2.2 Yöntem

Bu çalışma için 40x40x160 mm prizmatik kalıplar ve 50 mm kenarlı kübik kalıplar seçilmiştir. Önce çimento, seramik tozu, kum ve lifler karıştırılmış, ardından bunlara süperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Homojen bir karışım elde etmek için mikser kullanılmıştır. Harç kalıplara yerleştirildikten sonra vibrasyonlu makine kullanılarak, kalan hava ortadan kaldırılmış ve böylece matristeki hava boşlukları azaltılmıştır. Su/çimento oranı 0,45 ve bağlayıcı/kum oranı 1:2,75 olup, numuneler su kürü sistemi ile 28 ve 90 gün boyunca kürlenmiştir.

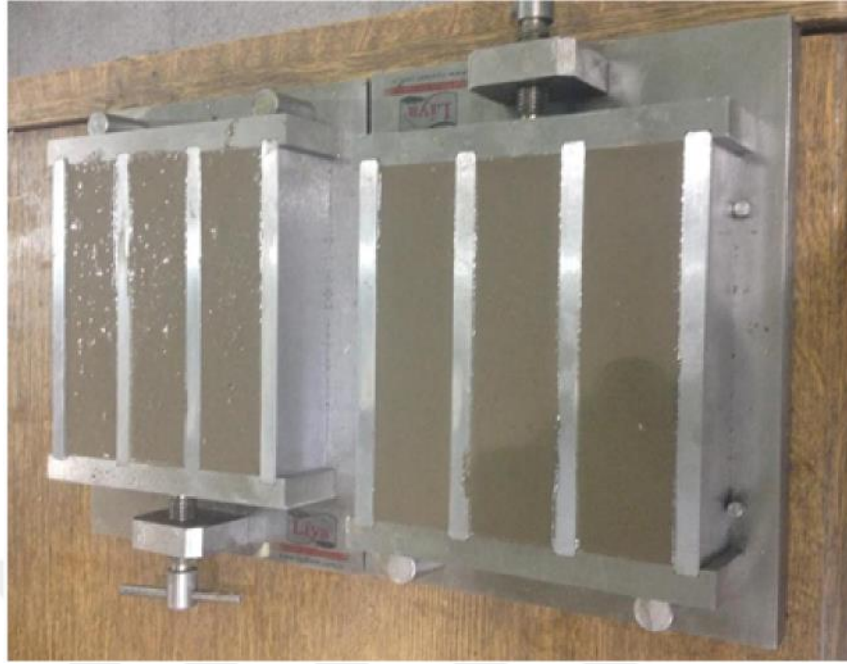
Çizelge 2.5 Genel karışımların detayları

su/çimento oranı	0.45
Bağlayıcı/agrega oranı	1:2.75
Lif yüzdesi	%0,4
Kürleme tipi	su kürü

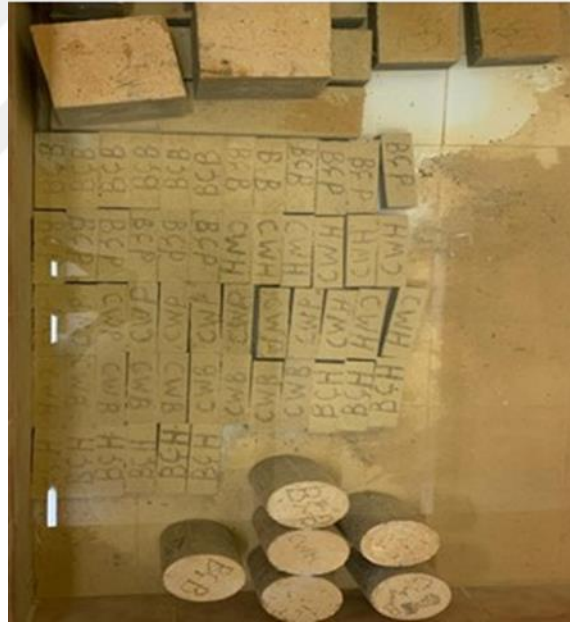
Çizelge 2.6 Numunelerin karışım oranları

Karışım Kimliği	Çimento (g)	Kum (gr)	Seramik atığı (gr)	Su (gr)	Süper akışkanlaştırıcı (g)	LİF (%)
WC	450	1237.5	-	202.5	30	-
CW5	427.5	1237.5	22.5	202.5	30	-
CW10	405	1237.5	45	202.5	30	-
CW15	382.5	1237.5	67.5	202.5	30	-
WCCC	450	1237.5	-	202.5	30	Pirinç kaplı çelik lif
WCB	450	1237.5	-	202.5	30	Bazalt lif
WCHE	450	1237.5	-	202.5	30	Kancalı uçlu çelik lif
CW5CC	427.5	1237.5	22.5	202.5	30	Pirinç kaplı çelik lif
CW5B	405	1237.5	45	202.5	30	Bazalt lif
CW5HE	382.5	1237.5	67.5	202.5	30	Kancalı uçlu çelik lif

Üretilen harç serileri bileşenlerinde, bu bölgelere göre dört lifsiz karışım, iki pirinç kaplı çelik, iki kancalı uçlu çelik ve iki bazalt lif esaslı karışım olmak üzere toplam 10 karışım üzerinde inceleme yapılmıştır. Karışımların sembolleri, bunlarda kullanılan ana malzeme ve lif türlerine göre ele alınmıştır. Örneğin, CW5B, %5 seramik atığı ikame edilerek üretilen harcı ve bazalt lifli seriyi ifade etmektedir. Lifli karışımların, seramik atığının %5'lik bir kısmının değiştirilmesi ile üretildiğine dikkat edilmektedir.



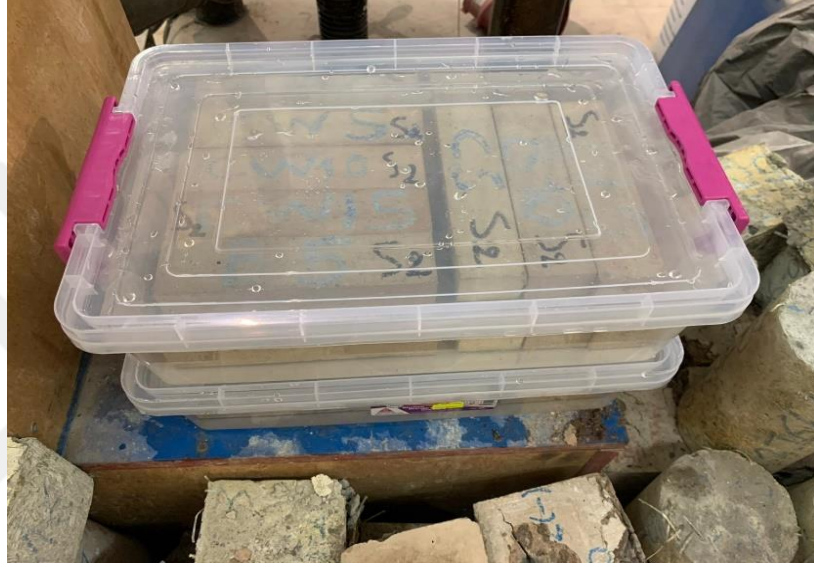
Şekil 2.5 Kalıplama işlemi



Şekil 2.6 Su kürü numuneleri

2.3 Sulfat Testi

90 gün kürlendikten sonra numunelerin 105°C'de kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Sulfat atak testi açısından numuneler 90 gün boyunca 30 günde bir çözelti değiştirilmek üzere %5'lik sodyum sulfat maruz bırakılmıştır. Sulfat öncesi ve sonrası etkileri birleştirmek için bu süreden sonra ağırlık, basınç ve eğilme dayanımı ölçülmüştür.



Şekil 2.7 Sulfat testindeki numuneler

2.4 Yüksek Sıcaklık Testi

Numuneler 90 gün kürlendikten sonra 105°C'de etüv kuru ağırlığı ölçülmüş ve ardından yüksek sıcaklık testine tabi tutulmuştur. Her hedef sıcaklığından sonraki ağırlık, basınç ve eğilme dayanım değerleri, üç farklı (250, 500 ve 750 °C) termal testten önceki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Fırında sıcaklık artış hızı, gerekli sıcaklığa ulaşılan kadar 5°C/dakika olarak ayarlanmıştır. Numuneler daha sonra bir saat boyunca yukarıda belirtilen hedef sıcaklıkta tutulmuştur. Son olarak, sonuçlar üzerinde etkisi olabilecek termal şoktan korunmak için kapağı açık bir şekilde numuneler fırında tutulmuştur.



Şekil 2.8 Yüksek sıcaklık testi sonrası numuneler

2.5 Donma-çözülme testi

90 günlük numunelerin ağırlıkları belirlendikten sonra bu test 90 gün sürmüştür. Donma-çözülme testi 12 saat -20°C 'de ve 12 saat $+20^{\circ}\text{C}$ 'de olacak şekilde uygulanmıştır. Test sonrası basınç ve eğilme dayanımları ve ağırlıklar test öncesi durumla kıyaslanmıştır.



Şekil 2.9 Donma-çözülme testinden sonra numuneler

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

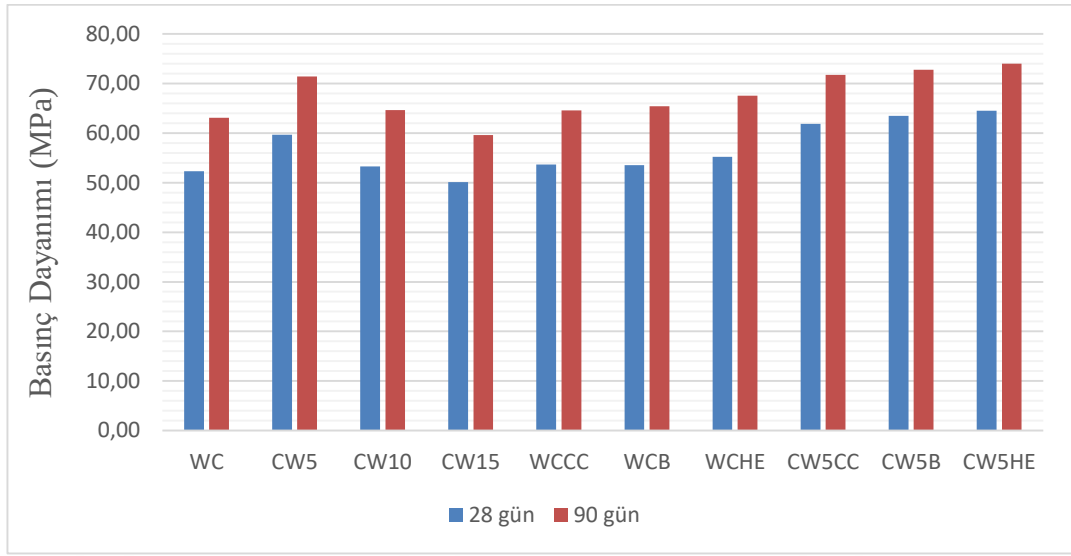
BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Durabilite Testleri Öncesi Sonuçlar

Aşağıda Tablo 3.1’de ve Şekil 3.1’de numunelerin durabilite testleri öncesi basınç dayanımları gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 28 ve 90 gün sonrası basınç dayanımı sonuçları

Numuneler	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	90 günlük basınç dayanımı (MPa)
WC	52.31	63.11
CW5	59.66	71.43
CW10	53.29	64.63
CW15	50.14	59.64
WCCC	53.68	64.61
WCB	53.53	65.42
WCHE	55.25	67.54
CW5CC	61.87	71.79
CW5B	63.48	72.81
CW5HE	64.53	74.02



Şekil 3.1 Basınç dayanımı test sonuçları

Sadece Beyaz Çimento ile hazırlanan numuneler ile Beyaz Çimento ve seramik tozu ve lif ilavesi ile hazırlanan numuneler üzerinde herhangi bir dayanıklılık testi uygulanmadan önce yapılan basınç dayanımı testlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, %5 oranında seramik tozu ilave edildikten sonra basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Beyaz Çimentoyla %10 seramik atık tozu ikame edildiğinde ise %5 ikame oranına göre azalış görülmüştür. Çimento kullanımının azaltılması basınç dayanımında düşüşe neden olurken yine de sonuçlar sadece Beyaz Çimento ile üretilen harçlara göre daha yüksek çıkmıştır (Kanaan ve El-Dieb, 2016).

%15 seramik tozu içeren numunele test edildiğinde ise, %10, %5 ve saf Beyaz Çimento içeren numunelere göre daha düşük basınç dayanımı düşüşüne sahip olmuştur. Çünkü seramik atık tozunun fazla dozu, hidrasyon sürecine katılamamıştır. Çimento karışımı numunenin iç yapısında birikerek bileşimin homojenliğinin azalmasına ve bu etki numunenin mekanik özelliklerinin azalmasına neden olmuştur.

Seramik tozunun puzolanik reaksiyonunun çok önemli olduğu bu durumda, seramik tozu gözenekleri doldurarak daha pürüzsüz bir yüzey oluşturmuştur. Karbon-hidrojen (CH) gibi çimento hidrasyon ürünleri ve kalsiyum silikat hidratlar (CSH) jeli, seramik tozu daha fazla miktarda kullanıldığında azalmıştır. Seramik tozu ile etkileşim, CH'deki azalma ile düşüş göstermiştir. Dayanım açısından sonuçlar bu durumdan dolayı olumsuz etkilenmiştir.

Puzolanik reaksiyon sırasında, atık seramiklerde bulunan silisyum ve alüminyum bileşikleri, ilave kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmiştir. Bu jel, çimento hidrasyon işlemi sırasında oluşan hidratasyon ürünlerine benzemiş ve betonun dayanımına ve dayanıklılığına katkıda bulunmuştur.

CSH jelinin oluşumu, beton matristeki gözenek boşluklarının doldurulmasına, yoğunluğunun arttırılmasına ve geçirgenliğin azaltılmasına yardımcı olur. Bu da betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini geliştirir. Daha yoğun ve daha geçirimsiz beton ayrıca kimyasal saldırıya, sülfat saldırısına ve klorür girişine karşı direnç dahil olmak üzere gelişmiş dayanıklılık özellikleri sergiler.

Atık seramiklerin puzolanik aktivitesi, ek hidratasyon ürünleri sağlayarak ve malzemenin mikro yapısını iyileştirerek betonun uzun vadeli performansına katkıda bulunur. Atık seramikleri puzolanik bir malzeme olarak kullanan beton üreticileri, geleneksel çimentolu malzemelerin tüketimini en aza indirirken ürünlerinin genel kalitesini ve sürdürülebilirliğini artırabilir.

Basınç dayanımı testlerinden elde edilen sonuçlar, en yüksek performanslı kontrol numunesi ile %5 seramik tozu ikâmesi olanlar arasında karşılaştırılmıştır. Lif takviyeli kompozitlerin yapısı incelendiğinde, malzemenin basınç dayanımının biraz arttığı görülmüştür. Liflerin özellikle çatlak büyümesine karşı iyileştirme etkisi görülmüştür. Çatlaklar ara yüzeye doğru ilerledikçe, gerilim iletilir ve sonuç olarak, uygulanan basınç kuvvetine daha iyi dayanabildikleri için lifler kompozitlerin basınç performansını artırır. Küçük artışın nedeni, lif kullanım oranının minimum olması ve liflerin basınç dayanımı üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Lif uzunluğu ile basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde (Açıkgenç ve diğerleri, 2013), yüksek boy oranına sahip çelik lifler, çatlak açılmasına karşı direnç göstermiş ve basınç dayanımını artırmıştır. Buna karşılık, düşük en-boy oranına sahip çelik lifler yalnızca mikro çatlak açılmasını ve yayılmasını kontrol edebilmiştir (Biswas ve diğerleri, 2021).

En iyi sonuçların kancalı uçlu çelik lif donatı ile elde edildiği kanaatine varılmıştır. Bazalt çelik lifin yüksek yoğunluğu burada da faydalı olmuştur. Daha uzun lifler daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir, bu da boşluk miktarının azalmasına ve dolayısıyla basınç dayanımının artmasına yardımcı olmaktadır. Lifli karışımlar arasında pirinç kaplı çelik

lif, daha kısa uzunluğu nedeniyle en zayıf olanıdır (Craig ve diğerleri, 1986; Jalal ve diğerleri, 2019; Song ve Hwang, 2004).

Çalışmanın sonuçlarına göre bazalt lifinin sistematik bir performans sergilediği kanaatine varılmıştır. Lifin istenen mekanik ve fiziksel nitelikleri, bazaltın ince ve tek düze yapıdaki kristal fazları sayesinde elde edilebilmiştir. ZrO_2 , TiO_2 veya P_2O_5 gibi bir çekirdekleştirici ajanın eklenmesi, istenen mikro yapıyı üretecektir. Yine de, bazalt kayaçlarının erime süreçleri, önemli bir fayda olan doğal bir Fe_3O_4 nükleatörü sağlamaktadır (Sim ve diğerleri, 2005).

Dayanıklılık testlerinin etkilerinden önceki eğilme dayanımları sonuçları aşağıdaki Çizelge 3.2 ve şekil 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 28 ve 90 gün sonrası eğilme dayanımı sonuçları

Numuneler	28 günde eğilme dayanımı (MPa)	90 günde eğilme dayanımı (MPa)
WC	6.79	7.88
CW5	7.35	8.42
CW10	7.21	8.06
CW15	6.22	6.65
WCCC	8.32	9.21
WCB	8.58	9.64
WCHE	9.02	10.13
CW5CC	9.09	10.05
CW5B	9.76	10.52
CW5HE	9.97	10.89



Şekil 3.2 Eğilme dayanımı test sonuçları

Saf Beyaz Çimentolu numuneler üzerinde herhangi bir dayanıklılık deneyi yapılmadan önce, eğilme dayanımı deneylerinin sonuçları, numunelerin basınç dayanımı davranışını neredeyse yansıttığını, aynı nedenlerle ilişkili olduğunu ve sonuçlardaki açıklamaya netlik getirildiğini göstermektedir.

Seramik tozu ve lif katkılı Beyaz Çimento numuneleri için eğilme dayanımı sonuçlarının, %5 seramik tozu eklendikten sonra iyileştiği, ancak %5 seramik tozu ile karşılaştırıldığında %10 seramik tozu eklendikten sonra düştüğü, ancak yine de katkı maddesi içermeyen Beyaz Çimentodan biraz daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur.

Eğilme dayanımı testlerinden elde edilen sonuçlar, liflerin eğilme dayanımını daha hızlı artırdığını göstermiştir. Lifli karışımların eğilme dayanımlarını lifin tipine, uzunluğuna, yönüne ve dağılımına bağlı olarak değiştirdiği açık bir bilgidir (Açıkgenç ve diğerleri, 2013).

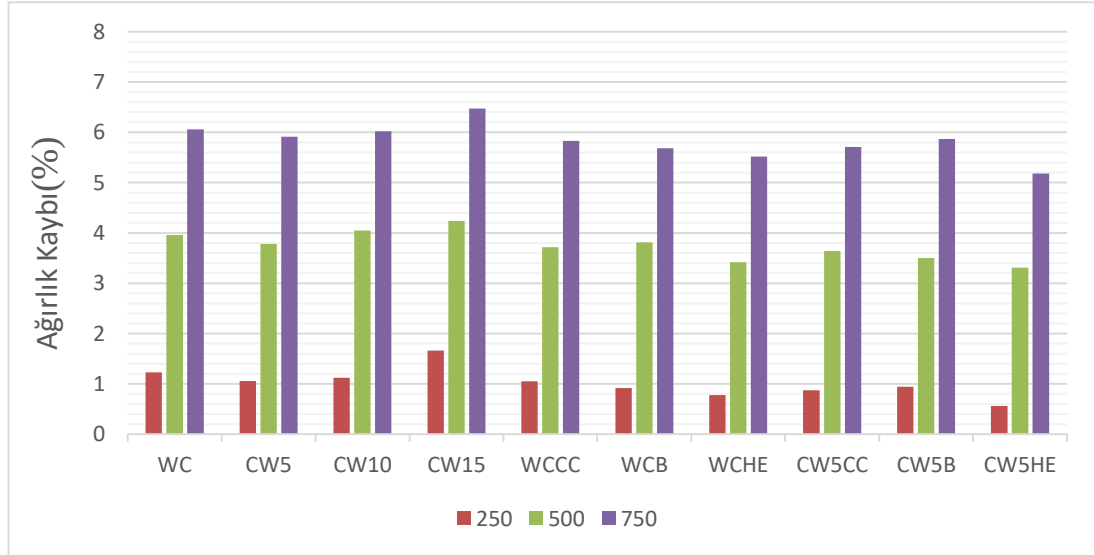
Kanca uçlu çelik liflerin uzunluğu arttıkça, lif sıyrma daha zorlu hale geldiğinden eğilme dayanımı da artmıştır. Ortalama çelik liften daha kısa olan pirinç kaplı çelik lif kullanıldığında eğilme dayanımı lifli karışımlarda en düşük değere sahip olmuştur (Açıkgenç ve diğerleri, 2013; Craig ve diğerleri, 1986; Sim ve diğerleri, 2005; Song ve Hwang, 2004).

3.2 Yüksek Sıcaklık Testi

Numunelerin yüksek sıcaklık etkisinden sonraki ağırlık kayıpları aşağıdaki Çizelge 3.3 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Yüksek sıcaklık etkisi sonrası ağırlık kayıpları

Numuneler	250°C'de ağırlık kaybı (%)	500°C'de ağırlık kaybı (%)	750°C'de ağırlık kaybı (%)
WC	1.23	3,96	6.06
CW5	1.06	3.78	5.91
CW10	1.12	4.05	6.02
CW15	1.66	4.24	6.47
WCCC	1.05	3.72	5.83
WCB	0.92	3.81	5.68
WCHE	0,78	3.42	5.52
CW5CC	0,87	3.64	5.71
CW5B	0.94	3.5	5.87
CW5HE	0,56	3.31	5.18



Şekil 3.3 Ağırlık kayıplarındaki yüksek sıcaklık etkisi

Yüksek sıcaklık nedeniyle nem içeriği buharlaştığından numunelerin ağırlık kaybetmesine neden olmuştur. Numunelerin homojen bileşim varyasyonlarına göre ağırlıkları çeşitli seviyelerde azalmıştır. Daha detaylı incelendiğinde, %5 seramik tozu içeren numunenin saf Beyaz Çimentoya göre daha az ağırlık kaybettiği, %10 seramik tozu içeren numunenin ise daha fazla ağırlık kaybettiği fark edilmiştir. En fazla ağırlık kaybı %15 seramik atık tozu kullanılan grupta görülmüştür.

Daha önce de belirtildiği gibi, ilave yüzdesinin numunenin iç bileşimi üzerinde çok önemli bir etkisi vardır; çimento karışımında hidratasyon işlemine katılan ve karışımındaki boşlukları dolduran ince taneli seramik atık partikülleri homojen bileşimi artırması açısından dayanıklılık özelliklerini geliştirmekte, yüksek olması nedeniyle daha az boşluk ve daha az ağırlık kaybına yol açmaktadır. Sıcaklık testi karşısında, %5 ve %10 seramik atık tozu ilavesinde daha iyi bir performans gösterilmiştir.

Öte yandan seramik atık tozunun %15 ilavesi ise daha az homojen ve daha çok boşluk oluşmasına neden olacağından dayanıklılık özelliklerini azaltacaktır.

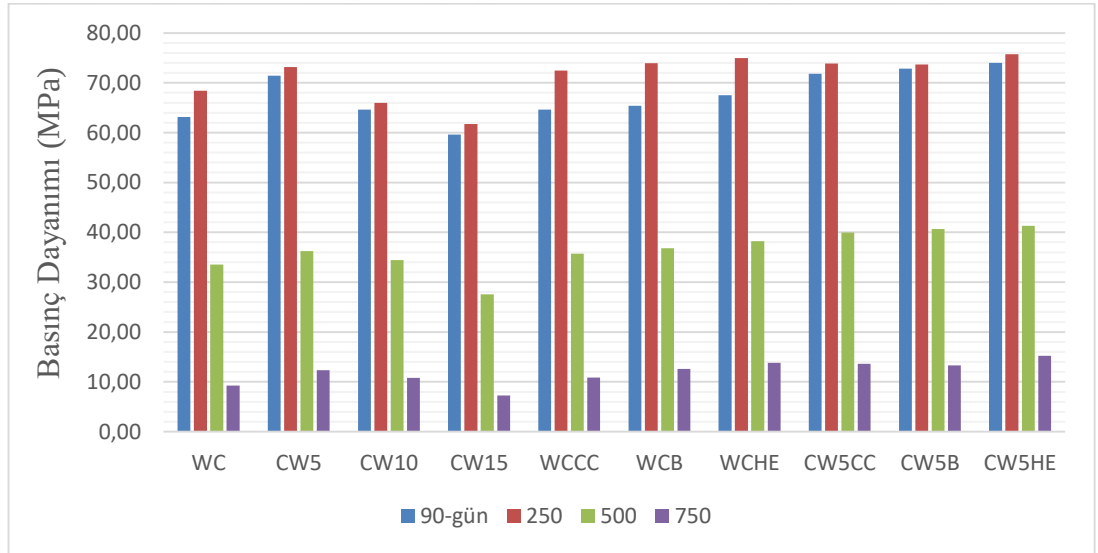
Lif takviyeli Beyaz Çimento numuneleri, lifsiz muadillerine göre daha az ağırlık kaybına sahiptir. Beyaz Çimento ve pirinç kaplı çelik lifin kombinasyonu, lifli numuneler arasında en fazla ağırlık azalmasıyla sonuçlanmıştır. Ardından Beyaz Çimento ve bazalt çelik lif karışımı gelmiş; Beyaz Çimento ve kancalı uçlu çelik lifin kombinasyonu, en az miktarda ağırlık azalması göstermiştir.

Numuneler, üç farklı tipte lif, Beyaz Çimento ve %5 seramik tozu kombinasyonu ile takviye edildikten sonra çok daha iyi gelişmiştir. Ağırlık kaybı en düşük %5'lik kancalı uçlu çelik lif karışımlı seramik tozunda olmuştur. Ayrıca ağırlık kaybı %5 seramik atık tozlu ve pirinç kaplı çelik lif karışımına göre, %5 seramik atık tozlu ve bazalt çelik lif numunesinde daha fazla olmuştur.

Numunelerin yüksek sıcaklık etkilerinden önceki ve sonraki basınç dayanımları Çizelge 3.4 ve Şekil 3.4 'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.4 Yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimleri

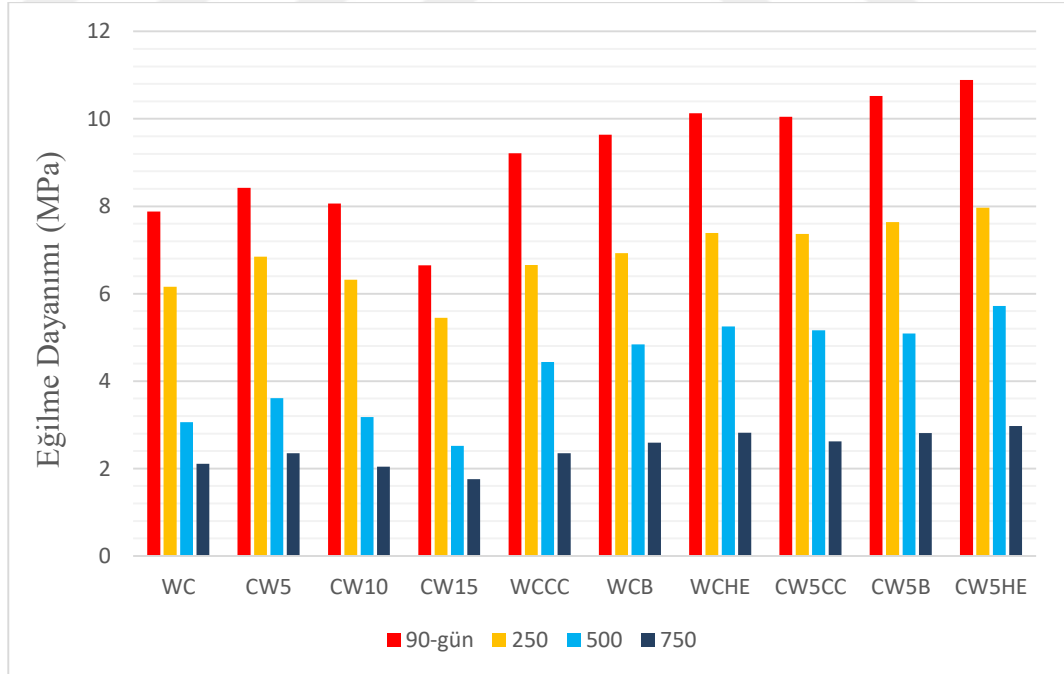
Numuneler	Yüksek sıcaklık etkisinden önce (MPa)	250°C yüksek sıcaklık sonrası (MPa)	500°C yüksek sıcaklık sonrası (MPa)	750°C yüksek sıcaklık sonrası (MPa)
WC	63.11	68.43	33.55	9.25
CW5	71.43	73.15	36.26	12.32
CW10	64.63	65.94	34.41	10.78
CW15	59.64	61.76	27.57	7.27
WCCC	64.61	72.47	35.72	10.84
WCB	65.42	73.95	36.83	12.57
WCHE	67.54	74.96	38.25	13.84
CW5CC	71.79	73.84	39.97	13.63
CW5B	72.81	73.67	40.64	13.29
CW5HE	74.02	75.74	41.29	15.25



Şekil 3.4 Basınç dayanımı üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi

Çizelge 3.5 Yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimleri

Numuneler	Yüksek sıcaklık etkisinden önce (MPa)	250 ° C yüksek sıcaklık sonrası (MPa)	500 ° C yüksek sıcaklık sonrası (MPa)	750 ° C yüksek sıcaklık sonrası (MPa)
WC	7.88	6.16	3.06	2.11
CW5	8.42	6.85	3.61	2.35
CW10	8.06	6.32	3.18	2.04
CW15	6.65	5.45	2.52	1.76
WCCC	9.21	6.66	4.44	2.35
WCB	9.64	6.93	4.84	2,59
WCHE	10.13	7.39	5.25	2.82
CW5CC	10.05	7.37	5.16	2.62
CW5B	10.52	7.64	5.09	2.81
CW5HE	10.89	7.97	5.72	2,97



Şekil 3.5 Eğilme dayanımı üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi

250°C'deki sıcaklık, eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmaya başlamıştır ve bu etki 500 ve 750 °C'de daha da artmıştır. Yüksek sıcaklıkların eğilme dayanımı üzerinde, basınç dayanımından daha büyük bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Bunun nedeni, çekme dayanımının numuneler üzerindeki etkisinin, eğilme dayanımı testinin sonuçları üzerinde daha büyük etkiye sahip olmasıdır. Bu etki nedeniyle numuneler, sonunda kırılmalarına neden olacak mikroskobik çatlaklar geliştirecektir. Aşırı ısınma, bileşimin kimyasal reaksiyonunu etkilemekte, ancak yüksek sıcaklıkta eğilme dayanımı testi, basınç dayanımı testinden daha etkili olmaktadır (Vijai ve diğerleri, 2010).

Saf Beyaz Çimento ile karşılaştırıldığında, %5 seramik toz katkılı numuneler önemli ölçüde daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Eğilme dayanımı, %10 seramik tozu eklenmiş durumda saf Beyaz Çimentodan daha düşüktür. Saf Beyaz Çimento ve diğer tüm numunelerle kıyaslandığında %15 seramik tozu katkılı numunenin eğilme dayanımı çok daha düşüktür.

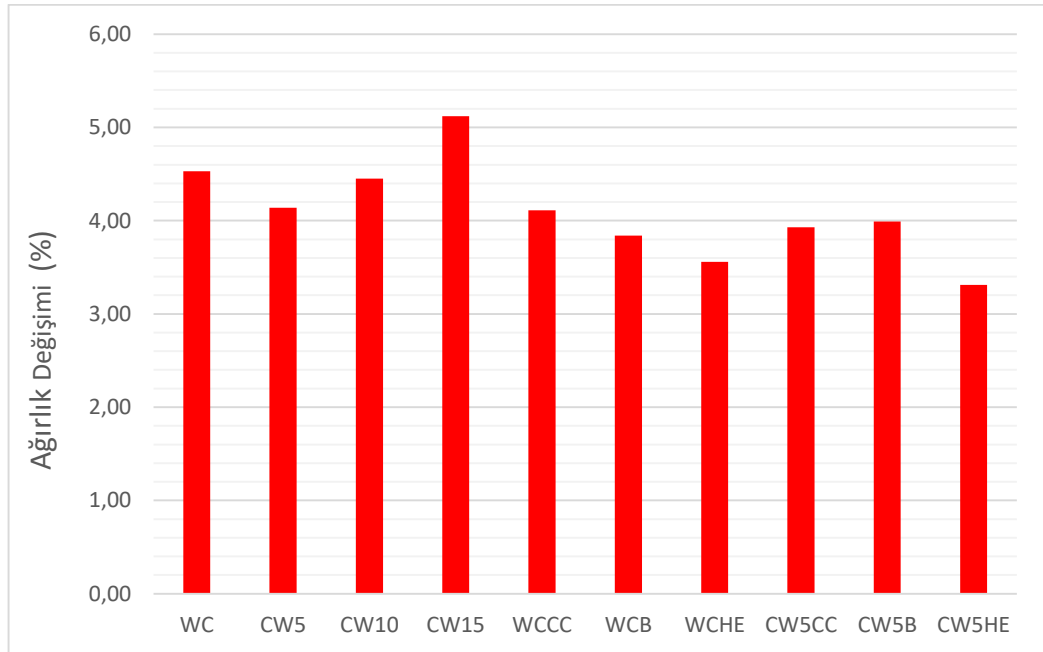
Beyaz çimentonun eğilme dayanımının, lif ilavesiyle büyük ölçüde arttığı gösterilmiştir. Saf Beyaz Çimento ve diğer lif katkılı çeşitlerle karşılaştırıldığında, kancalı uçlu çelik lif ilavesinin eğilme dayanımı çok daha fazla olduğu görülmüştür. Daha sonrasında, eğilme dayanımı açısından bazalt lifli seri ve son olarak pirinç kaplı çelik lifli seri gelmektedir.

3.3 Sülfat Etkisi

Sülfat testi sonrası (90 gün sonra) numunelerin ağırlık değişimleri aşağıdaki Çizelge 3.6 ve Şekil 3.6 'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6 Sülfat etkisi sonrası ağırlık değişimleri

Numuneler	3 ay (%)
WC	4.53
CW5	4.14
CW10	4.45
CW15	5.12
WCCC	4.11
WCB	3.84
WCHE	3,56
CW5CC	3.93
CW5B	3,99
CW5HE	3.31



Şekil 3.6 Sülfat testinden sonra ağırlık değişimleri

Numunelerin, bir sülfat çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra ağırlıklarının daha önce elde edilenlere göre arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, çözeltinin numunelerin

boşluklarını doldurmasıdır. Sonuç olarak, numuneler ağırlaşmıştır. Sülfat testi öncesi numunelerin etüvde kurutulmasıyla da ağırlık artışı sağlanmıştır. İkâme oranlarının bu davranışı etkilediği belirlenmekle birlikte, numune ağırlığındaki artışta değişiklik görülmüştür. Beyaz Çimento serisine göre %5 seramik tozu ilave edildiğinde ağırlık değişiminin saf Beyaz Çimentoya göre daha az, %10 seramik tozu ilave edildiğinde daha fazla arttığını ve en yüksek ağırlık değişiminin %15 seramik tozu ikâme edildiğinde meydana geldiği görülmüştür.

Lif takviyeli Beyaz Çimento numunelerinde, saf Beyaz Çimento numunelerine kıyasla daha az ağırlık kaybı görülmüştür. Burada, seramik tozunun ikâme edilemediği lifli seriler arasında, pirinç kaplı çelik lif karışımı en büyük ağırlık değişimini göstermiş, bunu bazalt lif kombinasyonu izlemiş ve son olarak kancalı uçlu çelik lif karışımı en az ağırlık değişimini göstermiştir.

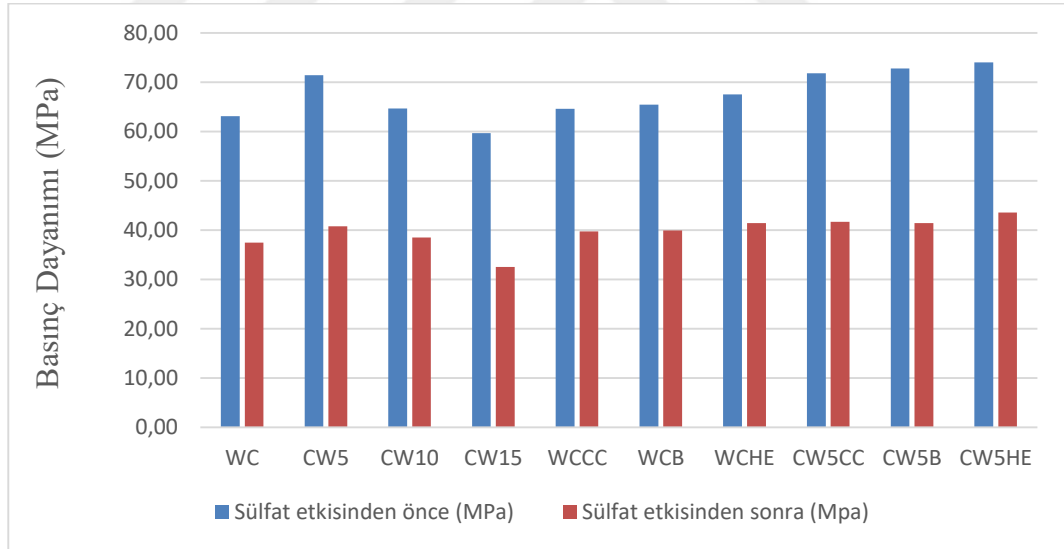
Numuneler, Beyaz Çimento ile %5 seramik tozu ve üç farklı tipte lifin birleştirilmesiyle daha da zenginleştirilmiştir. %5 seramik tozu ve kancalı uçlu çelik lif ile yapılan numune, genel olarak en az ağırlık değişimine sahiptir. Pirinç kaplı çelik lifler ve seramik tozu karışımına kıyasla, %5 seramik tozu ve bazalt lifi karışımında gösterilen ağırlık artışı daha düşük olmuştur.

Tüm ağırlık değişim sonuçları, numunelerin homojen bileşimini ve bunun boşluk dağılımına ve miktarına yansımaları gösterir, daha önce de belirtildiği gibi, en iyi numuneler en az ağırlık değişimini gösterir.

Numunelerin sülfat testi öncesi ve sonrası (90 gün sonra) basınç dayanımları Çizelge 3.7 ve Şekil 3.7 'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.7 Sülfat etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimleri

Numuneler	Basınç Dayanımı	
	Sülfat etkisinden önce (MPa)	Sülfat etkisinden sonra (MPa)
WC	63.11	37.42
CW5	71.43	40.76
CW10	64.63	38.49
CW15	59.64	32.52
WCCC	64.61	39.75
WCB	65.42	39.91
WCHE	67.54	41.39
CW5CC	71.79	41.67
CW5B	72.81	41.38
CW5HE	74.02	43.56



Şekil 3.7 Sülfatın basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Veriler daha kesin olarak analiz edildiğinde, sülfatın etkisi uygulanmadan önce basınç dayanımında zayıf performans gösteren numunelerin aynı zamanda sülfat çözeltisinin bir sonucu olarak en büyük ağırlık değişimine sahip olduğu bulunmuştur. İyi performans gösteren basınç dayanımı numuneleri en az ağırlık değişimi göstermiştir.

Basınç dayanımı için en yüksek sonuc veren ikâmeli numunelerde daha az ağırlık kaybı ve daha fazla homojenlik olmuştur.

Basınç dayanımı sonuçları, Beyaz Çimento ve %5 seramik tozu karışımının, saf Beyaz Çimento karışımına göre sülfat etkilerine karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir. Herhangi bir katkı maddesi içermeyen Beyaz Çimento karışımına göre %10 seramik tozu ile yapılan numunenin basınç dayanımı daha düşük, %15 seramik tozu ile yapılan numunenin basınç dayanımı ise en düşük olmuştur.

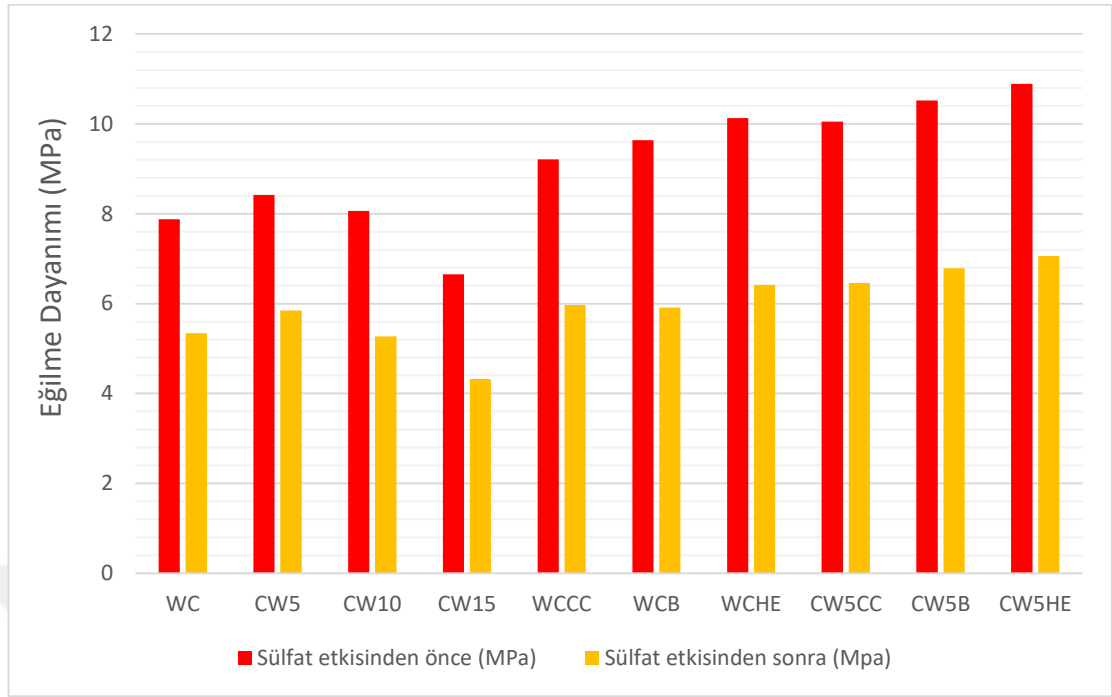
Beyaz Çimento karışımına lifler eklendiğinde malzemenin basınç dayanımı artmıştır. Beyaz Çimentoya kancalı uçlu çelik liflerin eklenmesi, malzemenin basınç dayanımını, bazalt lifleri ve pirinç kaplı çelik lif dahil, test edilen diğer tüm lif türlerinden daha fazla artırmıştır.

Basınç dayanımı en yüksek olan numuneler, daha önce %5 oranında seramik tozu uygulanmış numunelere lif ilave edilen numunelerdir. Kancalı uçlu çelik lif numunesi, bazalt lif ve pirinç kaplı çelik lif numunesinden sonra en iyi performansı göstermiştir.

Numunelerin sülfat testi öncesi ve sonrası (90 gün sonra) eğilme dayanımları Çizelge 3.8 ve Şekil 3.8 'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8 Sülfat etkisi öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimleri

Numuneler	Eğilme dayanımı	
	Sülfat etkisinden önce (MPa)	Sülfat etkisinden sonra (MPa)
WC	7.88	5.34
CW5	8.42	5.85
CW10	8.06	5.27
CW15	6.65	4.32
WCCC	9.21	5.97
WCB	9.64	5.91
WCHE	10.13	6.42
CW5CC	10.05	6.46
CW5B	10.52	6.79
CW5HE	10.89	7.06



Şekil 3.8 Sülfatın eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

Verilerin analizi yoluyla, sülfat çözeltisinin uygulanmasından önce eğilme dayanımında zayıf performans gösteren numunelerin, aynı zamanda sülfat çözeltisinin bir sonucu olarak en büyük ağırlık kaybına sahip olan numuneler olduğu görülmüştür. En iyi eğilme dayanımı performansına sahip numuneler aynı zamanda en az ağırlık değişimi göstermiştir. Eğilme dayanımı açısından değiştirilen numuneler arasında en iyi sonucu veren, gözenekleri doldurmak için daha az çözelti gerektiren ve daha küçük bir ağırlık kaybıyla sonuçlanan daha üniform ve gözenekli numunelerdir.

Sülfat etkisinin eğilme dayanımı sonuçları, Beyaz Çimento ve %5 seramik tozu kombinasyonunun, saf Beyaz Çimento karışımına göre daha güçlü bir dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Eğilme dayanımı %15 seramik tozu katılarak yapılan numunede ise en düşük sonuçlar elde edilmiştir.

Lifler Beyaz Çimento karışımına eklendikten sonra, malzemenin eğilme dayanımı arttırmıştır. Beyaz Çimentonun farklı lif katkılarıyla eğilme dayanımı karşılaştırıldığında, kancalı uçlu çelik lif üstündür, bunu bazalt lifi ve pirinç kaplı çelik lif takip etmiştir.

Diğer numunelere göre eğilme dayanımı, %5 seramik tozu katılmış olanlara lif ilave edildiğinde artmış, kancalı uçlu çelik lif en iyi performansı göstermiştir. Pirinç kaplı çelik lif numunesi ise en kötü performansı göstermiştir. Bu analizler, eğilme ve basınç

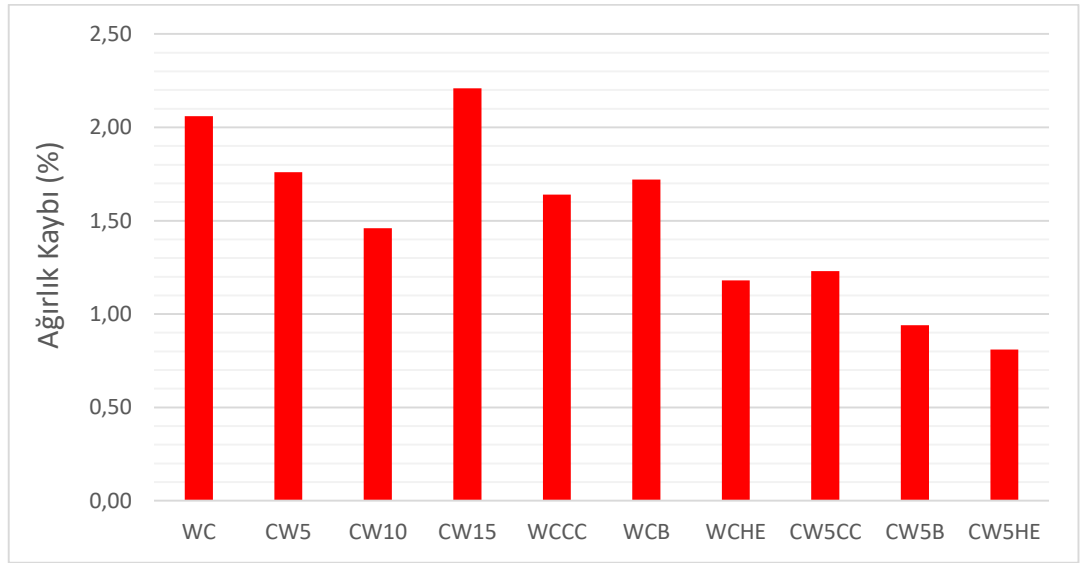
dayanımları arasında bir paralellik olduğunu göstermiştir. Sodyum sülfatın gözenekler üzerindeki etkisi, etrenjit ve jips oluşumuna neden olur, bu da malzemenin çatlamasına ve zayıflamasında etkili olmaktadır (Bakharev, 2005; Thokchom ve diğerleri, 2010).

3.4 Donma-Çözülme Etkisi

Numunelerin donma-çözülme etkisinden sonraki ağırlık kayıpları Çizelge 3.9 ve Şekil 3.9 'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 Donma-çözülme etkisi sonrası ağırlık kayıpları

Numuneler	Ağırlık kaybı (%)
WC	2.06
CW5	1.46
CW10	1.76
CW15	2.21
WCCC	1.64
WCB	1.72
WCHE	1.18
CW5CC	1.23
CW5B	0.94
CW5HE	0,81



Şekil 3.9 Ağırlık kaybında donma-çözülme etkisi

Donma-çözülme testi uygulanan numunelerin ağırlıkları azalmış; düşük sıcaklıklar, karışımın bileşimindeki kimyasal reaksiyonu kesintiye uğratmıştır. Donma noktası ayrıca mevcut nemi donduracağından ve numuneler için bileşimin homojenliğini bozacağından, aynı zamanda basınç ve eğilme dayanımında bir düşüşe neden olmuştur. Bununla birlikte, ağırlık kaybı miktarı numuneler içinde homojenlik derecelerine göre değişmiştir.

Herhangi bir ilave bileşim olmaksızın, %5 seramik tozu numunesinin, Beyaz Çimento serisinden daha az ağırlık kaybına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, %10 seramik tozu karışımı, saf Beyaz Çimento numunesinden daha fazla ağırlık kaybına sahiptir. Daha düşük direnç ve daha yüksek gözeneklilik nedeniyle en yüksek ağırlık kaybı sonuçları %15 seramik tozu ile görülmüştür (Aygörmez ve diğerleri, 2020).

Lifsiz Beyaz Çimentolu numuneler ile karşılaştırıldığında, Beyaz Çimento ve lifli numunelerdeki ağırlık kaybı önemli ölçüde daha düşüktür. Pirinç kaplı çelik lif ve bazalt lifli numunelerdeki ağırlık kaybı, Beyaz Çimento ve lifli numuneler arasında en fazla olmuştur. Kancalı uçlu çelik liflerin kombinasyonu en az miktarda ağırlık kaybına sahip olmuştur.

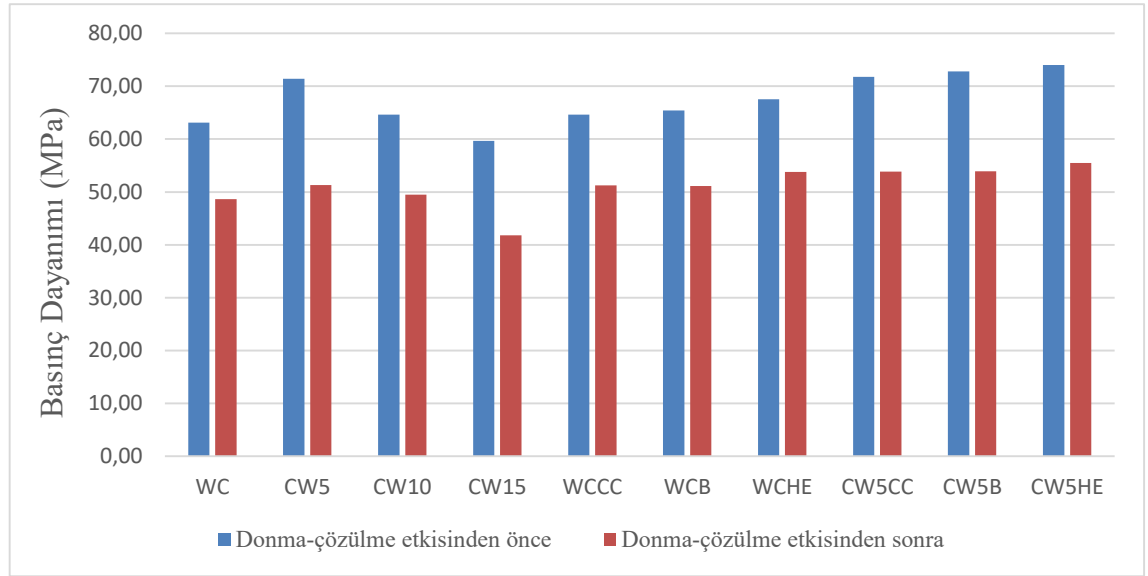
%5 seramik tozu ve üç tip lif ile harmanlanmış Beyaz Çimento, numuneleri önemli ölçüde geliştirmiştir. Diğer kombinasyonlarla karşılaştırıldığında, en az ağırlığı %5 seramik atığı tozlu ve kancalı uçlu çelik lifli numunenin kaybettiği görülmüştür. Daha sonra bazalt lifli ve %5 seramik tozlu karışımı gelmiş ve son olarak pirinç kaplı çelik lifli

ve %5 seramik tozlu karışım lifli ve seramik tozlu numuneler arasında en büyük ağırlık azalmasını göstermiştir (Vijai ve diğerleri, 2010).

Numunelerin donma-çözülme etkileri öncesi ve sonrası basınç dayanımları Çizelge 3.10 ve Tablo 3.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.10 Donma-çözülme etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimleri

Numuneler	Basınç Dayanımı (MPa)	
	Donma-çözülme etkisinden önce	Donma-çözülme etkisinden sonra
WC	63.11	48.62
CW5	71.43	51.31
CW10	64.63	49.46
CW15	59.64	41.82
WCCC	64.61	51.23
WCB	65.42	51.12
WCHE	67.54	53.78
CW5CC	71.79	53.87
CW5B	72.81	53.92
CW5HE	74.02	55.47



Şekil 3.10 Basınç dayanımı üzerindeki donma-çözülme etkisi

Karışımın bileşimindeki kimyasal reaksiyon, donma sıcaklığı ile bastırılır ve basınç dayanımında azalmaya yol açar. Numuneler için nem içeriğinin donmasına sebep olan

donma sıcaklığı nedeniyle bileşim tekdüzeliğinde bir kayıp vardır. Bununla birlikte, basınç dayanımı için sonuçlar, numunenin homojenlik derecesine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Bunun nedeni gözeneklilik artarken direncin azalmasıdır (Aygörmez ve diğerleri, 2020).

%5 seramik tozu ve kancalı uçlu çelik lifli, en yüksek basınç ve eğilme dayanımı değerlerine sahipken, Beyaz Çimento ve %15 seramik tozlu numune en düşük değerleri vermiştir.

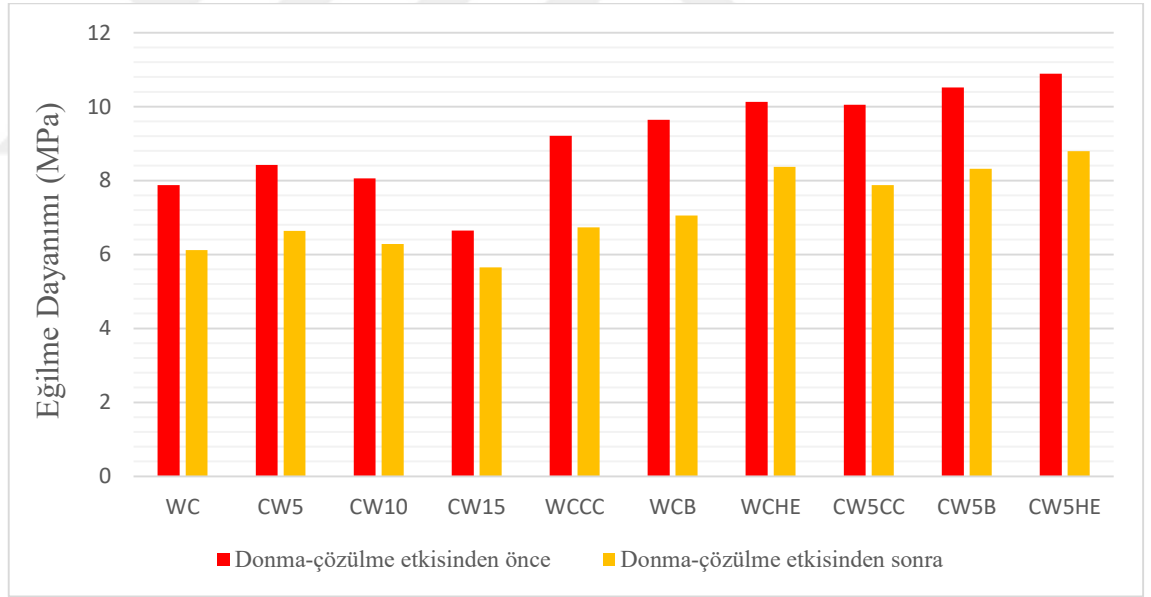
Basınç dayanımını arttırmak için Beyaz Çimento, %5 seramik tozu ile karıştırıldığında elde edilen numuneler katkısız numunelerden daha iyi performans göstermiştir. Beyaz çimentoya %10 seramik tozu ilave edildiğinde katkısız çimentoya göre basınç dayanımlarında azalma olduğu bildirilmiştir. Hem Beyaz Çimentolu hem de diğer numunelerle karşılaştırıldığında, %15 seramik tozu ilavesi basınç dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır.

Beyaz Çimentoya lifler ilave edildiğinde basınç dayanımı artar. Kancalı uçlu çelik lif ilavesinin basınç dayanımı, saf Beyaz Çimento ve diğer lif ilaveli numunelerden daha yüksektir. Basınç dayanımını sırasıyla bazalt lifli seri ve pirinç kaplı çelik lifli seri takip eder. Beyaz çimentonun %5 seramik tozu ve farklı liflerle takviye edilmesinden sonra kancalı uçlu çelik lifli numunenin basınç dayanımı performansı açısından en iyi seri olduğu görülmüştür.

Numunelerin donma-çözülme etkilerinden önceki ve sonraki eğilme dayanımları Çizelge 3.11 ve Şekil 3.11'de gösterilmektedir.

Çizgele 3.11 Donma-çözölme etkisi öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değışimleri

Numuneler	Eğilme Dayanımı (MPa)	
	Donma-çözölme etkisinden önce	Donma-çözölme etkisinden sonra
WC	7.88	6.12
CW5	8.42	6.64
CW10	8.06	6.28
CW15	6.65	5.65
WCCC	9.21	6.73
WCB	9.64	7.05
WCHE	10.13	8.37
CW5CC	10.05	7.88
CW5B	10.52	8.32
CW5HE	10.89	8.79



Şekil 3.11 Eğilme dayanımı üzerindeki donma-çözölme etkisi

Analiz sonuçları, eğilme dayanımında bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Numuneler donma sıcaklıklarına maruz kaldığında, içerdikleri nem donar ve normalde tutarlı olan bileşimlerini bozar. Eğilme dayanımı ölçümlerindeki tutarsızlıklar numune homojenliğine bağlanabilir ve bu durum direncin azalması ve gözenekliliğin artması olarak açıklanabilir (Aygörmez ve diğerleri, 2020).

Düz Beyaz Çimento ile karşılaştırıldığında, %5 seramik tozu ilave edilen numuneler önemli ölçüde daha yüksek eğilme dayanımına sahip olmuştur. Ayrıca, saf Beyaz Çimento ve diğer numunelerle karşılaştırıldığında, %15 seramik tozu eklendiğinde eğilme dayanımı önemli ölçüde azalmıştır. Karışıma lif eklendiğinde Beyaz Çimentolu numunenin eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Kancalı uçlu çelik lif ilaveli numunenin eğilme dayanımı, en yüksek olmuştur. Eğilme dayanımı değeri en yüksek kancalı uçlu çelik lif ve %5 seramik tozu katkılı numune serisinde, en düşük ise %15 seramik tozu katkılı Beyaz Çimento karışımında görülmüştür.



SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında çevresel ve ekonomik amaca ulaşmak için inşaat alanında kullanılan çimento miktarını azaltarak seramik atık tozunun kısmen çimento ikâmesi olarak kullanılma yeteneği test edilmiştir.

Basınç ve eğilme dayanımı, farklı ikame durumlarında test edilmiş ve ayrıca numuneler, dayanıklılığı kontrol edilmek üzere çeşitli etkilere maruz bırakılmıştır. Çalışmada aşağıda listelenen sonuçlara ulaşılmıştır:

1- Seramik atık tozunun kısmi ikâme olarak kullanılması, numunelerin performansının iyileştirilmesi açısından faydalı olmuş, pozitif etki ilave yüzdesi ile kontrol edilmiştir.

2- %5 seramik atık tozu ilavesi, test sonuçlarına yansıyan homojen bileşimde bir gelişme göstermiştir. Sadece seramik atık tozu ilavesi olan numuneler arasında en iyi sıralamayı oluşturmuş, bu basınç ve eğilmede fark edilmiştir.

3- %10 seramik atık tozu ilavesi, %5 seramik atık tozu ilavesine göre basınç ve eğilme test sonuçları açısından daha az iyileşme göstermiş, ancak sonuçlara bakıldığında %10 ilavesinin Beyaz Çimento numunesine kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür. Seramik atık tozu ilavesinin çimento tüketimini daha da azaltmak için kullanılabileceğini göstermiştir.

4- %15 oranında seramik atık tozu ilavesi homojen yapıda çok önemli bir hasara yol açmaya başlar, olumsuz etki diğer seramik atık tozu ilavelerine göre basınç ve eğilme dayanımı en düşük olan sonuçlarda açıkça görülmektedir.

5- Numunenin özelliklerini iyileştiren çelik liflerin bu artışı üç fonksiyonla sağlamıştır: Çelik liflerin özelliklerine, kullanılan çelik lifin uzunluğuna ve şekline bağlıdır. Bu parametrelere bağlı olarak, basınç ve eğilme dayanımının iyileştirilmesinde çok önemli bir etkiye sahip olan kancalı uçlu çelik lif en iyi çelik lif türü olarak kabul edilir ve bunu her ikisi de sonuçlarda nispeten farklı olan bazalt ve pirinç kaplı çelik lifler izlemiştir.

6-Termal etki, sülfat etkisi ve donma-çözülme etkisi gibi durabilite etkisine maruz bırakılan numunelerin özellikleri; basınç dayanımı ve eğilme dayanımına, ağırlık değişimine bağlı olarak kontrol edilmiştir. Uygulanan etkilerden sonra numunelerin,

dayanıklılık testlerinin etkisinden önceki davranışlarına kıyasla önemli bir değişiklik olmamıştır. Durabilite testleri öncesi daha iyi performans gösteren numuneler sonrasında da daha iyi performans göstermiştir.



KAYNAKLAR

- Abdallah, S., Fan, M., & Zhou, X. (2016). Effect of Hooked-End Steel Fibres Geometry on Pull-Out Behaviour of Ultra-High Performance Concrete. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 10(12), 1594–1599. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1128020>
- Acikgenc, M., Alyamac, K. E., & Ulucan, Z. C. (2013). *Fresh and hardened properties of steel fiber reinforced concrete produced with fibers of different lengths and diameters*.
https://www.researchgate.net/publication/267267018_Fresh_and_Hardened_Properties_of_Steel_Fiber_Reinforced_Concrete_Produced_With_Fibers_of_Different_Lengths_and_Diameters
- Ay, N., & Ünal, M. (2000). Use of waste ceramic tile in cement production. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 497–499. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00202-7)
- Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M., & Uysal, M. (2020). Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 235. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117502>
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233–1246. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.09.002>
- Bhavsar, J. K., & Panchal, V. (2022). Ceramic Waste Powder as a Partial Substitute of Fly Ash for Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(7), 1369–1387. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-07-05>
- Biswas, R. K., Bin Ahmed, F., Haque, Md. E., Provasha, A. A., Hasan, Z., Hayat, F., & Sen, D. (2021). Effects of Steel Fiber Percentage and Aspect Ratios on Fresh and

- Harden Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Applied Mechanics*, 2(3), 501–515. <https://doi.org/10.3390/APPLMECH2030028>
- Bonen, D., & Cohen, M. D. (1992). Magnesium sulfate attack on portland cement paste - II. Chemical and mineralogical analyses. *Cement and Concrete Research*, 22(4), 707–718. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90023-O](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90023-O)
- Cassar, L. (2004). Photocatalysis of cementitious materials: Clean buildings and clean air. *MRS Bulletin*, 29(5), 328–331. <https://doi.org/10.1557/mrs2004.99>
- Cassar, L., Pepe, C., Tognon, G., Guerrini, G. L., & Amadelli, R. (2003). White Cement for Architectural Concrete , Possessing Photocatalytic Properties. *11th International Congress on the Chemistry of Cement., May 2003*, 2012–2021. https://www.researchgate.net/profile/Gian-Luca-Guerrini/publication/228755640_White_cement_for_architectural_concrete_possessing_photocatalytic_properties/links/0deec52973e22c43f1000000/White-cement-for-architectural-concrete-possessing-photocatalytic-pro
- Cheng, Y., Huang, F., Li, G. L., Xu, L., & Hou, J. (2014). Test research on effects of ceramic polishing powder on carbonation and sulphate-corrosion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.023>
- Chindaprasirt, P., Nuaklong, P., Zaetang, Y., Sujumnongtokul, P., & Sata, V. (2015). Mechanical and Thermal Properties of Recycling Lightweight Pervious Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 443–450. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1563-z>
- Craig, R. J., Parr, J. A., Germain, E., Mosquera, V., & Kamilaes, S. (1986). Fiber Reinforced Beams in Torsion. *Journal Proceedings*, 83(6), 934–942. <https://doi.org/10.14359/1833>
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete.” *Cement and*

Concrete Research, 37(12), 1590–1597.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>

García-Ten, F. J., Quereda Vázquez, M. F., Gil Albalat, C., Chumillas Villalba, D., Zaera, V., & Segura Mestre, M. C. (2016). LIFE CERAM. Zero waste in ceramic tile manufacture. *Key Engineering Materials*, 663, 23–33.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.663.23>

Greener, J., Peemoeller, H., Choi, C., Holly, R., Reardon, E. J., Hansson, C. M., & Pintar, M. M. (2000). Monitoring of hydration of white cement paste with proton NMR spin-spin relaxation. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(3), 623–627.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01242.x>

Gündüz, Y., Taşkan, E., & Şahin, Y. (2016). Using hooked-end fibres on high performance steel fibre reinforced concrete. *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials II*, 1, 265–276.
<https://doi.org/10.2495/hpsm160241>

Hashimoto, K., Wasada, K., Osaki, M., Shono, E., Adachi, K., Toukai, N., Kominami, H., & Kera, Y. (2001). Photocatalytic oxidation of nitrogen oxide over titania-zeolite composite catalyst to remove nitrogen oxides in the atmosphere. *Applied Catalysis B: Environmental*, 30(3–4), 429–436. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00258-7](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00258-7)

He, C., Osbaeck, B., & Makovicky, E. (1995). Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1691–1702. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00165-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00165-4)

Higashiyama, H., Sappakittipakorn, M., Sano, M., & Yagishita, F. (2012). Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 33, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.018>

Higashiyama, H., Yagishita, F., Sano, M., & Takahashi, O. (2012). Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine

- aggregate. *Construction and Building Materials*, 26(1), 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.008>
- Huseien, G. F., Ismail, M., & Mirza, J. (2018). Influence of Curing Methods and Sodium Silicate Content on Compressive Strength and Microstructure of Multi Blend Geopolymer Mortars. *Advanced Science Letters*, 24(6), 4218–4222. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.11575>
- Jabbar, A. M., Hamood, M. J., & Mohammed, D. H. (2021). The effect of using basalt fibers compared to steel fibers on the shear behavior of ultra-high performance concrete T-beam. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00702. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00702>
- Jalal, A., Shafiq, N., & Zahid, M. (2019). Investigating the Effects of Fiber Reinforced Concrete on the Performance of End-Zone of Pre-Stressed Beams. *Materials* 2019, Vol. 12, Page 2093, 12(13), 2093. <https://doi.org/10.3390/MA12132093>
- Jenifer, J. V., & Brindha, D. (2021). Development of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete - in aspects of flexure, fracture and microstructure. *Revista de La Construcción*, 20(1), 62–90. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.1.62>
- Jiang, L., Niu, D., Yuan, L., & Fei, Q. (2015). Durability of concrete under sulfate attack exposed to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 112, 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.12.006>
- Kanaan, D. M., & EL-Dieb, A. S. (2016). Ceramic waste powder as an ingredient to sustainable concrete. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2016-Augus. <https://doi.org/10.18552/2016/scmt4s115>
- Kathirvel, P., Saraswathy, V., Karthik, S. P., & Sekar, A. S. S. (2013). Strength and Durability Properties of Quaternary Cement Concrete Made with Fly Ash, Rice Husk Ash and Limestone Powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(3), 589–598. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0331-1>

- Khaloo, A. R., & Afshari, M. (2005). Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.03.004>
- Kumar, S., & Kameswara Rao, C. V. S. (1994). Effect of sulfates on the setting time of cement and strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 24(7), 1237–1244. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90108-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90108-2)
- Larsson, O., & Thelandersson, S. (2011). Estimating extreme values of thermal gradients in concrete structures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(8), 1491–1500. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9714-0>
- Lasseuguette, E., Burns, S., Simmons, D., Francis, E., Chai, H. K., Koutsos, V., & Huang, Y. (2019). Chemical, microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1228–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.240>
- Mohammadhosseini, H., & Yatim, J. M. (2017). Microstructure and residual properties of green concrete composites incorporating waste carpet fibers and palm oil fuel ash at elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 144, 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.168>
- Naaman, A. E. (2003). Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 241–252. <https://doi.org/10.3151/jact.1.241>
- Nehdi, M., & Hayek, M. (2005). Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.032>
- Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1275–1296. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.004>

- Nie, Q., Zhou, C., Li, H., Shu, X., Gong, H., & Huang, B. (2015). Numerical simulation of fly ash concrete under sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 84, 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.088>
- Oh, B. H., Lee, H. J., Lim, D. H., & Lee, S. K. (1991). Flexural behavior of reinforced concrete beams containing steel fibers. *American Concrete Institute, ACI Special Publication, SP-128*, 987–999. <https://doi.org/10.14359/2901>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. *Materials and Structures*, 44(1), 155–167. <https://doi.org/10.1617/S11527-010-9616-6>
- Pierrehumbert, R. (2019). There is no Plan B for dealing with the climate crisis. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 75(5), 215–221. <https://doi.org/10.1080/00963402.2019.1654255>
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Mehrali, M., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). High tensile strength fly ash based geopolymer composite using copper coated micro steel fiber. *Construction and Building Materials*, 112, 629–638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.228>
- Rashad, A. M., Bai, Y., Basheer, P. A. M., Milestone, N. B., & Collier, N. C. (2013). Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.010>
- Rodríguez-Camacho, R. E., & Uribe-Afif, R. (2002). Importance of using the natural pozzolans on concrete durability. *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1851–1858. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00714-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00714-1)
- S. El-Dieb, A., R. Taha, M., & I. Abu-Eishah, S. (2019). The Use of Ceramic Waste Powder (CWP) in Making Eco-Friendly Concretes. *Ceramic Materials - Synthesis, Characterization, Applications and Recycling*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81842>

- Senthamarai, R. M., & Devadas Manoharan, P. (2005). Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 27(9–10), 910–913. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.04.003>
- Senthamarai, R., Manoharan, P. D., & Gobinath, D. (2011). Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2413–2419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.049>
- Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6–7), 504–512. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2005.02.002>
- Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669–673. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2004.04.027>
- Teng, Y., Li, K., Pan, W., & Ng, T. (2018). Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. *Building and Environment*, 132, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.026>
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), 36–40. <https://doi.org/10.25103/JESTR.031.07>
- V. Biradar, S., Dileep, M. S., & Vijaya Gowri, T. (2020). Studies of Concrete Mechanical Properties with Basalt Fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1006(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1006/1/012031>
- Verbeck, G. J. (2019). 7. Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete. *Performance of Concrete*, 113–124. <https://doi.org/10.3138/9781487584092-008>
- Vijai, K., Kumutha, R., & Vishnuram, B. (2010). Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete. *International Journal of Physical Sciences*

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BARAA ABDULJABBAR BADI AL-SHARHANEE

Uyruğu : IRAQI

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	El-Qadisiyah Üniversitesi	2020
Lise	AL- Kawther Kız Lisesi	2015

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
Yok	Yok	Yok

Yabancı Dil

Arapça : Ana dili

İngilizce : Orta

Türkçe : Orta