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

# BAKIR ENDÜSTRİSİ ATIKLARI VE BAZALT LİFİNİN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

**MOHAMMED NAJİ AHMED ABU AESHAH**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKHAN KAPLAN**

**KASIM - 2020**

**KASTAMONU**

# TEZ ONAYI

**Mohammed Naji Ahmed ABU AESHAH** tarafından hazırlanan "**Bakır Endüstrisi Atıkları ve Bazalt Lifinin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımının Araştırılması**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **01.11.2020** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

| | | |
|---|---|---|
| **Danışman** | Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN<br>Atatürk Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyesi** | Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL<br>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyesi** | Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR<br>Kastamonu Üniversitesi | ..... |

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

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

## TAAHHÜTNAME

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

**Mohammed Naji Ahmed ABU AESHAH**



# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

## BAKIR ENDÜSTRİSİ ATIKLARI VE BAZALT LİFİNİN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

**MOHAMMED NAJİ AHMED ABU AESHAH**

**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**
**DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKHAN KAPLAN**

Bu çalışmada bakır cürufu ve agregasının bazalt lifi ile birlikte çimento esaslı kompozitlerde kullanımı araştırılmıştır. Çevresel bir problem olan bakır atıklarının çimento esaslı kompozitlerde kullanımı ile ekosisteme katkı sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca bazalt lifinin kompozitlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çimento esaslı kompozitler için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Taguchi L18 matrisi kullanılmıştır. Bakır cürufu %0; 7,5 ve 15 oranlarında, bakır agregası ise %0, 25 ve 50 oranlarında kullanılmıştır. 6 ve 12 mm uzunluğundaki bazalt lifleri %1, 2 ve 3 oranlarında kullanılmıştır. Karışımların s/ç oranları 0,40; 0,50 ve 0,60 olarak seçilmiştir. 18 farklı karışım üzerinde taze ve sertleşmiş harç özellikleri ile geçirimlilik, donma-çözülme ve sülfat dayanıklılığı gibi durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karışımların 7, 28 ve 91 günlük basınç ve eğilme dayanımları açısından s/ç oranı 0,40 olan karışımlarda 6 mm uzunluğundaki lifin %1 oranında kullanılması daha olumlu sonuçlar sağlamıştır. Donma-çözülme dayanıklılığı açısından ise 0,40 s/ç oranına sahip karışımlarda 6 mm uzunluğundaki lifin %3 oranında kullanılması gerekmektedir. %7,5 oranında bakır cürufu kullanımı su işleme derinliğini azaltmıştır. Sodyum sülfat etkisindeki karışımlarda %15 oranında bakır cürufu kullanımı genleşme değerlerini azaltmıştır. Bakır agregası oranının artması agrega hacmini azalttığı için kuruma büzülmesi değerlerinin artmasına neden olmuştur. Sonuç olarak kompozitlerin dayanım ve dayanıklılığı için bakır cürufunun bakır agregasından daha çok olumlu etki sağladığı gözlenmiştir. Ancak bazı özelliklerden ödün vererek bakır agregası %25 oranında kullanılarak çevreye ve ekosisteme katkı sağlanabilir. Bazalt lifinin 6 mm uzunluğunda ve %1 oranında kullanılması mekanik özellikleri arttırırken %3 oranında kullanılması donma-çözülme dayanıklılığına önemli katkıda bulunmuştur. Bakır atıklarının çimento ve agrega yerine kullanılarak çevreye ve ekosisteme katkı sağlayacağı belirlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:**Bakır cürufu, bakır agregası, bazalt lifi, durabilite, sürdürülebilirlik

Kasım 2020, 105 Sayfa

# ABSTRACT

## MSC THESIS

## INVESTIGATION OF USE OF COPPER INDUSTRY WASTES AND BASALT FIBER IN CEMENT BASED COMPOSITES

**MOHAMMED NAJİ AHMED ABU AESHAH**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**
**DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**
**SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. GÖKHAN KAPLAN**

In this study, the use of copper slag and aggregate together with basalt fiber in cement-based composites was investigated. It is aimed to contribute to the ecosystem with the use of copper wastes, which is an environmental problem, in cement-based composites. In addition, the effect of basalt fiber on the strength and durability properties of composites was investigated. Taguchi optimization was carried out for cement based composites. In this context, the Taguchi L18 Matrix was used. Copper slag was used in 0, 7,5 and 15% ratios, and copper aggregate was used in 0, 25 and 50% ratios. 6 and 12 mm length basalt fibers were used in 1, 2 and 3% ratios. W/C ratios of mixtures were selected as 0,40; 0,50 and 0,60. Durability experiments such as permeability, freeze-thaw and sulfate resistance were conducted with fresh and hardened mortar properties on 18 different mixtures. The use of 6 mm length fiber by 1% in mixtures with an w/c ratio of 0,40 in terms of compressive and flexural strength of mixtures of 7, 28 and 91 days provided more positive results. In terms of freeze-thaw resistance, 6 mm length fiber should be used in mixtures with a ratio of 0,40 w/c at a rate of 3%. The use of copper slag by 7,5% reduced the water penetration depth. The use of copper slag by 15% in mixtures under the influence of sodium sulfate reduced the expansion values. Because the increase in the proportion of copper aggregate reduces the volume of aggregate, it has led to an increase in drying shrinkage values. As a result, it was observed that copper slag provides a more positive effect than copper aggregate for the strength and durability of composites. But by compromising some properties, copper aggregate can contribute to the environment and ecosystem by using 25%. 6 mm length and 1% use of basalt fiber increased mechanical properties, while 3% use contributed significantly to freeze-thaw resistance. It has been determined that copper waste will contribute to the environment and ecosystem by using it instead of cement and aggregate.

**KEYWORDS:** Copper slag, copper aggregate, basalt fiber, durability, sustainability

November 2020, 105 Page

# TEŞEKKÜR

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

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

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

Mohammed Naji Ahmed ABU AESHAH

Kastamonu, 2020

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

**TEZ ONAYI** ..... **ii**
**TAAHHÜTNAME** ..... **iii**
**ÖZET** ..... **iv**
**ABSTRACT** ..... **v**
**TEŞEKKÜR** ..... **vi**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**
**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... **ix**
**TABLOLAR DİZİNİ** ..... **x**
**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ** ..... **xi**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
**2. LİTERATÜR İNCELEMESİ** ..... **4**
2.1 Bakır Cürufu ..... 4
2.1.1 Bakır Cürufu Hakkında Genel Bilgiler ..... 4
2.1.2 Bakır Cürufu Üretimi ..... 4
2.1.3 Bakır Cürufunun Avantajları ..... 5
2.1.3.1 Bakır cürufunun çeşitli alanda kullanımı ..... 6
2.1.4 Bakır Cürufunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri ..... 7
2.1.5 Bakır Cürufunun Mekanik Özellikleri ..... 8
2.1.5.1 Agrega olarak bakır cürufunun kullanılması ..... 8
2.1.5.2 Çimento ikame malzemesi olarak bakır cürufu ..... 10
2.1.6 Bakır Cürufu ve Taze Hal Özellikleri ..... 12
2.1.6.1 İşlenebilirlik ..... 12
2.1.6.2 Terleme ..... 13
2.1.7 Bakır Cürufu ve Dayanıklılık ..... 14
2.1.7.1 Donma ve çözülme dayanıklılığı ..... 14
2.1.7.2 Kuruma büzülmesi ..... 16
2.1.7.3 Sülfat direnci ..... 17
2.1.8 Çevresel Etkiler ..... 19
2.2 Bazalt Liflar ..... 19
2.2.1 Lifli Betonun Özellikleri ..... 20
2.2.2 Bazalt Liflerinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ..... 21
2.2.3 Bazalt Liflerinin Kullanın Alanları ..... 22
2.2.4 Bazalt Liflerin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımı ..... 24
2.2.4.1 İşlenebilirlik ve kıvam ..... 24
2.2.4.2 Gözeneklilik ..... 25
2.2.4.3 Birim hacim ağırlık (BHA) ..... 26
2.2.4.4 Boyutsal kararlılık (Rötre ve sünme) ..... 27
2.2.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ..... 27
2.2.5.1 Basınç dayanımı ..... 28
2.2.5.2 Yarmada-çekme dayanımı ..... 29
2.2.5.3 Eğilme dayanımı ..... 31
2.2.5.4 Elastisite modülü ..... 32
2.2.6 Dayanıklılık ..... 33
2.2.6.1 Donma ve çözülme etkisi ..... 33

2.2.6.2 Kuruma büzülmesi ..... 34
2.2.6.3 Sülfat etkisi ..... 35
2.3 Taguchi Yöntemi ..... 36
**3. MALZEME VE YÖNTEM ..... 39**
3.1 Malzemeler ..... 39
3.1.1 Çimento ..... 39
3.1.2 Bakır Cürufu ..... 39
3.1.3 Agrega ..... 39
3.1.4 Bazalt Lifi ..... 40
3.1.5 Kimyasal Katkı ..... 42
3.1.6 Su ..... 42
3.2 Yöntem ..... 42
3.2.1 Karışım Özellikleri ..... 42
3.2.2 Test Yöntemleri ..... 45
3.2.2.1 Taze harç özellikleri ve birim hacim ağırlık (BHA) ..... 45
3.2.2.2 Basınç ve eğilme dayanımı ..... 46
3.2.2.3 Kapilarite ..... 46
3.2.2.4 Kuruma büzülmesi ..... 46
3.2.2.5 Sülfat dayanıklılığı ..... 46
3.2.2.6 Donma-çözülme dayanıklılığı ..... 47
3.2.2.7 Optimizasyon ve Taguchi yöntemi ..... 47
**4. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 50**
4.1 Çimento Esaslı Kompozitlerin Taze Hal Özellikleri ve BHA ..... 50
4.2 Çimento Esaslı Kompozitlerin Basınç ve Eğilme Dayanımı ..... 60
4.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kapilarite Özellikleri ..... 71
4.4 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmesi Özellikleri ..... 75
4.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Sülfat Dayanıklılığı Özellikleri ..... 79
4.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma-Çözülme Dayanıklılığı ..... 82
4.7 Çimento Esaslı Kompozitlerin Optimizasyon ve Doğrulama Deneyleri ..... 87
**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 92**
**KAYNAKLAR ..... 95**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 105**

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa**

Şekil 3.1 Agregalara ait tane dağılımları ..... 41
Şekil 3.2 Bakır atıklarının hazırlanmasında kullanılan ekipmanlar ..... 43
Şekil 3.3 Boy değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan dijital komparatör ... 47
Şekil 4.1 Çimento esaslı kompozitlerde kullanılan akışkanlaştırıcı oranları .... 51
Şekil 4.2 Çimento esaslı kompozitlerde farklı s/ç oranlarının akışkanlaştırıcı oranına etkisi ..... 52
Şekil 4.3 Lif ve bakır atıklarının çimento esaslı kompozitlerin yayılma çaplarına etkisi ..... 54
Şekil 4.4 S/Ç oranının yayılma çapı üzerindeki etkisi ..... 56
Şekil 4.5 Çimento esaslı kompozitlerin taze hal özellikleri ..... 57
Şekil 4.6 Çimento esaslı kompozitlerin BHA değerleri ..... 59
Şekil 4.7 S/Ç oranının BHA üzerindeki etkisi ..... 60
Şekil 4.8 Çimento esaslı kompoztlerin eğilme dayanımları ..... 64
Şekil 4.9 S/Ç oranının eğilme dayanımına etkisi ..... 65
Şekil 4.10 Çimento esaslı kompoztlerin basınç dayanımları ..... 68
Şekil 4.11 S/Ç oranının basınç dayanımına etkisi ..... 70
Şekil 4.12 Basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki ..... 71
Şekil 4.13 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kapilarite özellikleri ..... 72
Şekil 4.14 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kapilarite özellikleri ..... 73
Şekil 4.15 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kuruma büzülmesi özellikleri ..... 76
Şekil 4.16 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kuruma büzülmesi özellikleri ..... 77
Şekil 4.17 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların sodyum sülfat etkisindeki özellikleri ..... 80
Şekil 4.18 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların sodyum sülfat etkisindeki özellikleri ..... 80
Şekil 4.19 Çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme sonrasındaki eğilme dayanımları ..... 83
Şekil 4.20 S/Ç etkisinin donma-çözülme sonrasındaki eğilme dayanımına etkisi ..... 84
Şekil 4.21 Çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımları ..... 85
Şekil 4.22 S/Ç etkisinin donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımına etkisi ..... 86

# TABLOLAR DİZİNİ

**Sayfa**

Tablo 2.1 Bakır cürufunun fiziksel özellikleri (Shi vd., 2008) ..... 8
Tablo 2.2 Bazalt lifinin fiziksel özellikleri ..... 21
Tablo 3.1 CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri ..... 39
Tablo 3.2 Bakır cürufunun kimyasal analizi ..... 40
Tablo 3.3 Bazalt lifinin mühendislik özellikleri ..... 41
Tablo 3.4 Glenium 51'in teknik özellikleri ..... 42
Tablo 3.5 Deneysel çalışmaya ait değişkenler ..... 43
Tablo 3.6 Taguchi L18 matrisine ait tasarım ..... 44
Tablo 3.7 Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylere ait özellikler ..... 49
Tablo 4.1 Mekanik özellikler için optimum karışım oranları ve doğrulama deneylerinin sonuçları ..... 88
Tablo 4.2 Donma-çözülme dayanıklılığı için optimum karışım oranları ve doğrulama deneylerinin sonuçları ..... 89
Tablo 4.3 Geçirimsizlik ve boyutsal kararlılık için optimum karışım oranları ve doğrulama deneylerinin sonuçları ..... 90

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Kısaltmalar

**KYB** : Kendiliğinden Yerleşen Beton
**PÇ** : Portland Çimentosu
**s/b** : Su / bağlayıcı oranı
**s/ç** : Su / çimento oranı
**SA** : Süper Akışkanlaştırıcı
**SD** : Silis Dumanı
**SK** : Silisli Kum

# 1. GİRİŞ

Beton agrega, çimento, su kimyasal ve mineral katkılardan oluşan gevrek özellikte bir yapı malzemesidir. Beton, alt ve üstyapıyı oluşturan; konutlar, temeller, köprüler, üst geçitler, otoyollar, pistler, barajlar, borular, direkler ve hatta tekne yapımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton, insanlığın altyapıya ihtiyaç duyduğu hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Dünya çapında kullanılan beton miktarı, çelik, ahşap, plastik ve alüminyum kullanımının yaklaşık iki katıdır. Beton aynı zamanda ticaret açısından büyük bir endüstri koludur (Selvi vd., 2014).

Enerji açısından beton, çelik gibi yapı malzemelerine göre daha sürdürülebilir kabul edilmektedir. Bununla birlikte, diğer yapı malzemelerine kıyasla yüksek oranda beton tüketimi bu sürdürülebilir avantajı ortadan kaldırmaktadır (Sivakrishna vd., 2019). Ayrıca çimento uzun süredir betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Günümüzde yüksek oranda çimento kullanımı sürdürülebilirlik, maliyet, mühendislik ve dayanıklılık gibi konularda sorgulanmaktadır. Çimento üretimi çevreye büyük miktarlar da $CO_2$ salınımı yapar ve önemli miktarlarda doğal kaynakları tüketmektedir. Çimento üretimi, atmosfere salınan $CO_2$ 'nin yaklaşık %5-7'sini oluşturmaktadır. Ayrıca, çimento hammaddesi olan klinker üretiminde; kalsinasyon esnasında büyük miktarda enerji tüketilirken aynı zamanda doğal kaynaklara da zarar verilmektedir (Hwang vd., 2019). Örneğin 1 ton çimento üretmek için yaklaşık 1,7 ton hammadde tüketilir ve 0,8 ton $CO_2$ atmosfere salınmaktadır (Yaseri vd., 2019).

Bu nedenle, doğal kaynakları korurken betonun gelecekteki taleplerini karşılamak için çevreci (yeşil) betona sahip olma özelliği önem kazanmıştır. Yeşil beton, geleneksel betona kıyasla daha az enerji tüketen ve daha az karbon salınımı yapan bir beton olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca yeşil betonda farklı endüstriyel atıklar bağlayıcı veya agrega olarak kullanılabilir (Sivakrishna vd., 2019).

Dünya çapındaki en büyük sorunlardan bir tanesi büyük miktarlarda da endüstriyel yan ürünlerin oluşması ve bertaraf edilmesidir. Depolama için sınırlı alanların olması ve dolayısıyla artan maliyetler nedeniyle; atıkların geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanılmasına daha çok özen gösterilmektedir. Endüstriyel atıklar hem çevresel hem

de ekonomik açıdan faydalı olacak şekilde betonda kullanılmaktadır (Gupta ve Siddique, 2019). Dolayısıyla, büyük miktarlarda katı atıkların alternatif bir kaynağa dönüştürülmesi, yenilenemeyen malzeme kaynaklarının azalmasını koruyacaktır. Ayrıca enerjiyi tasarrufu ve çevresel sorunlarının çözülmesine yardımcı olacaktır. Çok sık kullanılan yapı malzemesi olan betonda endüstriyel atık malzemelerin kullanılması, özellikle küresel sera gazı emisyonlarına önemli katkı sağlayacaktır (El-Dieb ve Kanaan, 2018).

Atık malzemelerin geri dönüşümü beton endüstrisinde büyük bir potansiyeldir. Uzun yıllar uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi yan ürünler endüstriyel atık olarak kabul edilmiştir. Bu tür malzemelerle hazırlanan betonlar, normal betona göre işlenebilirlik ve dayanıklılıkta iyileşme göstermiş ve agresif ortamlarda yapılan yapılarının inşasında kullanılmıştır (Khan vd., 2015). Endüstriyel atıkların betonda aynı zamanda ince agrega olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel atıkların betonda ince agrega olarak kullanılması maliyeti azaltmakla kalmaz, aynı zamanda betonun sürdürülebilirliğine de katkı sağlamaktadır (Bhoi vd., 2018). Metal sektörüne ait cürufların betonda kullanılması son yıllarda artış göstermiştir.

Bakır cürufu, bakır cevheri konsantrelerinin izabe tesislerinde metalik bakıra dönüşmesinden elde edilen masif bir metalürjik atıktır. Bakır cürufları, geniş arazi alanlarını işgal ederek depolama alanlarında birikmektedir. Kimyasal bileşimleri $Fe_2O_3$, $SiO_2$ ve $Al_2O_3$ açısından zengindir. Mineralojik bileşimleri arasında ise fayalit ve manyetit daha yüksek oranda bulunmaktadır (Murari vd., 2014). Dünya çapında bakır endüstrisi tarafından bir ton bakır üretimi esnasında yaklaşık 2,2–3 ton bakır cürufu oluşmaktadır. Her yıl yaklaşık 24,6 milyon ton bakır cürufu açığa çıkmaktadır (Shi vd., 2008; Edwin vd., 2016).

Bakır cürufunun döngüsel ekonomiye katışması için mevcut seçenekler arasında; geri dönüşüm, metalin geri kazanılması, katma değerli ürünlerin üretimi ve cüruf atık sahalarında bertaraf yer almaktadır. Şu anda, bakır cürufu aşındırıcı aletler, çatı kaplama malzemeleri, kesici aletler, fayans, cam, yol altyapısı, demiryolu balastı, asfalt kaplamalar, çimento ve beton endüstrileri için yaygın olarak kullanılmaktadır. PCA (Portland Cement Association) raporları, bakır cürufunun çimento üretiminde

kullanıldığını göstermektedir. Çimento üretiminde ikame malzemesi olarak bakır cürufunun kullanılmasıyla önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanacaktır. Ayrıca bakır cürufunu betonda ince ve iri agrega olarak kullanmak da mümkündür. Agrega beton hacminin yaklaşık %75 'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle, çimento ve beton üretiminde bakır cürufunun kullanılması, özellikle önemli miktarda bakır cürufunun üretildiği alanlarda, çevresel ve ekonomik faydalar sağlayacaktır. (Shi vd., 2008).

Pek çok ülkede beton sektörü için gerekli olan doğal agrega problemi oluşurken, diğer ülkelerde de inşaat endüstrisinin artan talebi nedeniyle agrega tüketiminde artış devam etmektedir. Betonda ana agrega kaynağı olan doğal agregalara olan bağımlılığı azaltmak için, yapay olarak üretilmiş agregalar ve endüstriyel atıklardan üretilen yapay agregalar inşaat sektörüne alternatif oluşturmaktadır. Bu nedenle endüstriyel atıklardan elde edilen agrega kullanımı, doğal agregalara alternatif olabilmektedir.

Geçtiğimiz yirmi yılda, demiryolu traversleri, barajlar ve havaalanı kaplamaları gibi bazı projelerde lifleri betona ilave etmek yaygın olarak kullanılmıştır. Araştırmacılar ayrıca, betonun çekme, eğilme ve darbe dayanımını iyileştirmek için lifli betona polipropilen, PVA, çelik, cam ve karbon lifler ilave ederek incelemişlerdi. Liflerin kullanımı ile betonun tokluğu ve çatlama dayanımı iyileşmiştir. Bazalt lif, diğer ileri teknoloji liflerden önemli ölçüde farklı özelliklere sahiptir. Bazalt lifin hammaddesi, yüksek kimyasal ve termal stabilite içeren ve lif üretim sürecinde hiçbir zararlı gaz veya atık kalıntısı üretmeyen doğal volkanik kayadan oluşmaktadır. Bazalt lifler, dikkatlice seçilmiş bir taş ocağı kaynağından tek bir malzemeden yapılır ve cam lifı gibi farklı olarak esasen hiçbir malzeme eklenmez. Bazalt basitçe yıkanır ve ardından eritilir. Bazalt liflerinin üretimi, çıkarılan bazalt kayanın yaklaşık 1400 °C'de eritilmesi ile gerçekleştirilir. Erimiş bazalt kayası daha sonra sürekli bazalt lif filamentleri üretmek için küçük nozüllerden (düzeler) ekstrüde edilir. Bazalt lifin dayanımı, doğal ve sentetik liflerden çok daha yüksektir. Ayrıca, E-Modülü karbon lifinkine benzer özellik göstermektedir. Performansları benzer özellik göstermesine rağmen, bazalt lifin maliyeti karbon lifin onda birinden daha düşüktür (El-Gelani vd., 2018; Zhou vd., 2020).

# 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

## 2.1 Bakır Cürufu

### 2.1.1 Bakır Cürufu Hakkında Genel Bilgiler

Atık bertaraf problemlerini azaltmak için, atık oluşumunun azaltılması ve atıkların hammadde olarak kullanılabilir malzemelere geri dönüştürülmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Endüstriyel atıkların beton teknolojisinde faydalı kullanımı uzun yıllardır bilinmektedir. Uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi malzemelerin ikame malzemesi olarak kullanımı ile ilgili önemli araştırmalar yapılmıştır. Bu tür malzemeler, Portland çimentosunun dayanıklılık özelliklerini iyileştirmesi nedeniyle endüstriyel ve kimyasal tesislerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel atıkları kullanmanın diğer avantajı ise, inşaat maliyetini azaltmasıdır. Bakır cürufu atık bir malzeme olmakla beraber beton üretiminde agreganın yerine kısmen ya da tamamen kullanılabilmektedir (Ezhilarasan vd., 2020).

Birçok araştırmacı bakır cürufunun harç ve beton üretiminde kullanımını araştırmıştır. Ayrıca bazı çalışmalarda da klinker yerine bakır cürufu kullanılarak kompoze çimentoların özellikleri incelenmişti. Çimento ve betonda bakır cürufu kullanımı çevresel ve ekonomik faydalar sağlamaktadır. Bakır cürufunun harç ve betonda agrega olarak kullanımının mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmaların çoğu, bakır cürufunu ince agrega olarak kullanımını önermektedir. Bakır cürufunun çimento yerine kullanılması durumunda ise priz süresinin uzadığı belirtilmiştir (Sudarvizhi ve Ilangovan, 2011).

### 2.1.2 Bakır Cürufu Üretimi

Saf bakır üretimi sırasında bakır cürufu gibi birçok atık madde oluşmaktadır. Bu atıklar fabrikadan sıvı halde çıkarılmaktadır. Bir sonraki adımda ya su kullanarak ya da hava kullanarak soğutulmaktadır. Kesici takım, kum püskürtme, aşındırıcı malzeme vb. imalatı gibi çeşitli sektörlerde kısmen kullanılmakla beraber inşaat sektöründe dolgu, agrega veya bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bakır cürufu inşaat ve beton

endüstrisinde, inşaat maliyetini düşürmek ve çevreyi korumak için çimento ikame malzemesi veya agrega olarak kullanılmaktadır (Afshoon ve Sharifi, 2020).

Daha önce de belirtildiği gibi, bakır cürufu, bakırın ergitme ve rafinasyonu sırasında elde edilen bir yan üründür. Bir eritme sürecinin ana bileşenleri, sülfitler, demir ve bakır oksitleridir. Ayrıca konsantrede $SiO_2$, $Al_2O_3$, CaO ve MgO gibi oksitler de bulunabilir. Erime sisteminin kimyasını ve fiziksel yapısını büyük ölçüde kontrol eden demir, bakır, kükürt, oksijen ve diğer oksitleridir. Bir diğer önemli faktör, hammaddeleri ısıtmak ve eritmek için kullanılan gazların oksidasyon/indirgenme potansiyelleridir. Bu işlem sonucunda bakırca zengin hammadde (sülfitler) ve bakır cürufu (oksitler) iki ayrı sıvı faz olarak oluşur. Ergitme işlemi sırasında $SiO_2$ ilavesi, oksitlerle birleşerek kuvvetli silikat anyonları oluşturur. Bu reaksiyon bakır cürufu içerikli sıvı fazı üretirken, sülfitler anyon komplekslerini oluşturma eğiliminin düşük olması nedeniyle katı faz oluşturur. Kireç ve alümina ilavesiyle cürufun yapısı stabilize edilmektedir. Erimiş cüruf 1000–1300 °C 'de fırından çıkartılmaktadır. Sıvı cüruf yavaşça soğutulduğunda yoğun, sert kristalli bir ürün oluştururken, suyla soğutulmasında hızlı katılaşma granül amorf cürufu oluşturur (Shi vd., 2008; Behnood, 2014).

İşlem kurulumuna bağlı olarak, soğutma işleminin sertleşmiş cürufun özellikleri üzerinde etkisi bulunmaktadır. Erimiş cüruf yavaş yavaş ortam sıcaklığına soğutulduğunda, yoğun ve kristal yapıda olan kayaya benzer bir malzeme katılaşır. Erimiş cürufun su ile muamlesi sonucunda amorf yapı elde edilmektedir (Dhir vd., 2017).

### 2.1.3 Bakır Cürufunun Avantajları

Bakır cürufu temelde aşındırıcı alet imalatında ve kumlama endüstrilerinde kullanılsa da geri dönüşüm veya geri kazanım oranı düşüktür. Dolayısıyla fazla oranda açığa çıkan bakır cürufu betonda iri ve ince agrega olarak kullanılabilir. Bakır cürufu daha iyi sürdürülebilirlik geleneksel betondan daha yüksek dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi bazı olumlu özellikler sağlayacaktır (Dey vd., 2015).

Harç ve betonda ince ve iri agrega olarak bakır cürufunun kısmen ikame edilmesi son birkaç yıldır araştırılmaktadır. Bu araştırmalarda, bakır cürufunun çevre sorunları için hayati ve etkili bir ikame malzemesi olduğu ve gelecekte daha güçlü ve dayanıklı yapı tasarımında kullanılacağını açıkça görülmektedir. Bakır cürufu ikamesi, betondaki basınç dayanımını, işlenebilirliği, dayanıklılığı, çekme ve eğilme dayanımını da artırabilir (Dey vd., 2015).

Najimi ve Pourkhorshidi (2011) tarafından yapılan çalışmada, bakır cürufunun deneysel çalışmalarında birçok avantajı belirlenmiştir. Bu avantajlar:

a) Bakır cürufu, betonun daha dayanıklı hale gelmesin, sağlamakta ancak düşük puzolanik aktivite göstermektedir.

b) Bakır cüruf içeren betonun su ve klor geçirgenliği artarken dayanım özelliklerinde önemsiz kayıplar gözlenmiştir.

c) Çimentonun kısmen bakır cürufu ile değiştirilmesi, betonun sülfat etkisine karşı direncini etkili bir şekilde arttırmaktadır. Bakır cürufu kullanılması, sülfat çözeltisindeki betonun genleşmesini azaltırken, kontrol betonunda yüksek oranda etrenjit gözlenmiştir.

d) Bakır cürufunun kullanılması, harçların alkali-silika reaksiyonuna bağlı genleşmesini etkin bir şekilde azaltmıştır.

#### 2.1.3.1 Bakır cürufunun çeşitli alanda kullanımı

Çevre kirliliğini azaltmak için bakır cürufunun uygun şekilde bertarafı gerekmektedir. Bu nedenle bakır cürufunun geri dönüşümü, çevrenin korunmasına ve atık yönetime yardımcı olur. Bakır cürufunun çeşitli kullanım alanları: kompoze çimento üretimi, beton agregası ya da dolgu malzemesi olarak sıralanabilir. Bakır cürufu aşındırıcı aletlerde, kiremitlerde çatı kaplama malzemelerinde ve cam üretiminde kullanılmaktadır (Saxena ve Simalti, 2015).

Dey vd. (2015), Soni ve Mangroliya (2018) ve Dhanesh vd. (2019) ’e göre bakır cürufunun çeşitli kullanım alanları aşağıdaki gibidir;

- Bakır cürufu inşaat endüstrisinde dolgu malzemesi olarak kullanılır. Daha ince bir malzeme olarak ve yüksek yoğunluğu nedeniyle dolgu malzemesi olarak toprakla karıştırıldığında toprak tasarrufu sağlar.

- Müteahhitler ayrıca beton üretimi sırasında agrega yerine bakır cürufu kullanabilirler.

- Bakır cürufu, bloklar halinde oluşturulmuş bir yapı malzemesi olarak da kullanılabilir.

- Bakır cürufu kum püskürtme endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve aşındırıcı aletlerin imalatında tercih edilmektedir.

### 2.1.4 Bakır Cürufunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal bileşim, malzemenin karakterizasyonun da dikkate alınması gereken önemli bir husustur. Kimyasal özelliklerin hem malzemenin fiziksel yapısı hem de mekanik, dayanıklılık ve çevresel performansı üzerinde belirleyici etkisi vardır (Dhir vd., 2017).

Kimyasal bileşim açısından, bakır cürufu çimento ile karşılaştırıldığında yüksek $SiO_2$ ve $Fe_2O_3$ içeriğine sahip olduğu görülmektedir. ASTM C618-99 standardı ile karşılaştırıldığında, bakır cürufundaki üç oksidin (silika, alümina ve demir oksit) toplamı yaklaşık %89 'dur. Bu oran doğal puz olanlarda aranılan N sınıfı için %70 'lik gereksinimi aşmaktadır. Bu nedenle, bakır cürufunun yüksek kaliteli puzolan üretme potansiyeline sahip olması beklenmektedir (Al-Jabri vd., 2009). Ambily vd. (2015), bakır cürufunun mineral fazlarının yanı sıra minör oksitler ve ağır elementler de dahil olmak üzere bileşen oksitlerini analiz etmişlerdir. Kimyasal analizin sonuçları Tablo 2.1 'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Bakır cürufunun fiziksel özellikleri (Shi vd., 2008)

| | |
|---|---|
| Görünüm | Siyah, camsı |
| Parçacık şekli | Düzensiz |
| Yoğunluk ($g/cm^3$) | 3,16–3,87 |
| Su emme (%) | 0,15–0,55 |
| Sertlik (mohs) | 6–7 |
| Suda çözünür klorür (ppm) | <50 |
| Sağlamlık (%) | 0,8–0,9 |
| Aşınma kaybı (%) | 24,1 |
| İletkenlik (µs/cm) | 500 |

### 2.1.5 Bakır Cürufunun Mekanik Özellikleri

#### 2.1.5.1 Agrega olarak bakır cürufunun kullanılması

Doğal kaynakların kullanımı ile ilgili ciddi sorunlar nedeniyle, inşaat endüstrisi, doğal ince kuma olan bağımlılığı azaltmak için mevcut seçenekleri değerlendirmektedir. Ayrıca, hızlı kentleşme ve sanayileşme nedeniyle atık üretimi muazzam şekilde artmıştır. Endüstriyel kuruluşlar atıklarına çoğu zaman herhangi bir ön işlem yapmadan çevreye atarak uzaklaştırmaktadır. Endüstriyel atık malzemelerin çevreye boşaltılması insan sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Araştırmacılar, son yıllarda endüstriyel atıkları bertaraf etmenin pratik ve çevre dostu yollarını bulmak için birçok araştırma yapmışlardır. Geçmişte araştırmacılar, doğal ince agrega yerine endüstriyel atık malzemeler kullanarak başarılı bir şekilde beton üretmişlerdir (Bhoi vd., 2018).

Al-Jabri, vd. (2011), bakır cürufunun ince agrega olarak kullanılmasının harç ve beton özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada ince agrega yerine %0 ile %100 arasında değişen farklı oranlarda bakır cürufu ile çeşitli harç ve beton karışımları hazırlanmıştır. Sonuç olarak dayanım ve dayanıklılık özellikleri açısından ince agregaların yerine %40–50 oranında bakır cürufunun kullanılabileceği önerilmiştir. Farklı bakır cüruf oranlarına sahip tüm karışımların, kontrol karışımınınkine benzer

veya daha yüksek basınç dayanımı sağladığı gözlenmiştir. Ayrıca, kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında %50 bakır cüruf ikamesi ile harçların basınç dayanımında %70 'den fazla artış sağlanmıştır. Ayrıca bakır cüruf içeriği arttıkça yoğunlukta yaklaşık %5 'lik bir artış gözlenmiştir.

Al-Jabri vd. (2009), aynı işlenebilirlikte kontrol karışımına kıyasla %100 bakır cüruf ikamesi ile basınç dayanımında %20 'den fazla iyileşme olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca bakır cürufu ilavesinde betonun erken yaş dayanımlarının azalmadığı belirtilmiştir.

Selvi vd. (2014) ince agreganın betonda bakır cürufu ile değiştirilmesinin betonun yoğunluğunu artırdığını belirtmişlerdir. Basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımının %40 'a kadar bakır cürufu kullanılarak (ince agrega yerine) arttırılabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle ince agreganın %40 'a kadar bakır cürufu ile değiştirilmesi tavsiye edilmektedir.

Pavez vd. (2018) çalışmasında, ince agrega yerine bakır cürufu kullanarak harçların 3, 7 ve 28. günlerde basınç ve eğilme dayanımında bir artış olduğunu belirtmiştir. Basınç dayanımındaki en yüksek artış 3 günde gözlenirken zaman arttıkça bu artış eğilimi azalmıştır. Eğilme dayanımındaki artış 3 ve 7. günlerde benzer, ancak 28. günde daha düşüktür.

Sambhaji ve Autade (2016), ince agreganın bakır cürufu ile ikame yüzdesi arttıkça betonun birim ağırlığının kademeli olarak arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca, ince agreganın %50 'ye kadar bakır cürufu ile yer değiştirmesi sonucunda basınç dayanımı, kontrol karışımı ile benzer özellik göstermiştir. %50 'den fazla bakır cüruf içeriği ile basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir.

Wu vd. (2010), ince bir agrega olarak bakır cürufu içeren yüksek mukavemetli betonun mekanik özelliklerini araştırmış ve ikame olarak %40 'tan daha az bakır cürufunun, kontrol karışımına benzer veya daha iyi dayanımlı betonlar elde edebileceği sonucuna varmıştır.

Kumar ve Mahesh (2017), ince agreganın bakır cürufu ile kısmi ikamesi için yarmada-çekme dayanımının %10; %20; %30 ve %40 için %9,06; %4,43; %3,35 ve %3,32 düzeyinde arttığı sonucuna varmıştır.

Sambhaji ve Autade (2016), %10 ile %100 oranında bakır cürufunun ince agrega yerine kullanmış ve betonların E-modülünün kontrol karışımından daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Bakır cüruf katkılı betonun E-modülü, %50 ikame oranına kadar artmış ve daha sonraki oranlarda ise azalmıştır.

Patil (2018), doğal agreganın bakır cürufu ile yer değiştirmesine bağlı olarak E-modülünün azaldığını bulmuştur. Referans betonun E-modülü 30 GPa olarak bulunmuştur. %10 oranında bakır cürufu kullanımı E-modulünü arttırırken %70 oranında bakır cürufu kullanımı E-modülünü azaltmıştır.

Patil vd. (2018), doğal agreganın bakır cürufu ile yer değiştirmesine bağlı olarak E-modülünün arttığını bildirmiştir. %10 oranında bakır cürufu kullanımı E-modulünü arttırırken %60 oranında bakır cürufu kullanımı E-modülünü azaltmıştır.

Gopalakrishnan ve Nithiyanantham (2020), 3, 7 ve 28. günlerde karışımların basınç dayanımının, kontrol numunelerine kıyasla bakır cürufu ilavesiyle %30'a kadar arttığını belirlemiştir, Bakır cürufu kullanılan karışımlarda E-modülü 3. günden 28 güne kadar daha belirgin bir artış sağlamıştır.

#### 2.1.5.2 Çimento ikame malzemesi olarak bakır cürufu

Çimento ikam malzemesi olarak bakır cürufunun kullanılmasıyla, çimento üretimi için gereken enerji miktarı azalmaktadır. Ayrıca, atık bir yan ürünün faydalı bir şekilde yeniden kullanılması mümkün olmaktadır. Bakır cürufunun Portland çimentosunun ikamesi için puzolanik malzeme olarak kullanımı hidratasyon reaksiyonları ve özellikleri üzerindeki etkileri çeşitli araştırmalarda bildirilmiştir. Ayrıca birçok araştırmacı, önemli hidratasyon ürünlerinin oluşması için bakır cürufunun tamamen camsı yapıda olması gerektiğini bildirmiştir. Bu tür malzemeler için en büyük endişe, bünyelerindeki ağır metal içerikleridir. Bakır cürufunda bakır, nikel, kurşun ve çinko iyonları bulunabilmektedir (Shi vd., 2008).

Elde edilen bakır cürufu, puzolanik aktivite gösterebilir ve bu nedenle ikame malzemesi olarak çimento imalatında kullanılabilir. Portland çimentosu ile bakır cürufu karışımları genellikle uçucu kül içeren Portland çimentosuna eşdeğer özelliklere sahiptir, ancak silis dumanı içerikli karışımlardan çok farklıdır. Bakır cürufu ve uçucu kül, harçlarda hidratasyon ısısını silis dumanına göre daha etkili bir şekilde azaltır. %30 bakır cürufu kullanımı sonucunda uçucu kül ile benzer şekilde eğilme ve basınç dayanımı azalmaktadır. Bakır cürufunun puzolanik aktivitesi uçucu külünkine benzer ve silis dumanından daha düşüktür. Düşük s/ç oranlarının varlığında, bazı puzolanik malzemeler hidratlanmış kalsiyum alüminatların oluşumunda belirleyici bir faktör olan hidratasyon ürünleri için mevcut alanı sınırlayan çok kompakt bir çimento pastası üretir (Murari vd., 2014).

Arino ve Mobasher (1999), öğütülmüş bakır cürufunun çimento esaslı malzemelerin dayanımı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Portland çimentosu ikamesi olarak kütlece %15'e kadar bakır cürufu kullanmıştır. Basınç dayanımı sonuçları, bakır cürufunun dayanımı arttırdığını göstermiştir. Ancak bakır cürufu kullanımı daha gevrek kırılmalar gözlenmiştir.

Moura vd. (2007), bakır cürufu içeren betonun basınç dayanımının, 28 günlük kür sonucunda referans karışıma göre tüm s/b oranlarında kademeli olarak arttığını bulmuştur.

Edwin vd. (2017), reaktif pudra betonunda bakır cürufunun kullanımını araştırmıştır. Isıl işlemle birlikte bakır cürufunun kullanılması mekanik özellikleri iyileştiriştir.

Edwin vd. (2019), bakır cürufunun yüksek performanslı betonda çimento ikame malzemesi olarak kullanımını incelemiştir. %0 ile %40 arasında değişen farklı bakır cüruf yüzdeleri ile karışımlar hazırlamıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı bakır cüruf oranlarına sahip betonların mukavemetinin 56. günde referans karışımıyla karşılaştırılabilir hatta daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmada, betonun en yüksek basınç dayanımının, yaklaşık 78 MPa olan 56 günlük karışımlarda 1798 $cm^2/g$ inceliğe sahip %10 bakır cürufu ile elde edileceği belirlenmiştir. Ayrıca daha ince bakır cürufu ile daha yüksek basınç dayanımlarının da elde edileceği gözlenmiştir.

Pavez vd. (2019), çimento yerine %0, 5, 10, 15 ve 20 bakır cürufu ile harçların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak, bakır cürufu içeren harçlarda, kontrol harcı ile karşılaştırıldığında, basınç ve eğilme dayanımında 7, 28 ve 90. günlerde kademeli bir artış gözlenmiştir. Kontrol ve bakır cürufu katkılı harçlar arasındaki büyük farklar 7 gün sonra ortaya çıkarken, cüruf varlığının sertleşme sürecinde geciktirici bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, 90. günde basınç ve eğilme dayanımı hem kontrol harcı hem de bakır cürufu içeren harçlar için çok benzerdir. Bakır cürufunun kullanımı için optimum oranın %5 olduğu belirtilmiştir.

### 2.1.6 Bakır Cürufu ve Taze Hal Özellikleri

#### 2.1.6.1 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, ACI tarafından "yeni karıştırılmış beton veya harcın homojen bir duruma getirilme kolaylığını belirleyen bir özellik olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, yerleştirme, sıkıştırma ve yüzey bitirme özelliğinin de kolay yapılabilmesi gerekmektedir. Geleneksel betonun işlenebilirliği genellikle slump (çökme) testi ile belirlenir. (Bentz vd., 2013).

Al-Jabri vd. (2009), aynı işlenebilirlikte %100 agrega içeren kontrol karışımına kıyasla %0 bakır cürufu ikamesinde su ihtiyacı neredeyse %22 azalmıştır. Yine aynı işlenebilirlikte, bakır cüruf oranı arttıkça basınç dayanımında genel bir artış gözlenmiştir.

Selvi vd. (2014), aynı s/ç oranında ince agrega ikamelerinin bakır cüruf içeriğinin artmasıyla betonun işlenebilirliğinin arttığını bildirmiştir. Sambhaji ve Autade (2016), aynı s/ç oranında ince agrega ikamelerinin bakır cüruf içeriğinin artmasıyla betonun işlenebilirliğinin arttığını ifade etmiştir.

Lye (2015), agrega olarak bakır cürufu kullanılan tüm karışımların işlenebilirliğinin, önemli ölçüde arttığını, ancak betonun işlenebilirliğindeki bu artış oranının karışımın aşamasını etkilediğini belirtmiştir.

Bhoi vd. (2018) betonda ince agrega yerine bakır cürufu kullanıldığında su ihtiyacında önemli bir düşüş olduğu ve bunun da betonun işlenebilirliğinin artmasıyla sonuçlandığı sonucuna varmıştır. Çalışma, parlak yüzey dokusu ve bakır cürufunun çok düşük su emme oranının, çökmedeki önemli artıştan sorumlu olduğunu belirtilmiştir.

#### 2.1.6.2 Terleme

Betonun terlemesi, suyun üst yüzeye doğru fiziksel hareketi olarak düşünülebilir. Yüzey bitirme süreleri arttığında, yüzeyde daha yüksek s/ç oranına sahip şerbet oluştuğundan, dayanım ve dayanıklılık azalmaktadır. Terleme betonun servis ömrü açısından önemli bir özelliktir. Terleme suyu, buharlaşmayla kaybedilen suyun yerini alır beton yüzeyinin çok hızlı kurumasını önler (Ravindrarajah, 2003). Terleme, bir tür statik ayrışma olarak da bilinir, taze haldeki beton bileşenlerinin yoğunluk farkından kaynaklanır (Gökçe ve Andiç, 2019).

Gupta ve Siddique (2019) çalışmasında, %40 'tan fazla bakır cürufu içeren karışımlarda terleme ve ayrışma belirtileri gözlemlemiştir. Bakır cüruf tanelerinin ağır özgül ağırlığı ve camsı dokusu nedeniyle daha fazla terleme gözlenmiştir.

Bununla birlikte, Kumar (2013) 'ın başka bir çalışmasında, bakır cürufu işlenebilirlik gereksinimlerini karşılar, terlemeyi azaltır ve betonun basınç dayanımını iyileştirir.

Shoya vd. (1997) bakır cürufunun ince agrega yerine kullanılması durumunda terleme miktarının ve oranının arttığını bildirmiştir. Terleme miktarını 5 $l/m^2$'nin altına düşürmek için %40 'tan az bakır cürufu kullanılmasını önermişlerdir.

Hwang ve Laiw (1989) bakır cürufu ile yapılan harçların hava miktarının doğal agrega ile yapılanlardan daha az olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, bakır cüruf agregalarının düzensiz tane şekli, yüksek özgül ağırlığı ve camsı pürüzsüz yüzey özellikleri, işlenebilirlik özellikleri üzerinde etkilidir.

### 2.1.7 Bakır Cürufu ve Dayanıklılık

Betonarme bir yapının hizmet ömrü, çevre ile olan etkileşimlerine bağlıdır. Bu nedenle dayanıklı beton, belirli bir süre boyunca şiddetli çevre koşullarına maruz kaldığında mekanik özellikleri ve görsel görünümü etkilenmeyen bir betondur (Alimohammad vd., 2019).

Beton agresif ortama maruz kaldığında orijinal şeklini, kalitesini ve hizmet verebilirliğini korumak için hava koşullarına, kimyasal etkilere, aşınmaya veya diğer bozulma süreçlerine dirençli olmalıdır. Dayanıklılık, büyük olasılıkla beton ve betonarme yapıların uzun vadeli hizmet verilebilirliği ile ilgilidir. Servis ömrü, yapının belirli bir ortama maruz kaldıktan sonra kendisi için tasarlandığı ve inşa edildiği işlevleri yerine getirme kabiliyetini ifade eder. Dayanıklılık problemini çözmek için birçok araştırmacı derinlemesine araştırmalar yapmıştır.

Çalışmalar karbonatlaşma, alkali agrega reaksiyonu, korozyon, sülfat etkisi, çiçeklenme ve donma-çözülme etkisini kapsamaktadır (Li, 2011).

#### 2.1.7.1 Donma ve çözülme dayanıklılığı

Soğuk ortamlarda betonun en yaygın fiziksel bozulmalarından biri donma çözülme etkisidir. Kılcal gözenek yapısı içindeki suyun donması, hacimde yaklaşık %9 'luk bir artışa neden olmaktadır. Özellikle betondaki gözenekler doygunluğa yakın ise betonda ciddi çatlamalara ve bozulmaya neden olmaktadır. Donma çözülme hasarının iki türü vardır:

a) Betonun gövdesi içinde suyun donmasından kaynaklanan basınç dayanımı ve ağırlık kaybı ile ortaya çıkan içsel don hasarı;

b) Zayıf tuzlu çözeltilerle temas ettiğinde beton yüzeyinin donmasından kaynaklanan yüzey dökülmesidir (Abed ve Nemes, 2019).

Qiu vd. (2020) 'ye göre donma-çözülme hasarı, soğuk iklimlerde betonarme yapılarda dayanıklılık kaybının başlıca nedenidir ve kıyı bölgelerindeki betonarme yapılar donma-çözülme döngülerinde deniz suyu tuzluluğundan ciddi şekilde zarar görmektedir. Salin donma çözülme döngülerine bağlı beton bozunma mekanizmalarını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Donma-çözülme döngülerinden kaynaklanan hasar iki önemli yönden zararlıdır: yüzeydeki pullanma ve içsel don hasarıdır. Çözünmüş tuzun varlığı her iki tür hasarı da arttırmaktadır.

Donma çözülmenin neden olduğu bozulma, betondaki su varlığıyla bağlantılıdır, ancak donma sırasında suyun genleşmesi ile açıklanamaz. Açıkta saf su 0 °C 'de donarken, betonda su gerçekte çeşitli tuzların bir çözeltisidir, bu nedenle donma noktası daha düşüktür. Ayrıca, suyun donduğu sıcaklık, gözeneklerin boyutuna bağlıdır. Beton gözeneklerdeki suyun donma sıcaklığı gözenek boyutunun küçülmesiyle azalır.

Betonda, gözenek boyutları geniş bir aralığı sahiptir, bu nedenle tek bir donma noktası yoktur. Gösterge olarak, doygun çimento pastası için, 0,1 mm 'den büyük gözeneklerdeki serbest su, jel gözeneklerindeki su (10 nm 'den küçük gözenekler); -35 °C ve -10 °C'nin altında donar; 0,1 ile 0,01 mm arasındaki gözeneklerdeki su -20 ile -30 °C arasında donar; ve donma dış katmanlarda en büyük gözeneklerde başlar ve yalnızca sıcaklık daha fazla düştüğünde iç kısımlara ve daha küçük gözeneklere uzanır. Spesifik olarak, jel gözenekleri buz oluşumuna izin vermek için çok küçüktür ve donmanın büyük kısmı kılcal gözeneklerde gerçekleşir. Eksik sıkıştırmadan kaynaklanan daha büyük boşlukların genellikle hava ile doldurulduğu ve kayda değer bir şekilde ilk don etkisine maruz kalmadığı da not edilmelidir. Betona yapılan donma-çözülme döngüsü saldırıları sırasında, kalsiyum ve sodyum klorür gibi buz çözücü tuzların betonla temas halinde bulunması zararlı bir faktördür. Bu tuzların bulunduğu dış tabakalar donma noktasını düşürmedeki etkilerine rağmen, muhtemelen agregayı örten çimento hamurunun erken ortaya çıkması ve çiçeklenmenin erken ortaya çıkması ile higroskopik etkilerinden kaynaklanan su doygunluğunun artması nedeniyle dondan daha güçlü etkilenir (Li, 2011).

Shoya vd. (1997) ve Al-Dulaijan vd. (2003) gibi bazı araştırmacılar, bakır cürufunu agrega olarak kullandıklarında betonun donma-çözülme direncinin kontrol numunelerine göre daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Li (1999) ve Ayano ve Sakata (2000) gibi diğerleri, bakır cürufu ince agrega ile yapılan numuneler için benzer veya daha yüksek dayanıklılık gözlemlemişlerdir (Shi vd., 2008).

Peirovi vd. (2019), bakır cürufunun prekast betonun dayanıklılığına etkisini araştırmış, donma çözülme direncini ağırlık kaybı cinsinden belirlemiştir. Sonuçlar, bakır cürufunun beton bordürlerin donma çözülme direncini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, minimum kütle kaybı, %40 oranında agrega yerine kullanılan bakır cürufu içerikli numunelerde elde edilmiştir.

Lemougna vd. (2020), inşaatta potansiyel uygulama için seramik malzemelerin geliştirilmesinde bakır cürufu ve spodümen atıklarının yeniden kullanımını araştırmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, malzemelerin 200 donma çözülme döngüsünden sonra iyi bir dayanıklılık sunduğunu göstermiştir.

#### 2.1.7.2 Kuruma büzülmesi

Betonun kuruma büzülmesi, havada saklanan sertleşmiş betondan suyun atmosfere buharlaşması ile oluşan hacim azalmasıdır. Aynı zamanda, yüksüz ve kısıtlanmamış bir örnekte sabit sıcaklıkta zamana bağlı ölçülen gerilim olarak da tanımlanır. Büzülme, kurumaya maruz yüzeylerde en büyük etkiyi gösterir ve elemanın iç kısmına doğru azalmaktadır. Kuruma koşulları numunenin hem üst hem de alt yüzeylerde aynıysa, toplam gerilme numunenin derinliği boyunca aynı olacaktır; bununla birlikte, kuruma, üst ve alt yüzeylerden farklı bir hızda meydana gelirse, toplam gerilme dağılımı eğimli hale gelir ve elemanın eğrilmesi ile sonuçlanır. Kuruma büzülmesi, gerilmeye yol açarak çatlakların oluşmasına neden olur ve bunun sonucunda da dayanıklılık sorunları ortaya çıkar. Betonun kuruma büzülmesini etkileyen faktörler arasında malzeme bileşenleri, gözeneklilik, betonun yaşı, kür sıcaklığı, bağıl nem ve kullanılan katkı türleri bulunmaktadır (Tam ve Ng, 2012).

Daha önceki araştırmalar, betonun kuruma büzülmesi özelliklerinin mineral katkılar, çimento türü, kimyasal katkılar ve agrega miktarına göre değiştiğini göstermiştir. Ayrıca kuruma büzülmesi özelliklerini etkileyen en önemli faktörler karışımın su içeriği ve s/ç oranının olduğu ortaya çıkmıştır (Zhang vd., 2013).

Ayrıca birçok çalışmada, ince agrega olarak bakır cürufu kullanılması sonucunda betonun kuruma büzülmesi performansı, kontrol numunesi ile benzerlik göstermiştir (Sharifi vd., 2020).

You vd. (2020), farklı ikame oranlarında (hacimce -%0, %20, %40 ve %60) doğal agrega yerine bakır cürufunun etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, düşük bir ikame oranında (%20 ve %40), kuruma büzülmesini azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte, bakır cürufunun yüksek bir oranında (%60) kullanılması hem otojen hem de kuruma büzülmesini arttırmıştır.

#### 2.1.7.3 Sülfat direnci

Sülfatlar genellikle betona sodyum ve magnezyum sülfat olarak etki etmektedir. Sodyum ve magnezyum sülfat etkisi zamanla betona zarar verebilmektedir. Sülfatlar deniz suyunda ve bazı yer altı sularında bulunabilir. Betonun gözenekli olması durumunda sülfat tuzları rahatlıkla beton bünyesine sızabilmektedir (Rose ve Velan, 2019).

Betonarme yapıların en agresif ortamlarından biri olarak bilinen sülfat saldırısı, ciddi bozulmalara neden olur ve hizmet ömrünün kısalmasına yol açmaktadır. Sülfat saldırısı genellikle sülfat iyonlarının bozucu bir reaksiyonu olarak tanımlanır. Sülfat saldırısı, beton bozulmasının çeşitli kimyasal mekanizmalarından biridir. Betonarme yapıların sülfata maruz kalması, beton matrisinde zararlı kimyasal, mikroyapısal ve fiziksel değişikliklere yol açarak ciddi bozulmalara ve hizmet ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Çimentonun cüruflar ile ikame edilmesi, sülfat saldırısına karşı beton direncini artırmanın en etkili yöntemlerinden biridir (Najimi vd., 2011).

Najimi vd. (2011) çalışmasında, sülfat çözeltisindeki betonlarda bakır cürufunun performansı incelenmiştir. Çimentonun %0, 5, 10 ve 15'i oranında bakır cüruf ile yer değiştirilerek yapılan betonlarda sülfat çözeltisinde genleşme ölçümleri, basınç dayanımı ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, bakır cürufu içeren betonların, kontrol beton numunelerine göre sülfat etkisinde daha iyi basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. Bakır cürufu içerikli karışımların dayanımlarının normal şartlarda kontrol karışımlarından daha düşük olduğu gözlenmesine rağmen, sülfat etkisi durumunda dayanımlarının kontrol karışıma göre daha iyi olduğu rapor edilmiştir.

Rose ve Velan (2019), betonda doğal nehir agregası yerine bakır cürufu kullanmıştır. Bu çalışmada, M40 sınıfı betonunda bakır cürufunun sülfat saldırılarını katkısı incelenmiştir. Bu deneysel çalışmada, bakır cürufu ince agrega yerine %0 'dan %100 'e kadar kullanılmıştır. Bakır cürufunun sülfat etkisine karşı betonun dayanıklılığına olumlu katkı sağladığı gözlenmiştir.

Gopalakrishnan ve Nithiyanantham (2020), %5 $Na_2S0_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımını 3 günden 28. güne kadar incelemiştir. Minimum basınç dayanımı değerinin referans numunelerden elde edildiği, en yüksek basınç dayanımının ise %30 bakır cürufu katkılı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Bakır cürufunun %30 oranında kullanılması durumunda basınç dayanımı, kontrol karışımına göre %22 oranında artmıştır. Portland çimento harcında bakır cürufu olması halinde hidratasyon derecesi azalırken sülfat etkilerine karşı olumlu katkı sağlamaktadır. Çalışma ayrıca çimentosu yerine bakır cürufu kullanımının sülfat etkisine karşı faydasını üç şekilde azalttığını bildirmiştir:

1) Bakır cürufu, karışımdaki $C_3A$ miktarını azaltır;

2) Bakır cürufu, $Ca(OH)_2$ ile etkileşime girer ve etrenjit oluşumunu azaltır;

3) Bakır cürufu karışımın geçirgenliğini azaltmaktadır.

### 2.1.8 Çevresel Etkiler

Katı atık yönetimi, dünyadaki en önemli çevre sorunlarından birisidir. Atık depolama için yer olmaması nedeniyle atıkların kullanımı bertarafın bir alternatifi haline gelmiştir. Beton, çimento, ince agrega, iri agrega ve su kullanılarak üretilen bir yapı malzemesidir. Dere agregası, beton üretiminde kullanılan en yaygın ince agrega türüdür, ancak nehir yataklarının hızla tükenmesi, yüksek nakliye maliyeti vb. nedenlerle çok pahalı hale gelmiştir. İnşaat sektörü için sürdürülebilir kalkınma, geleneksel olmayan ve yenilikçi malzemelerin kullanımını ve geri dönüşüm kavramını içermektedir. Doğal kaynakların eksikliğini telafi etmek ve çevreyi korumanın alternatif yollarını bulmak için atık malzemelerin kullanımı teşvik edilmelidir. Beton üretiminde doğal agrega yerine alternatif malzemelerin kullanılması, betonum daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir yapı malzemesi olmasını sağlayacaktır (Shyam vd., 2016).

Cüruf oluşumundan kaynaklanan başlıca çevresel etkiler, tarımsal toprakların kullanımı ve peyzaj alanlarına zarar verilmesidir (Pavez vd., 2019). Çimentonun kısmi ikamesi olarak bakır cürufunun kullanılmasıyla, çimento üretimi için gerekli olan önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanacaktır (Shi vd., 2008).

Çevresel bakış açısından, izabe tesislerinin temel sorunu, bakır cürufu olarak adlandırılan gaz ve katı kirletici maddelerin oluşmasıdır. Bu nedenle bakır eritme işleminin olumsuz etkilerini azaltmak için çevre dostu teknolojilere ihtiyaç vardır (Pavez vd., 2018).

## 2.2 Bazalt Liflar

Betonda lif kullanımındaki hızlı artış, yeni nesil kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkisine bağlanmaktadır. Betona lif eklenmesi sonucunda basınç, çekme, eğilme dayanımı ve tokluğu gibi mekanik özellikleri iyileştiği kanıtlanmıştır. Betonu güçlendirmek için çelik, cam ve polietilen gibi birçok lif türü kullanılmıştır. Mevcut farklı lifler arasında çelik lifler muhtemelen en çok araştırılan ve en yaygın kullanılan lif türüdür.

İnşaat sektöründe kullanılan umut verici yeni malzemelerden birisi bazalt lifidir. Yapı sektöründeki uygulamasına yönelik olarak bu ürün üzerinde yalnızca son birkaç yılda kapsamlı araştırma ve testler yapılmıştır. Bazalt lifi, cam lifine benzer bir kimyasal bileşime sahiptir, ancak daha iyi mukavemet özelliklerine sahiptir ve çoğu cam lifinin aksine, alkali, asidik ve tuz etkilerine karşı oldukça dayanıklıdır. Bu yüzden betonu güçlendirmek için mükemmel bir ürün haline gelmiştir. Diğer lif türleri ile karşılaştırıldığında, inşaat mühendisliği alanında kullanımı çok düşüktür. Bazalt, lavın hızlı soğuması ile oluşan bir tür magmatik kayaç türüdür. Dünyanın yüzlerce kilometre altında bulunur ve yüzeye erimiş magma olarak ulaşmaktadır. Magma yüzeye ulaştığında soğur ve hammadde olarak çıkarılır (Elshafie ve Whittleston, 2015; Kızılkanat vd., 2015).

### 2.2.1 Lifli Betonun Özellikleri

Bazalt lifler, yüksek korozyon ve ısıl dirençleri, hafiflikleri (çelik lif ağırlığının üçte biri) ve yüksek mukavemetleri (çelik mukavemetinden üç kat daha yüksek) ile karakterize edilen nispeten yeni nesil kompozit malzemelerden biri olarak kabul edilir (Alnahhal ve Aljidda, 2018). Bazalt lifi dünya çapında büyük bir ilgi görmüştür. Bazalt lifinin sanayileşmesi ile havacılık, uzay ve otomobil alanlarında yaygın olarak kullanılmıştır. İnşaat mühendisliği ve hidrolik mühendisliğinde, bazalt lif genellikle kısa parçalar halinde kesilir ve beton içerisine karıştırılarak betonun çekme dayanımı arttırılır (Sun vd., 2019).

Bazalt lifi, çevresel ve toksik etkileri olmayan ve kolayca ayrışabilen bir mineral türüdür. Ayrıca beton karışımına lif olarak eklemek, çekme, eğilme, darbe ve yorulma dayanımı gibi mühendislik özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir. Son yıllarda, lif takviyeli beton (FRC) ve lif takviyeli çimento esaslı kompozitler (FRCC), inşaat mühendisliği altyapılarında ve askeri uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. (Sadrmomtazi vd., 2018). Bazalt lifi takviyeli beton, köprülerin, otoyolların, konutların, deniz yapılarının, tünellerin servis ömrünü arttırmaktadır. Lifsiz beton ile karşılaştırıldığında elde edilen iyileştirme seviyesi, beton karışımına eklenen lif oranına bağlıdır (Elshafie ve Whittleston, 2015).

Bazalt lifli beton, sürekli liflerin uygun içerik ve yöntemlerle karıştırılmasıyla oluşan kompozit bir malzemedir. Betonun gevrekliğini, çatlamasını ve zayıf korozyon direnci gibi dezavantajlarını iyileştirmek için bazalt lifi beton karışımına ilave edilir. Bazalt lifinin betana ilave edilmesi betonun mühendislik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmektedir (Chen, 2013).

### 2.2.2 Bazalt Liflerinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bazalt lifinin yoğunluğu nispeten daha yüksektir. Kopmada gerilme mukavemeti cam lifine yakındır. E-modülü cam lifinden daha yüksektir. Yüksek ısıya direnci cam lifinden önemli ölçüde daha yüksektir (Chen, 2013). Chen, (2013) 'e göre, bazalt lifinin diğer liflerle birlikte karşılaştırılmalı fiziksel özellikleri Tablo 2.3 'te gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Bazalt lifinin fiziksel özellikleri

| **Performans** | **Bazalt elyaf** | **S cam elyafı** | **E cam elyafı** | **Karbonfiber** | **Aramidfiber** |
|---|---|---|---|---|---|
| Yoğun ($g/cm^3$) | 2,65 | 2,46-2,49 | 2,55-2,62 | 1,78 | 1,44 |
| Gerilme direnci (MPa) | 3000-3500 | 4590-4830 | 3100-3800 | 2500-3500 | 2758-3034 |
| Esneklik modülü(Gpa) | 79,3-93,0 | 88-91 | 76-78 | 230-240 | 124-131 |
| Uzama (%) | 3,2 | 5,6 | 4,7 | - | 2,3 |
| Isı (%) | -260-500 | 300 | -60-60 | 500 | 250 |
| Termal İletkenlik (W/mk | 0,031-0,038 | - | 0,034-0,04 | - | - |

Son yirmi yılda, bazalt lifleri kompozit malzemelerin potansiyel takviyesi olarak dikkate alınmıştır. Bazalt, dünyadaki çoğu ülkede bulunabilen ve doğrudan lif üretimi için uygun olan yaygın bir volkanik kayaçtır. Kimyasal yapısı neredeyse camın özeliklerine bağlıdır. Bazaltın en önemli bileşenleri $SiO_2$, $Al_2O_3$, CaO, MgO, $Fe_2O_3$ ve FeO'dur. Farklı oksitler, birincil bağlara sahip büyük bir çapraz bağlı molekül oluşturur, bu nedenle bazalt ve cam özel bir polimer türü olarak kabul edilebilir. Bazalt kayalar yaklaşık 1350 ile 1700 °C arasında erimektedir. Hızlı bir şekilde soğutulduğunda, bazalt camsı amorf bir fazda katılaşmaktadır.

Daha yavaş soğutma, kısmen kristal bir yapıya ve mineraller topluluğuna neden olur. Bazalt liflerinin iyi elektrik yalıtkanlık özellikleri mevcuttur. Bazaltın ortalama yoğunluğu 2,6-2,7 g/cm$^3$ iken, camın yoğunluğu 2,5-2,6 g/cm$^3$ 'tür (Deák ve Czigány, 2009).

Bazalt malzemeleri $SiO_2$ içeriklerine göre alkali bazaltlar (%42 'ye kadar $SiO_2$), hafif asidik bazaltlar (%43-46 $SiO_2$) ve asidik bazaltlar (%46 'nın üzerinde $SiO_2$) olarak sınıflandırılır. Bazaltın rengi, kimyasal bileşime bağlı olarak kahverengi ve griden donuk yeşile kadar değişir. Bazalt lifler, güçlü alkalilere karşı cam liflere göre daha dayanıklıdır, ancak cam lifler, güçlü asitlere daha iyi dayanabilir. Bazalt lifler, –200 °C ile +600 °C arasında geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda yapısal değişiklikler meydana gelebilir (Deák ve Czigány, 2009).

Bazalt lif, aşındırıcı ortamda yüksek korozyon direncine ve kimyasal stabiliteye sahiptir. Bazalt lif çok iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Cam lifi ile karşılaştırıldığında, bazalt lif yüksek mekanik özelliklere, ısı direncine, asit ve alkali direncine, ses yalıtımına, elektrik yalıtımına ve kompozit malzemeler için diğer mükemmel performanslara sahiptir. Düşük maliyetli, yüksek performanslı yeni nesil bir malzemedir. Bazalt lifin yüzeyi pürüzsüzdür. Gaz ve sıvı geçiş direnci oldukça yüksektir. 650 °C sıcaklıkta rahatlıkla kullanılabilir. Aynı zamanda çevre açısından tehlikeli olan asbest lifler gibi toksik değildir (Chen, 2013).

### 2.2.3 Bazalt Liflerinin Kullanın Alanları

Bazalt lifler, harika yalıtım özellikleri ve termal döngülere karşı iyi direnç gösterdiği için otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. 1990'larda ilk kez; bir Japon otomobil firması, yeni egzoz sistemi yapmak için Kiev endüstrisi ile AR-GE çalışmaları yapmıştır (Jamshaid, 2017).

Son yıllarda, bazaltın kompozit malzemeler için takviye olarak kullanılmasına yönelik artan bir ilgi ortaya çıkmıştır. Çünkü bazalt ürünlerinin fiziko-kimyasal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra, özellikle üretim teknolojilerinin iyi işlem yeteneği özellikleri ve maliyet etkinliği, bazalt lifleri, ön plana çıkarmıştır. Son deneysel programlar ve

analitik yaklaşımlar, bazalt lifi takviyeli malzemelerin inşaat mühendisliğinde bir dizi yapısal uygulama için etkili olabileceğini ortaya çıkarmıştır (Alnahhal, Aljidda, 2018).

Endüstriyel potansiyeli yüksek olan ve çevreye daha az zararlı modern lif olarak kabul edilen bazalt lifler, kompozit sektörlerinde uygun hale gelmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikleri göz önüne alındığında, karbon ve cam gibi tip lifler için ciddi rakip olarak kabul edilmektedir. Doğrudan bazalt taşı eritilerek elde edilen bu liflerin son üretimi, Avrupa ve Amerika'da fabrikaların kurulmasına yol açmıştır. Daha yeşil, daha hafif ve donatı çubuklarının kullanımının azaltılması gibi özellikleri göz önüne alındığında, bazalt lifler diğer endüstrilerde de iyi bir potansiyele sahip olabilir (Sadrmomtazi vd., 2018).

Asbeste göre üç kat daha fazla ısı yalıtım kapasitesine sahiptir ve elektromanyetik dalgalara karşı direnci sayesinde kirlilik yaratmaz. Otomobil endüstrisinde, uçak ve gemilerde elektro teknik amaçlı olarak kullanılmaktadır (Pareek ve Saha, 2019).

Bazalt ürünleri, tanklar, boru hatları (çoğunlukla petrol boru hatları), yüksek basınçlı kaplar, atık su filtreleri ve korozyona dayanıklı tanklar ve borular için kullanılabilir. Bazalt kompozit borular, petrol ve petrol ürünlerini, gazları, agresif sıvıları, gevşek malzemeleri, sıcak ve soğuk su tedarikini sağlayabilir. Bazalt ürünler, yüksek mekanik özelliklerinden dolayı hokey sopaları, tenis raketleri, kayaklar, snowboardlar, oklar gibi farklı spor malzemeleri ve çok çeşitli ürünlerin üretimi için de oldukça uygundur (Jamshaid, 2017).

Günümüzde lifli beton, mükemmel darbe dayanımı, yüksek eğilme ve çekme dayanımı, nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Bazalt lifi, iyi işlenebilirlik, çatlama direnci, darbe direnci ve termal stabilite gibi iyi özellikler göstermiş, bu nedenle poliakrilonitril ve polipropilen liflere uygun bir alternatif haline gelmiştir (Pareek ve Saha, 2019).

### 2.2.4 Bazalt Liflerin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımı

#### 2.2.4.1 İşlenebilirlik ve kıvam

Taze betonun işlenebilirliğini etkileyen birkaç faktör bulunmaktadır. Bunlar; su içeriği, agrega biçimi, karışım oranları, agregaların gradasyonu ve lif varlığıdır. Betonun işlenebilirliği slump (çökme) testi kullanılarak belirlenir. Karışıma liflerin eklenmesi s/ç oranını değiştirebilir ve sonuç olarak çökmesini azaltabilir. Bazalt lifi içeriği arttıkça karışımın çökme değerinin azaldığı rapor edilmiştir (Elshafie, Whittleston, 2015).

Lifli betonlarda karışımda lif olması durumunda işlenebilirlik büyük sorunlara yol açabilmektedir. Kuru harç karışımındaki su içeriği için tasarım karışımı akışkanlık testi kullanılarak incelenebilir. Lif içeriği arttıkça çimento esaslı kompozitin akışkanlığı azalmaktadır. Bunun arkasındaki sebep, bazalt liflerinin rastgele dağılması nedeniyle kompleks bir ağ yapısının oluşmasıdır. Buna ek olarak, bazalt lifi oranı arttıkça, lifleri sarmak için daha fazla çimento hamuru gerekecek ve bu da akışkanlık için daha az miktarda pasta ile sonuçlanacaktır. İstenilen akış özelliğini iyileştirmek için çeşitli öneriler sunulmuştur (süper akışkanlaştırıcılar ve viskozite düzenleyici katkılar gibi) (Ralegaonkar vd., 2018).

Liu vd. (2019)'nin belirttiği gibi, s/b oranı karışımların işlenebilirliğini etkileyen en önemli faktördür. Karışımdaki serbest su içeriği, s/b oranının artmasıyla artmış, bu da betonun akışkanlığını %10-12 oranında artırmıştır. Ayrıca bazalt lifinin varlığı akışkanlık performansını önemli ölçüde azaltmıştır.

Kabay (2014), liflerin genellikle betonun işlenebilirliğini bozduğunun belirtmiştir. Bu etki, tüm liflerin karakteristik özelliğidir ve kısmen liflerin yüzey alanını kaplamak için karışım suyu ve pastanın bir kısmının tüketiminden kaynaklanmaktadır. Agregalardan daha geniş yüzey alanı nedeniyle, liflerin etrafını sarması için daha çok miktarda pasta adsorbe etmesi gerekmektedir. Çalışma ayrıca, lif ilavesinin akışkanlaştırıcı miktarını artırdığını ve lif içeriğindeki artışın, hedef çökmeyi elde etmek için daha fazla akışkanlaştırıcı ihtiyacına neden olduğunu göstermiştir. Lif uzunluğunun iki katına çıkarılması, akışkanlaştırıcı içeriğini arttırmıştır.

Tumadhir (2013), bazalt lifinin betonun özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bazalt lifi hacimce %0,1; 0,2; 0,3 ve 0,5 oranlarında kullanılmıştır. İşlenebilirlik açısından, liflerin hacmi arttıkça çökme değerleri azalmıştır. Çalışma, liflerin taze betonun akışkanlığını engellemesinden ve bunun da işlenebilirlikte azalmaya yol açmasından kaynaklandığını açıklamıştır.

Ma vd. (2013), bazalt lifi takviyeli çimentolu esaslı kompozitlerin akışkanlığının, bazalt lif içeriğinin 0'dan 4,0 kg/m$^{3}$'e çıktığında çökme değerinin 192 mm'den 158 mm'ye düştüğünü gözlemlemiştir. Çalışma sonucunda; bazalt liflerini sarmak için daha fazla pasta gerekmiş, bu nedenle akışkanlık azalmıştır. Ayrıca, bazalt liflerinin rastgele dağılımı nedeniyle akışkanlığın önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir.

Jiang vd. (2016), onarım uygulamaları için bazalt liflerinin karışıma eklenmesine etkilerini incelemiştir. Harcın çeşitli özelliklerinden olan taze, mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, harca bazalt lifinin eklenmesi çökme kaybına yol açmıştır.

Hanafi vd. (2020), bazalt lifi ilavesinin düşük hacim oranında (%0,3) karışımların akışkanlığını artırdığını gözlemlemiştir. Ancak %0,3 'den fazla bazalt lifi kullanılması çökme değerlerini azaltmıştır. Çalışma, bazalt lifinin geniş yüzey alanı nedeniyle mevcut suyu emdiğini belirtmiştir. Ek olarak, bazalt lifi yüksek hacimli fraksiyonda daha fazla çimento hamuru ihtiyacı duymaktadır. Bununla birlikte, bazalt lifi ilavesiyle kompozitlerin kohezyonu artmıştır.

Qin vd. (2018), Karışıma bazalt liflerinin eklenmesinin, lifsiz harca göre işlenebilirliğin azaldığını göstermiştir. Çalışma, büyük yüzey alanlarına sahip filament liflerinin, etrafına sarmak için karışım suyu ve çimento hamurunun bir kısmını adsorbe etmesi gerektiğinden, bu etkinin beklenebileceğini belirtmiştir. Bu nedenle, daha yüksek hacimde bazalt lifleri (>%1,0) içeren karışımlarda tasarıma dikkat edilmelidir.

#### 2.2.4.2 Gözeneklilik

Literatür, farklı uzunluk ve içerikteki bazalt lifleri ile güçlendirilmiş betonun daha yüksek bir geçirgenlik ve daha az gözeneklilik sağladığını göstermiştir. Ayrıca, bazalt

liflerinin çimento ile kimyasal olarak aderans sağladığı da rapor edilmiştir (Elshafie, Whittleston, 2015).

Hanafi vd. (2020), bazalt lifi ilavesinin, düşük hacim fraksiyonunda (%0,3) gözenekliliği azalttığını belirtmiştir. %0,3 'den fazla bazalt lifi ilavesinin, gözeneklilik değerlerini arttırdığı belirtilmiştir. Ek olarak, bazalt lifi arttıkça daha düşük gözeneklilik için daha fazla çimento pastasına ihtiyaç vardır.

Grzeszczyk vd. (2020), bazalt liflerinin RPC 'ye eklenmesinin toplam gözenekliliğin artmasına ve bazalt liflerinin oranı arttıkça gözenek dağılımının değişmesine neden olduğu bildirilmiştir. 2 kg/m$^3$ lif içeriğinde >20,0 nm'den büyük gözenek içeriği artarken 20–200 nm gözenek içeriği azalmaktadır. Daha yüksek lif içeriğinde (6 kg/m$^3$ ve 10 kg/m$^3$), 20 nm 'nin altındaki gözeneklerin azaldığı ve 200-2000 nm aralığındaki gözeneklerin arttığı gözlenmiştir.

#### 2.2.4.3 Birim hacim ağırlık (BHA)

Betonun yığın yoğunluğu veya birim hacim ağırlığı, birim ağırlık başına hacim ölçüsüdür ve kg/m$^3$ cinsinden ifade edilir. Betonun birim ağırlığını ölçmenin önemi, karıştırma, taşıma, yerleştirme ve örnekleme sırasında hammaddelerin homojenliğinin etkili bir göstergesidir. BHA'daki önemli bir değişiklik, süreçte bir yerde bir problem olduğunun işaretidir (Elshafie ve Whittleston, 2015).

Tumadhir (2013) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar, beton karışımında bazalt lif içeriği arttıkça BHA değerinin sabit kaldığını göstermiştir. Bu nedenle BHA, bazalt lifin hacim yüzdesinin artışına bağlı değildir.

Gopinath (2013), bazalt liflerinin farklı hacim fraksiyonlarını kullanmanın betonun BHA etkisini incelemiştir. Bu araştırmada kullanılan lif aralığı %0,3 ile %2 arasında değişmektedir. Sonuç olarak, beton karışımına hacimce daha fazla lif içeriği eklenmesinin betonun BHA biraz artırdığını göstermiştir.

#### 2.2.4.4 Boyutsal kararlılık (Rötre ve sünme)

Boyutsal kararlılık, betonun uzun vadeli dayanıklılığını ve servis ömrünü önemli ölçüde etkileyen önemli bir mühendislik özelliğidir. Erken yaşlarda, kısıtlanmış koşullar altında hacim azalması (yani büzülme) meydana geldiğinde, beton sıklıkla çatlama eğilimindedir. Kuruma büzülmesi ve otojen büzülme, sırasıyla harici ve dahili nem kaybına bağlı olarak hacim azalmasına karşılık gelmektedir. Otojen büzülme hidratasyon (kendi kendine kuruma) yoluyla iç su kaybıyla ilişkilendirilirken, kuruma büzülmesi buharlaşma yoluyla su kaybı ile ilişkilendirilmektedir (Radlińska, 2016).

Betonun sünmesinin nedenlerinden birisi, dış yükün etkisi altında koloidal suyun sızması olduğuna inanılmaktadır. Bu tür bir sızıntı, agreganın geçirgenliği ile bağlantılı olmakta ve böylece betonun sünmesi, agreganın geçirgenliği ne kadar yüksek olursa o kadar büyük olmaktadır. Doğal agreganın E-modülü azaldıkça betonun sünmesinin arttığı belirtilmiştir. Ancak bu etki aynı zamanda agreganın geçirgenliğine de bağlanabilmektedir, Düşük E- modülüne sahip agregalar genellikle daha yüksek bir geçirgenliğe sahiptir (Chiorino, 1965).

Yaygın olarak kullanılan liflerden, çelik, polipropilen, PVA ve bazalt lifi, betonun uzun vadeli deformasyon performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan sünme davranışını etkilemektedir. Liflerin sünmeyi ve rötreyi azalttığı bazı çalışmalarda belirtilmiştir (Zhao vd., 2016).

### 2.2.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Bazı araştırmalar, bazalt lif içeriği %0,25 olduğunda maksimum basınç dayanımına ulaşıldığını göstermiştir. Lif içeriği arttıkça ise basınç dayanımı azalmaktadır. Farklı bazalt lif uzunlukları kullanılarak maksimum basınç dayanımı, 10 ile 20 mm arasındaki uzunluklarda elde edilmiştir. Literatür ayrıca, betonun çekme dayanımını artırmak için farklı bazalt lif içeriğinin eklenmesinin önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Karışımda kullanılan bazalt lifleri ne kadar uzunsa, elde edilen çekme dayanımı o kadar yüksek olur. Literatürde bazalt liflerinin hem içeriğinin hem de uzunluğunun artmasının betonun eğilme dayanımını, E-modülünü ve çatlama direncini

artırdığı görülmüştür. Ayrıca, betonun çekme dayanımını arttırmak için farklı bazalt lif içeriğinin eklenmesinin önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlenmiştir.

Elshafie ve Whittleston (2015) tarafından belirtildiği gibi inşaat sektörü, bazalt lifi kullanan en büyük sektörlerden birisidir. Örneğin, bazalt lifler temellerde, perde duvarlarda, döşeme yapımında ve beton yolların güçlendirilmesinde kullanılır. Hacimsel olarak oluşturulmuş donatı ihtiyacı için 1 $m^3$ beton için yaklaşık 2-5 kg bazalt lifi kullanımı önerilmektedir. Sertleşmiş betonda bazalt lifi kullanımın avantajları şu şekilde sıralanmıştır;

- Basınç dayanımı % 20-25 oranında artar,
- Çekme dayanımı % 200 - 230 oranında artar,
- Don direnci 1,6 - 2 kat artar,
- Çatlama direnci büyük ölçüde artar.

#### 2.2.5.1 Basınç dayanımı

Betonun basınç dayanımı, inşaat mühendisleri tarafından bina tasarımında kullanılan en yaygın performans ölçüsüdür. Basınç dayanımı, eksenel yüke dayanma kapasitesi olarak tanımlanır. Genel olarak, beton çekme etkisinde zayıf ancak basınç etkisinde güçlüdür ve yüksek mukavemet gösterebilir. Bununla birlikte, farklı bazalt lif uzunluklarının ve içeriğinin eklenmesi betonun basınç dayanımını arttırmaktadır (Whittleston, 2015).

Kabay (2014) 'ın deneysel çalışmasında, bazalt lifinin betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. S/Ç oranları 0,45 ve 0,60 olarak belirlenen yüksek ve normal dayanımlı betonlar dökülmüş ve bu betonlara farklı miktar ve boyutlarda bazalt lifi katılarak toplam 10 adet karışım hazırlanmıştır. Basınç dayanımı açısından sonuçlar, lif eklenmesinin basınç dayanımında azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Lif uzunluğunun iki katına çıkarılması basınç dayanımına katkıda bulunsa da elde edilen dayanımlar referans karışıma göre düşük kalmıştır.

Kızılkanat vd. (2015), bazalt ve cam liflerinin yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanmıştır. Sonuçlar, %0,25'in üzerindeki lif içeriğinin hem bazalt hem de cam lif

için basınç dayanımında hafif bir artışla sonuçlandığını göstermiştir. %0,50 oranında bazalt lifi kullanımı 66,6 MPa ile en yüksek basınç dayanımını sağlarken, %0,75 oranında cam lifi kullanımı 67,6 MPa ile en yüksek basınç dayanımını sağlamıştır.

Jiang vd. (2016), lifin eklenmesinin basınç dayanımını önemli ölçüde değiştirmediğini gözlemlemiştir. Basınç dayanımının lif katılmasıyla artma eğilimi 90 günlük numunelerde gözlenmiştir.

Sun vd. (2019), lif içeriğinin belirli bir noktaya kadar artmasıyla birlikte önce betonun basınç dayanımının arttığını, ardından azaldığını ifade etmiştir. 6 ve 12 mm uzunluğundaki bazalt liflerinden üretilen betonlarda 6 mm lif uzunluğu basınç dayanımını daha çok arttırmıştır. Optimum lif oranının ise %2 olduğu vurgulanmıştır.

Sarkar ve Hajihosseini (2018), bazalt liflerinin beton kaplamaların mekanik özelliklerini iyileştirmedeki etkisini değerlendirmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneyler, iki lif uzunluğunda (12 ve 24 mm), üç lif dozajında (4, 8 ve 12 kg/$m^3$) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar; bazalt lifinin basınç dayanımını %4,3 ile %9,4 arasında artırdığını göstermiştir.

Ayub vd. (2014), bazalt liflerinin hacimce %3 'e kadar kullanımının yüksek performanslı lifli betonun mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemiştir. Çalışmanın sonuçları, bazalt liflerinin eklenmesinin basınç dayanımını etkilemediğini göstermiştir.

#### 2.2.5.2 Yarmada-çekme dayanımı

Yarmada-çekme dayanımı, betonun çekme özelliklerinin belirlenmesinde en sık kullanılan tekniklerden birisidir. Bu testin artan popülaritesinin ana nedenleri şunlardır: testin hazırlanmasının ve performansının basitliği, basınç dayanımı testiyle aynı test numuneleri ve ekipmanının kullanılması ve test sonuçlarının nispeten dar dağılımıdır. Çeşitli nedenlerle, numuneler laboratuvarda üretilmiş veya bitmiş yapılardan alınmasına rağmen, yarmada çekme testleri için genellikle temel olmayan boyutlardaki numuneler kullanılır. Bu şekilde elde edilen sonuçların objektif kullanımı, test edilen numunelerin yarmada çekme dayanımı için boyutu ve şekil

arasındaki ilişkinin belirlenmesini gerektirir. Betonun yarmada çekme dayanımı numune boyutuna bağlıdır (Kadlecek, 2002).

Kızılkanat vd. (2015), yarmada çekme testinin karışık gerilme alanı ve farklı lif oryantasyonu nedeniyle doğrudan çekme dayanımı için doğru bir tahmin yöntemi olmadığını belirtmiştir. Ancak, bu testte gözlenen başarısızlık modeli, malzemenin sünekliği hakkında makul bir fikir verdiği için yararlıdır. Ayrıca göçme örneği incelendiğinde, geleneksel betondan farklı olarak, lifli betonların ilk çatlamadan sonra ayrılmadığı da görülmüştür. Bu etkinin lifler tarafından sağlandığı belirlenmiştir. Lif ilavesinin, betonun yarmada çekme dayanımında bir artışa neden olduğu kaydedilmiştir.

Ma (2010), önceden ıslatılmış bazalt liflerinin uzunluğu arttıkça betonun çekme dayanımının arttığını bulmuştur. 10, 20 ve 30 mm'lik farklı bazalt lif uzunluklarının betonun çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, 30 mm bazalt lifin kullanılmasının en yüksek çekme dayanımına ulaştığını göstermiştir.

Budkonstruktsiya LLC ve Technobasalt-Invest (2013), 12, 24 ve 50 mm uzunluklarda ve %1-3 bazalt lif içeriğine sahip betonun çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. %1-2 lif içerikli 12 mm bazalt lif kullanılması, $C_20$ sınıfından daha yüksek çekme dayanımı elde edilmesini sağlar; Ayrıca 24 ve 50 mm uzunluğunda, %1-3 içerikli bazalt lifli çekme dayanımını 1,79 kat arttırmıştır. Çoğu lif uzunluğu daha yüksek çekme dayanımı elde etse de 24 ve 50 mm lif uzunlukları kullanıldığında önemli bir fark elde edilememiştir.

Yakhlaf (2015), artan bazalt lif içeriğinin, yarmada çekme dayanımının artmasıyla sonuçlandığı göstermiştir. Yarmada çekme dayanımı, kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %5 ile %33 artmıştır. Yarmada çekme dayanımındaki bu artış, bazalt liflerinin çatlak büyümesini azaltmasına bağlanabilir. Yük uygulandığında çatlaklar oluşmaya başlar ve beton silindir ikiye bölünür. Lifler, silindirin ayrık kısımları arasında bir köprü oluşturur ve iki parçanın ayrılmasını engeller.

Tumadhir (2013), lifin hacim fraksiyonunu %0,3 'e kadar artırarak yarmada çekme dayanımında hafif bir artış gözlemlemiş ancak bu etkinin %0,5 bazalt lifi kullanımı ile ortadan kalktığını tespit etmiştir.

#### 2.2.5.3 Eğilme dayanımı

İnşaat ve mühendislik alanında, malzemenin yapılarda kullanılacak kadar sağlam olduğundan emin olmak için malzemenin eğilme dayanımı gibi bazı özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Elayesh (2009)'e göre eğilme dayanımı, malzemenin yük altında deformasyona direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Buna ek olarak, karışımda kullanılan bazalt lifleri ne kadar uzun olursa, elde edilen çekme mukavemeti o kadar yüksek olur. Betondaki bazalt liflerinin hem içeriğinin hem de uzunluğunun artmasının betonun eğilme dayanımını, E-modülünü ve çatlama direncini artırdığı belirtilmiştir (Whittleston, 2015).

Deneysel sonuçlar, lif takviyeli betonda bazalt lif içeriği %1 olduğunda, eğilme tokluğu indeksinin 5,6 kat arttığını göstermektedir (Chen, 2013).

Kızılkanat vd. (2015), lif ilavesinin, betonun eğilme dayanımları üzerinde referans betona göre daha olumlu olduğunu bildirmiştir. Bazalt lifi takviyesi ile eğilme dayanımındaki artışın, cam lif takviyeli beton karışımlarına kıyasla daha belirgin olduğunu bulmuştur. Eğilme dayanımı %1 'e kadar artan fiber oranı ile kademeli olarak artmıştır. Çalışma ayrıca, eğilme yüküne maruz kaldığında bir eğilme çatlağı oluştuğunda referans numunelerin iki parçaya bölündüğünü belirtmiştir. Ancak bazalt lifleri, çatlakların yayılmasını etkili bir şekilde yavaşlatmış ve numunenin tokluğunu arttırmıştır.

Ayub vd. (2014), bazalt lifli betonun eğilme dayanımının lifsiz betondan daha yüksek olduğunu bulunmuştur. Betona bazalt lifleri eklendiğinde %38 ’e kadar eğilme dayanımında artış elde edilmiştir.

Sadrmomtazi vd. (2018), bazalt liflerinin karışıma eklemenin eğilme dayanımı sonuçları üzerindeki olumlu etkisini vurgulamıştır. Sonuçlar, silis dumanı olmayan

numunelerde %1 ve %1,5 oranında lif eklenerek eğilme dayanımı sırasıyla %29 ve %43 artmıştır.

Hanafi vd. (2020) bazalt liflerinin eklenmesi matrisi yoğunlaştırmış ve daha iyi aderans gözlenmiştir. Bazalt lifi ilavesinin %0,75 'e kadar etkili olduğu bildirilmiştir. %0,75 'den fazla lif kullanımında eğilme dayanımında bir azalma rapor edilmiştir. Çalışmada, çimento pastaları arasındaki köprüleme etkisinin azalması ve matris bağlarının zayıflaması nedeniyle, daha yüksek oranlarda vibrasyonda zorluk yaşandığı ve bunun da eğilme dayanımını azalttığı açıklanmıştır.

Grzeszczyk vd. (2020), aynı s/c oranı ile, bazalt lif içeriğinin 2 kg/$m^3$ 'ten 6 kg/$m^3$ 'e yükselmesi ile RPC eğilme dayanımının artırdığını göstermiştir. Lif miktarı daha yüksek olduğunda (8 kg/$m^3$ ve 10 kg/$m^3$), beton eğilme dayanımında azalma gözlenmiştir. Çalışma ayrıca RPC en yüksek eğilme dayanımına 6 kg/$m^3$ lif içeriğinde ulaşmıştır.

#### 2.2.5.4 Elastisite modülü

E-modülü, malzeme sertliğinin ve elastik olarak deforme olma eğiliminin bir ölçüsüdür. Hook yasasından, E-modülü (veya Young modülü), gerilimin gerinime oranı olarak tanımlanır ve gerilim şekil değiştirme diyagramının eğimi ile gösterilebilir. Çeşitli araştırmacılar, betonun E-modülüne farklı oran ve uzunluklarda bazalt liflerinin eklenmesinin etkisini araştırmışlardır (Whittleston, 2015).

E-modülü üzerindeki bazalt lif etkisi açısından Kızılkanat vd. (2015), lif takviyeli betonların E-modülünün artan lif içeriği ile biraz azaldığını bildirmişlerdir. E-modülü 41,860-44,415 MPa arasında değişmektedir. Ayrıca, cam lifi katkılı betonların, bazalt lifli betonlardan biraz daha düşük E-modülü değerleri sergilediği belirtilmiştir. Bunun nedeni cam lifinin bazalt lifinden daha düşük E-modülüne sahip olmasıdır.

Tumadhir ve Borhan (2013) deneysel olarak, bazalt lif içeriğini %0,1'den %0,3'e çıkarıtılması betonun E-modülünü önemli ölçüde arttırmıştır. Özellikle en yüksek E-modülü bazalt lif içeriği %0,3 oranında elde edilmiş ve bazalt lif içeriği %0,5'e ulaştığında ise azalmıştır.

Ayub vd. (2014) betona bazalt liflerinin eklenmesinin betonun E-modülünü artırdığını gözlemlemiştir. Kontrol karışımının gerilme şekil değiştirme eğrisinin eğiminin, bazalt lifleri ile daha dik olduğunu belirlemiştir. Bu deneylerde üç farklı oranda (%1, 2, 3) bazalt lif içeriği kullanılmıştır. Sonuçlar, bazalt liflerinin tamamen aktif olduğunu ve betonun çatlak yayılmasına karşı mükemmel direnç gösterdiğini göstermiştir.

Wu (2013), betonun farklı liflerle etkileşimini araştırmış ve bunların E-modülü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Test edilen lifler polietilen, cam ve bazalt liflerdir. Tüm beton numuneleri donma çözülme döngülerine tabi tutulmuş ve daha sonra betonun E-modülleri belirlenmiştir. Sonuçlar, bazalt liflerinin çeşitli donma çözülme döngülerinden sonra betonun E-modülünü değiştirmediğini göstermiştir. Referans betonun E-modülü ise donma çözülme döngüleri sonucunda azalmıştır. Bunun nedeni, bazalt liflerinin çatlakları azaltma özelliği ile oluştuğu düşünülmektedir.

### 2.2.6 Dayanıklılık

Betonarme yapıların dayanıklılık tasarımı fikri, performans ve yükleme fonksiyonunun bir parametresi olarak zamanı dikkate alarak başarısızlık olasılığına dayanan istatistiksel bir teori olarak geliştirilmiştir (Sarja, 2000). Dayanıklılık bir yapımım zamana bağlı olarak kimyasal ve fiziksel etkilere karşı özelliklerini kaybetmemesi olarak da tanımlanabilmektedir. Dayanıklılık bir yapının servis ömrü için önemli bir husustur. Yapının hizmet ömrünü uzatmak için betonun dayanımının yanında dayanıklılığının da önemli olduğu bilinmektedir (Chindaprasirt vd., 2004).

Lif kullanımı, çatlamayı sınırlamak ve dayanıklılığı artırmak için beton uygulamalarında mevcut en iyi çözümdür. Benzer şekilde, liflerin varlığı, köprüleme etkisinden dolayı harçtaki çatlakların genişliğini ve sayısını azaltır. Ayrıca harcın aşınma ve donma çözülme direnci gibi dayanıklılık özellikleri de iyileşmektedir (Smarzewski, 2019).

#### 2.2.6.1 Donma ve çözülme etkisi

Bazalt lif takviyeli betonun güncel araştırmaları daha çok temel mekanik özelliklerine odaklanmaktadır. Soğuk iklimlerde beton kaplamanın tahrip olmasının ana nedeninin

don olayı olduğu düşünüldüğünde ilgili araştırmaların az olduğu görülmektedir (Fan vd., 2014).

Fan vd. (2014) yaptıkları çalışmada, bazalt lif takviyeli betonun mükemmel donma-çözülme direncine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. 100 donma-çözülme döngüsünden sonra, bazalt lif takviyeli beton numunelerinin dinamik E-modülü, referans beton numunelerinkinden 1,47 kat fazladır. Bazalt lif takviyeli numunelerin kütle kaybı ise referans beton numunelere göre 0,64 kat azdır. Bazalt liflerinin agregaları desteklemedeki rolü nedeniyle beton sertleşmeden önce çatlaklarının oluşumunu etkili bir şekilde azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca bazalt liflerin betonun geçirimsizliğini arttırdığını belirten çalışmalarda mevcuttur. Geçirimsizlik betonun donma-çözülme direnci için önemli bir parametredir.

Jin vd. (2014), referans betonun kütle kaybı oranının %0,34 olduğunu, ancak bazalt lifl, betonun kütle kaybı oranının 200 donma ve çözülme döngüsünden sonra %0,2 'den daha az olduğunu gözlemlemiştir.

%0,1; 0,2; 0,3 bazalt lif içeriğine sahip betonun kütle kaybı oranı donma ve çözülme döngüsünden sonra sırasıyla %0,25; 0,24; 0,21 olmuştur. Ayrıca, bazalt lif ile güçlendirilmiş betonun donma çözülme direncinin etkin bir şekilde iyileştiği gözlenmiştir

### 2.2.6.2 Kuruma büzülmesi

Kuruma büzülmesi, betonarme yapıların bozulmasının ana nedenlerinden bir tanesidir. Malzemenin büzülmesi normal olarak iç veya dış sınırlamalarla engellenir ve çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler çekme dayanımını aşabilir ve betonun çatlamasına neden olabilir. Kuruma büzülmesindeki en etkili faktörlerden bir tanesi s/ç oranıdır (Bissonnette vd., 1999).

Bazalt liflerinin kuruma büzülmesini azaltacağı düşünülmekte ve bu durum bazı çalışmalarda gözlenmiştir. Ayrıca lif, su transferinin zorluğunu arttırarak, kapiler su kaybı buharlaşmayı azaltarak kuruma büzülmesini azaltacaktır (Zhou vd., 2020).

Jiang vd. (2010), bazalt lifinin kuruma büzülmesi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, özellikle erken yaşlarda bazalt lifi ilavesinin harcın kuruma büzülmesini önemli ölçüde azalttığını ve kür süresinin artmasıyla büzülme davranışı üzerindeki etkisinin azaldığını göstermiştir.

Ralegaonkar vd. (2018), harç tasarımı için bazalt liflerinin etkisini araştırmıştır. Bu çalışma, tamir harcına bazalt lifi eklenmesinin daha düşük kuruma büzülmesine yol açtığını göstermiştir.

#### 2.2.6.3 Sülfat etkisi

Sülfat etkisi, beton bozulmasının çeşitli kimyasal mekanizmalarından birisidir. Betonarme yapıların sülfata maruz kalması matriste kimyasal, mikroyapısal ve fiziksel değişikliklere yol açarak ciddi bozulmalara ve hizmet ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Çimentonun cürufla kısmen yer değiştirilmesi, sülfat saldırısına karşı beton direncini artırmak için etkili yöntemlerden biridir. Sülfat saldırısı, betonarme yapıların uzun süreli dayanıklılığını etkileyen en agresif çevresel bozulmalardan biridir (Al-akhras, 2006).

Betonun dayanıklılığının en önemli yönlerinden biri sülfat saldırısına karşı direncidir. Sülfatlı ortamda çimento hamuru genleşme, dökülme ve yumuşama sonucu bozulmaya uğrayabilir (Chindaprasirt vd., 2007).

Al-Dulaijan vd. (2003), sülfat etkisine bağlı betonun bozulması, donatı korozyonundan sonra ikinci büyük dayanıklılık sorunudur. Bu tür bozulmalar, sülfatlı topraklara ve yeraltı sularına maruz kalan yapılarda görülmektedir. Birçok ülkede sülfat etkisine bağlı beton bozulması bildirilmesine rağmen sülfat etkisinin mekanizmaları, net olarak anlaşılamamıştır.

Hanafi vd. (2020), karışıma bazalt lifi eklenmesiyle sülfat direncinin arttığını ve bazalt liflerinin eklenmesinin kimyasal stabilitede etkili olduğunu bildirmiştir. Sülfat dayanıklılığının gözenek yapısı ve lif miktarı ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Hawaldar vd. (2017), magnezyum sülfat etkisindeki betonlarda bazalt lifi takviyesinin etkisini incelemiştir. Çalışma; %2 bazalt lif içeren beton numunelerinin, sülfat etkisine maruz kaldıklarında, lifsız betondan daha fazla dayanıma sahip olduğunu göstermiştir Ayrıca 62 günlük magnezyum sülfat etkisinden sonra bazalt lifli betonun 28 günlük basınç ve çekme dayanımına göre daha yüksek dayanım değeri verdiği belirtilmiştir.

Zhang ve Wang (2018), betonun korozyon direnci, kütle kaybı ve hacim genleşme oranını test ederek, farklı bazalt lif içeriğinin sülfat direnci üzerindeki etkilerini incelemiştir. %5 bazalt lifi, toplam gözenek hacmini azaltmış ve gözenek yapısını optimize etmede faydalı olmuştur. Bu nedenle betonun sülfat direnci ve geçirimsizliği farklı derecelerde iyileştirilmiştir. Bu arada %0,3 lif içeren betonun sülfat direncinin en iyi olduğu belirtilmiştir.

## 2.3 Taguchi Yöntemi

Taguchi yöntemi, 1950 'li yıllarda Genichi Taguchi tarafından bir optimizasyon süreci tekniği olarak geliştirilen istatistiksel bir yöntemdir. Sağlamlığı artırmak, üretkenliği tasarlamak ve ürün kalitesini artırmak amacıyla deney sürecini optimize etmek için kullanılır. Sağlam tasarımın arkasındaki fikir, nedenleri ortadan kaldırmadan varyasyonun etkilerini en aza indirerek (kontrol edilmesi çok zor veya çok pahalı olduklarından) bir ürünün kalitesini iyileştirmektir. Taguchi ’nin parametre tasarımına yaklaşımı, tasarım mühendisine performans ve maliyet için sistematik ve verimli bir yöntem sağlar (Varghese ve Phılıp, 2016).

Parametre tasarımında, bir ürünün işlevsel karakteristiği, kontrol faktörleri ve gürültü faktörlerini etkileyen iki tür bulunmaktadır. Kontrol faktörleri, kolaylıkla kontrol edilebilen faktörlerdir. Gürültü faktörleri, kontrol edilmesi zor, imkânsız veya çok pahalı olan faktörlerdir. Bunlar, öncelikle bir ürünün performansının hedef değerinden sapmasına neden olan tepkidir. Bu nedenle, parametre tasarımı, ürünü gürültü faktörlerindeki değişikliklere karşı duyarsız hale getiren kontrol faktörlerinin ayarlarını belirlemeye çalışır, dolayısıyla varyasyonun nedenlerini ortadan kaldırmadan ürünü daha sağlam hale getirir (Bismi ve Philip, 2016).

Öztaşet vd. (2009), Taguchi'nin tartışılması gereken ilk kavramı, "gürültü faktörleri" olarak adlandırdığı şeydir. Gürültü faktörleri, ürünlerin neden başarısız olduğu da dahil olmak üzere performanstaki değişkenliğin nedenleri olarak görülmektedir. Hedef değerler ie şu şekilde sıralanmaktadır;

- Daha küçük daha iyi: hedefin yanıtını en aza indirmek
- Daha büyük daha iyi: hedefin yanıtını en üst düzeye çıkarmak
- Nominal daha iyidir: hedefin yanıtını belirtmek

Özbay vd. (2008), yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonun karışım oranlarını Taguchi yöntemini kullanarak incelemiştir. Karışımlar, s/ç oranı, su içeriği, ince agrega/toplam agrega yüzdesi, uçucu kül içeriği, hava sürükleyici içeriği ve akışkanlaştırıcı içeriği gibi altı faktör içeren bir L18 ortogonal dizisinden oluşmaktadır. Taguchi yönteminin, çeşitli taze ve sertleşmiş beton özelliklerini karşılamak için yüksek mukavemetli kendiliğinden yerleşen betonun karışım oranlarını optimize etmek için kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, deneme partilerinin sayısını azaltarak yüksek mukavemetli kendiliğinden yerleşen betonun karışım oranını optimize etmek için gereken test protokolünü basitleştirmiştir.

Nuruddin ve Bayuaji (2013) Mikrodalgada yakılmış pirinç kabuğu külünü köpük beton için Taguchi optimizasyonu ile tasarlamıştır. Karışımlar, beş faktörlü L16 ortogonal dizisinden oluşmaktadır. Mikrodalgada yakılmış pirinç kabuğu külü oranı, s/ç oranı, kum/çimento oranı, akışkanlaştırıcı içeriği ve köpük içeriğidir. Mümkün olan en iyi karışım oranları, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve UPV kriterlerine göre belirlenmiştir.

Türkmen vd. (2008), Taguchi yaklaşımı kullanarak mineral katkılardan üretilen betonun bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Deneysel çalışmada enerji, zaman ve malzeme tasarrufu sağlamak için Taguchi yönteminin yüksek dayanımlı betonun fiziksel özelliklerine başarıyla uygulanabileceğini bulmuşlardır. Bu araştırmada dikkate alınan faktörler mineral katkı oranı, s/b oranı, kür rejimi ve kür süresidir. Optimizasyon sonucu en iyi karışımın %10 silis dumanı ve %5 yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışım olduğu belirlendi.

Hadiwidodo ve Bin Mohd (2010), Taguchi deney tasarımını kullanarak KYB'nin taze özelliklerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar yürütmüştür. İri agrega, kum, çimento, silis dumanı, su ve akışkanlaştırıcı içerikleri olmak üzere altı kontrol faktörü kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucu, Taguchi yönteminin KYB optimizasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir.

Tan vd. (2015) çimento esaslı harçlarda terlemenin optimizasyonu için Taguchi yaklaşımını kullanarak bir araştırma yapmıştır. Bentonit, uçucu kül ve silis dumanı oranları çimento esaslı harçların terlemesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Üç faktörlü ve dört seviyeli L16 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Sonuçlar, silis dumanının terleme için en etkili malzeme olduğunu göstermiştir. Silis dumanı ve bentonit oranındaki artışla terleme azalırken uçucu kül oranındaki artışla belirgin bir iyileşme elde edilememiştir. Ayrıca minimum terleme için optimum koşullar bulunmuştur.

# 3. MALZEME VE YÖNTEM

## 3.1 Malzemeler

### 3.1.1 Çimento

Bu çalışmada, çimento esaslı kompozitleri üretmek için TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1 'de verilmiştir.

Tablo 3.1 CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

| **Kimyasal özellikler (%)** | | **Fiziksel özellikler** | |
|---|---|---|---|
| CaO | 64,4 | Özgül Ağırlık | 3,13 |
| $SiO_2$ | 19,6 | Priz baş. süresi (dk.) | 90 |
| $Al_2O_3$ | 5,5 | Priz sonu süresi (dk.) | 145 |
| $Fe_2O_3$ | 2,9 | Özgül yüzey alanı ($cm^2/g$) | 3300 |
| MgO | 2,1 | | |
| $SO_3$ | 2,7 | | |
| Cl | <0,01 | | |
| Kızdırma Kay. | 2,1 | | |



### 3.1.2 Bakır Cürufu

Bu çalışmada Samsun Eti Bakır tesislerinden elde edilen bakır cürufu kullanılmıştır. Bakır cürufu ilk olarak çimento inceliğine gelene kadar öğütülmüştür. Bakır cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

### 3.1.3 Agrega

Çimento esaslı kompozitlerin üretiminde ince agrega olarak kalker agregası kullanılmıştır. Kalker agregasının elek açıklığı 0-4,75 mm arasındadır. Klaker agregası yerine %25 ve 50 oranlarında bakır agregası kullanılmıştır. Bakır

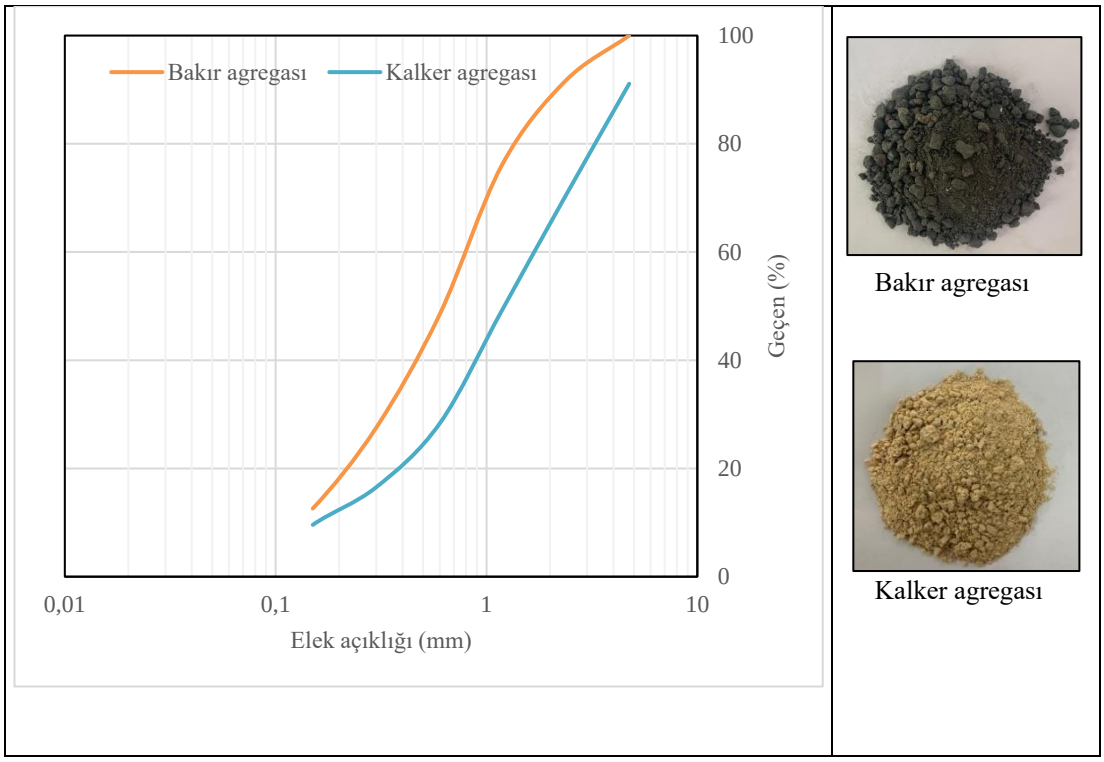
cüruflarının konkasör ile kırılması sonucunda elde edilmiştir. Bakır agregasınında elek açıklığı 0-4,75 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Agregaların tane dağılımları ve genel görünümleri Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Bakır cürufunun kimyasal analizi

| **Kimyasal özellikler (%)** | | **Fiziksel özellikler** | |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 25,25 | Özgül ağırlık | 3,69 |
| $Al_2O_3$ | 0,54 | Özg. yüzey alanı ($cm^2/g$) | 3590 |
| $Fe_2O_3$ | 69,02 | Renk | Koyu gri |
| CaO | 1,58 | | |
| $Na_2O$ | 0,75 |  | |
| $K_2O$ | 0,33 | | |
| $SO_3$ | 0,16 | | |
| CuO | 1,33 | | |
| Kızdırma Kay. | - | | |

### 3.1.4 Bazalt Lifi

Çimento esaslı kompozitlerin üretiminde iki farklı uzunlukta (6 mm ve 12 mm) bazalt lifi kullanılmıştır. Bazalt lifinin mühendislik özellikleri ve genel görünümleri Tablo 3.3'de verilmiştir.




Şekil 3.1 Agregalara ait tane dağılımları

Tablo 3.3 Bazalt lifinin mühendislik özellikleri

| Özellikler | |
|---|---|
| Lif tipi | Filament |
| Yoğunluk (g/cm$^3$) | 2,60 |
| Uzunluk (mm) | 6-12 |
| Çap (µm) | 15 |
| E-Modulü (GPa) | 85 |
| Çekme dayanımı (MPa) | 2800-3000 |
| Erime sıcaklığı ($^o$C) | ~1350 |
| Kopma uzaması (%) | ~3 |
| Renk | Golden brown |



6 mm



12 mm

### 3.1.5 Kimyasal Katkı

Çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirliğini düzenlemek için Master Glenium 51 isimli yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Glenium 51 polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltıcı yeni ikinci nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısıdır. Glenium 51'e ait özellikler Tablo 3.4 'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Glenium 51'in teknik özellikleri

| | |
|---|---|
| Kimyasal yapısı | Polikarboksilik eter bazlı |
| Renk | Koyu kahverengi |
| Yoğunluk | 1,082 – 1,142 kg / litre |
| Klor İçeriği % (EN 480-10) | < 0,1 |
| Alkali İçerik % (EN 480-12) | < 3 |



### 3.1.6 Su

Karışımların üretilmesinde ve kür işlemi için içilebilir nitelikteki şebeke suyu kullanılmıştır. Kastamonu Üniversitesi kampüsünde yer alan şebeke suyu TS-EN 1008 standardına uygundur.

## 3.2 Yöntem

### 3.2.1 Karışım Özellikleri

Karışımların hazırlanmasında agrega/bağlayıcı oranı 3 olarak seçilmiştir. Su/bağlayıcı oranı (s/b) 0,40; 0,50 ve 0,60 olmak üzere üç farklı değişkenden oluşmaktadır. Bakır cürufu hem çimento yerine hem de agrega ile yer değiştirilmiştir. Çimento yerine kullanılan bakır cürufu %7,5 ve 15 oranlarında kullanılmıştır. Agrega yerine kullanılan bakır cürufu ise %25 ve 50 oranlarında kullanılmıştır. Bakır atıkları hem çimento hem de agrega yerine kullanılmıştır. Çimento yerine kullanılan bakır cürufu bilyalı değirmende öğütülmüştür. Agrega yerine kullanılan bakır cürufu ise konkasör ile kırılarak ince agrega boyutuna getirilmiştir. Bakır atıklarının öğütülmesinde ve kırılmasında kullanılan ekipmanlar Şekil 3.2'de verilmiştir.



(a) Bilyalı değirmen (b) Çeneli kırıcı (Konkasör)

Şekil 3.2 Bakır atıklarının hazırlanmasında kullanılan ekipmanlar

Karışımların içerisine 6 ve 12 mm uzunluğunda bazalt lifi ilavesi yapılmıştır. Bazalt lifi çimento ağırlığınca %1, 2 ve 3 oranlarında kullanılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin hazırlanmasında Taguchi L18 matrisi kullanılmıştır. Deneysel çalışmaya ait değişkenler Tablo 3.5 ’de malzeme miktarları ise Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.5 Deneysel çalışmaya ait değişkenler

| Değişkenler | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|---|---|---|---|
| Lif uzunluğu (mm) | 6 | 12 | - |
| Lif oranı (%) | 1 | 2 | 3 |
| S/B | 0,40 | 0,50 | 0,60 |
| Bakır cürufu (%) | 0 | 7,5 | 15 |
| Bakır agregası (%) | 0 | 25 | 50 |

Tablo 3.6 Taguchi L18 matrisine ait tasarım

| Karışım parametreleri | | | | | | Malzeme miktarları (gr) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Karışım No,* | Lif uzunluğu (mm) | Lif oranı (%) | S/B oranı | Bakır cürufu (%) | Bakır agregası. (%) | Çimento | Bakır cürufu | Su | Kalker agregası | Bakır agregası | Lif |
| *1* | 6 | 1 | 0,4 | 0 | 0 | 450 | 0 | 180 | 1350 | 0 | 4,5 |
| *2* | 6 | 1 | 0,5 | 7,50 | 25 | 416,25 | 33,75 | 225 | 1012,5 | 337,5 | 4,5 |
| *3* | 6 | 1 | 0,6 | 15 | 50 | 382,5 | 67,5 | 270 | 675 | 675 | 4,5 |
| *4* | 6 | 2 | 0,4 | 0 | 25 | 450 | 0 | 180 | 1012,5 | 337,5 | 9 |
| *5* | 6 | 2 | 0,5 | 7,50 | 50 | 416,25 | 33,75 | 225 | 675 | 675 | 9 |
| *6* | 6 | 2 | 0,6 | 15 | 0 | 382,5 | 67,5 | 270 | 1350 | 0 | 9 |
| *7* | 6 | 3 | 0,4 | 7,50 | 0 | 416,25 | 33,75 | 180 | 1350 | 0 | 13,5 |
| *8* | 6 | 3 | 0,5 | 15 | 25 | 382,5 | 67,5 | 225 | 1012,5 | 337,5 | 13,5 |
| *9* | 6 | 3 | 0,6 | 0 | 50 | 450 | 0 | 270 | 675 | 675 | 13,5 |
| *10* | 12 | 1 | 0,4 | 15 | 50 | 382,5 | 67,5 | 180 | 675 | 675 | 4,5 |
| *11* | 12 | 1 | 0,5 | 0 | 0 | 450 | 0 | 225 | 1350 | 0 | 4,5 |
| *12* | 12 | 1 | 0,6 | 7,50 | 25 | 416,25 | 33,75 | 270 | 1012,5 | 337,5 | 4,5 |
| *13* | 12 | 2 | 0,4 | 7,50 | 50 | 416,25 | 33,75 | 180 | 675 | 675 | 9 |
| *14* | 12 | 2 | 0,5 | 15 | 0 | 382,5 | 67,5 | 225 | 1350 | 0 | 9 |
| *15* | 12 | 2 | 0,6 | 0 | 25 | 450 | 0 | 270 | 1012,5 | 337,5 | 9 |
| *16* | 12 | 3 | 0,4 | 15 | 25 | 382,5 | 67,5 | 180 | 1012,5 | 337,5 | 13,5 |
| *17* | 12 | 3 | 0,5 | 0 | 50 | 450 | 0 | 225 | 675 | 675 | 13,5 |
| *18* | 12 | 3 | 0,6 | 7,50 | 0 | 416,25 | 33,75 | 270 | 1350 | 0 | 13,5 |

Taze çimento esaslı kompozitler Tablo 3.6'da yer alan malzeme miktarları kullanılarak aşağıdaki işlem basamakları ile hazırlanmıştır.

- İlk olarak çimento ve bakır cürufu düşük hızda 1 dakika karıştırılmıştır.
- S/B oranına göre belirlenen su içeriğinin %50 'si ile kimyasal katkı ilave edilerek düşük hızda 30 saniye sonrasında yüksek hızda 2 dakika karıştırılmıştır.
- Hazırlanan çimento pastası 1 dakika dinlendirilmiştir.

- Kalker ve bakır agregası ilave edilerek düşük hızda 1 dakika sonrasında yüksek hızda 2 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır.

- Bazalt lifler karışıma ilave edilerek 3-5 dakika aralığında karıştırma işlemine devam edilmiştir. Liflerin homojen yayılması için yüksek lif içeriğinde 5 dakika karıştırma işlemi uygulanmıştır.

- Karıştırma işleminden tamamlandıktan sonra kompozitler kalıplara yerleştirilmiştir.

Karışımlar Hobart tipi mikser ile hazırlanmıştır. Cihaza düşük hız 140 rpm, yüksek hız ise 285 rpm olarak tanımlanmıştır. Karışımlar 24 saat sonra kalıplarından sökülerek deney gününe kadar kirece doygun su içerisinde saklanmıştır.

### 3.2.2 Test Yöntemleri

Çimento esaslı kompozitlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler üç adet numune gerçekleştirilmiştir.

#### 3.2.2.1 Taze harç özellikleri ve birim hacim ağırlık (BHA)

Çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları ASTM C 230 (Conshohocken, 2010) standardına göre belirlenmiştir. Harçların yayılma çapları X ve Y doğrultusunda ölçülerek tespit edilmiştir. Karışımların işlenebilirliğini etkileyen birçok parametre olduğu için her karışımın kimyasal katkı oranı farklı olmuştur. Akışkanlaştırıcı oranı yayılma çapı 15±3 cm esasına göre belirlenmiştir. Düşük s/b oranlarında akışkanlaştırıcı oranının fazla arttırılması segregasyona yol açtığı için 0,40 s/b oranına sahip karışımların yayılma çapları daha düşük değerler seçilmiştir. Karışımların birim hacim ağırlıkları 50*50*50 mm ayrıtlı küp numunelerde belirlenmiştir. Harçlar kalıplara iki tabakada ve vibrasyon masası yardımıyla sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Sertleşmiş harçların BHA etüvde 50 $^{o}$C'de 3 gün kurutulduktan sonra belirlenmiştir. Harçların boyutları kumpas yardımı ile ölçülerek hacimleri yaklaşık olarak tespit edilmiştir.

#### 3.2.2.2 Basınç ve eğilme dayanımı

Çimento esaslı kompozitlerin basınç ve eğilme dayanımları 40*40*160 mm boyutlu numunelerde belirlenmiştir. Karışımlar kalıba iki tabaka ve vibrasyon masası ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Karışımların mekanik özellikleri EN 196-1 (EN 196-1 Chapter13, 2016) standardına göre tespit edilmiştir. Numuneler üzerinde ilk olarak üç noktalı eğilme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyinden sonra basınç dayanımı belirlenmiştir. Karışımların basınç ve eğilme dayanımları 7, 28 ve 91. günlerde belirlenmiştir.

#### 3.2.2.3 Kapilarite

Çimento esaslı kompozitlerin kapilarite özellikleri 50*50*50 mm boyutlarındaki küp numunelerde ve ASTM C 1585 (ASTM C 1585-04, 2004) standardına göre belirlenmiştir. Karışımların 28. güne kadar su işleme derinlikleri ölçülmüştür. Harçların yan yüzeylerine 0,5 cm yüksekliğinde su geçirimsizlik malzemesi (su ile temas eden yüzeye) sürülmüştür.

#### 3.2.2.4 Kuruma büzülmesi

Kurma büzülmesi ölçümleri ASTM C 596 (ASTM C 596–01, 2001) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kuruma büzülmesi için 25*25*285 mm boyutlarındaki harç çubukları kullanılmıştır. Kuruma büzülmesi numunelerine 28 günlük ön kür işlemi uygulanmıştır. Ön kür süresinin uzun tutulmasının nedeni çimento yerine kullanılan bakır cürufundan dolayıdır. Ön kür işleminden sonra 3, 7 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 ve 90. günlerde kuruma sonucu oluşan büzülme değerleri ölçülmüştür.

#### 3.2.2.5 Sülfat dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin sülfat dayanıklılığı ASTM C 1012 (ASTM Committee C01.29, 2015) standardına göre belirlenmiştir. Ancak sülfat dayanıklılığının belirlenmesinde %5'lik $Na_2SO_4$ yerine süreci hızlandırabilmek için %10'luk $Na_2SO_4$ çözeltisi kullanılmıştır. Sülfat dayanıklılığı için 25*25*285 mm boyutlu harç çubukları kullanılmıştır. Harç çubuklarına ilk olarak 28 gün kür işlemi uygulanmış daha

sonrasında $Na_2SO_4$ çözeltisine yerleştirilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin boy değişimleri 3, 7,14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 ve 90. günlerde ölçülmüştür. Genleşme ve büzülme davranışları Şekil 3.3 ’de yer alan dijital komparatör ile belirlenmiştir.



Şekil 3.3 Boy değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan dijital komparatör

### 3.2.2.6 Donma-çözülme dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme dayanıklılığı için ASTM C 666 (Astm C666/C666M, 2003) standardı kullanılmıştır. Çimento esaslı kompozitlere 28 günlük kür işlemi uyguldıktan sonra donma-çözülme çevrimleri başlatılmıştır. Donma-çözülme çevrimleri -20/+4 $^oC$ sıcaklıkları arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Donma-çözülme dayanıklılığı 40*40*160 mm boyutlu numuneler üretilmiştir. Donma-çözülme etkisinin belirlenmesi için kompozitlere 50, 100 ve 200 çevrim uygulanmıştır. Her çevrim sonucunda numunelere basınç ve eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır.

### 3.2.2.7 Optimizasyon ve Taguchi yöntemi

Taguchi yöntemi, deney sayısını azaltırken kontrolsüz faktörlerin etkilerini de en aza indirmektedir. Önemli faktörleri ve optimum koşulları tanımlamak için çeşitli mühendislik analizlerinde kullanılan güçlü bir tasarım yöntemidir. Bu yöntem, ortogonal tasarıma dayanır ve gerçek deneysel değerler ile hedeflenen değerler arasındaki sapmayı hesaplamak için bir sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülen kayıp fonksiyonu kullanır. Bir Taguchi dizisi, kontrol faktörünün her seviyesi için (P-1) diğer faktörlerin L seviyelerinin en az bir kez test edildiği ortogonal bir tasarımdır (Menten ve Phadke, 1991; Davis ve John, 2018). Taguchi yöntemi zaman ve

maliyetten tasarruf sağlayan etkili bir deney tasarım yöntemidir. S/N oranının analizi temel olarak üç istatistiksel özelliğe dayanmaktadır. Bunlar (1) daha küçük-daha iyi, (2) daha büyük-daha iyi ve (3) Nominal-daha iyi olarak sınıflanmaktadır. Üç tür performans özelliği aşağıdaki eşitliklerde sunulmuştur (Fantous ve Yahia, 2020).

Daha büyük-daha iyi

$$S/N = -10\log[\sum_{i=1}^{n} y_{ij}^2\ ] \tag{3.1}$$

Daha küçük-daha iyi

$$S/N = -10\log[\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_{ij}^2}\ ] \tag{3.2}$$

Nominal-daha iyi

$$S/N = -10\log[\sum_{i=1}^{n} \left(y_{ij} - m\right)^2\ ] \tag{3.3}$$

Burada, $y_{ij}$, araştırma yanıtları için deneysel ölçümlerdir, n ve m sırasıyla belirli bir ölçümün tekrar sayısı ve nominal değeridir. Optimizasyon amacına göre bu yöntemlerden birisi seçilmektedir.

Taguchi optimizasyonu için gerçekleştirilen deneyler için numune boyutları ve standartları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7 Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylere ait özellikler

| Deney Adı | Standart No. | Boyut (mm) | Deney Zamanı |
|---|---|---|---|
| Yayılma çapı | ASTM C 230 | - | Taze harç |
| Sertleşmiş BHA | - | 50*50*50 | 91 gün |
| Basınç dayanımı | ASTM C 349 | 40*40*160 | 7, 28, 91 gün |
| Eğilme dayanımı | ASTM C 348 | | |
| Kapilarite | ASTM C 1585 | 50*50*50 | 91 gün |
| Kuruma büzülmesi | ASTM C 596 | 25*25*285 | 91. güne kadar |
| Sülfat dayanıklılığı | ASTM C 1012 | 25*25*285 | 91. güne kadar |
| Donma-Çözülme Dayanıklılığı | ASTM C 666 | 40*40*160 | 50, 100, 200 çevrim |

# 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

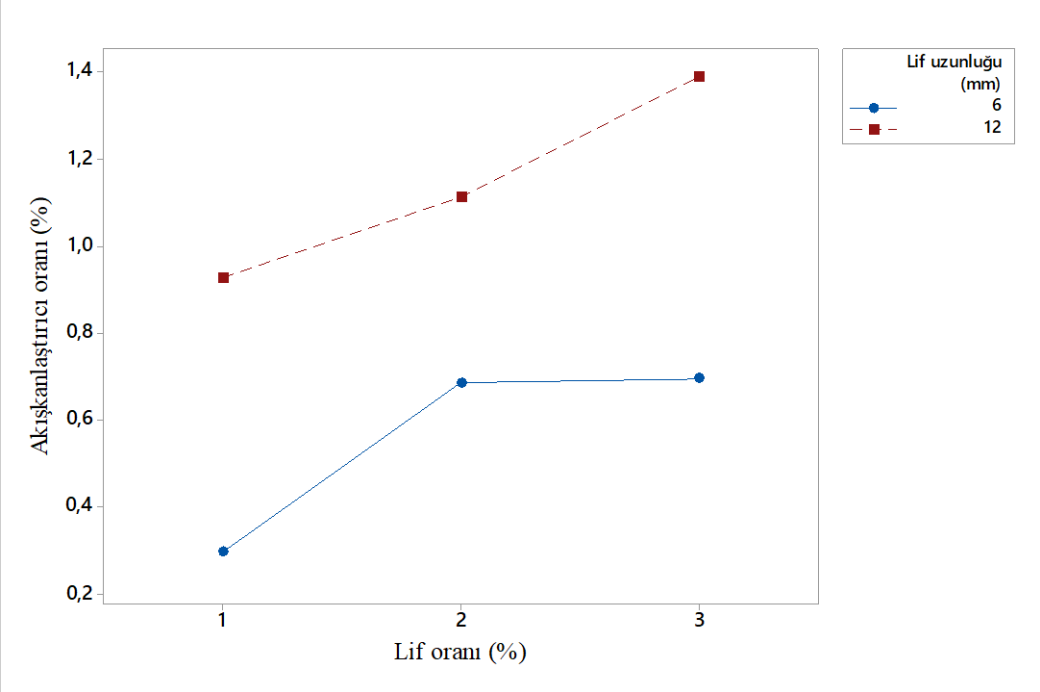
## 4.1 Çimento Esaslı Kompozitlerin Taze Hal Özellikleri ve BHA

Farklı oranlarda ve uzunlukta bazalt lifi kullanıldığı için karışımların akışkanlaştırıcı miktarları değişkenlik göstermektedir. Ayrıca işlenebilirliği etkileyen birçok faktör olduğu için akışkanlaştırıcı miktarını sabit tutmak mümkün olmamıştır. İşlenebilirlik üzerindeki etkili olan ana faktörün bazalt lifi olduğu ön deneylerde tespit edilmiştir. Şekil 4.1(a)'da bazalt lifine ait özelliklerin akışkanlaştırıcı miktarına etkileri verilmiştir. Şekil 4.1(b)'de ise bakır atıklarının akışkanlaştırıcı oranına etkisi verilmiştir.

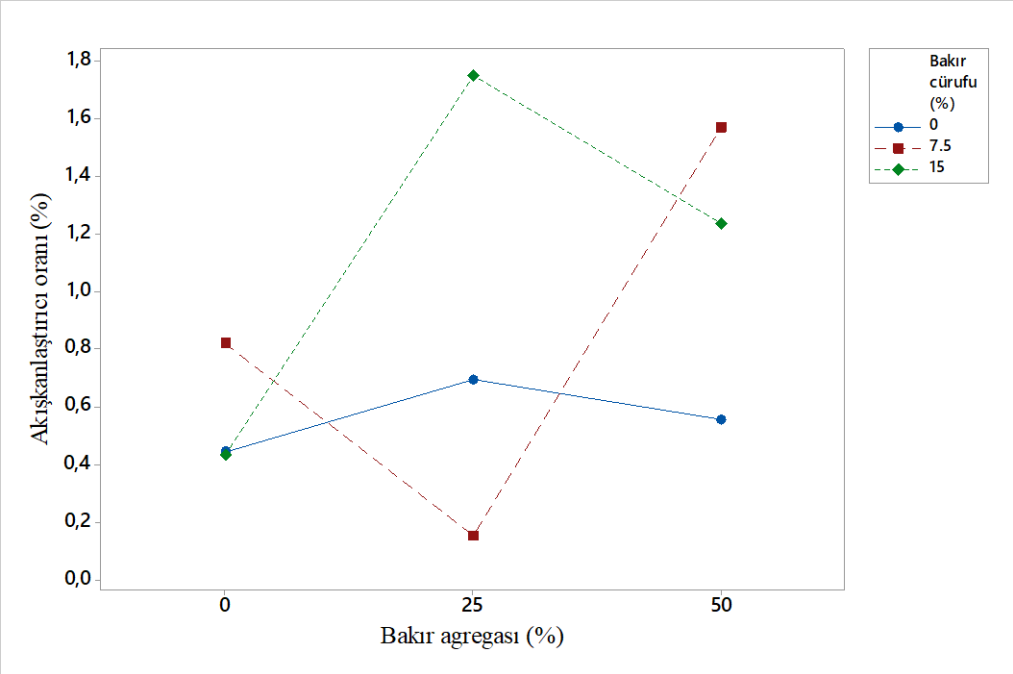
Lif uzunluğunun artması sonucunda akışkanlaştırıcı oranı artış göstermektedir. 12 mm uzunluğundaki lif kullanımında lif oranı arttıkça akışkanlaştırıcı miktarı artmaktadır (Şekil 4.1a). Lif oranının %1'den %3'e çıkarılması durumunda akışkanlaştırıcı oranı yaklaşık %55 artmıştır. 6 mm uzunluğundaki liflerde ise benzer durumlar gözlenmiştir. Ancak %2 ve 3 oranında lif kullanımı akışkanlaştırıcı miktarını çok etkilememiştir. Lif oranının %2 olması durumunda akışkanlaştırıcı oranı yaklaşık %115 artış göstermiştir. Kısa liflerde daha az akışkanlaştırıcı oranı kullanıldığı görülmektedir. Ancak kısa liflerde kendi aralarındaki lif oranının artması akışkanlaştırıcı oranını daha fazla arttırmaktadır. Uzun liflerde ise bu artış daha düşük seviyelerde kalmıştır. Emdadi vd. tarafından yapılan çalışmada PP lif uzunluğu arttıkça işlenebilirlik kayıpları oluşmuştur (Emdadi vd., 2015). Lif uzunluğunun artması içsel sürtünmeyi arttırdığı için işlenebilirlik azalmaktadır. Bu yüzden akışkanlaştırıcı oranının arttırılması gerekmektedir.

Şekil 4.1 (b)'de bakır atıklarının akışkanlaştırıcı oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. %0 bakır cürufu kullanılan karışımlarda %25 oranında bakır agregası kullanımı akışkanlaştırıcı oranını arttırırken %50 oranında bakır agregası kullanımı akışkanlaştırıcı oranını nispeten azaltmıştır. Benzer sonuçlar %15 oranında bakır cürufu kullanıldığında da gözlenmiştir. %25 oranında bakır agregası kullanımı yine akışkanlaştırıcı oranını arttırırken %50 bakır agregası akışkanlaştırıcı oranını azaltmıştır. %7,5 oranında bakır cürufu kullanımda %25 bakır agregası içeriği

akışkanlaştırıcı oranını azaltmaktadır. Genel olarak bakır cürufu kullanımın akışkanlaştırıcı miktarını arttırdığı gözlenmektedir.

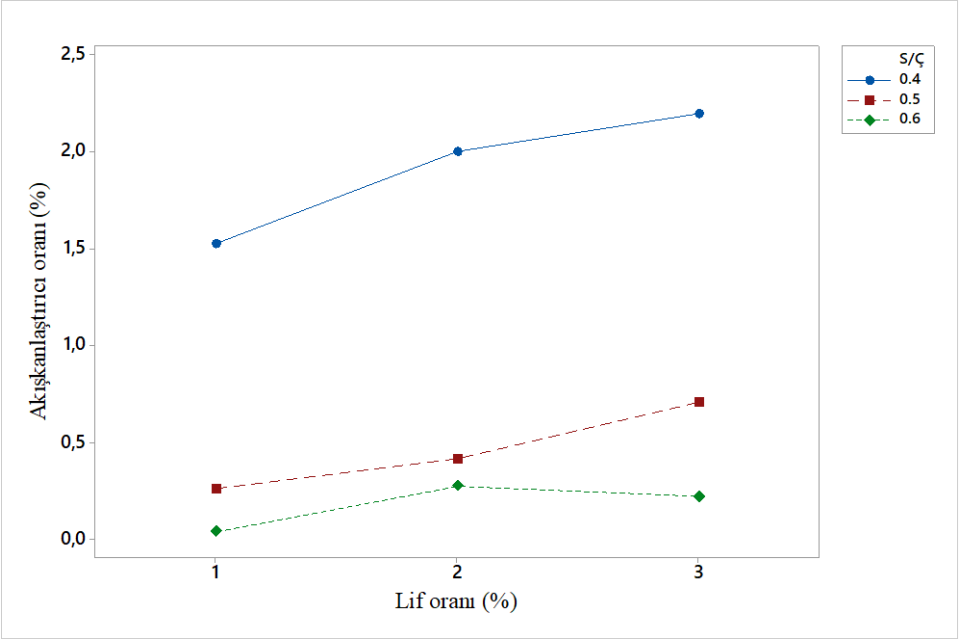



(a) Bazalt lifinin etkisi

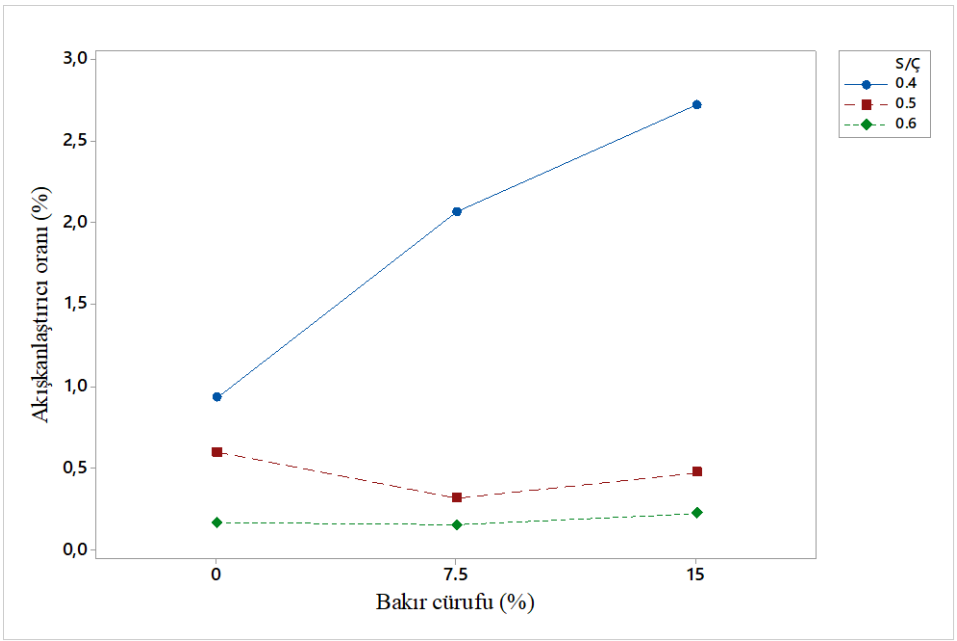



(b) Bakır atıklarının etkisi

Şekil 4.1 Çimento esaslı kompozitlerde kullanılan akışkanlaştırıcı oranları




(a) Lif içeriğinin etkisi



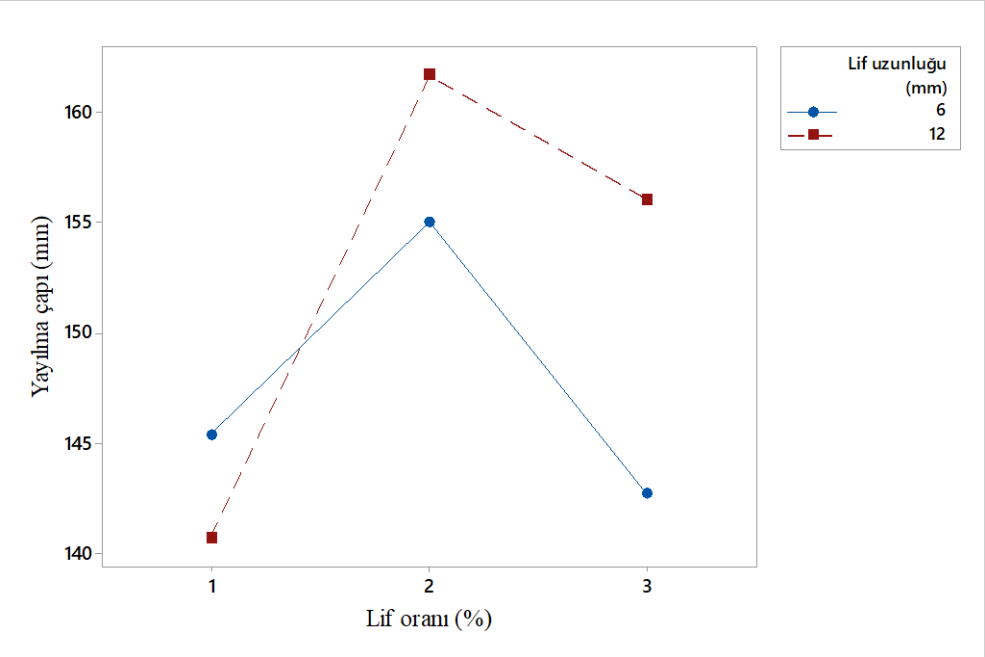

(b) Bakır cürufu oranının etkisi

Şekil 4.2 Çimento esaslı kompozitlerde farklı s/ç oranlarının akışkanlaştırıcı oranına etkisi

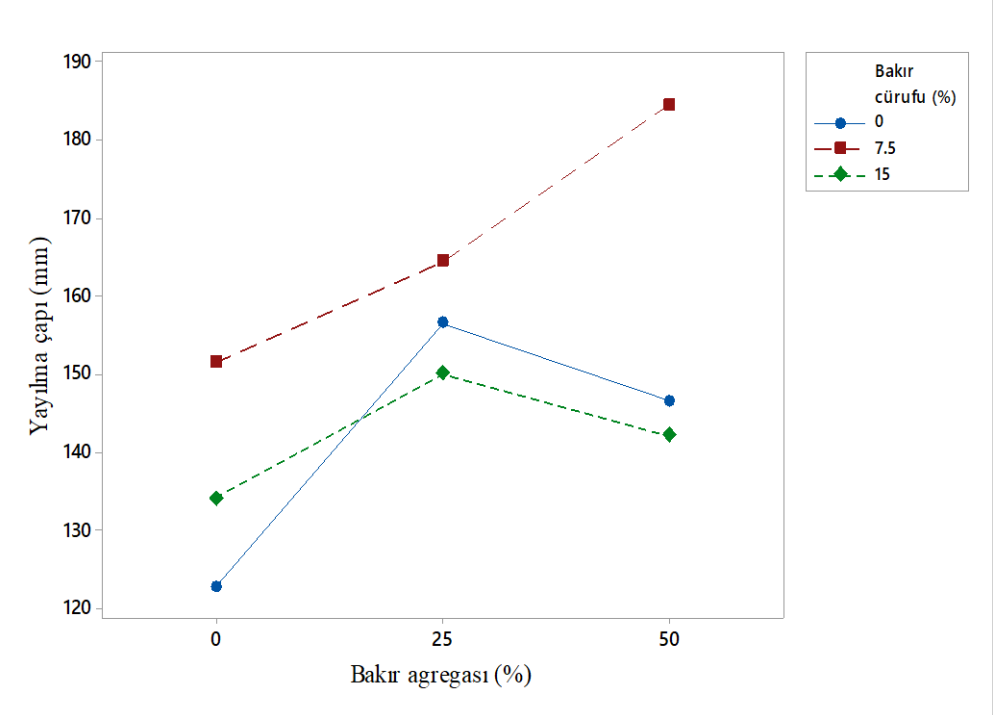
Şekil 4.2 (a)'da görüldüğü gibi s/ç oranı arttıkça akışkanlaştırıcı oranı azalmaktadır. Ayrıca lif oranının artması sonucunda genellikle akışkanlaştırıcı oranı artış göstermektedir. %3 lif oranında s/ç oranının 0,60'dan 0,40'a düşmesi durumunda akışkanlaştırıcı oranı yaklaşık 11 kat artmıştır. Lif oranının artması işlenebilirlik üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Düşük s/ç oranında (0,40) bakır cürufunun artması akışkanlaştırıcı oranını daha çok arttırmaktadır. s/ç oranının 0,50 ve 0,60 olması durumunda bakır cürufu oranı akışkanlaştırıcı oranını çok etkilememektedir. 0,40 s/ç oranındaki karışımlarda bakır cürufunun %7,5 ve üstünde olması durumunda akışkanlaştırıcı miktarı %2'nin üzerinde olmaktadır (Şekil 4.2b). Bakır cürufunun düşük s/ç oranlarında akışkanlaştırıcı miktarını daha çok etkilediği gözlenmiştir. Bu durumun pasta hacminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4.3 (a)'da görüldüğü gibi lif oranının %2 olması durumunda 6 ve 12 mm liflerden üretin karışımların yayılma çapları artış göstermiştir. Bu artışın nedeni %2 lif oranına sahip karışımlarda daha çok akışkanlaştırıcı kullanılmasıdır. 6 ve 12 mm uzunluğundaki lifli karışımlarda %3 oranında lif kullanmak ise yayılma çaplarını azaltmıştır. %3 oranında lif kullanılması durumunda daha fazla akışkanlaştırıcı kullanılmış ancak harçların yayılma çaplarında beklenilen iyileşme gözlenememiştir. Bunun nedeni lif sayısının artması ile birlikte içsel sürtünme artış göstermiş ve yayılma çapları azalmıştır. 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımlarda daha çok akışkanlaştırıcı kullanıldığı için yayılma çapları daha fazla olmuştur. %3 oranında lif kullanılan karışımlarda 12 mm lif tercih edilmesi durumunda yayılma çapı yaklaşık %10 artmıştır. Ancak bu durum kullanılan fazla akışkanlaştırıcı ile elde edilmiştir. Kısa ve uzun lifler için en optimum oranın %2 olduğu gözlenmiştir. Hasan vd. tarafından sabit s/ç oranında PP lif içeriği arttıkça betonların çökme değerleri azalmıştır (Hasan vd., 2019). Qin vd. magnezyum fosfat çimentosundan ürettikleri karışımlarda farklı oranlarda bazalt lifi kullanmışlardır. Bazalt lifi içeriğinin artması sonucunda karışımların işlenebilirliği azalmıştır (Qin vd., 2018). Büyük yüzey alanlarına sahip filament liflerin, etrafının sarılması için daha fazla çimento pastasına ihtiyaç duyulmakta ve bu liflerin su emme kapasiteleri de işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir (Chen ve Liu, 2005; Dias ve Thaumaturgo, 2005). Jalasutram vd. yaptıkları çalışmada bazalt lif içeriği ile birlikte akışkanlaştırıcı miktarını arttırmış ancak işlenebilirlik kaybını ortadan kaldıramamıştır (Jalasutram vd., 2017). Kabay tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar gözlenmiş bazalt lifi içeriği ile birlikte akışkanlaştırıcı miktarı arttırılmış ve işlenebilirlik bu şekilde düzenlenmiştir (Kabay, 2014).




(a) Bazalt lifinin etkisi



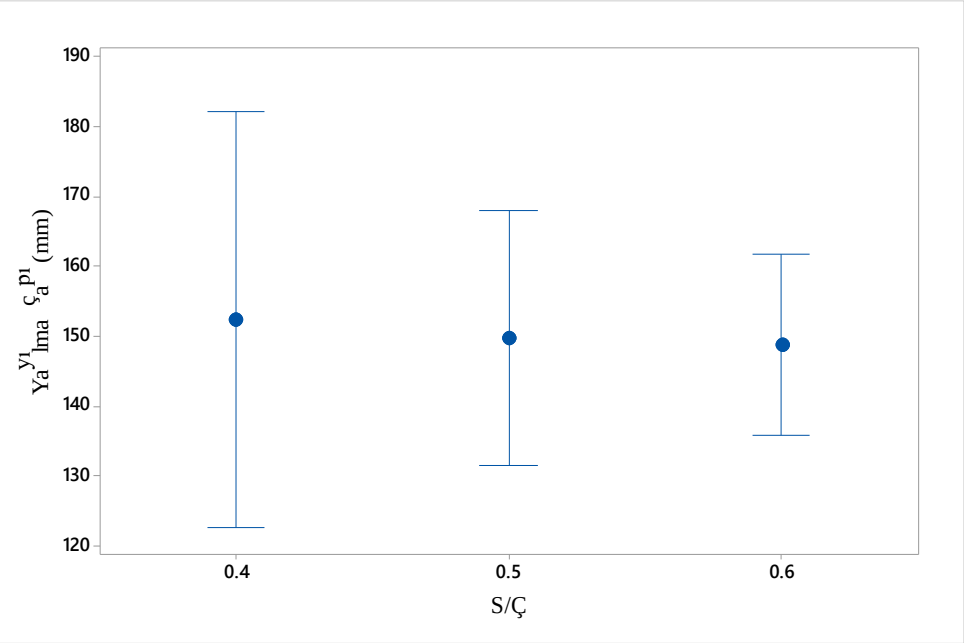

(b) Bakır atıklarının etkisi

Şekil 4.3 Lif ve bakır atıklarının çimento esaslı kompozitlerin yayılma çaplarına etkisi

Bakır cürufunun %7,5 oranında olması durumunda bakır agregasındaki artış ile birlikte yayılma çapları artmaktadır (Şekil 4.3b). %7,5 oranında bakır cürufu kullanılması durumunda karışımların yayılma çapları 151-185 mm arasında değişmektedir. %0 ve 15 oranında bakır cürufu içerikli karışımların yayılma çapları benzer özellikler

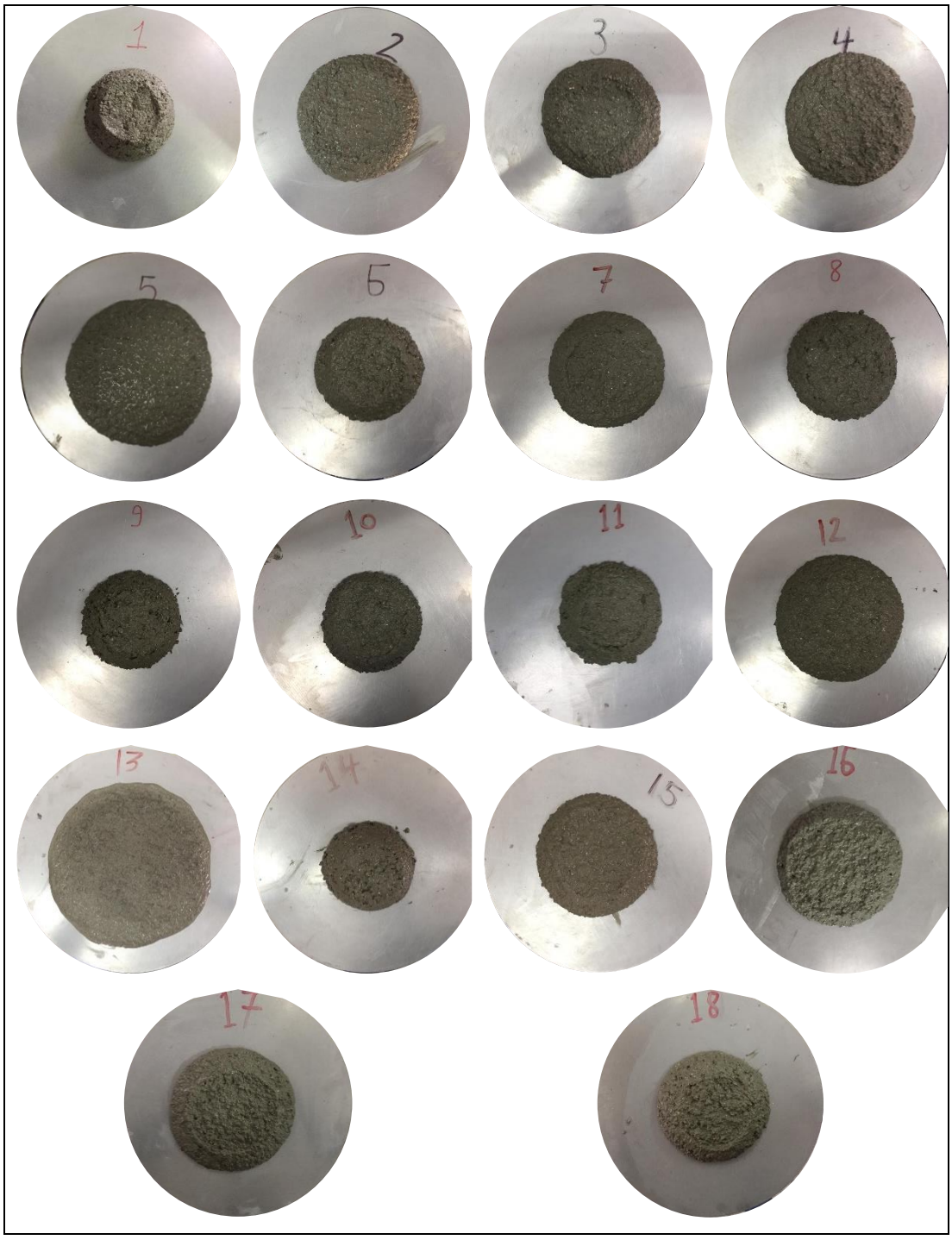
göstermiştir. Özellikle %25 bakır agregası kullanılması durumunda yayılma çapları artarken %50 oranında bakır agregası yayılma çaplarını azaltmıştır. %0 ve 15 bakır cürufu içerikli karışımlarda %25 bakır agregası kullanılması durumunda daha fazla akışkanlaştırıcı kullanıldığı için bu durum gözlenmiştir. %50 bakır agregası içerikli karışımlarda nispeten daha az akışkanlaştırıcı kullanılmış ve yayılma çapları azalmıştır. Ayrıca bakır agregasının kırmataş agregası gibi köşeli yapıya sahip olması içsel sürtünmeyi arttırmış ve işlenebilirliği daha çok olumsuz etkilemiştir. Bu yüzden akışkanlaştırıcı miktarı da arttırılmıştır. %15 bakır cürufu içerikli karışımların yayılma çapları 133-142 mm arasında değişmektedir. Khanzadi ve Behnood yaptıkları çalışmada bakır agregası kullanarak betonların çökme değerlerini arttırmışlardır (Khanzadi ve Behnood, 2009). Al jabri vd. (2011), farklı oranlarda bakır agregası kullanarak betonlar üretmişlerdir. Bakır agregası arttıkça karışımların çökme değerleri artış göstermiştir (Al-Jabri vd., 2011). Bakır agregasının bu olumlu etkisi düşük su emme oranı ile bazı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Ishimaru vd., 2005; Sharma ve Khan, 2017b). Bakır agregasının yüksek özgül ağırlığa sahip olması genellikle çökme değerlerini arttırmaktadır (Anjos vd., 2017). Najimi vd. (2011), bakır cürufunu %15'e kadar çimento ile yer değiştirerek kullanmışlardır. %5 oranında bakır cürufu kullanımı çökme değerini nispeten arttırmıştır. %10 ve 15 oranında bakır cürufu ise işlenebilirlik kaybına yol açmamıştır. Çökme kaybının olmaması bakır cürufunun yüksek özgül ağırlığa sahip olması ile açıklanmıştır (Najimi vd., 2011). Onuaguluchi ve Eren (2013) yaptıkları çalışmada bakır cürufunun artması ile birlikte yayılma çaplarının azaldığını bildirmiştir.

Şekil 4.4 (a)'da s/ç oranının yayılma çapı üzerindeki etkisi görülmektedir. S/Ç oranının 0,40 olması durumunda yayılma çapı 122-182 mm arasında değişkenlik göstermektedir. S/Ç oranının düşük olmasından dolayı karışımların işlenebilirliğini iyileştirmek için kullanılan akışkanlaştırıcı miktarındaki değişkenlik yayılma çapına da yansımıştır. S/Ç oranı 0,50 olduğunda ise 129-169 mm yayılma çapına sahip karışımlar elde edilmiştir. 0,60 s/ç oranına sahip karışımlarda yayılma çapındaki değişim daha az olmuş ve 135-160 mm arasında değerler gözlenmiştir. Nispeten s/ç oranı arttıkça yayılma çapları azalmaktadır. Bunun nedeni kullanılan akışkanlaştırıcı miktarı ile açıklanabilmektedir. S/Ç oranı arttıkça akışkanlaştırıcı miktarı azalmış ve bu durumda da yayılma çapları kısmen azalmıştır.




Şekil 4.4 S/Ç oranının yayılma çapı üzerindeki etkisi

Şekil 4.5 ’de lif ve bakır atıklarının kullanıldığı çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları verilmiştir. Karışımların yayılma çapları 117-199 mm arasında değişmektedir. En düşük yayılma çapı 1 numaralı karışım, en yüksek yayılma çapı ise 13 numaralı karışımda elde edilmiştir. Ayrıca 13 numaralı karışımda bir miktar ayrışma olduğu da gözlenmiştir. Akışkanlaştırıcı oranının %2,75 olmasından dolayı bir miktar Segregasyon meydana gelmiştir.



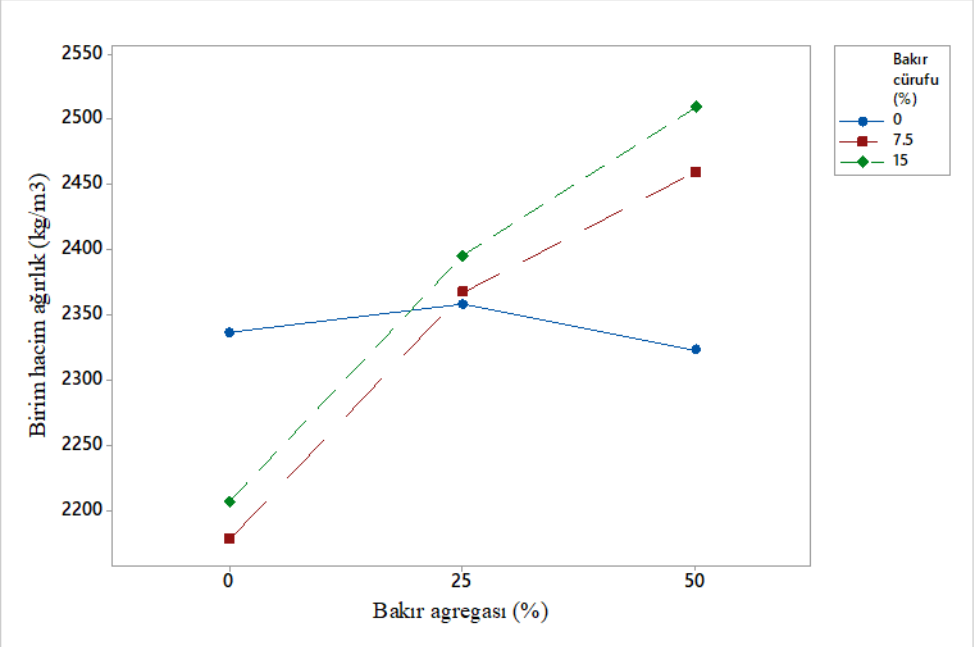

Şekil 4.5 Çimento esaslı kompozitlerin taze hal özellikleri

Şekil 4.6'da lif ve bakır atıklarının BHA (birim hacim ağırlık) üzerindeki etkileri verilmiştir. Karışımlardaki lif oranı arttıkça kompozitlerin BHA değerleri azalmaktadır. Bu durum hem 6 hem de 12 mm lifler için geçerlidir. Lifler kalıba yerleştirme esnasında içsel sürtünmeyi arttırdığı için BHA değerleri azalmıştır (Şekil 4.6a). Lif oranının %2 ve üzerindeki olması durumunda karışımların BHA değerleri

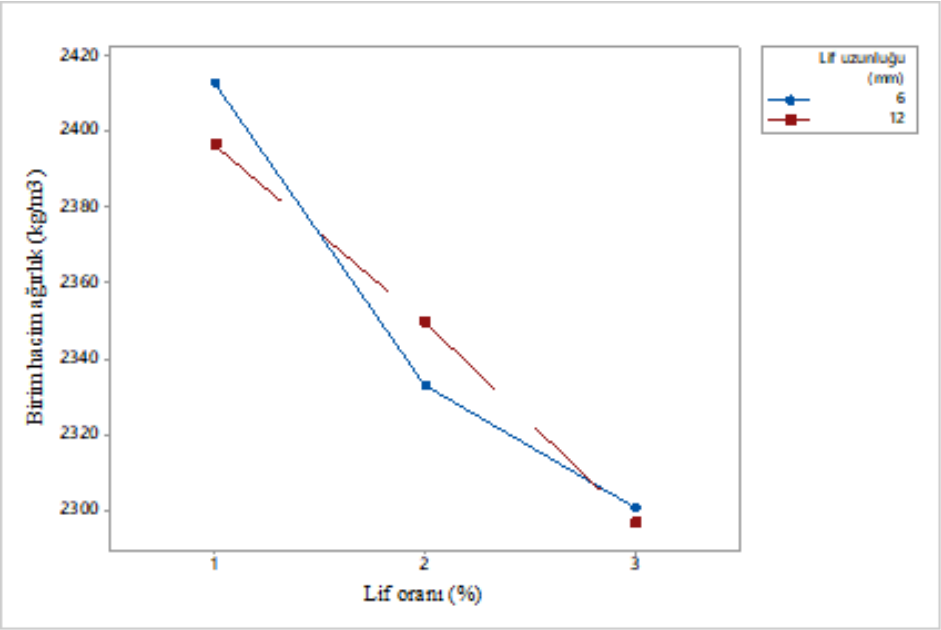
2400 kg/m$^3$ altına düşmektedir. 12 mm uzunluğundaki liflerin %1 yerine %3 oranında kullanılması durumunda BHA yaklaşık %5 oranında azalmıştır. Lif oranındaki değişim azda olsa BHA değerlerini etkilemiştir. 12 mm uzunluğundaki liflerin %1 ve 3 oranında kullanılması BHA daha çok azaltmıştır. Qin vd. tarafından yapılan çalışmada da bazalt lifi içeriği arttıkça betonların BHA azalmıştır (Qin vd., 2018). Benzer sonuçlar cam lifi ile yapılan karışımlarda da gözlenmiştir (Tassew ve Lubell, 2014; Hong ve Lubell, 2015). Hanafi vd. (2020) farklı oranlarda bazalt lifi kullanarak elde ettikleri çimento pastalarında lif oranının artışı ile BHA değerlerinin çok değişmediğini gözlemlemiştir (Hanafi vd., 2020). Borhan tarafından yapılan çalışmada bazalt lifi içeriği arttıkça betonların BHA değerleri azalmıştır (Borhan, 2012).

%7,5 ve 15 oranında bakır cürufu kullanılması durumunda bakır agregası içeriği arttıkça BHA değerleri artmaktadır. Ancak bu durum bakır cürufu kullanılmayan karışımlarda gözlenmemiştir. Bakır cürufu kullanılmayan karışımların BHA çok değişmemiş yaklaşık 2350 kg/m$^3$ değerinde olmuştur. %7,5 ve 15 oranında bakır cürufu kullanılması durumunda bakır agregasının artması sonucunda BHA değerleri 2400-2500 kg/m$^3$ arasında olmuştur. Özellikle %50 bakır agregası ve %15 bakır cürufu kullanılması halinde karışımların BHA değeri yaklaşık 2500 kg/m$^3$ olmuştur. Bakır atıklarından üretilen karışımların yayılma çapları ile BHA değerleri arasında belirgin ilişki gözlenmemiştir. Bunun nedeni bakır cürufu ve bakır agregasının yüksek özgül ağırlığa sahip olmasıdır. Karışımların işlenebilirlikleri kötü olmasına rağmen özgül ağırlıkları fazla olduğu için BHA artış göstermiştir. Anjos vd. bakır agregası kullanarak ürettikleri betonda agrega içeriğinin artması sonucunda BHA değerlerinin arttığını belirtmiştir (Anjos vd., 2017). Khanzadi ve Behnood (2009), bakır cürufunu agrega yerine kullanmışlar ve cüruf oranındaki artış ile birlikte betonların BHA değerleri artmıştır (Khanzadi ve Behnood, 2009). Al jabri vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada da bakır cürufu agrega olarak değerlendirilmiştir. Bakır cürufu oranı arttıkça betonların BHA değerleri artmıştır. %100 bakır cürufu kullanılan betonların BHA değerleri yaklaşık 2700 kg/m$^3$ olarak belirlenmiştir (Al-Jabri vd., 2009). Najimi vd. (2011) bakır cürufunu %15'e kadar çimento yerine kullanmışlar ve karışımların BHA'rında artışlar elde etmiştir (Najimi vd., 2011). Gupta vd. tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar gözlenmiştir (Gupta vd., 2017). Yapılan çalışmalarda hem bakır cürufunun agrega ve çimento yerine kullanılması durumunda BHA arttığı

belirtilmiştir. Bunun nedeni bakır atıklarının hem agrega hem de çimentodan daha fazla özgül ağırlığa sahip olması ile açıklanmıştır.

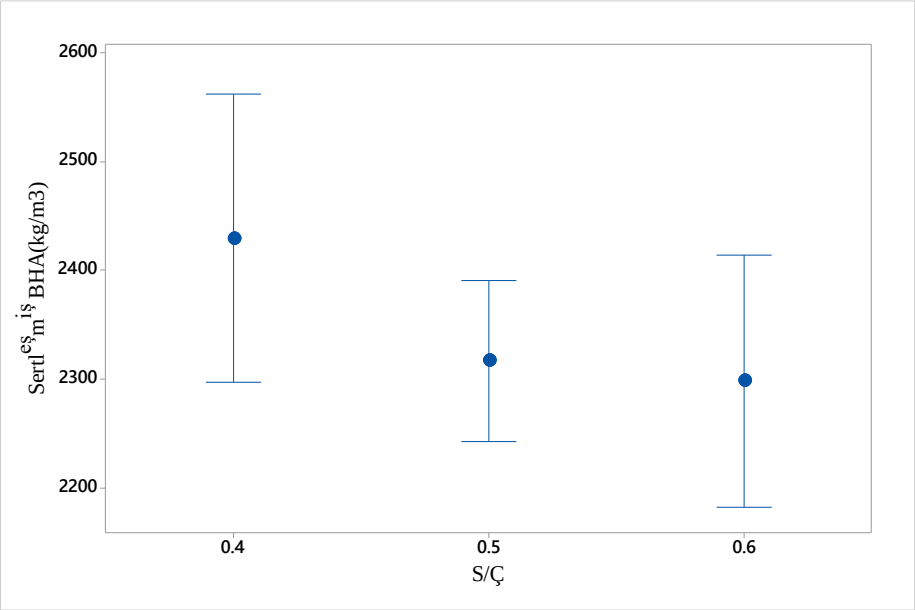



(a) Bazalt lifi etkisi




(b) Bakır atıklarının etkisi

Şekil 4.6 Çimento esaslı kompozitlerin BHA değerleri




Şekil 4.7 S/Ç oranının BHA üzerindeki etkisi

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi s/ç oranı arttıkça karışımların BHA değerleri azalmaktadır. s/ç oranı 0,40 olan karışımların BHA değerleri 2300-2570 kg/m$^3$ arasında değişmektedir. S/Ç oranı 0,50 olan karışımlarda BHA değerleri 2250-2390 kg/m$^3$ arasında değişmektedir. 0,60 s/ç oranına sahip karışımların BHA değerleri genellikle 2400 kg/m$^3$ altında olmaktadır. Karışımlardaki s/ç oranının artması su miktarını arttırdığı için karışımların BHA değeri azalmaktadır. 0,40 s/ç oranına sahip karışımlarda 2500 kg/m$^3$'ün üzerinde BHA değerleri elde edilmiştir.

## 4.2 Çimento Esaslı Kompozitlerin Basınç ve Eğilme Dayanımı

Şekil 4.8'de lif ve bakır atıklarının 7,28 ve 91 günlük karışımların eğilme dayanımına olan etkisi verilmiştir. Bazalt lifi katkılı karışımların eğilme dayanımları 4,5-6,8 MPa arasında değişmektedir (Şekil 4.8a). 6 mm uzunluğundaki liflerin %1 ve 3 oranında kullanılması durumunda eğilme dayanımı 6 MPa ve üzeri olmaktadır. Ancak lif oranının %2 olması durumunda eğilme dayanımı azalmıştır. 12 mm uzunluğundaki liflerin kullanımında lif oranındaki artış eğilme dayanımlarını arttırmıştır. Ancak 12 mm lif uzunluğundaki lif kullanımında eğilme dayanımları 6 MPa değerini geçememiştir. 6 mm uzunluğunda lif kullanımı 7 günlük eğilme dayanımlarını 12 mm lif uzunluğuna göre nispeten daha çok arttırmıştır.

28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde ise 6 mm lif kullanımında lif oranındaki artış eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Ancak lif uzunluğu 12 mm olduğunda lif oranındaki artış eğilme dayanımlarını azaltmıştır (Şekil 4.8a). Karışımların 28 günlük eğilme dayanımları hidratasyonun etkisi ile genellikle 8 MPa değerini geçmiştir. 6 mm liflerin %3 oranında kullanılması durumunda 28 günlük eğilme dayanımı yaklaşık 8.8 MPa olarak bulunmuştur. Lif oranındaki artış sonucunda eğilme dayanımlarında ihmal edilebilir seviyede azalmalar oluşmaktadır. 12 mm uzunluğundaki lifin %1 yerine %3 oranında kullanılması durumunda yaklaşık %4 oranında bir dayanım kaybı belirlenmiştir.

Şekil 4.8a 'da görüldüğü gibi 91 günlük eğilme dayanımları genellikle lif oranı arttıkça iyileşmektedir. Sadece 12 mm uzunluğundaki liflerin %2 oranında kullanılması durumunda dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Ancak bu dayanım kaybı değeri yaklaşık %13 'dür. 6 mm uzunluğundaki liflerin %1 ve 2 oranında kullanılması durumunda benzer özellikler gözlenmiştir. 91 günlük eğilme dayanımlarının genellikle 9 MPa üzerinde olduğu görülmektedir. 28 günlük eğilme dayanımları açısından 6 mm uzunluğundaki liflerin %3 oranında kullanılmasının daha olumlu olduğu görülmektedir.

Borhan vd. (2012), yaptıkları çalışmada bazalt lifi oranının bazı ara değerlerde yarmada çekme dayanımını azalttığını ancak bazı oranlarda ise arttırdığını belirtmiştir. Ancak yarmada-çekme dayanımındaki kayıplar ihmal edilebilir seviyelerde kalmıştır. Kabay (2014), yaptığı çalışmada betonların içerisinde %2 ve 4 oranında bazalt lifi kullanmıştır. Bazalt lifi oranı arttıkça eğilme dayanımının arttığını gözlemlemiştir. Qin vd. yaptıkları çalışmada da benzer sonuçları bulmuşlar ve bazalt lifi oranı arttıkça yarmada-çekme dayanımının arttığını belirtmiştir (Qin vd., 2018). Hanafi vd. (2020)'nin yaptığı çalışmada genellikle %0,75 oranına kadar bazalt lifi kullanımı eğilme dayanımını arttırırken %1,5 oranında bazalt lifi kullanımı eğilme dayanımını azaltmıştır. Eğilme dayanımındaki bu farklı davranışlar liflerin topaklaşma eğiliminde olmasından kaynaklanabilmektedir.

Bazalt lifi $SiO_2$ ve CaO'den oluştuğu için daha iyi mekanik performans göstermesi beklenmektedir. C-S-H jeli oluşumu, daha yüksek bir basınç ve eğilme dayanımı

sağlamaktadır. Ek olarak, bazalt lifleri amorf bir yapıya sahiptir. Bu, çimento hamurunda homojen bazalt elyaf dağılımı ile yoğunlaştırılmış bir matris oluşumuna yardımcı olmaktadır. Saloni vd. (2020), bazalt lifinin bir agrega görevi gördüğünü ve güçlü matris özellikleri oluştuğunda, dayanımın daha çok artırdığını bildirmiştir. Benzer sonuçlar diğer çalışmalarda da (Pehlivanli vd., 2016; Ralegaonkar vd., 2018; Sadrmomtazi vd., 2018; Chidighikaobi, 2019) gözlenmiştir.

Şekil 4.8(b)'de bakır atıklarının eğilme dayanımı özelliklerine etkisi verilmiştir. 7 günlük eğilme dayanımlarının 4,2-7,0 MPa arasında değiştiği görülmektedir. 7. günde en yüksek eğilme dayanımı (~7.0 MPa) %7,5 bakır cürufu kullanılan ancak bakır agregası kullanılmayan karışım ile %15 bakır cürufu ve %25 bakır agregası kullanılan karışımlarda gözlenmiştir. 7 günlük karışımlarda bakır agregasındaki artış genellikle eğilme dayanımının azalmasına yol açmıştır.

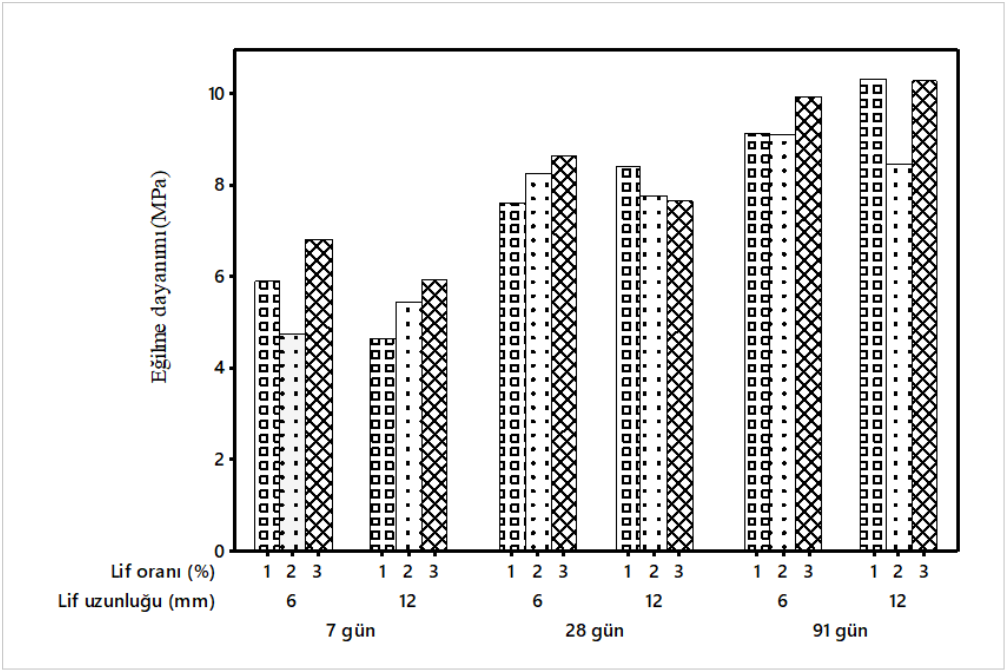
28 günlük eğilme dayanımlarında ise %15 oranında bakır cürufu kullanılan karışımların bakır agregası içeriğindeki artış dayanım artışı sağlamıştır. %7,5 oranında bakır cürufunun kullanılması durumunda bakır agregasındaki artış eğilme dayanımlarını azaltmıştır. Bakır cürufu kullanılmayan karışımların eğilme dayanımı sadece %25 bakır agregası içeriğinde artmıştır. %50 oranında bakır agregası kullanılması durumunda 28 günlük eğilme dayanımı yaklaşık %15 oranında azalmıştır. Karışımların 28 günlük eğilme dayanımları 7-8,55 MPa arasında değişmektedir. 28 günlük eğilme dayanımları açısından en uygun karışım oranları %7,5 bakır cürufu %0 bakır agregası ya da %15 bakır cürufu %25 bakır agregası olarak belirlenmiştir.

91 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde %0 ve 7,5 bakır cürufu içerikli karışımlarda bakır agregası arttıkça eğilme dayanımları azalmıştır. Bakır cürufunun %15 olması durumunda bakır agregasının %25 olması eğilme dayanımını yaklaşık %29 oranında arttırmıştır. %50 oranında bakır agregası ile bakır agregası kullanılmayan karışım ise benzer özellikler göstermiştir. 91 günlük eğilme dayanımlarının 8-11,5 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı %7,5 bakır cürufu ve bakır agregası kullanılmayan karışımlarda elde

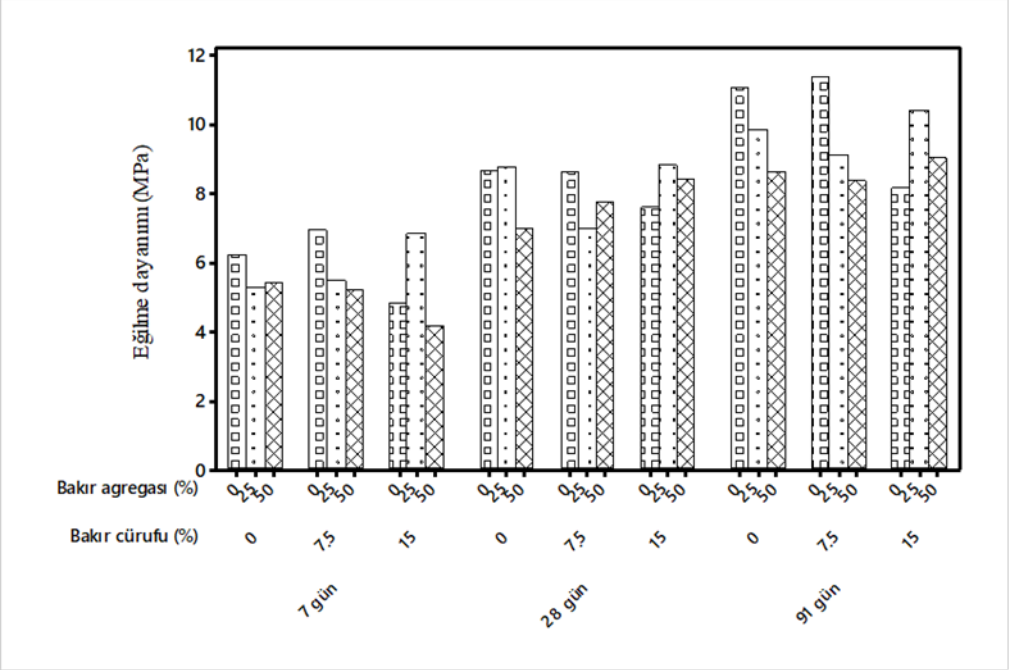
edilmiştir. Bakır agregası ve cürufu kullanılmayan karışımlarında eğilme dayanımı yaklaşık 11,5 MPa olmuştur.

Anjos vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada agrega yerine kullanılan bakır agregaları çekme dayanımını azaltmıştır. Bazı çalışmalar, bakır cürufunu ince agrega yerine kullanarak basınç ve çekme dayanımlarının normal betonunkiyle hemen hemen aynı hatta kontrol karışımlarından önemli ölçüde daha fazla olduğunu bildirmiştir (Hwang ve Laiw, 1989; Shoya vd., 1997; Khanzadi ve Behnood, 2009). Al Jabri vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada bakır cürufunun agrega yerine kullanılması durumunda bazı oranlarda eğilme dayanımı azalırken bazı oranlarda artışlar gözlenmiştir. Wu vd. (2010b), yaptıkları çalışmada bakır cürufu oranının artması ile eğilme dayanımının azaldığını, dayanım kaybının fazla hapsolmuş sudan kaynaklandığını belirtmiştir.

Moura vd. (1999), çimento yerine %10 oranında bakır cürufu kullanmışlar ve eğilme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. Antonio ve Mobasher (1999), 0,50 s/ç oranına sahip betonlarda %10 oranında bakır cürufu kullanarak eğilme tokluğunu belirlemişlerdir. Bakır cürufunun çimento yerine kullanılması durumunda eğilme tokluğunun azaldığı gözlenmiştir. Onuaguluchi ve Eren (2013), tarafından yapılan çalışmada %10 ve 15 oranında çimento yerine kullanılan bakır cürufu eğilme dayanımlarını azaltmıştır. Dayanım kaybının nedeni çimentoya göre reaktivitesi az olan bakır cürufundan kaynaklanmaktadır (Onuaguluchi ve Eren, 2012). Gupta vd. (2017), tarafından yapılan çalışmada ise bakır cürufunun çimento yerine kullanılması halinde eğilme dayanımları artış göstermiştir.

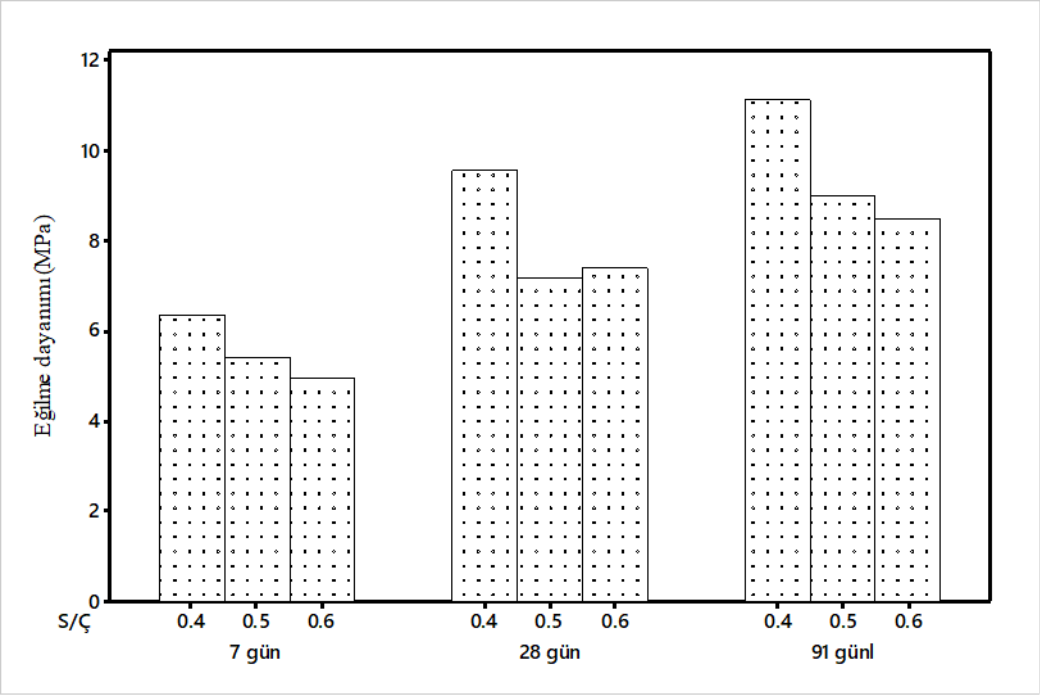



(a) Bazalt lifi etkisi




(b) Bakır atıklarının etkisi

Şekil 4.8 Çimento esaslı kompoztlerin eğilme dayanımları




Şekil 4.9 S/Ç oranının eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.9'a görüldüğü gibi s/ç oranı arttıkça karışımların eğilme dayanımları azalmaktadır. Tüm deney zamanlarında s/ç oranındaki artış eğilme dayanımlarını olumsuz etkilemektedir. Hidratasyon süresinin artması sonucunda eğilme dayanımları artmaktadır. Özellikle 91. günde karışımların eğilme dayanımları 8 MPa ve üzerinde olmaktadır. 28 günlük karışımlarda s/ç oranı 0,40 'dan 0,60'a çıkarıldığında eğilme dayanımı yaklaşık %25 azalmaktadır. 28 günlük numunelerde s/ç oranının 0,50'den 0.60'a çıkması durumunda bir miktar dayanım artışı gözlenmiştir.

Şekil 4.10'da bazalt lifi ve bakır atıklarından elde edilen karışımların farklı zamanlardaki basınç dayanımları görülmektedir. 7 günlük basınç dayanımlarında 6 mm lif kullanımı daha olumlu sonuçlar sağlamıştır (Şekil 4.10a). 6 mm lif kullanımında %1 ve 3 oranında lif kullanımı basınç dayanımını arttırmaktadır. %2 oranında lif kullanımı %11 oranında basınç dayanımını azaltmıştır. 12 mm lif kullanımı da 6 mm lif kullanımına göre nispeten basınç dayanımını azaltmıştır. 12 mm lif kullanılması durumunda lif oranındaki artışta basınç dayanımlarını azaltmaktadır. 7 günlük basınç dayanımlarının 39,8-45,8 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 7 günlük basınç dayanımlarında 6 mm uzunluğundaki liflerin %1 ya da 3 oranında kullanılması daha uygun olmaktadır.

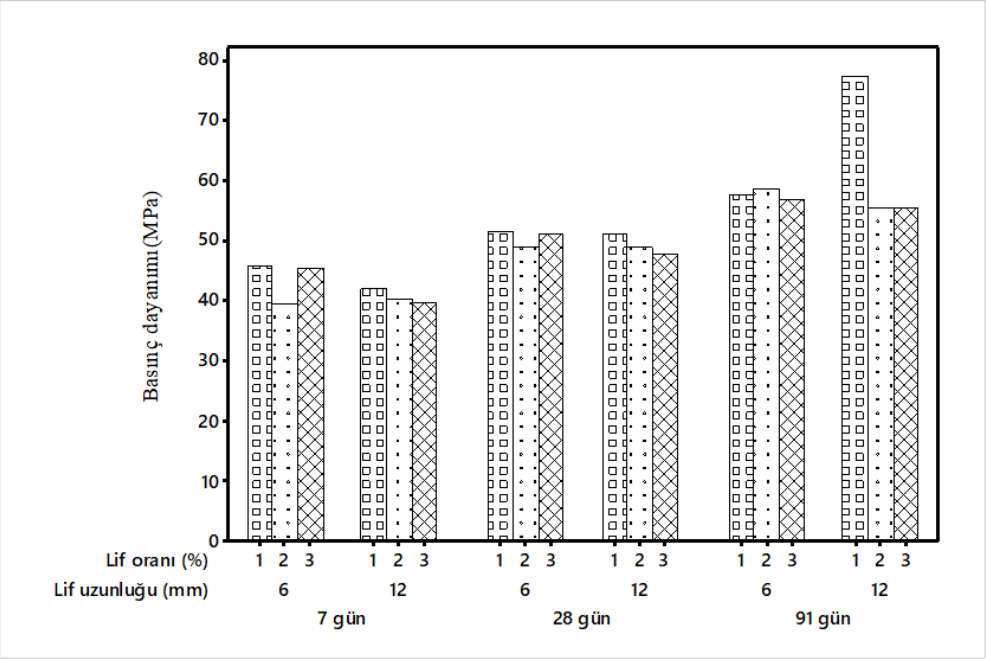
28 günlük basınç dayanımlarında lif özelliklerinin çok belirgin bir artış ya da azalışa yol açmadığı görülmektedir. Basınç dayanımlarının 49,2-54,1 MPa arasında olduğu görülmektedir (Şekil 4.10a). 6 mm uzunluğunda lif kullanıldığında %2 oranının dayanım kaybına yol açtığı gözlenmektedir. Ancak bu dayanım kaybının %6 gibi küçük bir değer olduğu görülmektedir. 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımlarda lif oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Bu yüzden en uygun oranının 52,6 MPa değerini sağlayan %1 olduğu tespit edilmiştir.

91 günlük karışımlarda ise hidratasyon sürecinin artması lif-matris aderansına katkı sağlamıştır. Özellikle 12 mm uzunluğundaki liflerin %1 oranında kullanılması basınç dayanımını yaklaşık 80 MPa değerine ulaştırmıştır. Ancak %2 ve 3 oranında lif kullanımı basınç dayanımlarını azaltmıştır. %2 ya da 3 oranında lif kullanılması basınç dayanımını yaklaşık %30 oranında azaltmıştır. 6 mm uzunluğunda lif kullanılması halinde diğer deney günlerinden farklı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. 6 mm uzunluğundaki lifin %2 oranında kullanılması basınç dayanımını nispeten az da olsa arttırmıştır. 6 mm uzunluğundaki lif kullanımında basınç dayanımı 57,8-59,7 MPa arasında değişmektedir. 91 günlük basınç dayanımı açısından en uygun karışım oranı 12 mm uzunluğundaki lifin %1 oranında kullanılması sonucunda elde edilmiştir. Benzer sonuçlar Borhan vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada da gözlenmiş bazalt lifi oranının artması sonucunda bazı karışımların basınç dayanımları azalmıştır. Dias ve Thaumaturgo (2005), hacimce %1,0 bazalt lifi ilavesinin betonun basınç ve yarmada çekme dayanımında sırasıyla %26,4 ve %12 oranında azalmaya neden olduğunu bulmuştur. Ayrıca, lif içeriği daha düşük olan (hacimce %0,5) betonların, lifsiz betona göre basınç ve yarmada-çekme dayanımının ihmal edilebilir düzeyde değişiklikler sunduğunu belirtmiştir. Kabay (2014), tarafından yapılan çalışmada düşük s/ç oranında (0,45) bazalt lifi oranının artması basınç dayanımını azaltmıştır. Ancak yüksek s/ç oranında lif oranın artması basınç dayanımını arttırmıştır. Qin vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada ise bazalt lif oranın artması basınç dayanımını arttırmıştır. 28. günde yaklaşık 80 MPa basınç dayanımına sahip betonlar elde edilmiştir. Genel olarak, bazalt liflerin karışıma eklenmesi, kompozit numunelerin yük taşıma kapasitesinde bir artışa neden olmaktadır. Bu performans artışı, lif-matris arasındaki aderans ile açıklanabilmektedir (Simões vd., 2017). Sun vd. (2019), hacimce %2'ye kadar bazalt lifi ilavesinin basınç dayanımını arttırdığını ancak daha

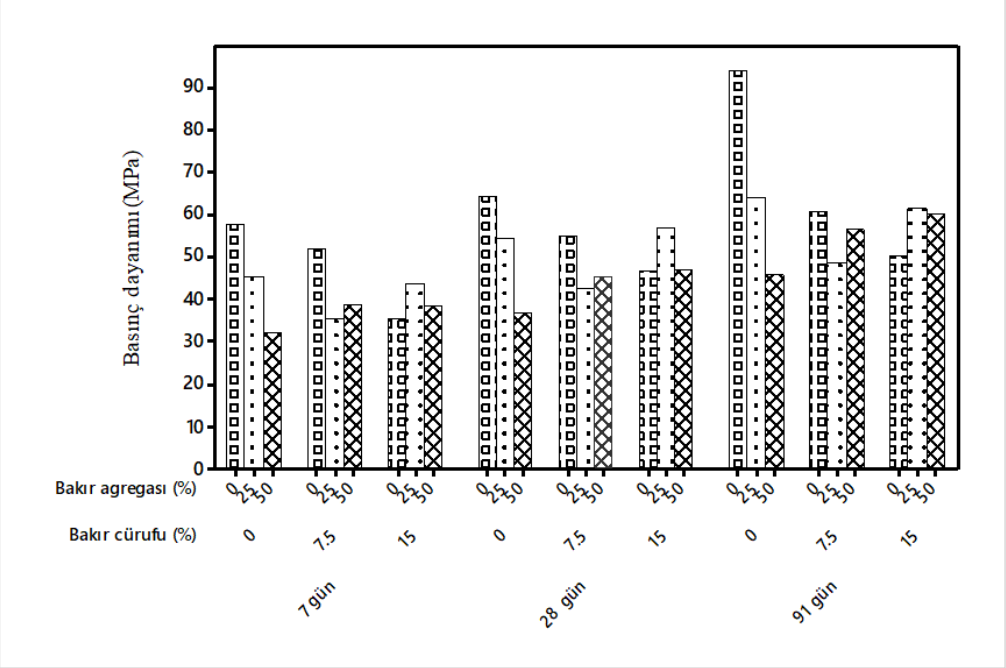
fazla lif ilavesinin dayanımı olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Jalasutram vd. (2017), tarafından yapılan çalışmada da bazalt lifi içeriği arttıkça betonların basınç dayanımları azalmıştır. Bazalt liflerinin eklenmesi, jeopolimer betonun dinamik basınç dayanımında önemli bir iyileşme sağlamazken deformasyon ve enerji yutma kapasitelerini önemli ölçüde iyileştirmiştir (Li ve Xu, 2009). Jiang vd. (2010), bazalt liflerinin karışıma eklenmesinin erken hidratasyon döneminde basınç ve eğilme dayanımlarını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Şekil 4.10 (b)'de bakır atıklarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir. 7 günlük karışımlarda genellikle bakır cürufu ve agregası basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Özellikle bakır cürufu kullanılmayan karışımlarda %50 oranında bakır agregası kullanılması basınç dayanımını yaklaşık %48 oranında azaltmıştır. %7,5 oranında bakır cürufu kullanılan karışımlarda ise %50 oranında bakır agregası kullanılması dayanım kaybını azaltmıştır. %15 oranında bakır cürufu kullanılan karışımlarda ise %25 oranında bakır agregası kullanımı basınç dayanımını arttırmış ve yaklaşık 45 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. 7 günlük basınç dayanımlarında en uygun oranın %7,5 bakır cürufu ve %0 bakır agregası olduğu gözlenmiştir.

Karışımların 28 günlük basınç dayanımlarının 34,7-69,1 MPa arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 4.10(b)). Genellikle bakır cürufu ve agregasındaki artış 28 günlük basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Sadece %15 bakır cürufu ve %25 bakır agregası kullanılan karışımlarda dayanım artışı gözlenmiştir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine paralellik gösterdiği görülmektedir. Bakır atıklarının kullanılmadığı karışımlarda yaklaşık 70 MPa basınç dayanımı sağlanmıştır.




(a) Bazalt lifi etkisi




(b) Bakır atıklarının etkisi

Şekil 4.10 Çimento esaslı kompoztlerin basınç dayanımları

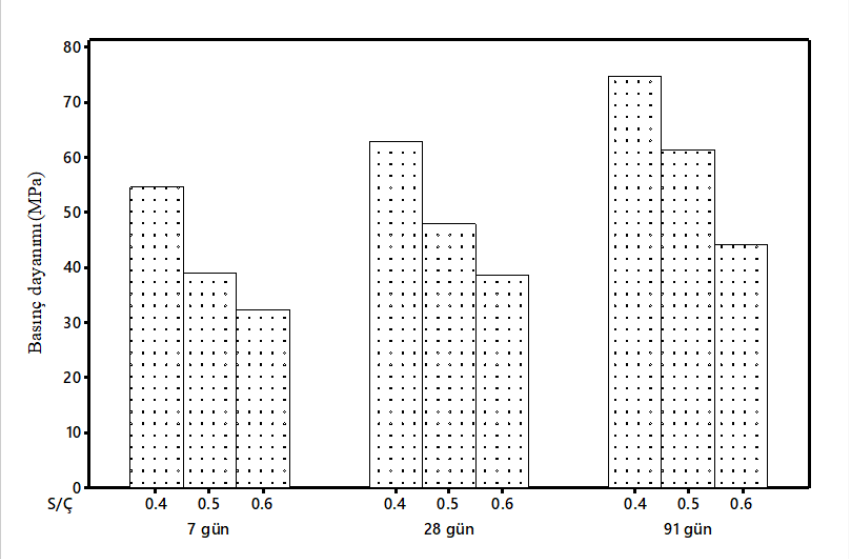
91 günlük basınç dayanımlarının da diğer deney günlerine benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Özellikle bakır atıkları kullanılmayan karışımlarda 90 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilmiştir. Bakır cürufu kullanılmayan karışımlarda bakır agregasının %50 olması durumunda basınç dayanımı yaklaşık %53 oranında azalmıştır. Bakır cürufundaki artış ile birlikte bakır agregasının neden olduğu dayanım

kaybı oranı azaltılmıştır. %15 oranında bakır cürufu ve %25 oranında bakır agregası kullanılan karışımların basınç dayanımı 60 MPa değerinin üzerinde olmuştur. Bu oranlar ile yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit üretmenin mümkün olduğu görülmüştür.

Resende bakır cürufunu harçlarda ince agrega yerine kullanarak mekanik özellikleri incelemiştir. Çalışma sonucunda optimum oranın %25 olduğunu tespit etmiştir. Bakır cürufunun mekanik özellikleri azalttığı bunun nedeni bakır cürufunun kimyasal yapısından dolayı kaynaklandığı belirtilmiştir. Anjos (2017) tarafından yapılan çalışmada da bakır cürufu agrega yerine kullanılmış ve cüruf oranındaki artış betonların basınç dayanımını azaltmıştır. Khanzadi ve Behnood (2009) ise yaptıkları çalışmada bakır cürufunu agrega olarak kullanmışlardır. Agrega olarak kullanılan bakır cürufunun basınç dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Dayanım artışının nedeni bakır cürufu agregasının dayanımı ile açıklanmıştır. Ayrıca bakır cürufu agregalarının kireçtaşına göre matrisle aderansının daha iyi olduğunu savunmuşlardır. Al Jabri vd. (2011) yaptıkları çalışmada agrega yerine bakır cürufu kullanarak dayanım artışı elde etmişlerdir. Wu vd. (2010a;b), bakır cürufu tanelerinin köşeli keskin kenarları sayesinde beton matrisinin kohezyonunu iyileştirdiğini belirtmiştir. Pürüzlü yüzeyinden dolayı çimento pastası ile agrega arasındaki aderans artmaktadır. Bakır cüruf tanelerinin köşeli keskin kenarları, ince agreganın olumsuz etkilerini bir dereceye kadar azaltır ve böylece betonun kohezyonunu daha da iyileştirme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca bakır cüruf tanelerinin camsı yüzey dokusu kohezyon üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bakır cürufunun düşük su emme özellikleri betonda fazla su olmasına neden olmaktadır. Yüksek bakır cürufu içeriğinde aşırı kusma yada terleme olabilir. Bu durum, betonda mikro boşluklar yada kılcal boşlukların oluşmasına neden olarak beton kalitesinde azalmaya yol açar. Bu nedenle, düşük bakır cüruf içerikli betonun mukavemeti, bakır cürufunun olumlu etkisi ile iyileştirilebilir, ancak bakır cüruf içeriği %40'ı aşarsa, etkili olduğu kohezyonda bir azalma ile betonun mukavemeti önemli ölçüde azalabilir.

Mobasher vd. (1996) ve Tixier vd. (1997) bakır cürufunun çimento hidratasyonu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ağırlıkça % 15'e kadar bakır cürufu, puzolanik reaksiyon aktivatörü olarak % 1,5'e kadar hidrate kireç ile birlikte portland çimentosu

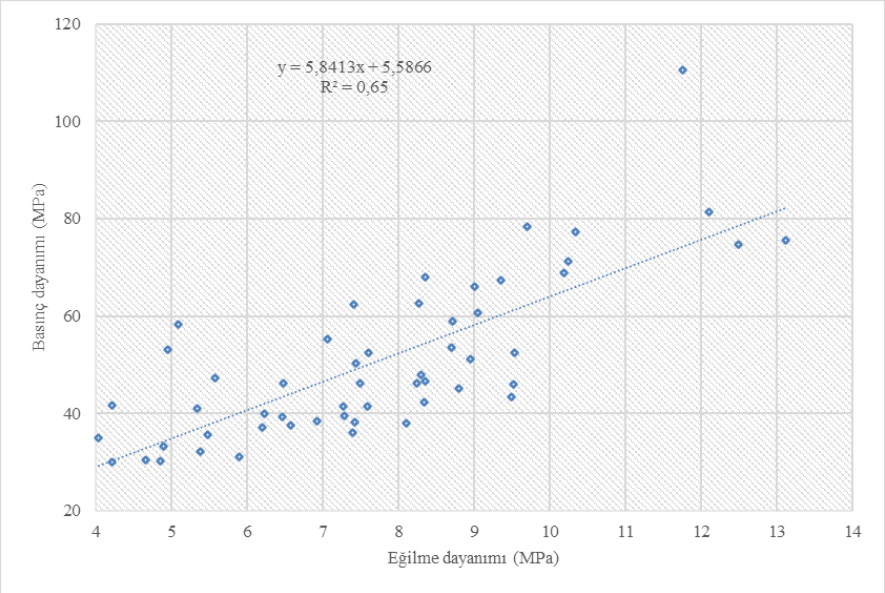
ikamesinde kullanılmıştır. Sonuçlar, 90 güne kadar hidratasyon için basınç dayanımında önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kılcal gözeneklilikte bir azalma ve jel gözenekliliğinde ise bir artış gözlenmiştir. Moura vd. (1999) bakır cürufunun beton ve harçlarda kullanılan katkı maddelerine potansiyel bir alternatif olabileceğini belirtmiştir. Al Jabri vd. (2006), 0,50 s/ç oranına sahip betonlarda %5 oranında bakır cürufu kullanarak bir miktar basınç dayanımını arttırmıştır. Zain vd. (2004) bakır cürufunun çimento yerine farklı oranlarda kullanımını araştırmıştır. Bakır cürufunun harçların priz süresini uzattığını ve basınç dayanımını azalttığını tespit etmişlerdir. Optimum ikame oranının %5-7,5 arasında olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Onuaguluchi ve Eren (2013) çimento yerine kullanılan bakır cürufunda %5'e kadar dayanım artışı elde ederken daha yüksek oranlarda dayanım kaybı ortaya çıkmıştır. Ranganath vd. (1998) yaptıkları çalışmada, büyük partiküllerin çimento karışımlarında daha az reaktif olduğunu ortaya koyarken, Cu (II) iyonlarının varlığından dolayı çimento hidratassyonunun gecikmesi Hashem vd. (2011) tarafından belirtilmiştir.




Şekil 4.11 S/Ç oranının basınç dayanımına etkisi

S/Ç oranı arttıkça karışımların basınç dayanımlarının azaldığı Şekil 4.11'de görülmektedir. Tüm deney günlerinde s/ç oranındaki artış basınç dayanımlarını azaltmaktadır. 91. günde farklı s/ç oranına sahip karışımların basınç dayanımları 43-75 MPa arasında değişmektedir. 28. günde 0,40 s/ç oranına sahip karışımların basınç dayanımı 50 MPa'yı geçerken. 91. günde 0,40 ve 0,50 s/ç oranına sahip karışımlar 50

MPa değerini geçmiştir. 0,60 s/ç oranına sahip karışımların 50 MPa değerini geçmediği belirlenmiştir.




Şekil 4.12 Basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki

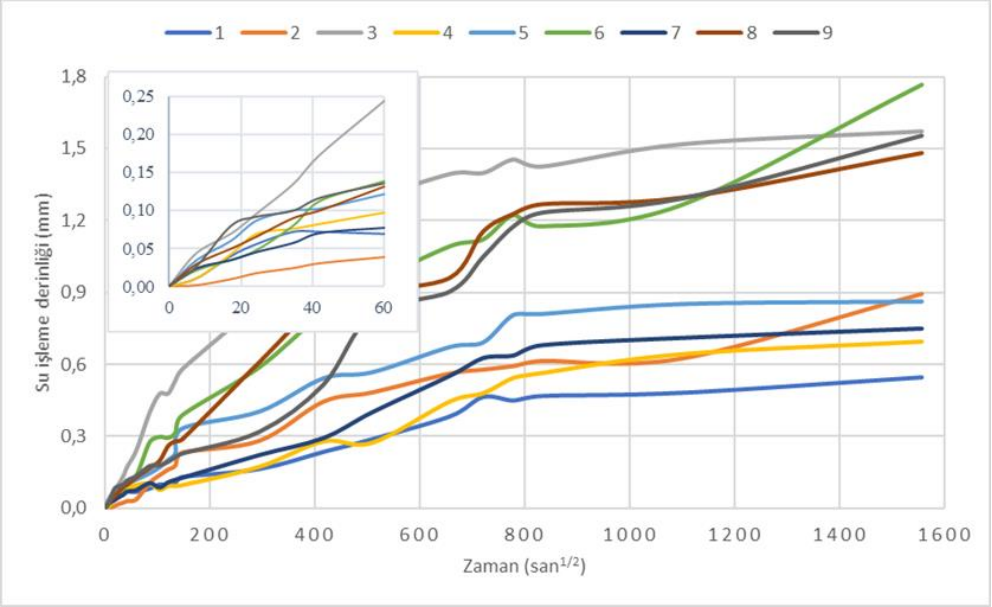
Şekil 4.12'de görüldüğü gibi basınç dayanımı arttıkça karışımların eğilme dayanımının da arttığı görülmektedir. Basınç ve eğilme dayanımı arasındaki R2 katsayısı 0,65 olmasına rağmen genellikle basınç dayanımı artışı eğilme dayanımını da arttırmaktadır.

## 4.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kapilarite Özellikleri

Şekil 4.13'te 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların zamana bağlı su işleme derinlikleri görülmektedir.

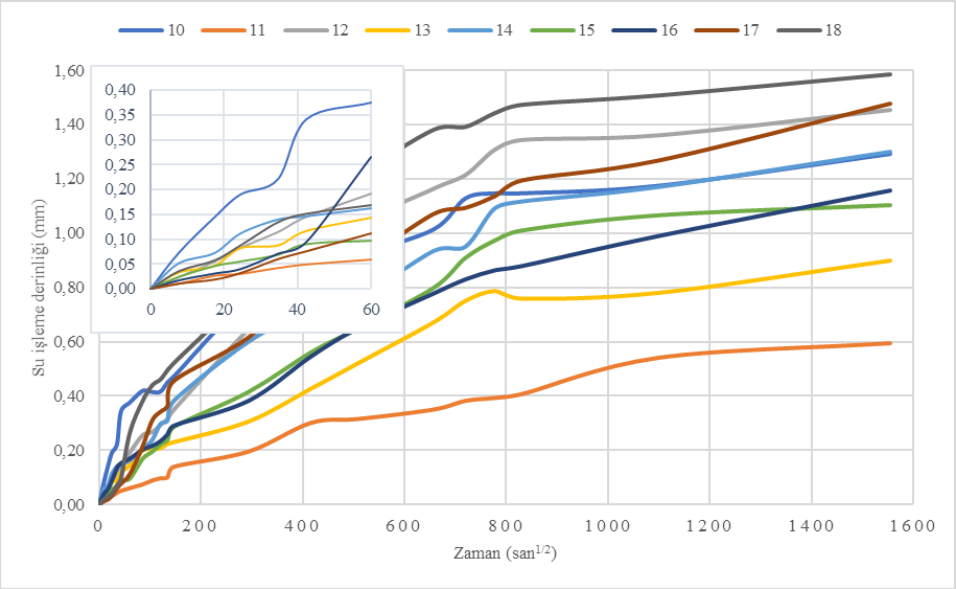
Şekil 4.13'te kapilarite deneyinin ilk zamanlarında en fazla su işleme derinliği 3 numaralı karışımda gözlenmiştir. 3 numaralı karışımın ilerleyen süreçte de su işleme derinliğinin arttığı görülmektedir. 3 numaralı karışımın su işleme derinliğinin fazla olmasının nedeni s/ç oranın 0,60 olmasıdır. Ayrıca %50 oranında kullanılan bakır agregası da bu süreçte etkili olmuştur. 3 numaralı karışımdaki lif içeriğinin %3 olması su işleme derinliğini de arttırmıştır. 9 ve 6 numaralı karışımlarında s/ç oranı 0,60 olduğu için su işleme derinlikleri diğer karışımlara göre daha fazladır. 3,6,8 ve 9 numaralı karışımların 28. gün sonundaki su işleme derinlikleri yaklaşık 1,5-1,8 mm

arasında değişmektedir. 8 numaralı karışımın s/ç oranı 0,50 olmasına rağmen lif içeriğinin %3 olması su işleme derinliğinin artmasına yol açmıştır. 1 numaralı karışımın ise su işleme derinliği 0.6 mm değerinin altındadır. 1 numaralı karışımın s/ç oranı 0,40 ve lif içeriği %1'dir. s/ç oranındaki azalma ile birlikte su işleme derinlikleri genellikle azalmaktadır. s/ç oranı 0,40 olan 4 ve 7 numaralı karışımlarında su işleme derinlikleri yaklaşık 0,8 mm olarak belirlenmiştir. 6 numaralı karışımın ise su işleme derinliği zamanla sürekli artış göstermektedir. 6 numaralı karışımda kullanılan %15 bakır cürufu pasta içeriğini azalttığı için bu durumun oluştuğu tahmin edilmektedir. %7,5 bakır cürufu kullanılan 5 ve 7 numaralı karışımlarda ise su işleme derinliği 8. günden itibaren fazla bir artış göstermemiştir. 3 ve 9 numaralı karışımların bakır agregası içeriği %50 olduğu için karışımların su işleme derinliğinin daha fazla olduğu da görülmektedir. Kırmataş agregasına göre daha yüksek özgül ağırlığa sahip olan bakır agregası kullanımı karışımların porozitesini arttırmaktadır. Bu durumda da karışımların genellikle su işleme derinlikleri artış gösterebilmektedir.




Şekil 4.13 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kapilarite özellikleri

Şekil 4.14'te 12 mm uzunluğundaki lifler ile üretilen karışımların su işleme derinlikleri verilmiştir.




Şekil 4.14 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kapilarite özellikleri

12 mm uzunluğundaki liflerin kullanılması genellikle su işleme derinliğini azaltmıştır (Şekil 4.14). Ancak s/ç oranındaki artış karışımların su işleme derinliklerini arttırmaktadır. Özellikle s/ç oranı 0,60 ve lif içeriği %3 olan 18 numaralı karışımın su işleme derinliği yaklaşık 1,6 mm olarak bulunmuştur. Benzer sonuçlar 12 numaralı karışımda da gözlenmiştir. S/Ç oranı 0,60, bakır agregası oranı %25 olan 12 numaralı karışımında su işleme derinliği 1.46 mm olarak belirlenmiştir. 17 numaralı karışımın s/ç oranı 0,50 olmasına rağmen lif içeriğinin %3 ve bakır agregası içeriğinin %50 olması su işleme derinliğini büyük ölçüde arttırmıştır. Ayrıca 10 numaralı karışımın s/ç oranı 0,40 olmasına rağmen bakır agregası içeriği %50 olduğu için su işleme derinliği 1,20 mm değerini geçmiştir. 11 numaralı karışımın su işleme derinliği 0,60 mm değerinin altındadır. Çünkü 6 numaralı karışımda bakır cürufu ve agregası kullanılmamıştır. Pasta hacmi ve agrega hacminin azalmamasından dolayı kılcal boşlukların daha az olduğu düşünülmektedir. Deney başlangıcında 10 numaralı karışımın daha fazla su işleme derinliğine sahip olduğu da görülmektedir. En az su işleme derinliği yine 11 numaralı karışımda gözlenmiştir. 28. günde 18 numaralı karışımın 11 numaralı karışıma göre su işleme derinliği %63 daha fazladır.

Sonuç olarak en az su işleme derinliği 0,54 mm ile 1 numaralı karışımda elde edilmiştir. 1 numaralı karışımın s/ç içeriği 0,40 ve lif içeriği %1'dir. Ayrıca bünyesinde bakır atıkları kullanılmamıştır. En fazla su işleme derinliği değeri 1,77 mm ile 6 numaralı karışımda elde edilmiştir. S/Ç değeri 0,50 olan 6 numaralı karışımın lif

içeriği %2'dir. Bakır agregası kullanılmayan ancak %15 bakır cürufu kullanılan 6 numaralı karışımın 28 günlük basınç dayanımı 37,91 MPa'dır. Genellikle basınç dayanımı düşük olan karışımların su işleme derinlikleri fazla olmuştur. Bu durum karışımlarda kullanılan bakır cürufu ve agregasının yol açtığı hacimsel kayıp ile açıklanmıştır.

Divyah vd. (2020) hafif betonlarda %0,25'e kadar bazalt lifi kullanmışlardır. Bazalt lifi oranındaki artış ile birlikte betonların kapilarite katsayılarında artışlar gözlenmiştir. Niu vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada bazalt lifi hacimce %0,20 oranına kadar kullanılmıştır. Bazalt lifi oranı arttıkça betonların su işleme derinliği artış göstermiştir. Lif içeriği çok yüksek olduğunda, lifler homojen olarak dağılmaz; matriste üst üste binerler ve aglomera oluştururlar, böylece lifler arasındaki kaba boşluklarda artışa neden olmaktadır. Bunun sonucunda da daha yüksek su emme ortaya çıkmaktadır (Niu vd., 2020). Karthikeyan vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada hacimce %1'e kadar bazalt lifi kullanılmıştır. Bazı karışımlarda bazalt lifi oranının artması kapilerite katsayısını azaltırken bazı karışımlarda kapilarite katsayısı artmıştır. Adesina vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada beton üretiminde %4 ve %8 oranında bazalt lifi kullanılmıştır. Bazalt lifi oranının artması sonucunda karışımların su işleme derinlikleri de artmıştır.

Yüksek performanslı betonda, ince agregalar olarak %40 oranında bakır cürufu ve çimento ikamesi olarak %2 nanosilis kullanılarak kapilarite azaltılmıştır (Chithra vd., 2016). Sharma ve Khan (2017a; 2017b; 2018) yaptıkları çalışmada bakır cürufunu agrega yerine kullanarak kapileritenin kontrol betonundan daha iyi olduğunu göstermiştir. Geetha vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada bakır cürufu içeriği arttıkça kapilarite değerleri azalmıştır. Gupta ve Siddique (2020) tarafından yapılan çalışmada ince agrega yerine kullanılan bakır cürufu kapilerite değerlerini genellikle azaltmıştır. Rajasekar vd. (2019) %100'e kadar bakır cürufunu agrega yerine kullanmışlar ve kapilerite değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir.

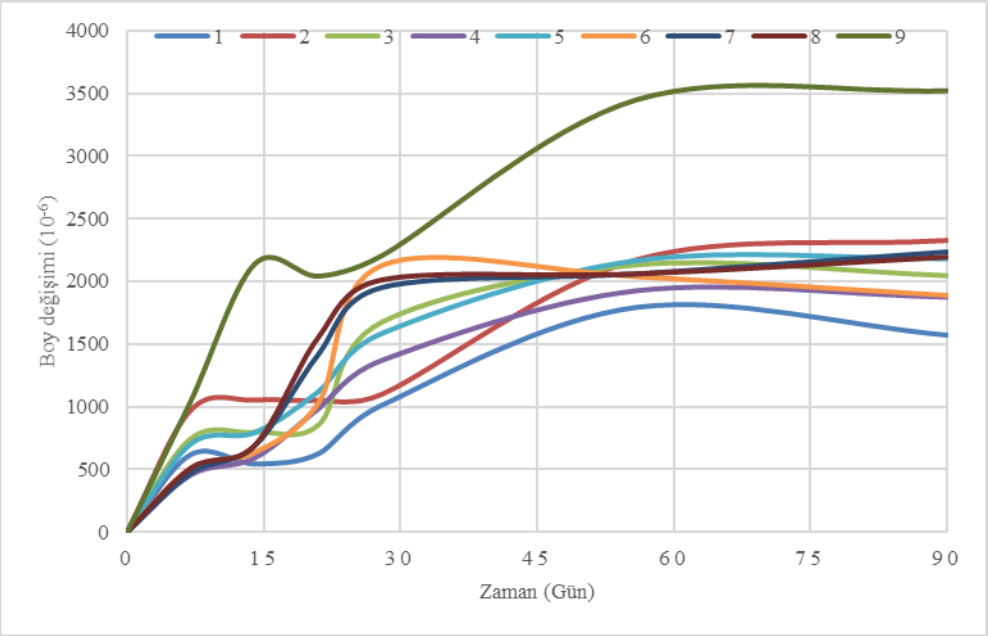
Bakır cürufunun çimento yerine kullanılarak elde edilen karışımlarda kapilerite özellikleri çok incelenmemiştir. Ancak bakır cürufu pasta hacmi üzerinde etkili olduğu için kapileriteye etkisi bu şekilde açıklanabilmiştir. Pasta hacminin artması sonucunda

genellikle kapilerite değerleri azalmaktadır. Buna yönelik literatürde birçok çalışma yer almaktadır (Kolias ve Georgiou, 2005; Chen vd., 2014; Zhong ve Wille, 2015; Chu, 2019).

## 4.4 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmesi Özellikleri

Şekil 4.15'te 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların zamana bağlı olarak oluşan kuruma büzülmesi davranışları verilmiştir. Kuruma büzülmesi ölçümleri 7 günlük su küründen sonra 91. güne kadar gerçekleştirilmiştir.

Karışımlar içerisinde en düşük büzülme değeri (91 gün) 1568x10-6 ile 1 numaralı karışımda elde edilmiştir. S/Ç oranı 0,40 olan 1 numaralı karışımda bakır cürufu ve agregası kullanılmamıştır. S/Ç oranı 0,40 olan diğer karışımında (4 numaralı) büzülme değeri 2000x10-6 değerinin altında olmuştur. 7 numaralı karışımın s/ç değeri 0,40 olmasına rağmen büzülme değeri nispeten artmış ve 2000x10-6 değerini geçmiştir. 7 numaralı karışımın lif içeriği %3 olmasına rağmen kuruma büzülmesini azaltmada çok belirgin bir davranış göstermemiştir. En fazla büzülme değeri s/ç oranı 0,60 ve bakır agregası oranı %50 olan 9 numaralı karışımda elde edilmiştir. 9 numaralı karışımın 91. gündeki büzülme değeri yaklaşık 3500x10-6 olarak ölçülmüştür. Lif içeriği %3 olan karışımların büzülme değerleri 2000x10-6'nın üzerinde olmuştur. %2 lif içeriğine sahip olan karışımların büzülme değerleri ise genellikle 2000x10-6'nın altında olmuştur. Lif oranındaki artış büzülme değerini arttırmıştır. Bakır cürufu %15 olan 3,6 ve 8 numaralı karışımların büzülme değerleri birbirine yakın olarak belirlenmiştir. Bakır agregasının kullanılması genellikle kuruma büzülmesi değerlerini arttırmaktadır. Çünkü agrega hacmi azalmakta ve bu yüzden kuruma büzülmesi artış göstermektedir.

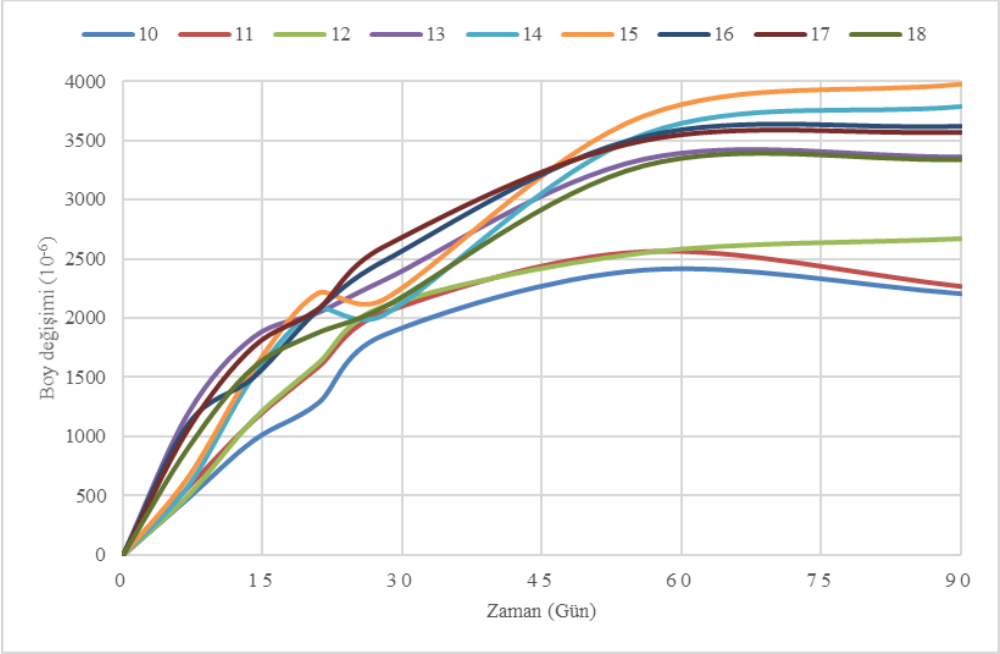



Şekil 4.15 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kuruma büzülmesi özellikleri

Şekil 4.16'da 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların zamana bağlı kuruma büzülmesi davranışları verilmiştir. En düşük büzülme değerleri 10,11 ve 12 numaralı karışımlarda gözlenmiştir. Bu karışımların ortak noktası %1 lif oranına sahip olmasıdır. %1'den sonraki lif oranın artışı kuruma büzülmesi davranışını arttırmaktadır. %2 lif oranına sahip 14 ve 15 numaralı karışımların kuruma büzülmesi değerleri ise yaklaşık 4000x10-6 değerine yaklaşmıştır. 14 numaralı karışımın s/ç oranı 0,5 ve bakır cürufu %15'tir. 15 numaralı karışımın s/ç oranı 0,60 ve bakır agregası içeriği %25'tir. S/Ç oranının yanında bakır cürufu ve agrega oranının artması kuruma büzülmesi davranışını arttırmıştır. 18 numaralı karışımın s/ç oranı 0,60 olmasına rağmen büzülme değeri 3344x10-6 olarak ölçülmüştür. Büzülme değerini %3 oranında kullanılan lifin azalttığı düşünülmektedir.

Lif uzunluğunun artması genellikle karışımların kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. 12 mm uzunluğunda lif kullanılan karışımların BHA değerleri genellikle daha azdır. Bu durum karışımların daha boşluklu olduğunun göstergesidir. Boşluklu yapıdan dolayı kuruma büzülmesi değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca basınç dayanımı yüksek olan karışımların daha az büzülme yaptığı bilinmektedir. Genellikle lif oranındaki artış basınç dayanımını azalttığı için lif oranı yüksek olan bazı karışımlarda yüksek büzülme değerleri gözlenmiştir. Bakır agregası içeriği %50 olan 13 ve 17 numaralı karışımlarında büzülme değeri yaklaşık 3500x10-6

değerindedir. Bakır agregası içeriği toplam agrega içeriğini azalttığı için genellikle kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. Ayrıca s/ç oranındaki artış da kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. Ancak bazı durumlarda yüksek lif içeriği bu dezavantajı azaltmıştır.




Şekil 4.16 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların kuruma büzülmesi özellikleri

Corinaldesi ve Nardinocchi (2016) çimento esaslı kompozitlere lif takviyesi ile kuruma büzülmesinin azaltılabileceğini belirtmiştir. Jiang vd. (2010) yaptıkları çalışmada bazalt lifi ilavesi ile erken yaşlarda kuruma büzülmesinin azaltıldığını gözlemlemiştir. Punurai vd. (2018) yaptıkları çalışmada bazalt lifi içeriği arttıkça kuruma büzülmesinin azaldığını gözlemlemiştir. Bazalt lifinin kısmı reaktivetsinden dolayı mikro agrega görevi yaptığını ve bu yüzden büzülme değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Jiang vd. (2016) bazalt lifi kullanarak kontrol karışımına göre daha düşük büzülme değerleri elde etmiştir. Ruijie vd. (2017) yaptıkları çalışmada %0,1 ve 0,3 oranında bazalt lifi kullanmıştır. Bazalt lifi oranındaki artış bazı karışımların büzülme değerini arttırmış anacak genellikle büzülme değerleri azalmıştır. Li vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada bazalt lifi içerikli bazı karışımlarda kuruma büzülmesinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda kuruma büzülmesinin esas olarak 50 nm'den küçük çaplara sahip geçiş gözeneklerinden etkilendiği belirtilmiştir (Zhong ve Zhang, 2020). Bu durum s/ç oranının kuruma büzülmesi üzerindeki etkisini de göstermektedir. Araştırmacılar, kür süresi arttıkça büzülme

oranındaki azalmanın su kaybı oranı ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Bazalt lifi katkılı karışımların kuruma büzülme oranı, tüm kür süreleri boyunca kontrol betonunkinden daha düşük olmuştur. Bu sonuç, bazalt lifinin kuruma büzülme oranını azaltmada olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu sonucun üç nedeni vardır:

1) Karışıma lif eklenmesi, fiziksel olarak kısıtlayıcı büzülmeye katkıda bulunan beton matrisin çekme dayanımını artırır.

2) Lif ilavesi ile köprüleme etkisi ile çatlak gelişimi engellenir.

3) Büzülme sonucu oluşan gerilmeler lifler arasındaki ara bağlantılar tarafından aktarılır (Li vd., 2006).

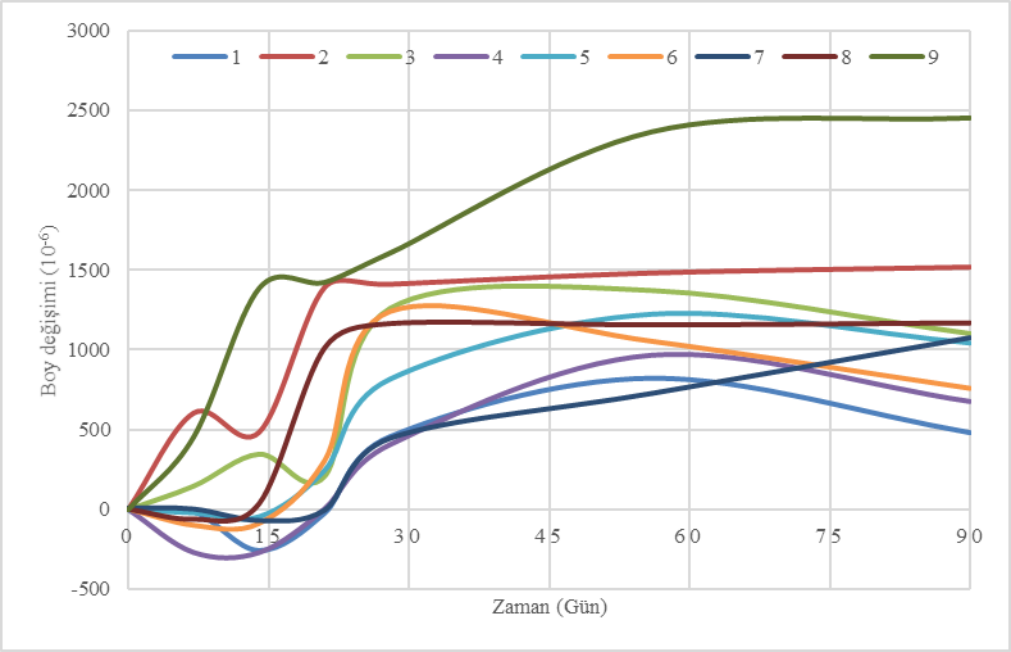
Bazalt lifinin artması sonucu kuruma büzülmesi değerlerinin artması liflerin içsel sürtünmeyi arttırarak kalıba yerleşmeyi zorlaştırması ile açıklanabilmektedir. Karışımların porozitesi artış gösterdikçe kuruma büzülmesi değerlerinin arttığı tahmin edilmektedir.

İnce agrega yerine kullanılan bakır cürufundan üretilen karışımlarda kuruma büzülmesi kontrol karışımına benzer özellikler göstermiştir. Hatta bazı bakır cürufu içerikli karışımların kontrol karışımından daha az olduğu da gözlenmiştir (Hwang ve Laiw, 1989; Shoya vd., 1997). Gupta vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada agrega yerine kullanılan bakır cürufu betonların büzülme değerlerini arttırmıştır. You vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada agrega yerine %60 oranında bakır cürufu kullanımı kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. Ayrıca bazı çalışmalarda, bakır cürufunun yüksek oranda kullanılması durumunda, segregasyon ve kusma oluşarak, kuruma büzülmesi artmıştır (Zhan, vd., 2015; Han ve Wang, 2016; Mastali vd., 2018). Sharifi vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada %100'e kadar iri agrega yerine kullanılan bakır cürufu kuruma büzülmesini azaltmıştır. Bu olumlu etkisi bakır agregasının çimento pastası ile olan yüksek aderansı ile açıklanabilmiştir (Sharifi vd., 2020). Bakır cürufunun çimento yerine kullanılarak kuruma büzülmesi davranışının ele alındığı çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu yüzden pasta hacminin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi üzerinden yorum yapılmıştır. Çünkü literatürde kuruma büzülmesinin pasta hacmi ile doğrudan ilişkili olduğunu gösteren çalışmalar yer

almaktadır. Pasta hacminin artması sonucunda kuruma büzülmesi artış göstermektedir (Bissonnette vd., 1999; Rozière vd., 2007).

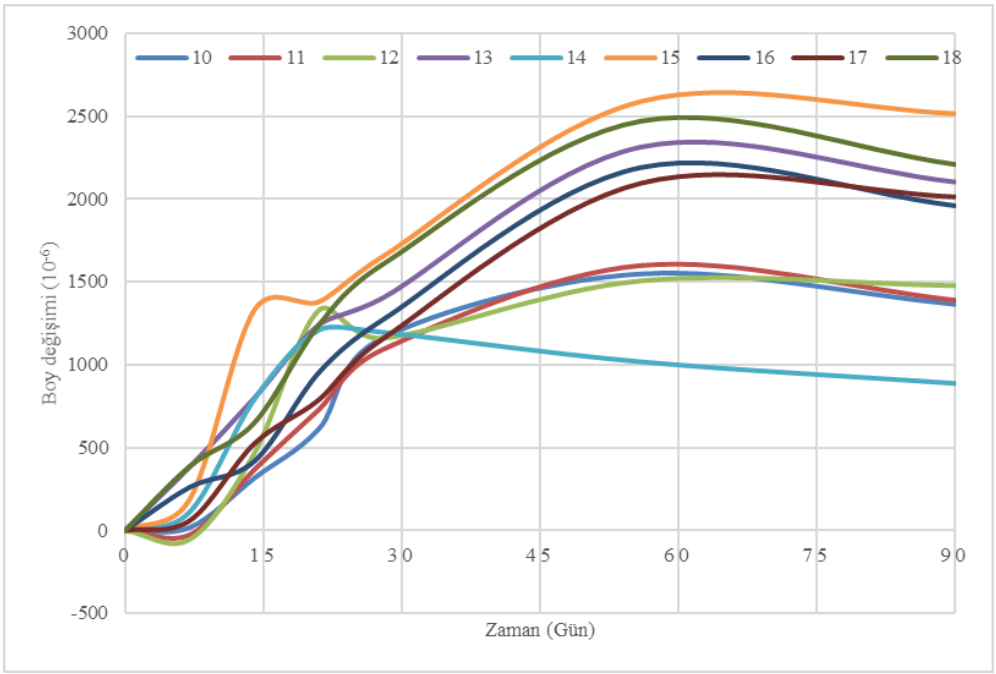
## 4.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Sülfat Dayanıklılığı Özellikleri

6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların %5 sodyum sülfat etkisindeki davranışları Şekil 4.17'de verilmiştir. 1,4,5,6 ve 7 numaralı karışımlar sodyum sülfat çözeltisine konulduktan sonra boylarında bir miktar azalma gerçekleşmiştir. Bu karışımlar daha çok 14. günden itibaren genleşme özelliği göstermiştir. S/Ç oranı 0,40 olan ve bakır cürufu ve agregası kullanılmayan 1 numaralı karışımın en az genleşme gösterdiği görülmektedir. Ancak bu etkide ilk 14 günlük büzülmenin oluşması önemli durum olmuştur. S/Ç oranı 0,40 olan diğer karışımlarında (4 ve 7) genleşme değerleri nispeten düşük olmuştur. S/Ç oranı 0,60 ve lif oranı %2 olan 6 numaralı karışımın genleşme değeri 759x10-6 olarak bulunmuştur. Yüksek s/ç oranına rağmen az genleşme yapmasının nedeni içeriğinde kullanılan %15 bakır cürufundan kaynaklanmaktadır. Çimento bünyesindeki $C_3A$ içeriğinin sülfat dayanıklılığını etkilediği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Çimentolardaki $C_3A$ içeriği azaldıkça sülfat dayanıklılığı artmaktadır (Kaplan ve Öztürk, 2019). En fazla genleşme değeri yaklaşık 2500x10-6 değeri ile 9 numaralı karışımda elde edilmiştir. 9 numaralı karışım 0,60 s/ç oranına sahip ve %50 bakır agregası ile üretilmiştir. Bakır agregası toplam agrega hacmini azalttığı için karışımın gözenekliliği artış göstermiş bunun sonucunda da genleşme değerleri artmıştır. %15 bakır cürufu kullanılan 6 ve 8 numaralı karışımların ise genleşme değerleri yaklaşık 1000x10-6 olarak belirlenmiştir. Bakır cürufu kullanımı sülfat dayanıklılığına önemli bir katkı sağlamıştır. Lif oranının sülfat dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkisi ise tespit edilmemiştir.




Şekil 4.17 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların sodyum sülfat etkisindeki özellikleri

Şekil 4.18'de 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların zamana bağlı olarak sülfat dayanıklılığı verilmiştir.




Şekil 4.18 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların sodyum sülfat etkisindeki özellikleri

Şekil 4.18'de görüldüğü gibi 10,11 ve 12 numaralı karışımlar benzer özellik göstermiştir. 0,60 s/ç oranına sahip 12 numaralı karışımın yaklaşık 1500x10-6 genleşme değerine sahip olduğu görülmektedir. 12 numaralı karışımda kullanılan %7,5 bakır cürufunun bu sürece olumlu katkı yaptığı gözlenmiştir. 13, 15,16,17 ve 18 numaralı karışımların 2000x10-6 genleşme değerini aştığı görülmektedir. 15 numaralı karışımın s/ç değeri 0,60 ve çimento yerine bakır cürufu kullanılmamıştır. Karışım içerisindeki %2'lik lif sülfat genleşmelerini engellemede çok etkili olamamıştır. 16 numaralı karışımın s/ç oranı 0,40 ve bakır cürufunun %15 olmasına rağmen bünyesinde nispeten yüksek genleşme oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni %25 bakır agregası ve %15 bakır cürufu ile birlikte agrega ve pasta hacminin azalması sonucu artan gözeneklilik ile oluştuğu düşünülmektedir. 18 numaralı karışımında s/ç oranı 0,60 olmasından dolayı yüksek bir genleşme gösterdiği görülmektedir.

Lif uzunluğunun artması sonucunda karışımların sülfata dayalı genleşme değerleri de artmıştır. Ayrıca yüksek basınç dayanımına (>60 MPa) sahip olan 1, 4, 7 ve 11 numaralı karışımlarda diğer karışımlara göre daha az genleşme oluştuğu belirlenmiştir. Basınç dayanımı düşük olan (<40 MPa) 9, 17 ve 18 numaralı karışımlarda ise daha fazla genleşmeler oluşmuştur. 9 numaralı karışımın sülfat genleşmesi değerinin yüksek olmasının nedeni su işleme derinliğinin fazla olması (~1.5 mm) etkili olmuştur. Su işleme derinliği fazla olan (~1,8 mm) 6 numaralı karışımın fazla sülfat genleşmesi yapmadığı görülmüştür. Bunun nedeni çimento yerine kullanılan %15 bakır cürufundan kaynaklanmaktadır. 18 numaralı karışımında su işleme derinliği yaklaşık 1,60 mm olduğu için bu durum sülfat genleşmesine de yansımıştır.

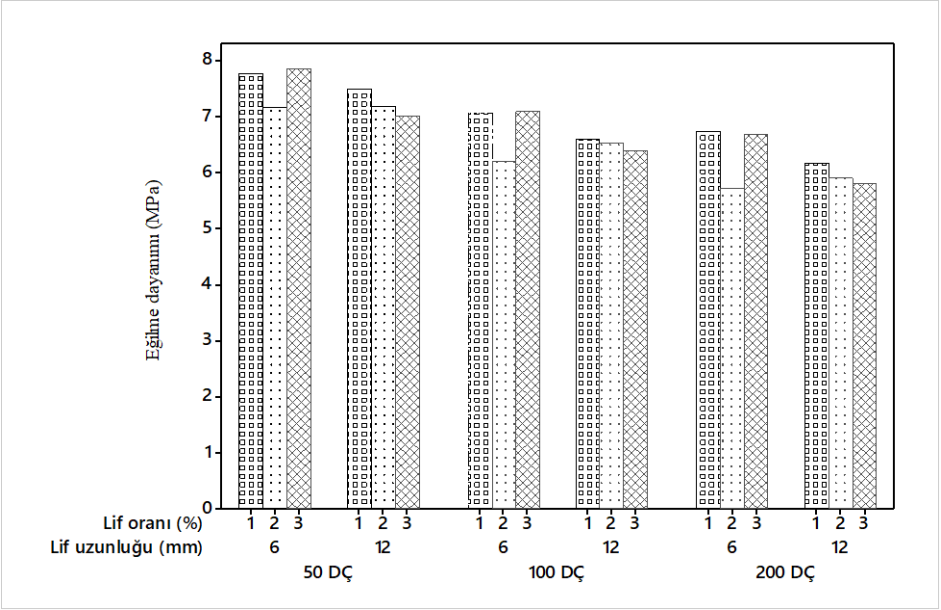
Literatürde bazalt lifinin kimyasal dayanıklılığa katkısı hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Hanafi (2020) tarafından yapılan çalışmada bazalt lifi kullanımı sodyum sülfat kaynaklı genleşmeleri azaltmıştır. Myadaraboına vd. (2020) yaptıkları çalışmada klor ve sülfatların doğrudan bazalt lifine zarar vermediğini belirtmiştir. Literatürde çimento esaslı kompozitlerde lif kullanılarak durabilite özelliklerinin iyileştiğini belirten birçok çalışma yer almaktadır (Zollo, 1997; Benmokrane vd., 2002; Brandt, 2008; Karahan ve Atiş, 2011; Ramli vd., 2013; Afroughsabet ve Ozbakkaloglu, 2015; Yehia vd., 2016).

Toshiki vd. (2000) bakır cürufunu ince agrega olarak değerlendirmişlerdir. Yaptıklarının çalışmanın sonucunda bakır cürufunun betonun durabilite özelliklerini iyileştirdiğini görmüşlerdir. Bakır cürufunun agrega yerine kullanılması durumunda sülfat direncinin artması yanı sıra karbonatlaşma hızı da azalmıştır (Hwang ve Laiw, 1989).

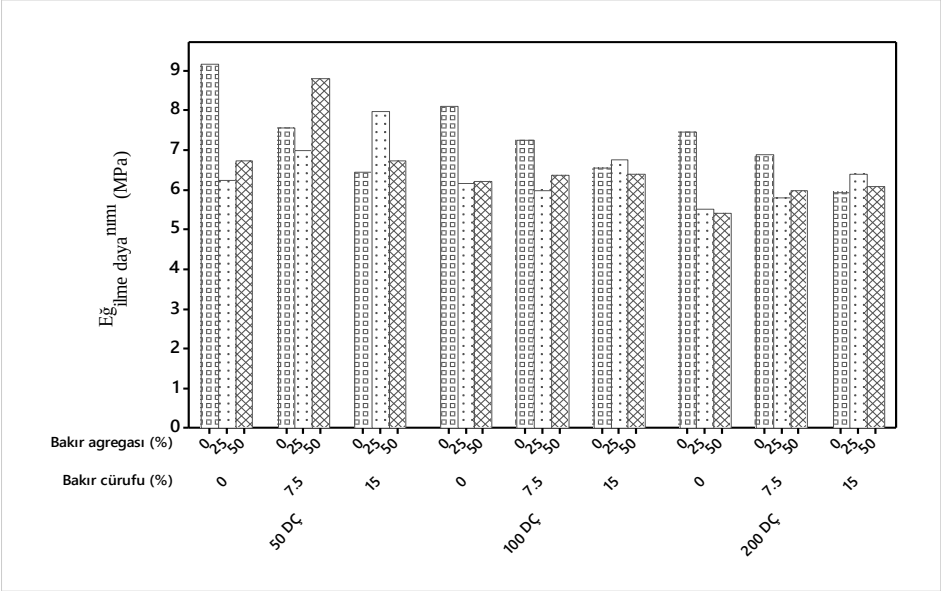
Çimento yerine cüruf, uçucu kül ve silis dumanı gibi endüstriyel atıkların kısmi ikamesi betonun sülfat saldırısına karşı direncini arttırmak için yararlı bir teknik olduğu belirlenmiştir (Tikalsky ve Carrasquillo, 1992; Hooton, 1993; Al-Amoudi vd., 1995; Al-Dulaijan vd., 2003). Onuaguluchi ve Eren (2012) tarafından yapılan çalışmada çimento yerine kullanılan bakır cürufu sülfata bağlı genleşme değerlerini arttırmıştır. Bakır cürufunun bu olumsuz özelliği geçirimlilik ile açıklanmıştır. Bakır cürufu oranı arttıkça karışımların geçirimliliği arttığı için bu durum gözlenmiştir.

## 4.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Şekil 4.19'da bazalt lifi özellikleri ile bakır atıklarının donma-çözülme dayanıklılığına etkisi verilmiştir. 50 D-Ç çevriminin eğilme dayanımlarını çok azaltmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.19a). Özellikle s/ç oranı 0,40 olan karışımlarda eğilme dayanımında az da olsa dayanım artışı gözlenmiştir. Bu durum düşük s/ç oranlarında geçirimsizlikten dolayı hidratasyonun tam gerçekleşmemesinden kaynaklanabilmektedir. D-Ç etkisi ile harç bünyesinde oluşan çatlaklardan sızan su hidrate olmayan çimento tanelerinin hidratasyona katılmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda düşük D-Ç çevrimlerinde dayanım artışı gözlenmiştir. 6 mm uzunluğundaki liflerin %2 oranında kullanılması durumunda genellikle eğilme dayanımı azalmıştır. Ancak lif oranının %3 olması durumunda D-Ç sonrasında oluşan eğilme dayanımı kaybı azalabilmektedir. Lif uzunluğunun artması D-Ç çevrimlerinde eğilme dayanımını azaltmaktadır. 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımlarda lif oranı arttıkça eğilme dayanımı azalmaktadır. 50 D-Ç sonrası eğilme dayanımları 7,1-8,8 MPa arasında değişirken, 200 D-Ç sonrası eğilme dayanımları 7,0-6,1 MPa arasında değişmektedir. D-Ç etkisi için 6 mm uzunluğundaki liflerin %1 ya da 3 oranında kullanılması daha uygun olmaktadır.




(a) Bazalt lifi etkisi



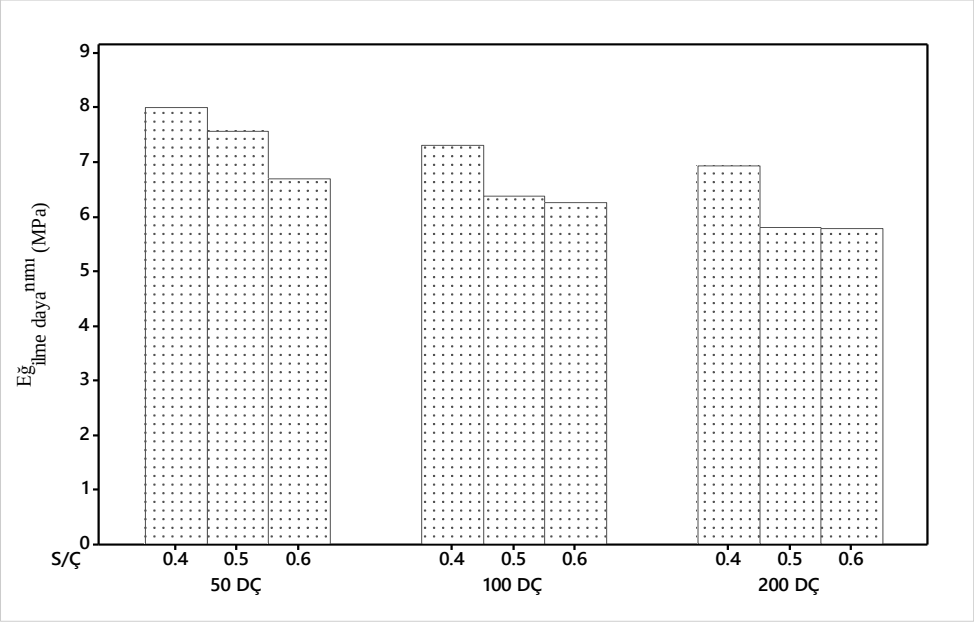

(b) Bakır atıklarının etkisi

Şekil 4.19 Çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme sonrasındaki eğilme dayanımları

Şekil 4.19b'de görüldüğü gibi D-Ç çevrim sayısı arttıkça karışımların eğilme dayanımları azalmaktadır. 50 D-Ç sonrasında bakır cürufu kullanılmayan karışımlarda bakır agregası arttıkça eğilme dayanımı azalmıştır. Ancak bakır cürufunun artması ile birlikte bakır agregası kullanımı nispeten eğilme dayanımını arttırmıştır. Bu durum 100 ve 200 D-Ç çevrimi uygulanan karışımlarda da gözlenmiştir. 50 D-Ç çevrimi sonrasında en büyük eğilme dayanımı %7,5 bakır cürufu ve %50 bakır agregası kullanılan karışımlarda gözlenmiştir. 100 D-Ç çevrimi sonrasında ise %15 bakır

cürufu içerikli ve %25 bakır agregası kullanımı eğilme dayanımındaki kayıpları azaltmıştır. Benzer durum 200 D-Ç etkisinde de gözlenmektedir. Bakır cürufunun bakır agregası ile kombine bir şekilde kullanması D-Ç çevrimi sonucunda oluşan eğilme dayanımı kayıplarını azaltmıştır.

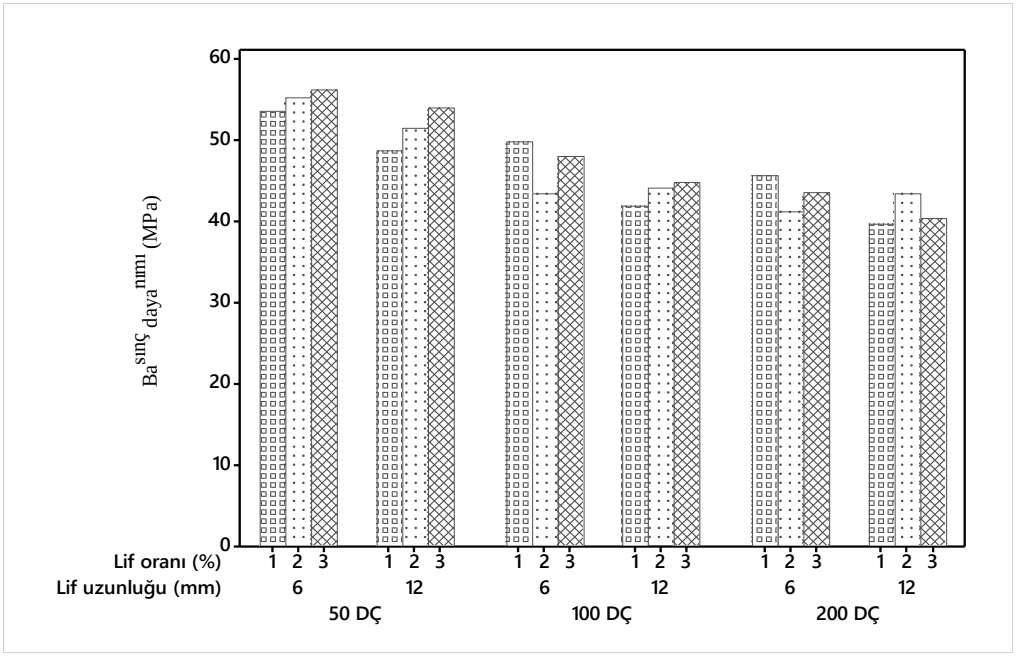
Şekil 4.20'de tüm D-Ç çevrimleri sonrasında s/ç oranı arttıkça eğilme dayanımlarının azaldığı gözlenmektedir. 100 ve 200 D-Ç çevrimleri sonucunda karışımların eğilme dayanımları benzer özellikler göstererek 7MPa değerinin altına düşmüştür. 0,40 S/Ç oranına sahip karışımların D-Ç çevrimlerinden çok etkilenmediği gözlenmektedir. Bu durum s/ç oranının azalmasıyla karışımların daha geçirimsiz olması ile ilgili olmaktadır.



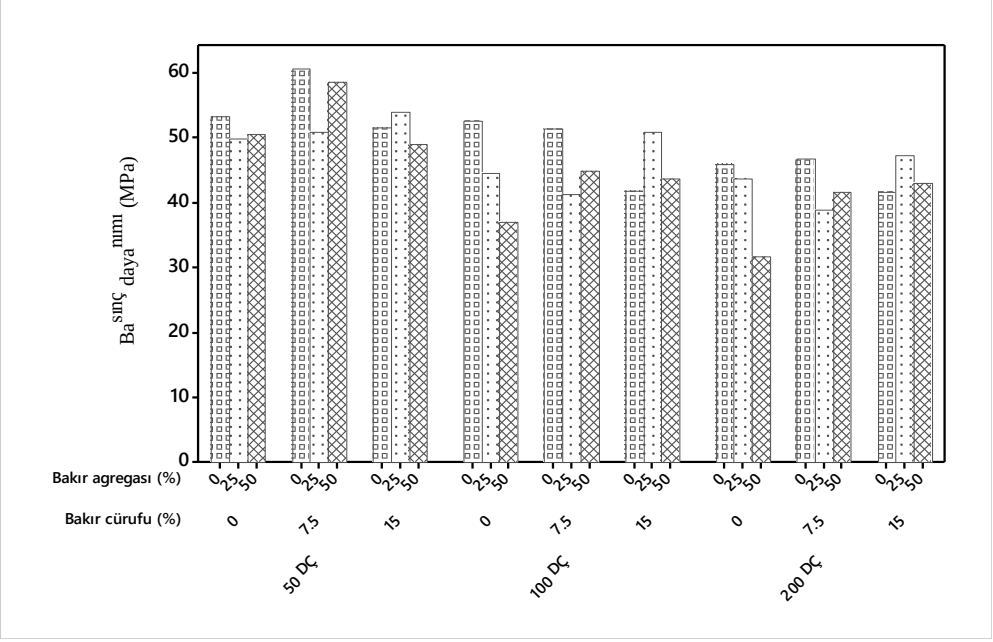

Şekil 4.20 S/Ç etkisinin donma-çözülme sonrasındaki eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.21'de lif özellikleri ve bakır atıklarının D-Ç çevrimleri sonrasındaki basınç dayanımına etkisi verilmiştir. 50 D-Ç çevrimi sonrasında hem 6 mm hem de 12 mm uzunluğundaki liflerin oranı arttıkça karışımların basınç dayanımları artmıştır (Şekil 4.21a). Ancak lif uzunluğunun artması basınç dayanımlarının bir miktar azalmasına neden olmuştur. Özellikle 6 mm uzunluğundaki liflerden elde edilen karışımların 50 D-Ç çevrimi sonrasındaki basınç dayanımları 50 MPa üzerinde olmuştur. 100 D-Ç çevrimi sonrasında 12 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımlarda lif oranı arttıkça basınç dayanımı artış göstermektedir. 6 mm uzunluğundaki liflerde ise en

uygun oranın %1 ya da 3 olduğu gözlenmiştir. 200 D-Ç sonrasında tüm karışımların basınç dayanımı 50 MPa altına düşmüştür. Ancak 6 mm uzunluğundaki liflerden üretilen karışımların dayanım kaybı daha az olmuştur.




(a) Bazalt lifi etkisi

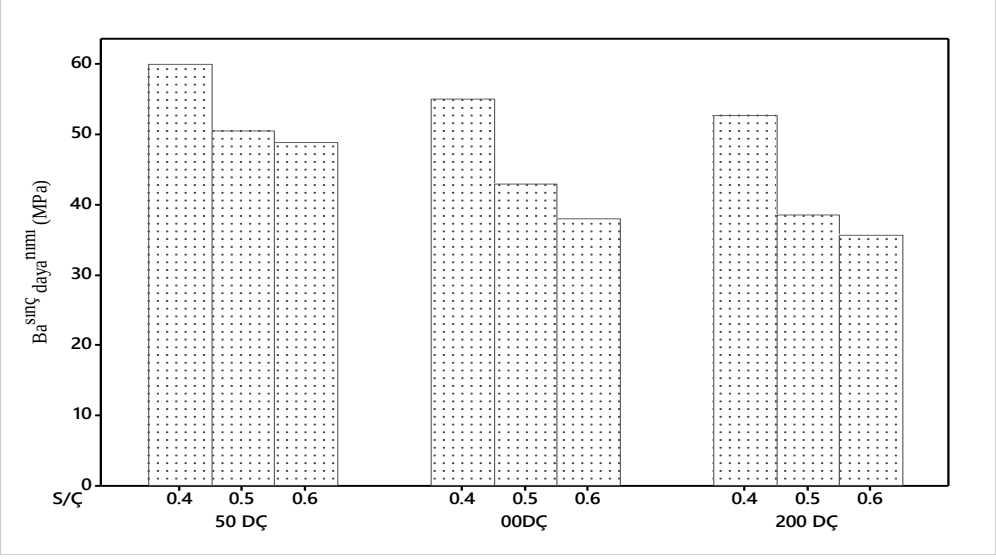



(b) Bakır atıklarının etkisi

Şekil 4.21 Çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımları

Eğilme dayanımında olduğu gibi bakır agregası ve bakır cürufunun birlikte kullanılması sonucunda D-Ç sonrasındaki basınç dayanımlarına daha olumlu etki yapmaktadır (Şekil 4.21b). 50 D-Ç çevrimi sonrasında bakır cürufunun %7,5 oranında kullanılması basınç dayanımlarını arttırmıştır. Ancak bakır agregası kullanılan karışımların basınç dayanımları nispeten daha düşük olmuştur. 100 D-Ç sonrasında %15 bakır cürufu kullanılması halinde bakır agregasındaki artış basınç dayanımlarını olumlu etkilemiştir. Benzer durum 200 D-Ç çevrimi sonrasında da gözlenmiştir. Bakır cürufunun %7,5 olması durumunda bakır agregasının %50 olması genellikle D-Ç çevrimi sonrasındaki dayanım kayıplarını azaltmaktadır.

Şekil 4.22'de s/ç oranının D-Ç çevrimleri sonrasındaki basınç dayanımına etkisi görülmektedir. Eğilme dayanımında olduğu gibi s/ç oranı arttıkça karışımların donma-çözülme dayanıklılığı azalmaktadır. 0,40 s/ç oranına sahip karışımların 200 D-Ç sonrasında bile 50 MPa üzerinde basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. S/Ç oranı 0,40 olan karışımların 50 D-Ç sonrasında az da olsa basınç dayanımında artışlar gözlenmiştir.




Şekil 4.22 S/Ç etkisinin donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımına etkisi

6 mm uzunluğundaki liflerin %2 oranında kullanılması D-Ç sonrasındaki basınç ve eğilme dayanımlarını genellikle azaltmaktadır. Bu durumun nedenlerinden bir tanesi de bu özellikteki karışımların 28 günlük basınç dayanımlarının genellikle düşük dayanıma (<40 MPa) sahip olmasıdır. Karışımların elde edilmesinde 6 mm

uzunluğundaki liflerin kullanılması daha uygun olmaktadır. D-Ç etkisi için bakır cürufu ve bakır agregasının birlikte kullanılması olumlu sonuçlar sağlamıştır. Bakır cürufu %7,5 olduğu takdirde bakır agregasının %50, bakır cürufunun %15 olması durumunda ise bakır agregasının %25 olması D-Ç sonrasındaki mekanik özellikleri iyileştirebilmektedir. Düşük su işleme derinliğine sahip karışımların genellikle bakır cürufunun ve agregasının kombine kullanıldığı durumlar olduğu gözlenmiştir. Bu özellikteki karışımların s/ç oranının ise 0,40 olması daha uygun olmaktadır.

Araştırmalar, betona lif eklenmesi sonucunda donma-çözülme direncinin artırabileceğini göstermiştir. Ayrıca, lifler çatlak oluşumu ve gelişmesini engelleyerek matris dayanımını artırabilir. Liflerin eklenmesi, donma olayı sonucunda oluşan basıncı azaltabilen zararsız gözeneklerin sayısını artırabilir ve dolayısıyla donma-çözülmenin neden olduğu hasar derecesi azaltılmaktadır (Tiberti vd., 2014; Nam vd., 2016; Zhang vd., 2016). Yapılan bazı çalışmalarda ise bazalt lifi kullanarak betonların donma-çözülme dayanıklılığı arttırılmıştır (Fan vd., 2014; Jin vd., 2014; Zhao vd., 2018).

Shoya vd. (1997) bakır cürufunun agrega yerine kullanılması durumunda betonun donma-çözülme direncinin kontrol karışımlarına göre daha düşük olduğu bildirilmiştir. Ayano ve Sakata (2000) ise bakır cürufunun agrega yerine kullanılması durumunda betonun donma-çözülme direncinin arttığını belirtmiştir. Ancak literatürde bakır cürufunun donma-çözülme dayanıklılığı üzerindeki etkilerini gösteren sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

## 4.7 Çimento Esaslı Kompozitlerin Optimizasyon ve Doğrulama Deneyleri

Taguchi L18 deney matrisine göre üretilen karışımlar için 3 ana başlıkta optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon grupları aşağıda sunulmuştur.

1. Grup: Mekanik Özellikler
2. Grup: Donma-çözülme dayanıklılığı
3. Grup: Boyutsal kararlılık ve geçirimsizlik

1. grupta yer alan mekanik özelliklerde 7, 28 ve 91 güne ait basınç ve eğilme dayanımlarının maksimum olması için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. 2. grupta yer alan donma-çözülme dayanıklılığı için 50, 100 ve 200 D-Ç çevrimi sonrasındaki mekanik özelliklerin (Basınç ve eğilme dayanımı) maksimum olması için optimizasyon yapılmıştır. 3. grupta sodyum sülfat kaynaklı genleşme, kuruma olayı sonrası oluşan büzülme ve su işleme derinliğinin minimum olması için optimum karışım bulunmuştur. Optimum karışımların tahmini özellikleri bulunduktan sonra deneysel olarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. 1. ve 2. gruplarda hedef fonksiyon maksimize seçilirken, 3. grupta minimize hedef fonksiyon belirlenmiştir. 1. gruba ait tahmini ve deneysel sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Mekanik özellikler için optimum karışım oranları ve doğrulama deneylerinin sonuçları

| **Optimum karışım oranları** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Lif uzunluğu (mm) | Lif oranı (%) | Bakır cürufu (%) | Bakır agregası (%) | S/Ç |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 0,40 |
| **Tahmini ve deneysel sonuçlar** | | | | |
| 7 gün eğilme dayanımı (MPa)-Tahmini | | 7 gün eğilme dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark (%) |
| 6,71 | | 7,21 | | 7,45 |
| 28 gün eğilme dayanımı (MPa)-Tahmini | | 28 gün eğilme dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark (%) |
| 9,93 | | 9,05 | | 8,86 |
| 91 gün eğilme dayanımı (MPa)-Tahmini | | 91 gün eğilme dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark (%) |
| 12,12 | | 10,97 | | 9,49 |
| 7 gün basınç dayanımı (MPa)-Tahmini | | 7 gün basınç dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark (%) |
| 67,19 | | 63,46 | | 5,55 |
| 28 gün basınç dayanımı (MPa)-Tahmini | | 28 gün basınç dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark (%) |
| 72,39 | | 69,62 | | 3,83 |
| 91 gün basınç dayanımı (MPa)-Tahmini | | 91 gün basınç dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark (%) |
| 95,53 | | 89,04 | | 6,79 |

Tablo 4.1'de görüldüğü gibi mekanik özelliklerin maksimum olması istendiğinde bakır atıklarının kullanılmaması daha uygun olabilmektedir. Tahmini ve deneysel sonuçlar arasındaki farkın %10'dan daha az olduğunu ayrıca basınç dayanımının tahmininde daha az sapma yüzdesinin olduğu gözlenmiştir. 6 mm uzunluğundaki lifin %1 oranında kullanılması mekanik özellikleri olumlu etkilemiştir.

Tablo 4.2'de 50, 100 ve 200 D-Ç çevrimi sonucunda karışımların basınç dayanımlarının maksimum olması için yapılan optimizasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.2 Donma-çözülme dayanıklılığı için optimum karışım oranları ve doğrulama deneylerinin sonuçları

| **Optimum karışım oranları** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Lif uzunluğu (mm) | Lif oranı (%) | Bakır cürufu (%) | Bakır agregası (%) | S/Ç |
| 6 | 3 | 7,5 | 0 | 0,40 |
| **Tahmini ve deneysel sonuçlar** | | | | |
| 50 D-Ç sonrası basınç dayanımı (MPa)-Tahmini | | 50 D-Ç sonrası basınç dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark (%) |
| 69,39 | | 71,87 | | 3,57 |
| 100 D-Ç sonrası basınç dayanımı (MPa)-Tahmini | | 100 D-Ç sonrası basınç dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark |
| 61,75 | | 64,04 | | 3,71 |
| 200 D-Ç sonrası basınç dayanımı (MPa)-Tahmini | | 200 D-Ç sonrası basınç dayanımı (MPa)-Deneysel | | Fark |
| 56,11 | | 52,82 | | 5,86 |

Donma-çözülme etkisi için yapılan optimizasyonda 6 mm uzunluğundaki lifin %3 oranında kullanılması daha uygun olmaktadır. Donma etkisine bağlı olarak oluşan gerilmeler artan lif içeriği ile kontrol edilerek hasar derecesi azaltılmıştır. Ayrıca bakır cürufunun %7,5 oranında kullanılması da donma-çözülme dayanıklılığına olumlu katkı sağlamıştır. 200 D-Ç çevrimi sonrasında düşük oranda bakır cürufu kullanılarak basınç dayanımı 50 MPa üzerinde karışım elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür. Karışımın s/ç oranının 0,40 olmasının 200 D-Ç çevrimi sonrasındaki hasarı azaltmada önemli bir etkisi olduğu da görülmüştür. Düşük s/ç oranı ve yüksek lif içeriği donma-çözülme hasarını azaltan faktörler olmuştur.

Tablo 4.3'te su ileme derinliği, kuruma büzülmesi ve sodyum sülfat kaynaklı genleşmelerin minimum olması için gerekli karışım oranları verilmiştir.

Tablo 4.3 Geçirimsizlik ve boyutsal kararlılık için optimum karışım oranları ve doğrulama deneylerinin sonuçları

| **Optimum karışım oranları** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Lif uzunluğu (mm) | Lif oranı (%) | Bakır cürufu (%) | Bakır agregası (%) | S/Ç |
| 6 | 1 | 15 | 0 | 0,40 |
| **Tahmini ve deneysel sonuçlar** | | | | |
| Su işleme derinliği (mm)-Tahmini | | Su işleme derinliği (mm)-Deneysel | | Fark (%) |
| 0,93 | | 1,01 | | 8,60 |
| Kuruma büzülmesi ($10^{-6}$)-Tahmini | | Kuruma büzülmesi ($10^{-6}$)-Deneysel | | Fark |
| 1195 | | 1307 | | 9,37 |
| Sülfat genleşmesi ($10^{-6}$)-Tahmini | | Sülfat genleşmesi ($10^{-6}$)-Deneysel | | Fark |
| 365 | | 401 | | 9,86 |

Tablo 4.3'te görüldüğü gibi bakır cürufunun %15 olması karışımların boyutsal kararlılığına katkı sağlamaktadır. Özellikle sodyum sülfat kaynaklı genleşmeleri azaltmada etkili olmuştur. Çimento yerine kullanılan bakır cürufu $C_3A$ ve CH içeriğini azalttığı için sülfat dayanıklılığına katkı sağlamıştır. Bakır cürufunun artması sonucunda su işleme derinliğinin ve buna bağlı olarak da donma-çözülme dayanıklılığının arttığı söylenebilir. Bakır agregası içeriğinin artması ise boyutsal kararlılığa katkı sağlamamıştır. Çünkü kırmataş agregasına göre yüksek özgül ağırlığa sahip olmasından dolayı agrega miktarının artması agrega hacmini azaltmaktadır. Bunun sonucunda karışım daha gözenekli olmakta ve büzülme değerleri artış gösterebilmektedir. Kuruma büzülmesinin azaltılmasında agrega hacminin önemli bir rolü bulunmaktadır.

Bazı çalışmalarda bazalt lifinin beton ve harç içerisinde topaklaşmaya yol açtığı belirtilmiştir (Meng vd., 2016; Alnahhal ve Aljidda, 2018; Zhang vd., 2019). Yan vd. (2017) tarafından bazalt lifinin topaklaşması SEM görüntüleri ile belirlenmiş ve bu etkinin mekanik özellikleri de etkilediği tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar püskürtme beton içinde gözlenmiştir (Yan vd., 2020). Bu çalışmada da bazalt lifinde oluşan topaklaşmanın mekanik özelliklerde değişkenliğe yol açtığı düşünülmektedir. Lif

içeriğindeki artış ile birlikte oluşan değişkenlik topaklaşma eğiliminden kaynaklanabilmektedir.

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karışımlarda kullanılan lifin uzunluğu ve oranı arttıkça akışkanlaştırıcı miktarı artış göstermiştir. Benzer sonuçlar bakır agregası ve cürufu içeriği içinde geçerlidir. Bakır atıklarının artması akışkanlaştırıcı miktarını arttırmıştır. Lif içeriğinin ya da uzunluğunun artması içsel sürtünmeyi arttırdığı için yeterli işlenebilirliğin elde edilmesi açısından akışkanlaştırıcı miktarı arttırılmıştır. Bakır agregasının da kırmataş agregasına göre daha keskin köşeli yapısı işlenebilirliği azaltmıştır. Ancak bakır cürufu ve agregası kullanılması durumunda akışkanlaştırıcı kullanımına dikkat edilmelidir. %7,5 bakır cürufu ve %50 bakır agregası kullanılan 13 numaralı karışımda akışkanlaştırıcı miktarına bağlı olarak kısmen ayrışma gözlenmiştir. S/Ç oranı arttıkça ise akışkanlaştırıcı miktarı azaltılmıştır.

Lif uzunluğu karışımların BHA üzerinde çok etkili olmazken lif oranının artması BHA değerlerini azaltmıştır. Karışımların işlenebilirlikleri birbirine yakın olmasına rağmen kalıba yerleştirilirken lif oranındaki artış ile birlikte daha boşluklu yapı oluşmuştur. Bakır cürufu ve bakır agregası oranlarındaki artış ise karışımların BHA değerlerini arttırmıştır. Bakır attıklarının çimento ve kırmataşa göre daha yüksek özgül ağırlığa sahip olması bu durumu etkilemiştir. S/Ç oranındaki artış ile birlikte karışımların BHA değerleri azalmıştır.

Lif uzunluğunun artması genellikle yayılma çapını arttırmıştır. Ancak bu etki 12 mm uzunluğundaki lifler ile üretilen karışımlarda daha fazla akışkanlaştırıcı kullanıldığı için oluşmuştur. Benzer sonuç lif oranında da gözlenmiştir. %2 ve 3 lif oranına sahip karışımların yayılma çapı bir miktar artış göstermiştir. Bakır cürufunun %7,5 olması durumunda yayılma çapı artış gösterirken %15 oranında bakır cürufu kullanımında yayılma çapı cürufsuz karışımlar ile aynı olmuştur. Karışımlarda bakır agregası kullanılması karışımların yayılma çaplarını arttırmıştır. Ancak %25 ve 50 bakır agregasının yayılma çapları açısından benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.

Mekanik özellikler açısından (7-28-91 gün/Basınç ve eğilme dayanımı) 6 mm uzunluğundaki lifin %1 oranında kullanılması daha uygun olmaktadır. Mekanik özellikler için yapılan optimizasyonda bakır atıklarının kullanılmaması daha uygun

olmaktadır. Ancak karışımlar 1m3 içeriği yerine malzeme oranlarına göre hazırlandığı için bu durum gözlenmiştir. Bakır agregası ve cürufu agrega ve pasta hacmini azalttığı için bakır atıkları için böyle kesin bir ifade kullanmak doğru olmayabilir. Yüksek dayanım elde etmek için s/ç oranının 0,40 olması gerekmektedir.

D-Ç sonrasındaki mekanik özellikler için de 6 mm uzunluğundaki lifin kullanılması uygun olmaktadır. Ancak lif oranının %3 bakır cürufu oranının %7,5 olması donma-çözülme dayanıklılığına olumlu katkı sağlamaktadır. Geçirimsizlik için s/ç oranının 0,40 olması dayanım kaybını azaltmaktadır. Donma-çözülme dayanıklılığı açısından da bakır agregası oranının %0 olması uygun olmaktadır.

Kapilarite ve boyutsal kararlılık özellikleri açısından da 6 mm uzunluğundaki lifin %1 oranında kullanılması daha olumlu sonuçlar sağlamıştır. Sülfat genleşmesinin azaltılmasında ise %15 oranında bakır cürufunun kullanılması önemli bir katkı sağlamıştır. Kuruma büzülmesini azaltmak için ise bakır agregası oranındaki artışın çok belirgin özelliği elde edilememiştir. Çünkü bakır agregası oranı arttıkça agrega hacmi azalmaktadır. Ayrıca %7,5 oranında bakır cürufu kullanımı karışımların su işleme derinliklerini azaltmaktadır.

Genel olarak karışımlarda 6 mm uzunluğundaki lifin %1 oranında ve 0,40 s/ç oranında kullanılması daha olumlu sonuçlar sağlamaktadır. Bakır agregası kullanımı dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde iyileşme sağlamazken bakır cürufunun %7,5 oranında kullanılması su işleme derinliğini, %15 oranında ise sülfat genleşmesini azaltmaktadır. Ancak karışımların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinden biraz ödün verilerek daha çevreci bir kompozit elde edilebilir. Örneğin %15 bakır cürufu ve %50 bakır agregası kullanılan karışımlarda yaklaşık 52 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilebilmiştir. Bakır agregasının %25 olması durumunda dayanım ve dayanıklılık özellikleri bir miktar kötüleşebilir ancak çevre açısından daha faydalı bir karışım elde edilebilir.

Sonuç olarak bakır cürufu ve agregasının mekanik özelliklere çok olumlu etkisi belirlenmezken dayanıklılık açısından bakır cürufunun daha etkili olduğu gözlenmiştir. Bakır agregasının da %25'e kadar kullanılarak bazı beton özelliklerinden

ödün verilerek kullanılabileceği tespit edilmiştir. Bu sayede çevresel problem olan atıkların bertarafı sağlanacaktır.

Bakır madenlerinde ve galerilerde kullanılan geleneksel ve püskürtme beton içerisinde sahada oluşan bakır atıklarının doğrudan kullanılmasının mümkün olabileceği görülmüştür.

Bakır cürufunun uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolanlar ile birlikte kullanılarak çimento esaslı kompozitlerin özelliklerine etkisi incelenebilir. Ayrıca bakır agregasının özgül ağırlığı fazla olduğu için ağır beton tasarımında kullanılması uygun olabilir. Bazalt lifi ile üretilen kompozitlerin donma-çözülme ve sülfat dayanıklılığı daha uzun vadede incelemek literatüre katkı sağlayacaktır. Ayrıca bakır atıklarının geopolimer tasarımında değerlendirilmesi daha uygun olabilir.

## KAYNAKLAR


Abed, M., & Nemes, R. (2019). Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials. Construction and Building Materials, 212, 350–361. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.004

Adesina, A. vd. (2020) 'Performance of basalt fibre-reinforced concrete for pavement and flooring applications', 5, p. 103. doi: 10.1007/s41062-020-00359-y.

Afroughsabet, V. & Ozbakkaloglu, T. (2015) 'Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.

Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M. & Saadi, M. M. (1995) 'Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements', ACI Materials Journal. doi: 10.14359/1173.

Al-Dulaijan, S. U. vd. (2003) 'Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate', Cement and Concrete Composites, 25(4-5 SPEC), pp. 429–437. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00083-5.

Al-Jabri, K. S. vd. (2006) 'Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete', Construction and Building Materials, 20(5), pp. 322–331. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.020.

Al-Jabri, K. S. vd. (2009) 'Copper slag as sand replacement for high performance concrete', Cement and Concrete Composites. Elsevier Ltd, 31(7), pp. 483–488. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007.

Al-Jabri, K. S., Al-Saidy, A. H. & Taha, R. (2011) 'Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete', Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 25(2), pp. 933–938. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090.

Alnahhal, W. & Aljidda, O. (2018) 'Flexural behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates', Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 169, pp. 165–178. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.135.

dos Anjos, M. A. G., Sales, A. T. C. & Andrade, N. (2017) 'Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete', Journal of Environmental

Management. Elsevier Ltd, 196, pp. 607–613. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.032.

Ariño, A. M. & Mobasher, B. (1999) 'Effect of ground copper slag on strength and toughness of cementitious mixes', ACI Materials Journal. doi: 10.14359/430.

ASTM C 596–01 (2001) 'Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement', Annual Book of ASTM Standards. doi: 10.1520/C0596-18.2.

Astm C666/C666M (2003) 'Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing', ASTM International, West Conshohocken, PA, 03(Reapproved), pp. 1–6. doi: 10.1520/C0666.

ASTM C 1585-04 (2004) 'Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes', ASTM International.

ASTM Committee C01.29 (2015) 'ASTM C1012/C1012M –15: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution', in Annual Book of ASTM Standards Volume 04.01. doi: 10.1520/C1012_C1012M-15.

Ayano, T., Kuramoto, O. & Sakata, K. (2000) 'Concrete with copper slag fine aggregate', Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan. doi: 10.2472/jsms.49.1097.

Ayano, T. & Sakata, K. (2000) 'Durability of Concrete with Copper Slag Fine Aggregate', Special Publication, 192, pp. 141–158. doi: 10.14359/5746.

Benmokrane, B. vd. (2002) 'Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment', Journal of Composites for Construction. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(143).

Bissonnette, B., Pierre, P. & Pigeon, M. (1999) 'Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials', Cement and Concrete Research, 29(10), pp. 1655–1662. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00156-8.

Borhan, T. M. (2012) 'Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre', Materials and Design. doi: 10.1016/j.matdes.2012.05.062.

Brandt, A. M. (2008) 'Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering', Composite Structures. doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.006.

Chen, B. & Liu, J. (2005) ‘Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability’, Cement and Concrete Research. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.035.

Chen, J. J., Kwan, A. K. H. & Jiang, Y. (2014) ‘Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.066.

Chidighikaobi, P. C. (2019) ‘Thermal effect on the flexural strength of expanded clay lightweight basalt fiber reinforced concrete’, in Materials Today: Proceedings. doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.110.

Chithra, S., Senthil Kumar, S. R. R. & Chinnaraju, K. (2016) ‘The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.119.

Chu, S. H. (2019) ‘Effect of paste volume on fresh and hardened properties of concrete’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.131.

Conshohocken, W. (2010) ‘ASTM C 230/C 230M – 08 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement’, ASTM International, pp. 4–9.

Corinaldesi, V. & Nardinocchi, A. (2016) ‘Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.024.

Davis, R. & John, P. (2018) ‘Application of Taguchi-Based Design of Experiments for Industrial Chemical Processes’, in Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes. doi: 10.5772/intechopen.69501.

Dias, D. P. & Thaumaturgo, C. (2005) ‘Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers’, Cement and Concrete Composites, 27(1), pp. 49–54. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044.

Divyah, N. vd. (2020) ‘Characterization and behavior of basalt fiber-reinforced lightweight concrete’, Structural Concrete. doi: 10.1002/suco.201900390.

Emdadi, A. vd. (2015) ‘Optimized workability and mechanical properties of FRCM by using fiber factor approach: theoretical and experimental study’, Materials and Structures/Materiaux et Constructions. doi: 10.1617/s11527-013-0221-3.

EN 196-1 Chapter13 (2016) ‘13 . Cement - Determination of Strength’, Building Materials 10 - Testing Methods.

Fan, X. C., Wu, D. & Chen, H. (2014) ‘Experimental research on the freeze-thaw resistance of basalt fiber reinforced concrete’, Advanced Materials Research, 919–921, pp. 1912–1915. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.1912.

Fantous, T. & Yahia, A. (2020) ‘Effect of viscosity and shear regime on stability of the air-void system in self-consolidating concrete using Taguchi method’, Cement and Concrete Composites. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103653.

Geetha, S. & Madhavan, S. (2017) ‘High Performance Concrete with Copper slag for Marine Environment’, Materials Today: Proceedings. Elsevier Ltd, 4(2), pp. 3525–3533. doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.243.

Gupta, N. & Siddique, R. (2020) ‘Durability characteristics of self-compacting concrete made with copper slag’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 247, p. 118580. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118580.

Gupta, R. C., Mehra, P. & Thomas, B. S. (2017) ‘Utilization of copper tailing in developing sustainable and durable concrete’, Journal of Materials in Civil Engineering. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001813.

Han, J. & Wang, K. (2016) ‘Influence of bleeding on properties and microstructure of fresh and hydrated Portland cement paste’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.059.

Hanafi, M., Aydin, E. & Ekinci, A. (2020) ‘Engineering properties of basalt fiber-reinforced bottom ash cement paste composites’, Materials, 13(8), pp. 1–15. doi: 10.3390/MA13081952.

Hasan, A., Maroof, N. & Ibrahim, Y. (2019) ‘Effects of Polypropylene Fiber Content on Strength and Workability Properties of Concrete’, Polytechnic Journal. doi: 10.25156/ptj.v9n1y2019.pp7-12.

Hashem, F. S., Amin, M. S. & Hekal, E. E. (2011) ‘Stabilization of Cu (II) wastes by C3S hydrated matrix’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.015.

Hong, L. T. & Lubell, A. S. (2015) ‘Phosphate cement-based concretes containing silica fume’, ACI Materials Journal. doi: 10.14359/51687178.

Hooton, R. D. (1993) ‘Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity’, ACI Materials Journal. doi: 10.14359/4009.

Hwang, C.-L. & Laiw, J.-C. (1989) ‘Properties of Concrete Using Copper Slag as a Substitute for Fine Aggregate’, Special Publication. doi: 10.14359/1986.

Ishimaru, K. vd. (2005) ‘Properties of concrete using copper slag and second class fly ash as a part of fine aggregate’, Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan. doi: 10.2472/jsms.54.828.

Jalasutram, S., Sahoo, D. R. & Matsagar, V. (2017) ‘Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete’, Structural Concrete. doi: 10.1002/suco.201500216.

Jiang, C. H. vd. (2010) ‘Influence of basalt fiber on performance of cement mortar’, Key Engineering Materials, 426–427, pp. 93–96. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.426-427.93.

Jiang, C. vd. (2016) ‘Effect of polypropylene and basalt fiber on the behavior of mortars for repair applications’, Advances in Materials Science and Engineering, 2016, pp. 14–16. doi: 10.1155/2016/5927609.

Jin, S. J. vd. (2014) ‘Experimental study on the performance of the basalt fiber concrete resistance to freezing and thawing’, Applied Mechanics and Materials, 584–586, pp. 1304–1308. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.1304.

Kabay, N. (2014) ‘Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 50, pp. 95–101. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.040.

Kaplan, G. & Öztürk, A. U. (2019) ‘Dimensional Stability and Microstructural Properties of Cements with Different C3A Contents’, INAE Letters. doi: 10.1007/s41403-018-00061-7.

Karahan, O. & Atiş, C. D. (2011) ‘The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete’, Materials and Design. doi: 10.1016/j.matdes.2010.07.011.

Karthikeyan, B., Subin, A. & Muthulakshmi, T. (2020) ‘High strength concrete using ultra-fine TiO2 and basalt fiber-a study on mechanical and durability characteristics’, Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials.

Khanzadi, M. & Behnood, A. (2009) ‘Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 23(6), pp. 2183–2188. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.005.

Kolias, S. & Georgiou, C. (2005) 'The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete', Cement and Concrete Composites. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.009.

Li, W. & Xu, J. (2009) 'Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading', Materials Science and Engineering A. doi: 10.1016/j.msea.2008.11.063.

Li, Y., Shen, A. & Wu, H. (2020) 'Fractal dimension of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) and its correlations to pore structure, strength and shrinkage', Materials. doi: 10.3390/ma13143238.

Li, Z., Perez Lara, M. A. & Bolander, J. E. (2006) 'Restraining effects of fibers during non-uniform drying of cement composites', Cement and Concrete Research. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.04.001.

Marisa, C. vd. (no date) ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO AGREGADO FINO EM PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO TESE DE MESTRADO-ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL.

Mastali, M. vd. (2018) 'Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.125.

Meng, W. jing vd. (2016) 'Bond-slip constitutive relation between BFRP bar and basalt fiber recycled-aggregate concrete', KSCE Journal of Civil Engineering. doi: 10.1007/s12205-015-0350-z.

Menten, T. & Phadke, M. (1991) 'Quality Engineering Using Robust Design', Technometrics. doi: 10.2307/1269049.

Mobasher, B., Devaguptapu, R. & Arino, A. M. (1996) 'Effect of copper slag on the hydration of blended cementitious mixtures', in Proceedings of the Materials Engineering Conference.

Moura, W. vd. (1999) 'Concrete performance with admixtures of electrical steel slag and copper slag concerning mechanical properties.', American Concrete Institute.

Myadaraboina, H., Law, D. & Patnaikuni, I. (2020) 'DURABILITY OF BASALT FIBERS IN CONCRETE MEDIUM', Proceedings of International Structural Engineering and Construction. doi: 10.14455/isec.res.2014.41.

Najimi, M., Sobhani, J. & Pourkhorshidi, A. R. (2011) 'Durability of copper slag contained concrete exposed to sulfate attack', Construction and Building materials. Elsevier, 25(4), pp. 1895–1905.

Nam, J. vd. (2016) 'Frost resistance of polyvinyl alcohol fiber and polypropylene fiber reinforced cementitious composites under freeze thaw cycling', Composites Part B: Engineering. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.12.009.

Niu, D. vd. (2020) 'Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117628.

Onuaguluchi, O. & Eren, Ö. (2012) 'Durability-related properties of mortar and concrete containing copper tailings as a cement replacement material', Magazine of Concrete Research. doi: 10.1680/macr.11.00170.

Onuaguluchi, O. & Eren, Ö. (2013) 'Rheology, strength and durability properties of mortars containing copper tailings as a cement replacement material', European Journal of Environmental and Civil Engineering. doi: 10.1080/19648189.2012.699708.

Pehlivanli, Z. O. vd. (2016) 'The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.223.

Punurai, W. vd. (2018) 'Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115.

Qin, J. vd. (2018) 'Mechanical properties of basalt fiber reinforced magnesium phosphate cement composites', Construction and Building Materials, 188, pp. 946–955. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.044.

Rajasekar, A., Arunachalam, K. & Kottaisamy, M. (2019) 'Assessment of strength and durability characteristics of copper slag incorporated ultra high strength concrete', Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.118.

Ralegaonkar, R. vd. (2018) 'Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review', Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 164, pp. 589–602. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.245.

Ramli, M., Kwan, W. H. & Abas, N. F. (2013) 'Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.002.

Ranganath, R. V., Bhattacharjee, B. & Krishnamoorthy, S. (1998) 'Influence of size fraction of ponded ash on its pozzolanic activity', Cement and Concrete Research. doi: 10.1016/S0008-8846(98)00036-2.

Rozière, E. vd. (2007) 'Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete', Cement and Concrete Composites. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.03.010.

Ruijie, M. A. vd. (2017) 'Influence of length-to-diameter ratio on shrinkage of basalt fiber concrete', in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. doi: 10.1088/1757-899X/242/1/012027.

Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B. & Saradar, A. (2018) 'Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC)', Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 162, pp. 321–333. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.159.

Saloni, Parveen & Pham, T. M. (2020) 'Enhanced properties of high-silica rice husk ash-based geopolymer paste by incorporating basalt fibers', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118422.

Sharifi, Y. vd. (2020) 'Environmental protection by using waste copper slag as a coarse aggregate in self-compacting concrete', Journal of Environmental Management. Elsevier Ltd, 271(June), p. 111013. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111013.

Sharma, R. & Khan, R. A. (2017a) 'Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates', Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 155, pp. 617–629. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.074.

Sharma, R. & Khan, R. A. (2017b) 'Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials', Journal of Cleaner Production. Elsevier B.V., 151, pp. 179–192. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.031.

Sharma, R. & Khan, R. A. (2018) 'Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete', Journal of Cleaner Production. Elsevier B.V., 171, pp. 1171–1186. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.029.

Shoya, M. vd. (1997) 'Freezing and thawing resistance of concrete with excessive bleeding and its improvement.', Special Publication.

Simões, T. vd. (2017) 'Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes', Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.104.

Sun, X. vd. (2019) ‘Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 202, pp. 58–72. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018.

Tassew, S. T. & Lubell, A. S. (2014) ‘Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.046.

Tiberti, G. vd. (2014) ‘Influence of concrete strength on crack development in SFRC members’, Cement and Concrete Composites. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.10.004.

Tikalsky, P. J. & Carrasquillo, R. L. (1992) ‘Influence of fly ash on the sulfate resistance of concrete’, ACI Materials Journal, 89(1), pp. 69–75. doi: 10.1016/0958-9465(91)90022-A.

Tixier, R., Devaguptapu, R. & Mobasher, B. (1997) ‘The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures’, Cement and Concrete Research. doi: 10.1016/S0008-8846(97)00166-X.

Wu, W., Zhang, W. & Ma, G. (2010a) ‘Mechanical properties of copper slag reinforced concrete under dynamic compression’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 24(6), pp. 910–917. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.001.

Wu, W., Zhang, W. & Ma, G. (2010b) ‘Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete’, Materials and Design. Elsevier Ltd, 31(6), pp. 2878–2883. doi: 10.1016/j.matdes.2009.12.037.

Yan, S. vd. (2020) ‘Bending Properties of Short-Cut Basalt Fiber Shotcrete in Deep Soft Rock Roadway’, Advances in Civil Engineering. doi: 10.1155/2020/5749685.

Yan, X. vd. (2017) ‘Polypropylene–glass fiber/basalt fiber hybrid composites fabricated by direct fiber feeding injection molding process’, Journal of Applied Polymer Science. doi: 10.1002/app.45472.

Yehia, S. vd. (2016) ‘Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.127.

You, N. vd. (2020) ‘Rheology, shrinkage and pore structure of alkali-activated slag-fly ash mortar incorporating copper slag as fine aggregate’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 242, p. 118029. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118029.

Zain, M. F. M. vd. (2004) ‘Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag’, Cement and Concrete Composites. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2003.08.002.

Zhang, W., Hama, Y. & Na, S. H. (2015) ‘Drying shrinkage and microstructure characteristics of mortar incorporating ground granulated blast furnace slag and shrinkage reducing admixture’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.103.

Zhang, W., Zhang, N. & Zhou, Y. (2016) ‘Effect of flexural impact on freeze–thaw and deicing salt resistance of steel fiber reinforced concrete’, Materials and Structures/Materiaux et Constructions. doi: 10.1617/s11527-016-0851-3.

Zhang, X. vd. (2019) ‘Strength indices and conversion relations for basalt fiber-reinforced recycled aggregate concrete’, Dyna (Spain). doi: 10.6036/8986.

Zhao, Y. R. vd. (2018) ‘Study on bending damage and failure of basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.096.

Zhong, R. & Wille, K. (2015) ‘Material design and characterization of high performance pervious concrete’, Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027.

Zhong, H. & Zhang, M. (2020) ‘Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres’, Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120914.

Zollo, R. F. (1997) ‘Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development’, Cement and Concrete Composites. doi: 10.1016/s0958-9465(96)00046-7.

## ÖZGEÇMİŞ



| | |
|---|---|
| Adı Soyadı | : Mohammed Naji Ahmed ABU AESHAH |
| Doğum Yeri ve Yılı | : 23.04.1994 |
| Medeni Hali | : Bekâr |
| Yabancı Dili | : İngilizce |
| E-posta | : mohamednage8@gmail.com |

**Eğitim Durumu**

| | |
|---|---|
| Lise | : Elmuruj Lisesi, 2011 |
| Lisans | : Mesallata– teknik mühendislik fakültesi, 2018 |

**Mesleki Deneyim**

| | |
|---|---|
| İş Yeri | : Trablus'ta Tapu, 2018 |