

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



**KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOLARININ KÖPÜK BETON  
ÜRETİMİNDE BAZALT LİF İLE KULLANIMININ  
İNCELENMESİ**

**GÖKHAN YARAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR**

**TEMMUZ - 2021**

**KASTAMONU**

## TAAHHÜTNAME

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

**Gökhan YARAR**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### KALSİYUM ALÜMINAT ÇİMENTOLARININ KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE BAZALT LİF İLE KULLANIMININ İNCELENMESİ

GÖKHAN YARAR

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

DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Bu çalışma, atık mermer tozu agregası ve bazalt lif içeren köpük beton özelliklerinin incelenmesine odaklanmaktadır. Bu amaçla, üç farklı köpük içeriği (yani 30,40 ve 50  $\text{kg/m}^3$ ) ve üç farklı bazalt lif içeriği (yani 0, karışımın hacimce %1 ve %2'si) ile köpük betonun taze, fiziksel, mekanik, kapilerite, kuruma büzülmesi, sülfat dayanıklılığı, yüksek sıcaklık dayanıklılığı, donma-çözülme dayanıklılığı, ısı iletkenlik özelliklerini araştırmak için yapılmıştır. Çalışmada eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yüksek sıcaklık dayanıklılığı ve donma-çözülme dayanıklılığında 40\*40\*160 mm boyutlarında, fiziksel özellikler ve kapilerite için 50\*50\*50 mm boyutlarında, kuruma büzülmesi ve sülfat dayanıklılığı için 25\*25\*285 mm boyutlarında ve ısı iletkenlik için ise 20\*30\*50 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Sonuçlarda yayılma çaplarının 18,3 cm ile 8,4 cm arasında, porozitenin % olarak 24,43 ile 12,6 arasında, su emmenin % olarak 16,91 ile 6,86 arasında, kuru birim hacim ağırlığının 1924  $\text{kg/m}^3$  ile 1370  $\text{kg/m}^3$  arasında, eğilme dayanımı 28 günde 12,22 MPa ile 4,09 MPa arasında, basınç dayanımı 28 günde 33,53 MPa ile 19,4 MPa arasında, kuruma büzülmeleri 90 günde 751  $\mu\text{m}$  ile 1951  $\mu\text{m}$  arasında, kapilerite 1,91 mm ile 6,72 mm arasında, ısı iletkenlik katsayıları 0,645 W/mK ile 0,757 W/mK arasında değiştiği gözlenmektedir.

**ANAHTAR KELİMELELER:**Bazalt lifi, Kalsiyum alüminat çimentosu, Köpük beton, Yüksek sıcaklık

Temmuz 2021, 91 Sayfa

## **ABSTRACT**

### **MSC THESIS**

#### **INVESTIGATION OF THE USAGE OF CALCIUM ALUMINATE CEMENTS WITH BASALT FIBER IN PRODUCTION OF FOAM CONCRETE**

**GÖKHAN YARAR**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

**SUPERVISOR:DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR**

This study focuses on the investigation of the properties of foam concrete containing waste marble dust aggregate and basalt fiber. For this purpose, it was conducted to investigate the fresh, physical, mechanical, capillarity, drying shrinkage, sulfate resistance, high temperature durability, freeze-thaw durability, thermal conductivity properties of foam concrete with three different foam content (i.e 30,40 and 50 kg/m<sup>3</sup>) and three different basalt fiber content (i.e 0, %1 and %2 by volume of the mixture). In the study, samples in 40\*40\*160 mm dimensions for flexural strength, compressive strength, high temperature durability and freeze-thaw durability, 50\*50\*50 mm dimensions for physical properties and capillarity, 25\*25\*285 mm dimensions for drying shrinkage and sulfate resistance, and 20\*30\*50 mm dimensions for thermal conductivity were used. The results show that the spreading diameters are between 18.3 cm and 8.4 cm, the porosity is between 24.43 and 12.6%, the water absorption is between 16.91 and 6.86%, the dry unit volume weight is between 1924 kg/m<sup>3</sup> and 1370 kg. /m<sup>3</sup>, flexural strength between 12.22 MPa and 4.09 MPa at 28 days, compressive strength between 33.53 MPa and 19.4 MPa at 28 days, drying shrinkage between 751 µm and 1951 µm at 90 days, capillarity 1.91 mm It is observed that the thermal conductivity coefficients vary between 0.645 W/mK and 0.757 W/mK.

**KEYWORDS:**Basalt fiber, Calcium aluminate cement, Foam concrete, High temperature

July 2021, 91 Page

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca danıőmanlıęımı yapan, bilgi birikimiyle çalıőmama ıőık tutan çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a őukranlarımı sunarım. Tez jürime katılan sayın Prof. Dr. Hasbi YAPRAK hocama ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN hocama teşekkür ederim. Mersin Toroslar Belediye Baőkanı sayın Av. Atsız Afőın YILMAZ'a teőekkürlerimi sunarım. Çalıőmam süresince desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme minnettarım. Yaptığım tez çalıőmasının, bilim dünyasına yararlı olmasını temenni ederim.

GÖKHAN YARAR

Kastamonu, 2021

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ ONAYI</b> .....	<b>ii</b>
<b>TAAHHÜTNAME</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>2</b>
2.1 Kalsiyum Alüminat Çimentoları .....	<b>2</b>
2.1.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri .....	<b>3</b>
2.1.2 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Faz Bileşimi .....	<b>4</b>
2.1.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri .....	<b>5</b>
2.1.4 Kalsiyum Alüminat Çimentosu Taze ve Sertleşmiş Betonun Özellikleri .....	<b>7</b>
2.1.4.1 Priz süresi .....	<b>7</b>
2.1.4.2 Reaksiyon hızı ve ısı değişimi.....	<b>7</b>
2.1.4.3 Sülfat dayanıklılığı .....	<b>8</b>
2.1.4.4 Asit dayanıklılığı.....	<b>8</b>
2.1.4.5 Yüksek sıcaklık dayanıklılığı.....	<b>8</b>
2.1.4.6 Kalsiyum alüminat çimentosunun hidrasyon mekanizması...9	
2.1.4.7 Kalsiyum alüminat çimentosunun kimyasal reaksiyonları .....	<b>11</b>
2.1.4.8 Kalsiyum alüminat çimentosunun kullanımında dikkat edilmesi gereken hususlar .....	<b>14</b>
2.1.4.9 Kalsiyum alüminat çimentosunun kullanım alanları.....	<b>15</b>
2.2 Köpük Beton.....	<b>15</b>
2.2.1 Bileşenleri .....	<b>16</b>
2.2.2 Kıvam ve Reoloji .....	<b>16</b>
2.2.3 Fiziksel Özellikleri.....	<b>17</b>
2.2.3.1 Birim hacim ağırlık .....	<b>17</b>
2.2.3.2 Gözeneklilik ve kılcal su emme .....	<b>17</b>
2.2.4 Mekanik Özellikleri .....	<b>17</b>
2.2.4.1 Basınç dayanımı .....	<b>18</b>
2.2.4.2 Yarmada çekme ve eğilme dayanımı .....	<b>18</b>
2.2.5 Fonksiyonel Özellikleri.....	<b>18</b>
2.2.5.1 Akustik yalıtımı.....	<b>18</b>
2.2.5.2 Isı yalıtımı .....	<b>19</b>
2.2.5.3 Yüksek sıcaklık direnci .....	<b>19</b>
2.2.6 Kullanım Alanları, Avantajları ve Dezavantajları .....	<b>19</b>
2.3 Beton Üretiminde Kullanılan Lifler .....	<b>20</b>

2.3.1	Çelik Lif.....	21
2.3.2	Cam Lifler.....	23
2.3.3	Polipropilen Lifler.....	24
2.3.4	Karbon Lif.....	25
2.3.5	Bazalt Lif .....	25
2.3.5.1	Bazalt liflerin üretimi .....	26
2.3.5.2	Bazalt liflerin fiziksel özellikleri.....	27
2.3.5.3	Bazalt liflerin kimyasal yapısı.....	28
2.3.5.4	Bazalt liflerin kullanım alanları .....	28
2.4	Kalsiyum Alüminat Çimentolu Köpük Beton Uygulamaları .....	31
2.5	Bazalt Liflerin Çimento Esaslı Malzemelerde Kullanımı .....	33
<b>3.</b>	<b>MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>40</b>
3.1	Materyal.....	40
3.1.1	Çimento.....	40
3.1.2	Agrega.....	40
3.1.3	Karışım Suyu .....	41
3.1.4	Bazalt Lif .....	41
3.1.5	Köpük Ajanı.....	42
3.2	Metod.....	42
3.2.1	Köpük Beton Numunelerinin Üretimi .....	42
3.2.2	Taze Hal Özellikleri (Yayılma) .....	44
3.2.3	Fiziksel Özellikler .....	44
3.2.4	Mekanik Özellikler .....	45
3.2.5	Kapilerite Özellikleri .....	45
3.2.6	Kuruma Büzülmesi Özellikleri .....	45
3.2.7	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Dayanıklılığı.....	46
3.2.8	Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı.....	46
3.2.9	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ve HCl Dayanıklılığı .....	46
3.2.10	Isıl İletkenlik .....	47
<b>4.</b>	<b>SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR .....</b>	<b>48</b>
4.1	Köpük Betonların Taze Özellikleri .....	48
4.2	Köpük Betonların Fiziksel Özellikleri .....	49
4.3	Köpük Betonların Mekanik Özellikleri .....	53
4.3.1	Eğilme Dayanımı .....	53
4.3.2	Basınç Dayanımı .....	56
4.4	Köpük Betonların Kuruma Büzülmesi .....	59
4.5	Köpük Betonların Kapilerite Özellikleri .....	64
4.6	Köpük Betonların Isıl İletkenlik Özellikleri.....	67
4.7	Köpük Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı.....	68
4.7.1	Hava ile Soğutma.....	69
4.8	Köpük Betonların Asit Dayanıklılığı .....	74
4.8.1	Sülfirik Asit (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	74
4.8.2	Hidroklorik Asit (HCl).....	77
4.9	Köpük Betonların Sülfat Dayanıklılığı.....	79
<b>5.</b>	<b>SONUÇ .....</b>	<b>83</b>
	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>85</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>91</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2. 1 KAÇ ve Portland çimentolarının bileşim aralığı .....	3
Şekil 2. 2 Portland çimentosu – ISIDAÇ40 basınç dayanımı gelişimi .....	6
Şekil 2. 3 Portland ve KAÇ'larının hidratasyon ürünlerinin birikimi .....	7
Şekil 2. 4 KAÇ hamurunun hidratasyon süreci .....	10
Şekil 2. 5 $C_3AH_6$ kristalinin morfolojisi .....	12
Şekil 2. 6 S/Ç ~ 0,4 ve çimento içeriği $400 \text{ kg/m}^3$ olan KAÇ betonunun dayanım gelişimi .....	13
Şekil 2. 7 27 yaşındaki KAÇ betonuna ait SEM görüntüsü .....	14
Şekil 2. 8 Halifax limanı rıhtımı, Nova Scotia, Kanada .....	15
Şekil 2. 9 Çelik Lif Tipleri .....	23
Şekil 2. 10 Makara üzerine sarılmış bazalt lifleri .....	26
Şekil 2. 11 Demiryolu döşemesinde bazalt lif kullanımı .....	31
Şekil 3. 1 Atık mermer tozunun genel görünümü .....	41
Şekil 3. 2 Bazalt lif genel görünümü.....	42
Şekil 3. 3 Yayılma tablasının genel görünümü .....	44
Şekil 4. 1 Köpük ve lif hacminin( $V_f$ ) yayılma çapına etkisi .....	49
Şekil 4. 2 Köpük betonların poroziteleri(%) .....	50
Şekil 4. 3 Köpük betonların su emmeleri(%).....	51
Şekil 4. 4 Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıkları ( $\text{kg/m}^3$ ).....	52
Şekil 4. 5 Köpük betonların yayılma-kuru birim hacim ağırlık-porozite korelasyonu .....	52
Şekil 4. 6 Köpük betonların 6 saatlik eğilme dayanımları .....	53
Şekil 4. 7 Köpük betonların 1günlük eğilme dayanımları .....	54
Şekil 4. 8 Köpük betonların 7 günlük eğilme dayanımları .....	55
Şekil 4. 9 Köpük betonların 28 günlük eğilme dayanımları .....	55
Şekil 4. 10 Köpük betonların 6 saatlik basınç dayanımları.....	57
Şekil 4. 11 Köpük betonların 1 günlük basınç dayanımları .....	57
Şekil 4. 12 Köpük betonların 7 günlük basınç dayanımları .....	58
Şekil 4. 13 Köpük betonların 28 günlük basınç dayanımları .....	59
Şekil 4. 14 Köpük betonların $30 \text{ kg/m}^3$ köpük içeriğine sahip numunelerin kuruma büzölmeleri ( $\mu\epsilon$ ).....	60
Şekil 4. 15 Köpük betonların $40 \text{ kg/m}^3$ köpük içeriğine sahip numunelerin kuruma büzölmeleri ( $\mu\epsilon$ ).....	61
Şekil 4. 16 Köpük betonların $50 \text{ kg/m}^3$ köpük içeriğine sahip numunelerin kuruma büzölmeleri ( $\mu\epsilon$ ).....	62
Şekil 4. 17 Köpük betonların kuruma büzölmesinin genel görünümü .....	63
Şekil 4. 18 Köpük betonların basınç dayanımı-kuruma büzölmesi-porozite korelasyonu .....	64
Şekil 4. 19 Köpük betonların $30 \text{ kg/m}^3$ köpük içeriğine sahip numunelerin kapileritesi ( $\text{mm/s}^{1/2}$ ) .....	65
Şekil 4. 20 Köpük betonların $40 \text{ kg/m}^3$ köpük içeriğine sahip numunelerin kapileritesi ( $\text{mm/s}^{1/2}$ ) .....	65

Şekil 4. 21 Köpük betonların 50 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin kapileritesi (mm/s <sup>1/2</sup> ) .....	66
Şekil 4. 22 Köpük betonların basınç dayanımı-su emme-kapilerite korelasyonu .....	67
Şekil 4. 23 Köpük betonların kapilerite-büzülme korelasyonu.....	67
Şekil 4. 24 Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları $\lambda$ (W/mK) .....	68
Şekil 4. 25 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların hava soğutma sonrası UGH değişimi (km/s) .....	69
Şekil 4. 26 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların hava soğutma sonrası eğilme dayanımları .....	70
Şekil 4. 27 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların hava soğutma sonrası basınç dayanımları.....	71
Şekil 4. 28 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların su soğutma sonrası UGH değişimi (km/s) .....	72
Şekil 4. 29 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların su soğutma sonrası eğilme dayanımı .....	73
Şekil 4. 30 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların su soğutma sonrası basınç dayanımı .....	74
Şekil 4. 31 %5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 30 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi .....	75
Şekil 4. 32 %5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 40 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi .....	75
Şekil 4. 33 %5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 50 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi .....	76
Şekil 4. 34 %5 HCl etkisine maruz bırakılan köpük betonların 30 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi .....	77
Şekil 4. 35 %5 HCl etkisine maruz bırakılan köpük betonların 40 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi .....	78
Şekil 4. 36 %5 HCl etkisine maruz bırakılan köpük betonların 50 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi .....	78
Şekil 4. 37 %10 MgSO <sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 30 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin genleşmesi (%).....	80
Şekil 4. 38 %10 MgSO <sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 40 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin genleşmesi (%).....	80
Şekil 4. 39 %10 MgSO <sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 50 kg/m <sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin genleşmesi (%).....	81

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2. 1 KAÇ'nun kimyasal bileşimi .....	4
Tablo 2. 2 KAÇ türlerinin bileşim aralıkları .....	4
Tablo 2. 3 Portland çimentosu – KAÇ fazları .....	5
Tablo 2. 4 KAÇ fazları.....	5
Tablo 2. 5 ISIDAÇ 40 esaslı karoların ısı dayanımlarının Portland Çimento esaslı karolar ile karşılaştırılması .....	9
Tablo 2. 6 Kalsiyum alümina hidratlarının yoğunluk ve bağıl su oranları .....	11
Tablo 2. 7 Kullanılan Lif Türlerinin Önemli Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.	21
Tablo 2. 8 Bazalt lifinin tipik fiziksel özellikleri .....	27
Tablo 2. 9 Bazalt lifinin tipik kimyasal bileşimi .....	28
Tablo 3. 1 ÇİMSA RECIPRO 40 çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	40
Tablo 3. 2 Karışım ve kür de kullanılan suyun özellikleri.....	41
Tablo 3. 3 Bazalt liflerin kimyasal kompozisyonu .....	42
Tablo 3. 4 Bazalt lifin fiziksel ve mekanik özellikleri .....	42
Tablo 3. 5 Karışım değişkenleri .....	43
Tablo 3. 6 Karışım Hesapları (kg/m <sup>3</sup> ) .....	43

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

<b>CA</b>	: Monokalsiyum Alüminat
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Oksit
<b>C<sub>2</sub>S</b>	: Dikalsiyum Silikat
<b>C<sub>3</sub>S</b>	: Trikalsiyum Silikat
<b>AC</b>	: Alüminli Çimento
<b>HAC</b>	: Yüksek alümina çimento
<b>CaO</b>	: Kalsiyum Oksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum Oksit
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Demir Oksit
<b>MgO</b>	: Magnezyum Oksit
<b>SO<sub>3</sub></b>	: Kükürt Trioksit
<b>C<sub>3</sub>A</b>	: Trikalsiyum Alüminat
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	: Tetrakalsiyum Alüminoferrite
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Sodyum Sülfat
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Sülfirik Asit
<b>HCl</b>	: Hidroklorik Asit
<b>MPa</b>	: Megapaskal

### Kısaltmalar

<b>KAÇ</b>	: Kalsiyum Alüminat Çimentosu
<b>PÇ</b>	: Portland Çimentosu
<b>AR-GE</b>	: Araştırma ve Geliştirme

## 1. GİRİŞ

Portland çimentosu (PÇ), günümüzde en yaygın kullanım alanına sahip çimentodur. Ancak bazı özel ve zor durumlarda istenilen ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Son zamanlarda PÇ'ye alternatif olarak çeşitli çimento türleri kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan biri de kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ)'dur. Bu çimento; yüksek erken dayanım gerektiren yol uygulamaları, yüksek aşınma direnci gerektiren endüstriyel zemin uygulamaları, yüksek sıcaklık direnci gerektiren refrakter uygulamaları, kimyasal ve biyolojik etmenlere karşı yüksek dayanım ve yüksek asit dayanımı gerektiren kanalizasyon uygulamaları vb. gibi durumlarda üstün performans göstermektedir.

Köpük ajanları ve diğer genleştirici katkıları kullanılarak KAÇ'den köpük beton elde edilmesine ilişkin çalışma sayısı çok azdır. Hâlbuki KAÇ, PÇ'nin yaklaşık 8 aylık basınç dayanımını 1-2 günde sağlayabilmektedir. Ayrıca PÇ içeren kompozitlerden çok daha yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruyabilmektedir, asidik ortamlardan etkilenmemektedir ve darbeye, aşınmaya karşı yüksek direnç gösterebilmektedir.

Dünyada ve ülkemizde ticari bir ürün olarak piyasada yer alan KAÇ'den üretilmiş mamul halde "ısı yalıtım malzemesi" bulunmamaktadır. Ulusal ve uluslararası literatürde KAÇ kullanılarak üretilmiş köpük betona ya da hafif betona yönelik bir bilimsel araştırma çalışması oldukça azdır. Bu çalışmada, köpük betonun özelliklerini daha çok geliştirebilmek için KAÇ kullanımının yanında bazalt lif ile destekleyerek özelliklerde çelik yapılarda yangın direncini yükseltmek, betonarme yapılarda ise yüksek sıcaklık direnci yüksek yalıtım malzemesi üretmek amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1 Kalsiyum Alüminat Çimentoları

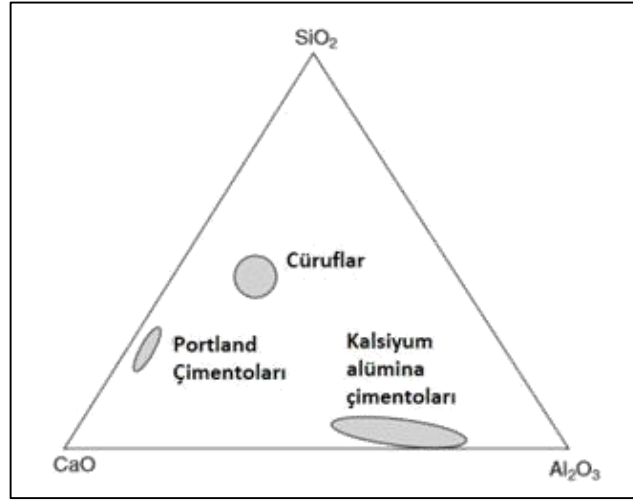
KAÇ terimi, ana bileşenleri olarak monokalsiyum alüminat (CA) mevcudiyeti ile karakterize edilen bir dizi inorganik bağlayıcı içerir. KAÇ'nun kimyasal bileşimi geniş bir aralıkta değişebilir,  $Al_2O_3$  içeriği %40 ile %80 arasındadır. Portland çimentosundan farklı olarak trikalsiyum silikat ( $C_3S$ ) içermez, ancak sınırlı miktarda dikalsiyum silikat ( $C_2S$ ) içerebilir. KAÇ ayrıca alüminli çimento (AC) veya yüksek alümina çimento (HAC) olarak da adlandırılır (Werner vd. 2000).

KAÇ'ları kireçtaşı ve düşük silis içerikli boksitlerden üretilirler. KAÇ kullanımının temel nedeni Portland çimentosuna kıyasla sülfat saldırılarına daha dirençli olmasıdır (Scheinherrová ve Trník, 2017). KAÇ'nun endüstriyel gelişimi esas olarak, Bied'in Fransa, Le Teil'deki J. ve A. Pavin de Lafarge firmasının laboratuvarlarındaki çalışmaları ile başlamıştır. Bu çalışmanın ortaya çıkmasının başlıca sebebi, Fransa'daki büyük miktarlarda sülfat, alçıtaşı ve anhidrit içeren yerlerde harç ve betonların hızla bozulması ve parçalanması ile ortaya çıkan problemlerdir. 1840'larda Vicat, silika+alümina ve kireç+magnezya içeriğinin sülfat direnci sağlayabileceğini önermiştir. Bu hipotezle Bied, yüksek alümina içeren çimentoların gelişimine odaklanmıştır. 1908'de bu çalışma, boksit veya düşük silika içerikli diğer alümin ve demir içerikli malzemelerin kireçtaşı ile birlikte üretim sürecinin patentlenmesiyle sonuçlanmıştır. Elde edilen çimento sadece istenen sülfat direnci özelliklerine sahip olmakla kalmayıp, aynı zamanda Portland çimentosundan çok daha hızlı dayanım kazanmaktadır. Çimentonun ilk kullanımı hızlı sertleşme özelliğinden yararlanılarak, 1.Dünya savaşı sırasında gerçekleşmiş ve sülfat direncinden dolayı, Paris-Lyon-Marsilya demiryollarında, yoğun anhidrit tehlikesine karşı bir tünelin yapımında kullanılmıştır (Scrivener ve Capmas, 2003). KAÇ, en çok kullanılan özel çimento türü olmasına rağmen, dünya çapında yıllık üretimi Portland çimentosunun binde birinden azdır (Li, 2011). Bu kadar az kullanılmasının en büyük sebeplerinden birisi hidratasyon reaksiyonunun yarattığı güvensizliktir. Hidratasyon sürecinde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda porozite artar ve dayanım azalabilir. Hidratasyon

reaksiyonunun yanlış anlaşılması ve etkisinin öngörülememesi geçmişte bir miktar hasara yol açmıştır (Bizzozero, 2014). Ancak, (Mangabhai, 1990) KAÇ'nun yapı malzemesi olarak kullanılmaması için hiç bir geçerli sebep olmadığını ortaya koymuştur. KAÇ ile yapılan yapıların uzun vadede büyük hasara uğramayacağını göstermiştir (Barnes ve Bensted, 2002).

### 2.1.1 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

KAÇ üretiminde ana hammadde kireçtaşı ve boksittir (Scrivener ve Capmas, 2003). Portland çimentosu gibi KAÇ, kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir oksitlerini içerir. Bununla birlikte, bunların bileşimi Şekil 2.1'de görüldüğü gibi oldukça farklıdır. Bu, CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sistemi içerisinde, Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufunun bileşim bölgeleri ile birlikte, yaklaşık olarak KAÇ'larının bileşim bölgesini göstermektedir (Li, 2011).



Şekil 2. 1 KAÇ ve Portland çimentolarının bileşim aralığı (Li, 2011)

Portland çimentosundan farklı olarak, KAÇ'nun en yüksek orandaki ana bileşeni alüminyum oksittir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Sonra sırasıyla, kalsiyum oksit (CaO), demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silisyum oksit (SiO<sub>2</sub>), magnezyum oksit (MgO) ve kükürt trioksit (SO<sub>3</sub>) gelmektedir. Portland çimentosunda ise ana bileşenler sırasıyla CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO ve SO<sub>3</sub>'tür. Tablo 2.1'de KAÇ'nun oksit oranları verilmiştir. Tablo 2.2'de ise farklı KAÇ'larına ait sınıfların oksit oranları sunulmuştur.

Tablo 2. 1 KAÇ'nun kimyasal bileşimi (Kırca, 2006)

Oksitler	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38-82
CaO	18-40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3-18
SiO <sub>2</sub>	0,5-6
TiO <sub>2</sub>	0,1-4
MgO	0,2-1,5
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0,4-7
SO <sub>3</sub>	0,2-0,4

Tablo 2. 2 KAÇ türlerinin bileşim aralıkları (Scrivener ve Capmas, 2003)

Sınıf	Standart düşük alümina	Düşük alümina, düşük demir	Orta alümina	Yüksek alümina
Renk	Gri	Gri-beyaz	Beyaz	Beyaz
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	36-42	48-60	65-75	≥80
CaO (%)	36-42	36-42	25-35	<20
SiO <sub>2</sub> (%)	3-8	3-8	<0,5	<0,2
MgO (%)	~1	~0,1	~0,1	~0,1

### 2.1.2 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Faz Bileşimi

Portland çimentosundaki ana fazlardan (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF) farklı olarak KAÇ'ndaki ana fazlar monokalsiyum alüminat (CA), dikalsiyum alüminosilikat (C<sub>2</sub>AS, gehlenit), dodekakalsiyum heptaalüminat (C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>, mayenit) ve tetrakalsiyum alüminoferrit (C<sub>4</sub>AF, ferrit)'tir (Barborak, 2010; Guirado ve Galí, 2006). Portland çimentosunun ana fazlarının KAÇ ile karşılaştırılması Tablo 2.3'te gösterilmiştir. Faz gruplarının karmaşıklığı ve değişkenliği sebebiyle, KAÇ'nun potansiyel faz bileşimini hesaplamak için Portland çimentosunda kullanılan Bogue hesaplamasının bir karşılığı yoktur (Scrivener ve Capmas, 2003). X ışını kırınımı ve optik mikroskop KAÇ'da bulunan ana fazları belirlemek için kullanılan temel tekniklerdir (Barnes ve Bensted, 2002).

(Guirado ve Galí, 2006), yaptıkları çalışmada 20 farklı KAÇ örneğinin faz analizini yapmışlardır. Elde edilen faz yüzdeleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2. 3 Portland çimentosu – KAÇ fazları (Barborak, 2010).

Faz	Portland Çimentosu (%)	Kalsiyum Alüminat Çimentosu (%)
C <sub>3</sub> S	50-70	0
C <sub>2</sub> S	15-30	<10
C <sub>3</sub> A	5-10	0
C <sub>4</sub> AF	5-15	10-40
CA	0	40-50

Tablo 2. 4 KAÇ fazları (Guirado ve Galí, 2006)

Faz	Ağırlıkça %
CA	40-70
C <sub>2</sub> AS	0-20
C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	0-10
C <sub>4</sub> AF	10-30

Tüm KAÇ'larında ana hidrolik faz olarak monokalsiyum alüminat (Ca.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CA) %40'tan daha fazla bulunur (Scrivener ve Capmas, 2003). Bu faz, suyla hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve KAÇ'larında dayanım gelişiminden sorumludur. Hidrate olmuş KAÇ'nun erken mukavemetini sağlar (Ramadevi ve Shri, 2015). Dikalsiyum alüminosilikat (2CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>As, gehlenit) C<sub>2</sub>S'ye benzer şekilde davranır, hidratasyonu yavaşır ve nihai yaş dayanımına katkıda bulunur. Dodekakalsiyum heptaalüminat (12CaO.7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>, mayenit) yaygındır, fakat çoğu durumda KAÇ'larının sadece küçük bir bileşenidir. Kafes yapısı kübik formdadır (Werner vd. 2000). Hızlı bir şekilde priz alır ancak dayanıma hiçbir katkı sağlamaz, bu nedenle küçük miktarlar haricinde KAÇ'da çok istenen bir bileşen olarak kabul edilmez. Tetrakalsiyum alüminoferrit (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>AF, ferrit) priz süresi üzerinde ve dayanım kazanmada çok az yada hiç bir etkiye sahip değildir.

### 2.1.3 Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

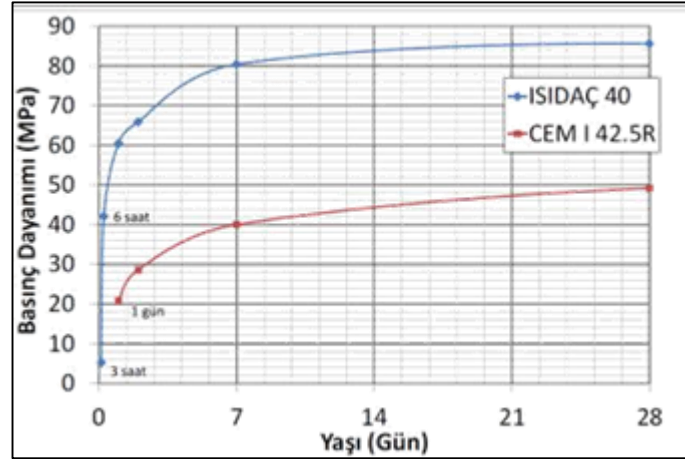
KAÇ sınıfları için özgül ağırlıklar 3200-3250 kg/m<sup>3</sup>'tür. Özgül ağırlık demir içeriğiyle doğru orantılıdır, demir içeriği arttıkça özgül ağırlık artmaktadır. Özgül yüzey alanları

ise 250-400 m<sup>2</sup>/kg'dır (Scrivener ve Capmas, 2003). Özgül ağırlıkları Portland çimentosuna kıyasla yüksektir.

(Barnes ve Bensted, 2002)'e göre iki ana KAÇ vardır. Birincisi, koyu gri veya siyah renkte olan ve geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilen, ikicisi ise beyaz renkte olan ve öncelikle yüksek sıcaklıkta refrakter amaçlı ve bazen de dekoratif amaçlı kullanılabilen KAÇ'dur.(Hall, 2012)'ye göre bu iki tip, ana çimento davranışlarında genel olarak benzerdir. Beyaz KAÇ (>ağırlıkça %70 alümina), daha fazla alümina içeriğine sahiptir ve koyu gri/siyah KAÇ daha fazla demir fazı içerir.

Beyaz KAÇ genellikle düşük demir yüzdesi bulunan kalsine edilmiş alümina ile sönmemiş kireç (CaO) veya yüksek saflıkta kireçtaşı ile pişirilerek yapılır. Ticari olarak üretilen beyaz KAÇ'larının çoğu CA (ana bileşen) ve C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> (mayenit) içerir.

KAÇ'larında, bir günde elde edilen basınç dayanımı, Portland çimentosunun 28 günlük basınç dayanımından fazladır (Barnes ve Bensted, 2002). Şekil 2.2'de Portland çimentosu ve ISIDAÇ40 tipi KAÇ'nun basınç dayanımı gelişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2. 2 Portland çimentosu – ISIDAÇ40 basınç dayanımı gelişimi (Ilhan ve Yaman, 2015)

## 2.1.4 Kalsiyum Alüminat Çimentosu Taze ve Sertleşmiş Betonun Özellikleri

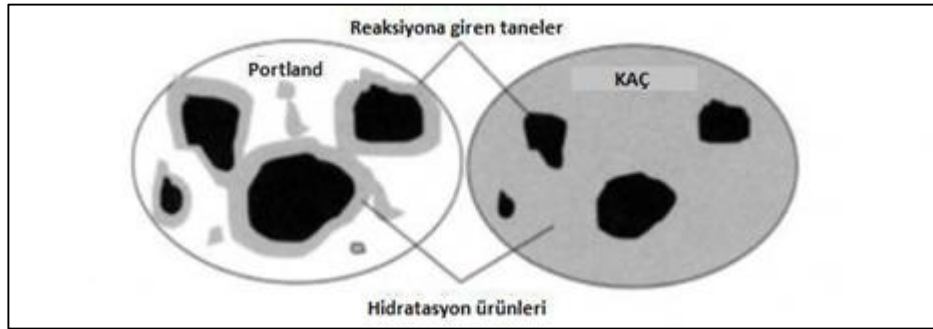
### 2.1.4.1 Priz süresi

KAÇ'nun hızlı prizinden  $C_{12}A_7$ , CaO,  $C_3A$  fazları, ortalama priz süresinden CA fazı ve yavaş prizinden ise  $CA_2$  ve  $C_4AF$  fazları sorumludur.

Priz süresi genellikle  $0^\circ C$  ile yaklaşık  $20^\circ C$  arasında kısalmır,  $28-30^\circ C$ 'deki priz süresi,  $20^\circ C$ 'dekinin 8 katı kadar olabilir.  $30^\circ C$ 'nin üstünde ise, yine çok hızlı şekilde priz süresi kısalmır. Hidratasyonun başlangıç periyodunun uzunluğu, çözeltideki C/A oranı ile azalmır.

### 2.1.4.2 Reaksiyon hızı ve ısı değişimi

Portland çimentosunda, ana hidratasyon ürünü, hidrate çimento tanelerinin etrafında birikmektedir, böylece ilk birkaç saat sonra reaksiyon hızı dereceli olarak yavaşlar. KAÇ'larında, ise, hidratasyon ürünleri boşluk boyunca biriktirilir (Şekil 2.3).



Şekil 2. 3 Portland ve KAÇ'larının hidratasyon ürünlerinin birikimi (Li, 2011)

Hızlı reaksiyonun bir başka sonucu da hidratasyon ısısının nispeten kısa bir sürede gelişmesidir. Bu kendi kendine ısınma etkileri, KAÇ betonu üzerindeki dayanım gelişimi için çok önemlidir. Bu yüksek sıcaklık artışlarına rağmen, KAÇ betonları termal çatlama aşırı duyarlı görünmemektedir. Hızlı sıcaklık artışının önemli bir sonucu, yüzeyin kurumasını ve dehidratasyonunu önlemek için betonu nemli tutma ihtiyacıdır. Büyük hacimli işler için, kalıpları mümkün olduğunca erken çıkarmak (yaklaşık 6 saat) ve yüzeye su püskürtülmesi önerilir. Bu kendiliğinden ısınmanın bir avantajı da, betonun hidratasyon başlamadan önce donmasına izin verilmemesi

koşuluyla, çok soğuk havalarda ve aslında sıfırın altındaki sıcaklıklarda beton dökülmeye devam edilebilmesidir (Li, 2011).

#### **2.1.4.3 Sülfat dayanıklılığı**

KAÇ'larının, Portland çimentosu gibi kalsiyum silikat bazlı çimentolardan daha iyi sülfat direncine sahip olduğunu savunmuştur (Mangabhai, 1990). KAÇ betonları 80 yılı aşkın bir süredir sülfatlı sulara maruz kalan alanlarda kullanılmaktadır. Bu süre zarfında, bu malzemenin hem yapılardaki hem de uzun vadeli saha denemelerindeki performansı ile ilgili sürekli olarak iyi raporlar sunulmuştur. Portland çimentosunun aksine, sodyum sülfat çözeltilerinin KAÇ betonları için magnezyum sülfat çözeltilerinden daha agresif olabileceği öne sürülmüştür (Scrivener ve Capmas, 2003).

#### **2.1.4.4 Asit dayanıklılığı**

Portland çimentoları, yapılarında bulunan silikatların, pH değerinin 7'nin altına düşmesi durumunda çözünmeye başlamaları sebebiyle, asidik ortama dayanıksızdır. KAÇ ise sahip olduğu alüminat fazları ile düşük pH'larda bile yüksek asit dayanımı gösterirler ve minimum kütle kaybına uğrarlar (Çetin vd. 2015).

KAÇ'larının iyi performansının anahtarı hidratların, özellikle alümina hidratın doğasında yatmaktadır. Alümina hidrat, yaklaşık 3 veya 4 pH'a kadar kararlıdır ve diğer hidratların kalsiyum bileşeninin çözünmesi, bu fazın daha çok oluşmasına yol açar, bu da boşlukları doldurur, betonu daha fazla saldırıdan korur ve genellikle daha az agrega kaybıyla daha pürüzsüz bir yüzey sağlar (Scrivener ve Capmas, 2003).

#### **2.1.4.5 Yüksek sıcaklık dayanıklılığı**

KAÇ hamurunun termal genleşmesi Portland çimentosuna göre daha düşüktür. Dikkatli agrega seçimi ile yangına maruz kalabilen KAÇ betonları yapılabilir (Scrivener ve Capmas, 2003). Tablo 2.5'te ISIDAÇ40 tipi KAÇ'nun sıcaklık ile değişen basınç dayanımlarının Portland çimentosuyla karşılaştırılması sunulmuştur.

Tablo 2. 5 ISIDAÇ 40 esaslı karoların ısı dayanımlarının Portland Çimento esaslı karolar ile karşılaştırılması (Çetin vd. 2015)

Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Klinker Agregalı Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Şamot Agregalı Karışım	ISIDAÇ 40 Çimentosu ve Şamot Agregalı Karışım	Portland Çimentosu ve Kalker Agregalı Karışım
400 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (Mpa)	37,2	29,7	39,2	35,5
600 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (Mpa)	43,8	41,3	46,9	24,8
800 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (Mpa)	59,5	45,3	56,7	0
1100 °C Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı (Mpa)	32,4	25,1	30,2	0

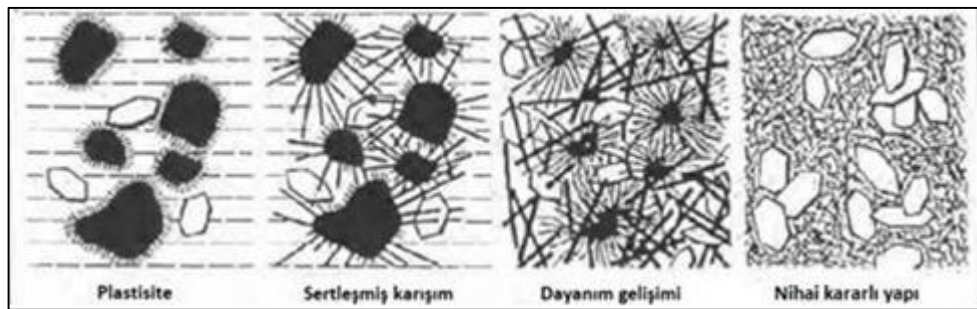
#### 2.1.4.6 Kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyon mekanizması

KAÇ hidratasyon süreci Portland çimentosundan farklıdır. Genel olarak, Portland çimentosu hidratasyonunun %60-80'i, 28 gün içinde gerçekleşir ve hidratasyon 28 gün sonra yavaş yavaş devam eder. Bununla birlikte, KAÇ'ndaki hidratasyonun çoğu, sadece ilk 24 saat içinde gerçekleşir. Portland çimentosu, kalsiyum ve silisyum oksitleri ile C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S fazlarını oluşturarak, su ile tepkimeye girdiğinde C-S-H ve C-H hidratlarının elde edilmesini sağlar. KAÇ, kalsiyum ve alüminyum oksitleri ile monokalsiyum alüminat (CA) oluşturarak, su ile tepkimeye girdiğinde kalsiyum alüminat hidratları oluşturur (Sucu ve Delibaş, 2015).

Su ile temas halindeki anhidrit fazlar, iyon vermek için çözelti içinde çözünür. Örneğin, KAÇ'nun ana fazı monokalsiyum alüminat (CA), suda  $Ca^{+2}$  ve  $Al(OH)^{4-}$  iyonlarının oluşmasına yol açar. Hidratların çökmesi ve büyümesi çözelti yoluyla gerçekleşir (Bizzozero, 2014). Bunu, kalsiyum alüminat hidrat kristallerinin ve jipsetin ( $AH_3$ ) çekirdeklenme ve çökmesi izler. Bu hidrat kristalleri, bir jel tabakası oluşturarak reaksiyona girmemiş klinker yüzeyine yakın çökmeye başlar. Bu tabaka suya geçirgendir. Bu nedenle, alttaki klinker tanelerinin daha fazla hidrasyonu, çözülme ve hidrasyon için yeterli su olduğu sürece sürekli bir işlem olarak kolayca gerçekleştirilir. İlk aşamalarda, hidrasyon kristalleri reaksiyona girmemiş taneleri kaplayan bir jel tabakası oluşturur. Karışım hala plastiktir. Reaksiyonlar sonucu kristal oluşumundaki ilerlemeye bağlı olarak, çimento taneleri arasında bazı bağlar meydana gelmekte ve karışımın sertleşmesi ile sonuçlanmaktadır. Hidrasyon daha da ilerlerken, karışım güçlenerek sertleşir.

Tepkime hızı sadece reaksiyon içerisinde yer alan çimento veya su tükendiğinde yada hidratların çökmesini sağlayan boş alan olmadığı zaman yavaşlar. Bu olay çimento hamurunun, harç veya betonun prizine neden olur (Bizzozero, 2014).

KAÇ'larının düşük sıcaklıklardaki ( $<27\text{ }^{\circ}C$ ) hidrasyon ürünleri  $CAH_{10}$ ,  $C_2AH_8$  ve  $AH_3$ 'tür (Kırca, 2006). Şekil 2.4'te KAÇ'ın hidrasyon süreci verilmiştir.



Şekil 2. 4 KAÇ hamurunun hidrasyon süreci (Kırca, 2006)

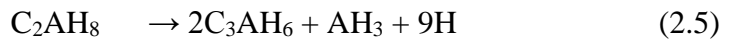
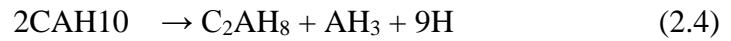
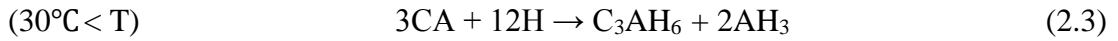
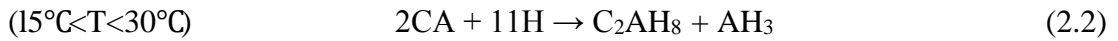
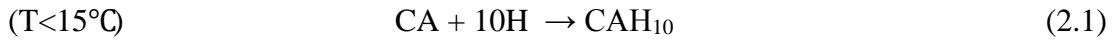
Hidrasyon sürecinde;

1) Çimento taneciklerinin yüzeylerinde ilk kristaller oluşur. Karışım hala bu noktada plastisite gösterir, ancak başlangıçtaki akış özelliklerini kaybetmiştir.

- 2) Sürekli çözünme/çökme ilerlemesiyle birlikte kristaller daha da büyür, birbirleriyle bağlanır. Bireysel tane hareketi yavaşlayarak karışım sertleşir ve priz alır.
- 3) Hidratasyon işlemi devam ettikçe, daha fazla kristal gelişir ve büyür, birbiriyle iç içe geçerek yapıya dayanım kazandırır.
- 4) Su tamamen kullanıldığında ve kararlı kristal fazları geliştiğinde nihai kararlı yapıya ulaşılır.

#### 2.1.4.7 Kalsiyum alüminat çimentosunun kimyasal reaksiyonları

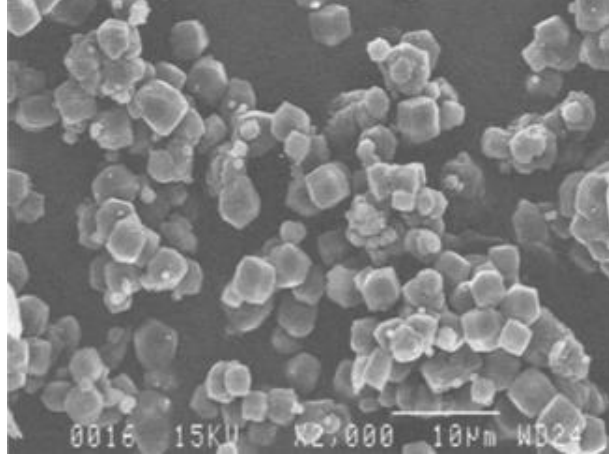
Hidratasyon süreci boyunca yarı kararlı  $CAH_{10}$ ,  $C_2AH_8$  ve kararlı  $C_3AH_6$  kalsiyum alümina hidratları oluşur. Altıgen yarı kararlı hidratlar, kararlı kübik hidratlara dönüşür. Kararlı kübik hidrat  $CAH_{10}$ ,  $C_2AH_8$ 'den daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve bu da porozitenin artmasına neden olur. Porozitenin artması dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkiler. Monokalsiyum alüminatın  $15^\circ C$ 'nin altındaki hidratasyonu, yarı kararlı  $CAH_{10}$ 'un oluşmasına neden olur. (Scrivener ve Capmas, 2003), hidratasyon reaksiyonlarını formül 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 ve 2.5'teki gibi açıklamışlardır.



Tablo 2. 6 Kalsiyum alümina hidratlarının yoğunluk ve bağıl su oranları (Scrivener ve Capmas, 2003)

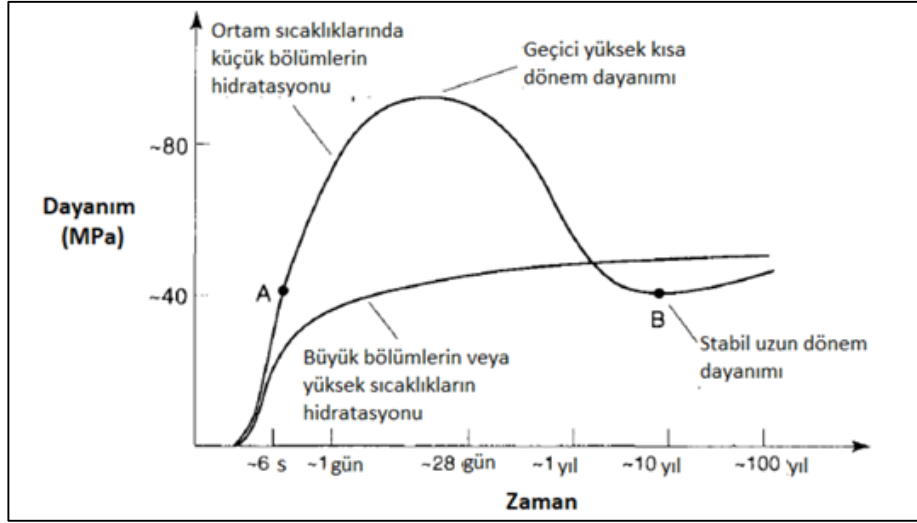
	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Bağıl Su (%)
$CAH_{10}$	1720	53
$C_2AH_8$	1750	40
$C_3AH_6$	2520	28
$AH_3$	2400	35

Tabloda 2.6’da görüldüğü üzere en yüksek yoğunluğa sahip hidrat  $C_3AH_6$ ’dır. Tüm sıcaklıklarda en kararlı hidratlar, kübik kristal ve zayıf kristalin yapıları olan  $C_3AH_6$  ve  $AH_3$ ’tür (Scheinherrová ve Trník, 2017). Şekil 2.5’te  $C_3AH_6$  kristalinin morfolojisi gösterilmiştir. Bu resimdeki kristaller, yüksek s/ç oranına sahiptir, bu yüzden oldukça büyüktür (Li, 2011).



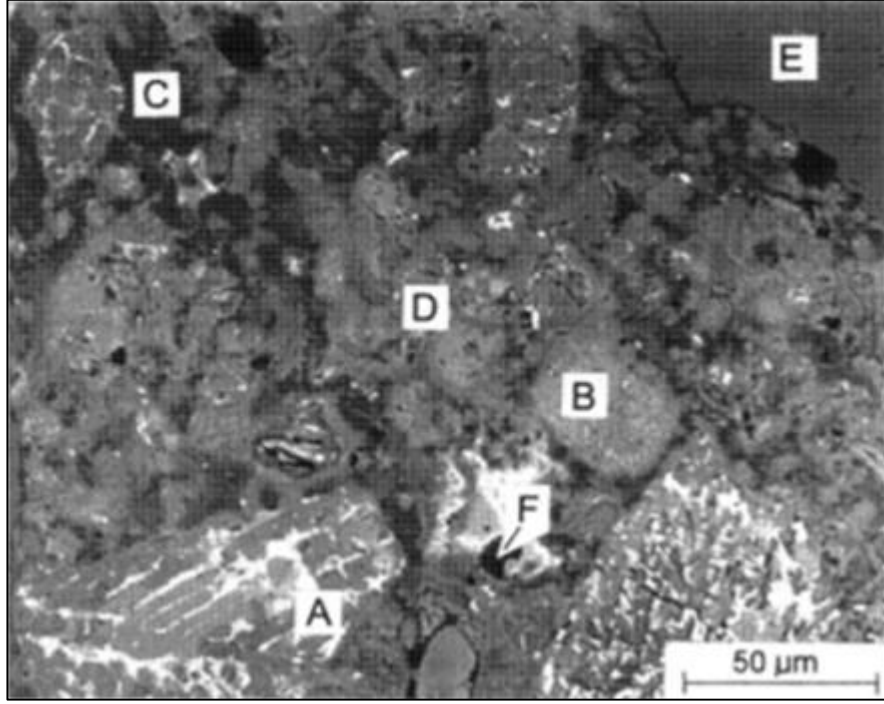
Şekil 2. 5  $C_3AH_6$  kristalinin morfolojisi (Li, 2011)

KAÇ’nun uzun süreli dayanımı, kararlı hidratların ( $C_3AH_6$  ve  $AH_3$ ) oluşumuyla gelişir. Hidratasyon, ortam sıcaklıklarında küçük bölümlerde gerçekleştiğinde, bu kararlı hidratların oluşumu, yarı kararlı hidratların ( $CAH_{10}$  ve  $C_2AH_8$ ) oluşumundan önce gelir. Yarı kararlı hidratlar, yüksek oranda su ve düşük yoğunluklara sahip olduklarından, orijinal olarak su ile kaplı olan alanı hızla doldururlar ve erken dayanım sağlarlar. Bu erken dayanımlar, kararlı hidratların asıl oluşumundan önce geçici olarak kabul edilmelidir. Düşük yoğunluklu yarı kararlı hidratların, daha yüksek bir yoğunluğa sahip kararlı hidratlara dönüşmesi sırasında, porozitede bir artış ve mukavemette bir azalma olur. Aynı zamanda su açığa çıkar. İlk s/ç oranı düşük tutulursa, ilk yarı kararlı hidratların oluşumundan sonra hidrate olmamış çimento kalacaktır. Bu hidrate olmamış çimento, hidratasyon reaksiyonu sırasında serbest kalan suyla reaksiyona girmektedir, bu da mukavemette bir artışa yol açar (Scrivener ve Capmas, 2003). Şekil 2.6’da KAÇ betonunun zamana bağlı dayanım gelişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2. 6 S/Ç ~ 0,4 ve çimento içeriği 400 kg/m<sup>3</sup> olan KAÇ betonunun dayanım gelişimi (Kurdowski, 2014)

Reaksiyon oranı zamana bağlıdır, özellikle 20°C'nin altındaki sıcaklıklarda birkaç yıl sürebilir. Ayrıca, kütleme sıcaklığı arttıkça, reaksiyon daha hızlı gerçekleşir, kararsız CAH<sub>10</sub> ve C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>'in C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>'ya dönüştürülmesiyle reaksiyon doğrudan güçlenir (Kırca, 2006). Şekil 2.7'de 27 yaşındaki KAÇ betonunun SEM görüntüsü verilmiştir. KAÇ betonun s/ç oranı 0,32'dir. A: büyük ölçüde tepkimeye girmemiş çimento tanesini (esas olarak CA (orta koyu) ve ferrit (açık) içeren), B: tamamen reaksiyona girmiş bir çimento tanesini, C:AH<sub>3</sub>'ü, D: tanımlanmamış ürünleri (muhtemelen esas olarak mikrometre seviyesinde veya altında karışmış C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> ve AH<sub>3</sub>'ten oluşur), E: agregayı ve F: bir gözeneği göstermektedir (Taylor, 1997).



Şekil 2. 727 yaşındaki KAÇ betonuna ait SEM görüntüsü (Taylor, 1997)

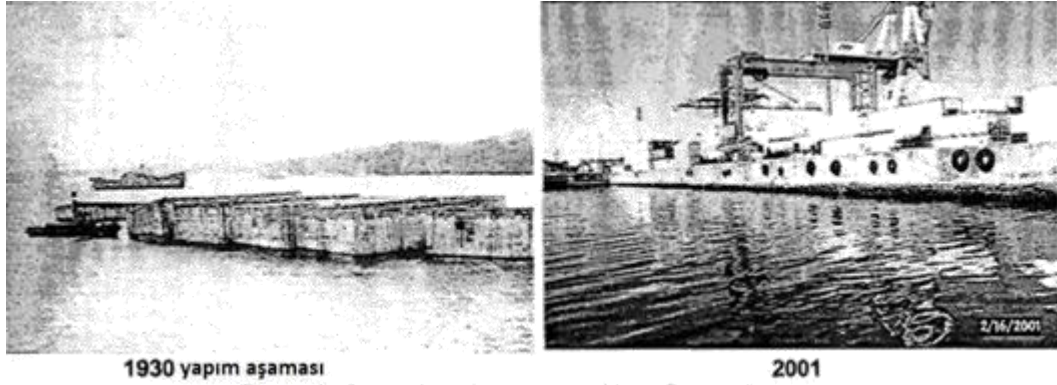
#### 2.1.4.8 Kalsiyum alüminat çimentosunun kullanımında dikkat edilmesi gereken hususlar

Hidratasyon reaksiyonunun yanlış anlaşılması ve etkisinin öngörülememesi geçmişte bazı hasarlara yol açmıştır (Bizzozero, 2014).

KAÇ'larının hidratasyon reaksiyonlarındaki dönüşüm tepkimeleri genellikle dayanım azalması, artan porozite ve geçirgenlik olarak ortaya çıkmaktadır. Dönüşüm oranı çok çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; sıcaklık (sıcaklığın yükselmesiyle daha hızlı dönüşüm), nem (bağıl nemin doygunluğun altına düşmesiyle daha yavaş dönüşüm), s/ç oranı (yüksek s/ç oranı yüksek dönüşüm hızı), agrega seçimi, çimentonun mineralojik bileşimidir (düşük alkali daha yavaş dönüşüm). Bu dönüşüm reaksiyonu, yüksek sıcaklıkta kütleme (<50°C) ile hızlandırılabilir (Barnes ve Bensted, 2002).

1950'li ve 60'lı yıllarda İngiltere'de ön gerilmeli kirişlerde KAÇ betonu kullanılmıştır. O zamanlar hidratasyon reaksiyonları konusu pek anlaşılammıştır. s/ç oranlarının 0,4'ün altında tutulmasına yönelik önerilere rağmen, eklenen suyun kontrolü bazı durumlarda yetersiz kalmış ve bazı betonlarda daha yüksek oranlar kullanılmıştır. 1973-74 döneminde üç farklı hasara bağlı çökme olayı meydana gelmiştir. İki durumda

kirişlerin duvarlara bağlantısının zayıf tasarımı ve detaylandırılması, üçüncüde ise sülfat saldırısı gibi çeşitli nedenlerden oluşmuştur. Bu olaylara rağmen, 40 ile 70 yıl sonra dayanıklılık problemleri yaşamadan İngiltere'de KAÇ betonu içeren yaklaşık 50.000 bina mevcuttur. Dayanıklılığa iyi bir örnek Halifax limanındaki rıhtımlardan biridir (Şekil 2.8). Bu liman, 1930/31'de inşa edilmiştir ve hala faaliyet göstermektedir (Li, 2011).



Şekil 2. 8 Halifax limanı rıhtımı, Nova Scotia, Kanada (Li, 2011)

#### 2.1.4.9 Kalsiyum alüminat çimentosunun kullanım alanları

- 1) Beton uygulamaları: Yüksek erken dayanım aranan yerler
- 2) Refrakter uygulamaları: 1350 °C'ye kadar uygulanabilir
- 3) Özel uygulamalar: Üçlü bağlayıcı sistemleri (KAÇ + PÇ + alçı) (İlhan ve Yaman, 2015).

## 2.2 Köpük Beton

Kaynak ve enerji verimliliğine duyulan ihtiyaç, yapı malzemelerinin ve üretim teknolojilerinin devamlı olarak geliştirilmesini teşvik etmektedir. Bu nedenle hem üretim, hemde kullanım aşamaları için daha az kaynak ile daha yüksek enerji verimine sahip ısı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi ve üretilmesi, özellikle soğuk iklim koşulları için son derece önemlidir.

Köpük beton, köpük ajanı ilavesi ile oluşturulan homojen ve gözenekli yapıya sahip dolgu harcı olarak bilinen hafif bir materyaldir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007), tarafından yapılan çalışmada; köpük beton için sadece ince agregası, çimento, su ve köpük içeren, büyük çoğunluğu hafif malzemelerden oluşan ve büyük agregası içermemesi sebebiyle homojen olduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle köpük beton, yukarıda verilen bu özelliklere de sahip olmasının yanı sıra, uygun bir köpük ajanı kullanımı ve hava boşluklarının harç içinde homojen bir dağılım gösterecek şekilde tutulduğu, yüksek akışkanlık, düşük yoğunluk, minimum agregası tüketimi, kontrollü düşük dayanım ve çok iyi ısı yalıtım özelliklerini barındıran bir hafif beton cinsi olarak tanımlanmaktadır. Uygun dozajlarda kullanılan köpük ajanları farklı yoğunluklarda (400-1600 kg/m<sup>3</sup>) köpük beton üretimine olanak sağlamaktadır. Köpük beton patenti ilk kez 1923 yılında alınmış olmasına karşın kararlı köpük beton karışımı üretiminin kullanılan köpük ajanı özellikleri ve miktarına, köpük üretim yöntemine, hava boşluğu dağılımının homojenliğine, uygulanan karışım yöntemlerine ve diğer birçok etkene bağlı olması sabit bir oranda standart karışım hazırlama yöntemi bulunmamaktadır (Turro vd. 2009).

### **2.2.1 Bileşenleri**

Köpük betonun temel bileşenleri ve değişkenlik gösteren yardımcı bileşenlerine bakıldığında çimento, kum, su, köpük ajanıyla üretilen köpük ile agregaların oluşturduğu ve ek malzemeler olarak ise uçucu kül, akışkanlaştırıcı ile organik ve inorganik liflerden oluştuğu belirtilmiştir (Amran vd. 2015).

### **2.2.2 Kıvam ve Reoloji**

Köpük beton taze harç karışımının akış özellikleri, işlenebilirliği ve kendiliğinden yerleşebilme yeteneğini belirleyen kıvam ve reoloji özellikleri üzerinde etkili en önemli faktörler bileşenlerin birbirleriyle uyumluluğu ve su içeriğidir. Bileşenler arasındaki adhezyon kuvveti, köpük ajanı cinsi, hacmi, gözeneklilik, kullanılan agregası cinsinin tane boyutu, şekil ve yüzey alanı ile karışımın su/katı oranı kıvamı büyük ölçüde değiştirmektedir (Turro vd. 2009).

### **2.2.3 Fiziksel Özellikleri**

Köpük betonun fiziksel özellikleri bakımından yoğunluk, gözeneklilik ve kılcal su emme önem arz etmektedir.

#### **2.2.3.1 Birim hacim ağırlık**

Köpük betonun taze birim hacim ağırlığı ile kuru birim hacim ağırlığı farkının 100-120 kg/m<sup>3</sup> miktarlarını aşmaması önerilirken (Amran vd. 2015) kuru birim hacim ağırlığı için teorik ve gerçek birim hacim ağırlıkları farkı  $\pm 50$  kg/m<sup>3</sup> olması gerektiği belirtilmiştir (Bing vd. 2012). Köpük beton birim hacim ağırlığının azalması sertliğinin ve dayanımının azalmasına sebebiyet vermektedir (Mydin ve Wang, 2012).

#### **2.2.3.2 Gözeneklilik ve kılcal su emme**

Köpük betonun temel fiziksel, mekanik ve fonksiyonel özellikleri üzerinde belirleyici bir role sahip olan gözenek yapısı ile ilgili olarak toplam gözenek miktarı, gözenek büyüklüğü, gözeneklerin dağılımı ve birbirleriyle olan bağları onun yük veya diğer etkenler karşısındaki davranış şeklini belirleyen en önemli faktörlerdir. Gözenekler geleneksel olarak jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve makro gözenekler olarak sınıflandırılmaktadır. Kılcal gözenekler, betona su emme durumu yarattığından kürlenme süresinden sonra alınacak sonucu da değiştirebilmektedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Bir köpük betonun gözenek yapısı, karışımı oluşturan bileşenlerin cinsleri, özellikleri ve oranlarının etkisi altında şekillense bile burada esas belirleyici olan köpük ajanının sahip olduğu gözenek yapısı olduğu da gözden kaçırılmamalıdır.

### **2.2.4 Mekanik Özellikleri**

Basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları köpük betonların en sık incelenen mekanik özelliklerindedir.

#### **2.2.4.1 Basınç dayanımı**

Köpük beton basınç dayanımını etkileyen başlıca faktörler arasında köpük ajanı cinsi ve oranı, çimento, kum ve diğer bileşenlerin oranı, s/ç oranı, yoğunluk ve kütleme yöntemi bulunmaktadır. Ancak Bing vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada köpük beton dayanımının yoğunluktaki artışla birlikte üstel bir şekilde arttığı ve yine köpük hacmindeki azalmayla birlikte arttığı belirtilmiştir. Köpük hacminin % 50 oranında olması durumunda basınç dayanımında büyük bir azalma olduğu belirtilmiştir ve % 30 oranındaki köpük hacmi, basınç dayanımında değişime neden olmayan uygun oran olarak belirlenmiştir (Bing vd. 2012). Su miktarının, karışımın tutarlılığı ve kararlılığı üzerinde belirleyici bir role sahip olduğu ve genellikle tasarım karışımlarında kullanılan kumun tane boyutunun ve diğer malzemeler ile elyafın betonun dayanımını üzerinde etkili olduğu bilinmektedir.

#### **2.2.4.2 Yarmada çekme ve eğilme dayanımı**

Köpük betonun çekme/basınç dayanımı oranı normal betona göre daha yüksektir. Karışım suyu miktarının beton yoğunluğunu değiştirmesi çekme ve eğilme dayanımının da farklılaşmasına neden olmaktadır. Köpük hacmi artışının yarmada çekme dayanımını azalttığı ve %10 oranındaki köpük hacminde yüksek olan söz konusu dayanımın % 30 ve 50 oranlarındaki köpük hacimlerinde büyük bir azalma olduğu belirtilmiştir (Karthikeyan vd. 2015).

#### **2.2.5 Fonksiyonel Özellikleri**

Köpük betonun fonksiyonel özellikleri arasında akustik yalıtım direnci, ısı iletkenlik ve yüksek sıcaklık direnci özellikleri ön plana çıkmaktadır.

##### **2.2.5.1 Akustik yalıtımı**

Köpük betonda kullanılan köpük hacmine bağlı olarak gözeneklilik ve gözenek boyut dağılımının geleneksel betona göre farklılaşması nedeniyle köpük betonun ses yutma ve yansıtma özelliklerinin de gelişmesine sebep olmuştur.

### 2.2.5.2 Isı yalıtımı

Köpük beton ısı iletkenlik değerleri karışım bileşenlerinin cinsi, miktarı ve harç/köpük oranı gibi faktörlere bağlıdır. Konuyla ilgili bir çalışmada, karışımında bazı atık ek bileşenlere de yer verilerek jeopolimer köpük betonun ( $1300 \text{ kg/m}^3$ ), ısı iletkenlik katsayısının ( $0.47 \text{ W/mK}$ ) geleneksel duvar malzemeleri olan briket ve tuğladan sırasıyla % 22 ve 48 oranlarında daha düşük olduğu ve en yüksek yoğunluğa sahip olan köpük betonun ( $1700 \text{ kg/m}^3$ ) ise sahip olduğu basınç dayanımı ( $30 \text{ MPa}$ ) ve ısı iletkenlik katsayısı ( $0.58 \text{ W/mK}$ ) ile kıyaslandığında I. sınıf yapısal beton olarak sınıflandırıldığı bildirilmiştir (Liu vd. 2014). (Zhang vd. 2015) tarafından yapılan çalışmada; jeopolimer köpük betonların aynı yoğunlukta ve/veya aynı dayanıma sahip PÇ içeren köpük betondan daha iyi ısı yalıtım özellikleri gösterdiği belirtilmiştir. (Panesar, 2013), tarafından yapılan çalışmada; sentetik ve protein esaslı köpük ajanlarının hava kabarcıklarına etkileri ve ısı iletkenliğin karışımların hava içeriği ile bağlantılı olan yoğunluk artışı ile birlikte azaldığı vurgulanmıştır.

### 2.2.5.3 Yüksek sıcaklık direnci

Köpük betonun karışım bileşenlerine ve oranlarına göre geleneksel betona kıyasla daha iyi yüksek sıcaklık direnci sağladığı bilinmektedir. (Vilches vd. 2012), tarafından yapılan bir çalışmada; ultra hafif köpük beton yoğunluğunun artması ile yüksek sıcaklık direncinin artması,  $400 \text{ kg/m}^3$  yoğunluk için  $150 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa göre 3 kat daha fazla olması ve yeterli yüksek sıcaklık direnci için  $250 \text{ kg/m}^3$ 'ten daha yüksek bir yoğunlukta tasarımların yapılması gerektiği şeklinde ifade etmektedir.

### 2.2.6 Kullanım Alanları, Avantajları ve Dezavantajları

Hafif beton çeşitlerinin bazı şap ve koyulaştırıcılar ile zemin, çatı, duvar ve diğer yapı elemanları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı çeliğinin yangın ve aşınmaya karşı korunması veya mimari amaçlara yönelik bir kaplama malzemesi olarak hafif beton kullanılmaktadır (Davraz vd. 2021). Yine duvarların ve çatıların genel yalıtımı amacı ile de kullanılmaktadır. Diğer kullanım alanları arasında yakıt depoları, kanalizasyon boru hatları ve menfezler gibi boşlukların doldurulması bulunmaktadır.

Hafif beton kullanımının avantajları arasında ilk sırada birim hacim ağırlığın önemli ölçüde azaltılması ve takviyede tasarruf sağlamasıdır. Geliştirilmiş ısı iletkenlik ve yangın direnci özelliklerine sahiptir. Nispeten basit inşaat, prefabrik ünitelerin taşınması ve hızlı bir şekilde montajı, kullanılan kalıp miktarının azaltılması ve desteklenmesi konularında avantaj sağlamaktadır. Çoğunluğunun, ağır ve yüksek performanslı geleneksel betonlara göre daha iyi zımbalama ve kesme özelliklerine sahip olması ve ekonomik olması yanında daha az iş gücüne ihtiyaç duyulması diğer avantajlarıdır (Ismail vd. 2004).

Karışımlarda su miktarının oldukça önemli olduğu bazı karışımlarda agregaların çimento harcından ayrılarak yüzebileceği ve karıştırma süresinin uygun karışmayı sağlamak için geleneksel betona göre daha uzun sürmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Ismail vd. 2004).

### **2.3 Beton Üretiminde Kullanılan Lifler**

Betonarme yapı elemanlarının matrisi (ana kütlesi) oldukça küçük kırılma sünekliği gösteren çimentodur. Matrisin bu sınırlı olan kırılma sünekliği ve yine çok düşük olan eğilme mukavemeti değeri, yüzeye yakın bölgelerde istenmeyen çatlakların ortaya çıkmasına neden olur.

Liflerin varlığı çatlakların oluşmasını önlerken, büyük uzama değerinde çok sayıda, ince dağılımlı, gözle görülmeyen ve olumsuz etkileri göstermeyen zararsız çatlakların oluşmasına neden olur. Lifli betonlar, katkısız matrisli betona göre oldukça uygun bir şekil değiştirme ve aynı zamanda yüksek mukavemet özelliği gösterir (Halm, 1996).

Bentur ve Mindess; Philips ve Uğurlu, değişik liflerin çok önemli fiziksel ve mekanik özelliklerini (elastisite modülünü, çekme gerilmesini ve kırılma uzamasını) veren tabloları çıkarmışlardır. Bu tablolar toplanıp, tek bir tablo düzenlendiğinde aşağıdaki Tablo 2.7'de verilen tablo elde edilmektedir (Bentur ve Mindess, 2006; Phillips, 1989; Uğurlu, 1994).

Tablo 2. 7 Kullanılan lif türlerinin önemli fiziksel ve mekanik özellikleri

Lif Tipi	Çap (µm)	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (GPa, kN/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (GPa)	Kopma Uzunluğu (%)
Çelik	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-2,0
Cam	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Asbest	0,02-0,4	3,40	196	3,5	2-3
Asbest(Krisotil)	0,02-0,4	2,60	164	3,1	2-3
Polipropilen	20-200	0,9	5-77	0,5-0,75	8
Aramid(Kevlar)	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4
Karbon Tip I	9	1,90	380	1,8	0,5
Karbon Tip II	9	1,90	230	2,6	1,0
Naylon (Tip 242)	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Selüloz	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Akrilik	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietilen	-	0,95	0,3	0,7	10
Ağaç Lifli	-	1,50	71,0	0,9	-
Sisal Keneviri	10-50	1,50	-	0,8	3,0
Bor	-	2,63	379	2,76	-
Pamuk	-	1,50	4,8	0,4-0,7	3-10
Polyester	-	1,40	8,3	0,7-0,9	1,4
Pamuk-yün	-	1,50	6,9	0,4-0,7	10-25
Mineral yünü	-	2,70	69-117	0,4-0,8	0,6
Titanyum alaşımı	-	4,52	117	0,7	-
Hafif alaşım	-	2,69	72	0,5	-
Alümin	-	3,30	297	3	-
Polikristalin alümin	500-770	3,90	24,5	0,65	-
Grafit I	8	1,90	380-415	1,5-2,1	0,5
Grafit II	9	1,90	240-280	2,4-2,6	1,0
Çimento matrisi	-	2,50	10-45	3,7x10 <sup>-3</sup>	0,02

### 2.3.1 Çelik Lif

Çelik lif takviyeli betonun mekanik özellikleri lifin tipi (uzunluk/çap oranı, lif miktarı) ve numunenin boyutu, şekli, agreganın boyutu ve numunenin hazırlanış şekline etkilenir.

Geleneksel ekipman ve prosedürler ile yerleştirilebilen ve karıştırılabilen çelik lifli beton karışımlarında, tüm beton haminin %0,5 ile %1,5' i kadar hacimde lifler

kullanılır. Daha yüksek lifler (%2 ile 10), özel lif ilave teknikleri ve yerleştirme prosedürleriyle kullanılmaktadır. Ancak ilave dayanım yada dayanıklılığa ihtiyaç duyulan özel tekniklerle ayarlanabilecek uygulamalarda daha yüksek lif karışım yüzdesi verilebilmektedir.

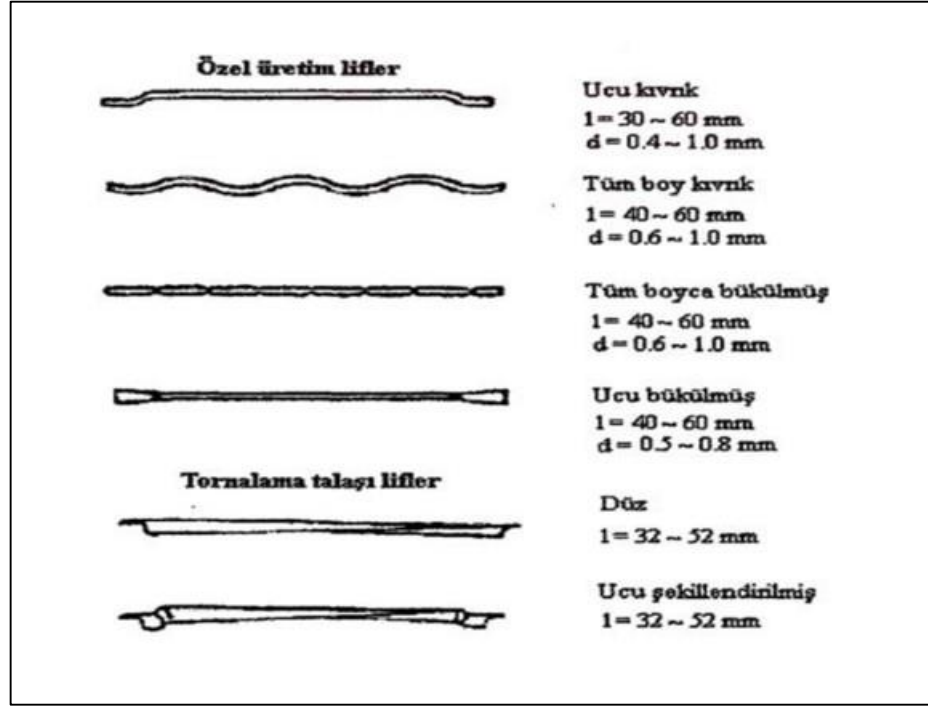
Lifler; tüm yetersiz modlarda beton ve hamurun mekanik özelliklerini; özelliklede direkt çekme, eğilme, çarpma ve kesme gibi yorulma ve çekmeye neden olan özellikleri etkiler. Liflerin dayanım mekanizması, eğer lif yüzeyi deforme olursa, lif ve matris arasında bağlantı kuran ya da kesme ara yüzeyiyle matristen life gerilme transferini kapsar. Gerilme, böylece matris kırılana kadar çekmede lif ve matris tarafından paylaşılır ve o zaman bütün gerilme devamlı liflere transfer edilir.

Çoğu araştırmalar, geleneksel karışım teknikleri kullanılırsa lifler, 100' den büyük bir boyut oranıyla çalışıldığında, genellikle beton karışımı yetersiz işlenebilirliğine ve üniform olmayan lif dağılımına sebep olur. Pratikte kullanılan birçok karışım, 100' den daha az boyut oranıyla lifleri çalıştırır ve kompozitin başarısızlığı öncelikle lif aderansı yüzündendir. Ancak, boyut oranı artmaksızın artan aderans direnci, eğri şekilli ve sonu ankrajlı liflerle sağlanır, kırılma liflerin bazılarını da kapsayabilir; ama genellikle aderans olumlu etkilenir (Kadir, 2015).

Eğer lifler çekmede kırılırsa oluşan hızlı kırılma normal betona kıyasla aşamalı ve sünektir. Genellikle; çelik lifler ne kadar sünek olursa beton kırılması da o kadar sünek ve aşamalı olur. Eğilmede çelik lifler tarafından sağlanan süneklik; yüksek dayanımlı lifler tavrlandığı zaman, metallerin kırılma dayanımını azaltan ve onları az da olsa yumuşatan tavlama işlemiyle arttırılabilmektedir. Bir anlamda; lif tipi ve miktarıyla, çelik lifli betonun mekanik özelliklerinin değişmesi, başarılı dizaynın önemli bir ifadesidir (ACI, 1989).

Çelik lifler değişik geometrik şekillerde piyasadan temin edilebilirler. Şekil 2.10 verilen örnekler seçilebilecek türdendir. Bunların seçiminde hiçbiri tam mükemmel olduğu fikri öne çıkmamalıdır.

Liflerin geometrik şekli hem çelik lifli betonun işlenebilirliğine ve hem de ulaşılan özelliklere büyük etkisi vardır. Farklı lif tipleri farklı amaçlara yöneliktir. Böylece, kullanıcı lifleri kendi amacına göre seçebilir (Schnütgen, 1992).



Şekil 2. 9 Çelik Lif Tipleri (Schnütgen, 1992)

### 2.3.2 Cam Lifler

Dikkatli bir inceleme yapıldığında, cam liflerin çimento matrisine karşı alkali direncinin artırılması gerektiği görülmüştür. Ağırlıkça %11 Na<sub>2</sub>O, %71 SiO<sub>2</sub>, %16 ZrO<sub>2</sub>, %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %1 LiO<sub>2</sub> kompozisyonlu cam lifi laboratuvar çalışmaları sonucu bulunmuştur.

Matriste puzolan kullanılırsa; çimento hidratasyonu sırasında ortaya çıkan Ca(OH)<sub>2</sub>' i ve diğer alkalileri bağlayarak, korozif alkali atıklarını azaltmada önemli rol oynamaktadır (Majumdar ve Laws, 1991).

Yüksek mekanik dayanım aranan ürünler Amerika' da "S" camı; Avrupa' da "R" camı olarak nitelenmektedir. Kompozit mukavemeti ve rijitliğini arttıran ub cins cam elyaf havacılık, uzay ve askeri alanlarda yüksek teknik performans gereksinimi nedeni ile kullanılmaktadır (Yıldız, 1998).

Çimento ile bağlanan malzemelerin uzun süreli cam lifi takviyesinde, liften matris içinde fiziksel ve kimyasal özellikler açısından, belli değişik şeyler istenir. Özellikle çimento ana kütle içerisinde liflerin bazik ortama dayanıklı olması gerekir. Bu surum ancak bazlara dayanıklı cam liflerin, yani yüksek zirkonyum içerikli cam liflerin kullanımı ve özel bir düzeltici katla kaplanmış liflerle sağlanabilir. Böyle lifler genellikle bazik ortama dayanıklı AR-lifleri olarak adlandırılır (AR=Alkali Resistant).

Yüksek çimento içeriği, cam liflerin bağlanmaması ve çimento tarafından tam olarak çevrelenmemesi için çimentonun birleştirici etkisinin yüksek olması ihtiyacından kaynaklanır.

Düşük olan çimento birleştirici madde oranları, yetersiz derecede bir lif kullanımına ve yapı elemanına etkiyen kuvvetin liflere yeterince aktarılamamasına neden olur. Nemli bir zeminde kullanılan cam lif takviye elemanı, sertleştirilmiş durumda hemen hemen hiç mukavemet artışı getirmez (Halm, 1996).

### **2.3.3 Polipropilen Lifler**

Polipropilen lifler, halen kullanımda olan geleneksel hazır beton güçlendiricilerine göre en güçlü alternatiflerden birisi olmuştur. Öyle ki, sahip olduğu karakteristikleri ile başta maliyetlere getirdiği düşme olmak üzere kullanım rahatlığı, hızlı imalat imkanı yaratması, çok uzun ömürlü oluşu ve diğer pozitif değerleri, çelik hasıra göre çok ciddi bir alternatif olmasını sağlamıştır.

Endüstriyel tesisleri, havaalanlarını, konutları ve yüzme havuzlarını da içine alan uygulama yerlerinde; çarpma ve aşında mukavemetini arttırırken, betonun geçirimsizliğini de arttırmaktadır. Lifler korozyondan etkilenmemektedir, ayrıca tuz ve alkalilere dayanıklıdır. İç güçleri yok ederek mikro çatlakları engellemekte ve buna bağlı olarak plastik gerilimini düşürmektedir. Böylece çelik hasırda %65' e kadar azalan plastik gerilme çatlakları, polipropilen lif kullanıldığında %72' ye kadar azalabilmektedir (Türker, 2000).

Katılmış betonda özellik değişimleri büyük oranda lif içeriğine bağlı kalır. Az oranda betona yapılacak olan katkılarda, lifler sadece çekme eğilimi gösterirken,

oldukça yüksek (%1 hacim oranının üzerindeki) lif içeriklerinde öncelikle süneklik özelliğini etkilerken, mekanik özelliklerin de iyileşmesini sağlar (DBV-Sachstandsbericht, 1996).

#### **2.3.4 Karbon Lif**

Çeliğin 2 veya 3 katı olan elastisite modülleri ve hafif yapıları ile karbon lifler yüksek dayanım ve rijitlik özelliği nedeniyle önce uzay teknolojilerinde kullanılmıştır. Bu liflerin beton içinde kullanılır hale gelmesi petrol ve kömür ziftinden üretilip maliyetlerinin azaltılmasıyla mümkün olmuştur. İplik biçimindeki liflerin her biri içinde 12000 tek lif vardır ve liflerin bir tanesinin çapı 5 µm kadardır. İlk ikisi daha fazla kullanılan üç tip karbon lif mevcuttur (Mindess vd. 1981).

- Poliaktrilonitril kökenli lif
- Zift kökenli lif
- Mitsui Mining oluşumu lif

#### **2.3.5 Bazalt Lif**

Bazalt lav kökenli bir kayadır. Yer kabuğunun yaklaşık olarak 1/3 kadarını kaplamaktadır. Dolayısıyla bulunması kolaydır ve ekonomiktir. Bazalt kaynağının kaliteli olması üretilecek lifin özellikleri için de önem taşımaktadır. Bazalt liflinin üretimindeki en önemli parametreler kayacın eritildikten sonra elde edilen lavın soğuma hızı, hava ile etkileşimi, kimyasal kompozisyonudur (Kocabeyoğlu, 2016, URL-1). Bazalt lifi aktif olarak Çin, Rusya ve Ukrayna'da yapılmaktadır (URL-2).

Volkanik kayalardan elde edilmesi sebebiyle bazalt liflerinin durabilite özellikleri yüksektir. Sıcaklığa karşı dirençlidirler (Kabay, 2014). Bazalt lifler bu özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklık etkisinde bulunan yerlerde, kimyasal olarak aktif olmayan ve aşınma direnci yüksek olan malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır (Militký vd. 2002). Bazalt liflerin üretiminde eritme işlemi yapılırken dışarıdan başka bir kimyasal katkı kullanılmaması ekonomiklik sağlamaktadır (Kabay, 2014).

Bazalt lifleri kimyasal bakımdan hava ve su ile reaksiyon vermeyen, aynı zamanda üretim süreci esnasında insan sağlığı ve çevre bakımından tehdit oluşturacak herhangi bir reaksiyon vermemektedir. Bu bakımdan çevre dostu bir malzemedir (Ketan ve Kulkarni, 2012; Kocabeyoğlu, 2016). Üretim süreçleri cam liflerine benzer olmasına rağmen mekanik ve kimyasal performansı göz önüne alındığında endüstri alanında cam liflerine göre öne geçmiş durumdadır (Kocabeyoğlu, 2016). Çekme dayanımı cam liflerden, kopma birim uzaması ise karbon liflerden daha iyidir (Hong ve Shin, 2003).

### 2.3.5.1 Bazalt liflerin üretimi

Bazalt lifleri bazalt kayaçlarının eritilmesi ile üretilir. Bazalt kayaçları çok ince bir şekilde küçük paralara bölünerek ince lifler üretilebilecek hale getirilirler. Bu süreç kısmen cam lifi üretim yöntemine benzemektedir (Militký vd. 2002; Sim ve Park, 2005). Bazalt liflerin üretim aşamaları aşağıdaki şekildedir (Kocabeyođlu, 2016),

- Bazalt kayaçları 5-20 mm civarında olacak şekilde kırılır.
- Kırılan malzemeler 1300-1700 °C civarında eritilirler.
- Eritilen bazaltlar çok ince deliklerden uçtan uca geçirilerek 9-15 mikron çapında bazalt lifleri üretilir.
- Lifler yağlanır ve makaralar üzerine sarılırlar (Şekil 2.10).



Şekil 2. 10 Makara üzerine sarılmış bazalt lifleri (Kocabeyoğlu, 2016)

### 2.3.5.2 Bazalt liflerin fiziksel özellikleri

Bazalt liflerin başlıca fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir (Kocabeyoğlu, 2016),

- Yüksek çekme dayanımı
- Radyasyon direnci
- Yüksek ısı direnci
- Yüksek ısı ve ses yalıtımı
- Sıkışma direnci
- Yüksek kayma mukavemeti.

Tablo 2.8’de tipik bir bazalt lifinin özellikleri verilmiştir (URL-3).

Tablo 2. 8 Bazalt lifinin tipik fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Çalışma Isısı Aralığı, °C	-269 – 700
Bağ Isısı, °C	1050
Termal İletkenlik, w/m °K	0,03-0,038
Çap, µm	7-15
Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>	2650
Elastik Modül, GPa	100-110
Çekme Dayanımı, MPa	4150-4800

Bazalt liflerinin orijininin volkanik kayalar olması doğası itibariyle termal stabiliteye sahip olmasını sağlamıştır. İnsan sağlığı ve çevre için bilinen herhangi bir risk içermemektedir. Yukarıda belirtilen birçok özelliği bir arada taşınması sebebiyle çoklu performans malzemesi olarak da tercih edilmektedir (Kocabeyoğlu, 2016). Bazalt kayacı sert ve yoğun bir malzemedir. Mohs sertliği 5-9 arasındadır (Di Ludovico vd. 2010).

Bazalt liflerin betonda ve harçlarda kullanılması maliyet açısından dezavantaj getirmemektedir. Hatta aynı görevi gören diğer malzemelere göre rekabetçi bir

üründür. Çimento ve beton içerisinde karıştırıldığında dağılması kolaydır. İşlenebilirliği olumsuz etkilememektedir, aynı zamanda hacim sabitliği, sızdırmazlık gibi özelliklerinde oluşmasında etkinidir (URL-3).

### 2.3.5.3 Bazalt liflerin kimyasal yapısı

Bazalt malzemesinin ana bileşenleri  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  ve demir oksitlerdir. Kayaç türüne göre kimyasal bileşenle ve miktarları farklılıklar gösterebilir. Bazalt liflerinin tipik kimyasal bileşimleri Tablo 2.9'de verilmiştir (Ramakrishnan vd. 1998).

Tablo 2. 9 Bazalt lifinin tipik kimyasal bileşimi (Ramakrishnan vd. 1998)

Bileşenler	Miktar (%)
$\text{SiO}_2$	49-54
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12-17
$\text{CaO}$	7-10
$\text{MgO}$	5-11
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	3-5
$\text{TiO}_2$	<3
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10-14

### 2.3.5.4 Bazalt liflerin kullanım alanları

Bazalt lifler bir çok farklı amaç için kullanılmaktadır. Kullanım alanları aşağıda verilmiştir (Militky vd. 2002);

- Tavan, çatı, duvar izolasyonu ve bina cephe yalıtımı olarak,
- Binalarda ve metal yapılarda yangın korunumu için,
- Buhar hatları, ısıtma sektörü, fırınlarda izolasyon malzemesi olarak ve ısıya dayanıklı malzeme üretiminde,
- Makine yapımında; kompozit malzemelerde, yapı malzemelerinde, kesici diskleri güçlendirmek için ızgaralarda, ses yalıtımı malzemelerinde, termal ekipmanların ısı yalıtımlarında, filtrelerinde, toz ve endüstriyel atık ve baca gazı temizlenmesinde,

- Otomotiv sektöründe; otomobil paneli, yalıtım kamaları, ekranları, lastik, fren balataları, plastik diğer malzemelerde, debriyaj balatası yapımında, yanmaz kompozitlerde kord üretiminde, yakıt tanklarında, LPG ve sıkıştırılmış doğal gaz tanklarında korozyon ve darbelere karşı, aşınmaya dayanıklı kaplama imalatında,
- Gemilerde; korozyona dayanıklı, güçlendirilmiş kaplamalarda, kompozit malzemelerde, deniz tesislerinde, gemi teknelerinde, perdelerinde ve üst yapı inşaatında,
- Vagonlarda; kompozit yapısal malzemelerde ve ürünlerde, yapısal plastik, yanıcı olmayan kompozit malzemelerde, elektrikli yalıtım malzemelerinde,
- Havacılık ve roketlerde; ısı, motor ve gövdelerinde, yapısal kompozitlerinde, yüksek ısıya dayanıklı malzemelerinde ve ses yalıtımında,
- Enerji alanında; buhar kazanlarında, türbinlerde, ısıtmalarda, yüksek elektrik alanlarında yalıtım malzemesi olarak, ekipmanın ısı yalıtımında, taşıyıcı yüksek gerilim hatlarında,
- Nükleer enerji alanında; yanmaz yalıtım ve inşaat malzemelerinde, yangın kapılarında ve kablo geçişlerinde rasyasyondan korunmak için,
- Elektronik sanayiinde; devrelerde, elektrik yalıtım malzemelerinde, elektronik cihazların üretiminde,
- Kimya endüstrisinde; borularda, depolama tanklarında, aşındırıcı sıvılarda, asitlere, alkalilere, kimyasal gübrelere, toksik maddelere dayanıklı materyallerin ve ürünlerin üretiminde. Tanklarda, boru hatlarında, çelik yapılarda, betonarme yapılarda kimyasala dayanıklı koruyucu kaplama olarak, toz ve endüstriyel atık su filtrasyonunda, filtrelerde, yüksek sıcaklık filtrelerinde,
- Petrokimya sanayiinde; kimyasallarda ve tanklarda, boru hatlarında, petrol boru hatlarında dayanıklı koruyucu kaplama olarak, yanmayan kaplamalarda ve

kompozit malzemelerde, ateşe dayanıklı kompozit malzemelerde, petrol boru hatları için borularda,

- Metalürji alanında, demirsiz metal eritme fırınları ve kemerlerinde, kapılarda, termal ekipman yalıtım malzemelerinde, fırınlarda, ısı geri kazanımlarında, boru hatlarında iletişim hatlarında, kalıplama sırasında erimiş metallerin filtrasyonunda, maden işlemlerinde ve metalürjik bitkiler üzerindeki toz ve egzoz gazlarının temizlikleri için kullanılan filtrelerde, su arıtma filtrelerinde,
- Kriyojenik makina ve ekipmanlarında; sıvılaştırılmış gazların üretiminde ve bunların termal yalıtım malzemelerinde,
- İnşaat malzemeleri üretiminde; bina inşaatlarında ve plastik kaplamalarda sıva takviye örgülerinde, prefabrik binalarda ve yapıların tavanları için yalıtımlı panellerde, asma tavanlarda, yangın perdelerinde, güvenlik duvarlarında, yangın kapılarında, plastik yapılarda, köprü, tünel, demiryolu ve metro inşaat malzemelerinde (Şekil 2.11),
- Güçlendirme malzemelerinde; yollarda asfalt betonu kaplama üretiminde, havaalanı ve pistinin yapımında, çatı malzemelerinde. Hidrolik mühendisliği alanında sulama malzemelerinde, baraj inşaatı için malzemelerde, yüksek binalarda ve endüstriyel tesislerin yapımı için kullanılan malzemelerde, liman tesislerinde, deniz platformlarında,
- Tarım alanlarında; depolama, ilaçların ve sıvı kimyasal gübrelerin taşınması için toprak kaplar geliştirmek üzere kullanılan ızgaralarda, fide, büyüyen bakteri kültürleri ve diğer bitkiler için hidroponik için malzeme üretiminde,
- Kamu hizmetlerinde; su arıtma tesisleri, su temini ve atık sular için üretilen büyük çaplı boruların üretimindeki malzemelerde. Hava ve sıvı arıtmaların, evsel atık su arıtma tesislerindeki filtrelerinde,
- Ev aletlerinde, yalıtım, sıhhi tesisat, gaz ve elektrik dolaplarında, fırınlarda, elektrikli fırınlarda,

- Havacılık ve uzay alanında; ısı, motor ve ses yalıtımı için üretilen kumaşlarda, uzay araçlarında,
- Filtrelerde; yaygın filtre malzemesi ve ürün olarak, hava ve sıvının ince filtrelerinde, yüksek sıcaklıkta filtre üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 2. 11 Demiryolu döşemesinde bazalt lif kullanımı (URL-3)

#### 2.4 Kalsiyum Alüminat Çimentolu Köpük Beton Uygulamaları

Çetin vd. (2015), tarafından yapılan çalışmada; 300, 400 ve 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı içeren köpük beton numunelerinin hızlı ve yüksek erken dayanım kazanımı incelenmiştir. PÇ ile birlikte kullanıldığında hem yüksek dayanım hem de çok kısa priz süresi elde edilen KAÇ'nin köpük beton blokları şeklinde kullanımı değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde farklı Portland çimentosu/KAÇ dayanım değerleri ve kuru haldeki numunelerin ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. KAÇ içeren karışımların dayanımlarında ise PÇ ile önemli bir fark görülmemiştir. Numunelerin katılma süreçleri takip edilmiştir. Kullanılan ISIDAÇ 40 (KAÇ) katkılı numunelerin kalıptan daha çabuk söküldüğü ve süre farkının 1 güne kadar ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Sabit s/ç oranının ve köpük yoğunluğunun sağlandığı ortamlarda K miktarının artışı basınç dayanımını, köpük yoğunluğunu ve ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü görülmüştür.

Erkmen (2018), tarafından yapılan çalışmada; mineral katkıları eklenerek mekanik olarak kararlı bağlayıcı kombinasyonlar oluşturulması hedeflenmiştir. Mineral katkıların farklı sıcaklıklarda kürlenmiş KAÇ içeren çimento harçlarının

hidratasyonuna ve dayanım gelişimine etkileri kalorimetri, X-Işını Kırınımı yöntemi ve dayanım deneyleri ile tespit edilmiştir. Hidratasyon reaksiyonlarının yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleştiği görülmüştür. Çimento karışımında uygun miktarda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmasının farklı kür sıcaklıklarında dayanım kayıplarını önleme açısından faydalı olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak buna benzer açık bir etki uçucu kül içeren bağlayıcılarda görülmemiştir.

Şengül (2018), tarafından yapılan çalışmada; KAÇ'nin kısa sürede yüksek dayanım kazanmasına karşılık neme ve sıcaklığa bağlı olarak yarı kararlı kalsiyum alüminat hidratlarının bozunması sebebiyle önemli oranda yaşadığı dayanım kaybını azaltmak veya tamamen durdurmak adına stratlingit oluşumunu sağlamak için ülkemizde çokça bulunan bir silis kaynağı kullanılması amaçlanmıştır.

Alpaslan (2019), tarafından yapılan çalışmada; farklı polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıların KAÇ'nin kıvam ve kıvam koruma yeteneği üzerine etkileri araştırılmıştır. İlk olarak, katkılı ve katkısız çimento harçlarının kıvam testleri yapılmıştır. Reometrede çalışmaya uygun kıvamdaki çimento harçlarına uygulanan akma protokolü, zamana bağlı olarak su ile çimento karıştıktan hemen sonra ve ardından 30, 60 ve 90 dakika sonunda tekrarlanmıştır. Deneyler sonuçlarına göre katkısız halde reometrede işlenemeyecek kadar kuru kıvamda olan s/ç oranlarında polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile işlenebilir bir kıvam elde edildiği ve bu kıvamın uzun süre korunduğu gözlemlenmiştir.

Aydın (2019), tarafından yapılan çalışmada; KAÇ'nin kimyasal ve mineralojik özellikleri ile erken priz alma süresi, eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. KAÇ'nin kimyasal ve mineralojik özellikleri ile erken priz alma süresi, eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler lineer regresyon tekniği ile belirlenmiştir. Ayrıca KAÇ numunelerinde %12-32 oranlarında amorf faz tespit edilmiştir. Blaine test sonuçları ile elek analizi sonuçları birbirini destekleyerek PÇ, KAÇ'ye göre daha ince boyutlu tanelerden oluştuğu gözlemlenmiştir.

Ramamurthy ve Narayanan (2000), tarafından gazbetonun yapısı ve özelliklerine yönelik yapılan çalışmada; gözenek oluşumunun ve kürlenme şeklinin betonun iç yapısı ve özellikleri üzerinde etkili olduğu, kimyasal özelliklerin kürlenme şekliyle değiştiği, yoğunluğun beton özelliklerini etkilediği, otoklav kullanımında kuruma rötresinin daha düşük olduğu ve otoklav kullanılmadığı durumdakinin %20-25 oranlarına kadar değiştiği ve havalandırılmış betonun olumlu fonksiyonel özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir.

Nambiar ve Ramamurthy (2009), tarafından yapılan çalışmada; köpük betonda büzülmeyle ilişkin çalışmaların az sayıda olması sebebiyle yoğunluk, nem içeriği, köpük hacmi, agrega/çimento oranı, uçucu kül/kum ikame oranı ve kuruma büzülmesi gibi temel özellikler üzerine odaklanılmıştır. Agrega/çimento oranı artarken büzülmenin azaldığı belirtilmiştir ve daha yüksek agrega/çimento oranı için daha düşük büzülme değeri elde edildiği bildirilmiştir.

## **2.5 Bazalt Liflerin Çimento Esaslı Malzemelerde Kullanımı**

Branston vd. (2016a), ince kıyılmış bazalt lifleri kullanılan betonların erken yaş plastik rötre çatlakları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Testler kısıtlanmış ve kısıtlanmamış örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları kısıtlanmamış rötrenin derecesinde bazalt lifi kullanımı ile azalma olduğunu göstermiş ve bazalt liflerinin çatlak önlemede etkin olduğu görülmüştür ve aynı zamanda çatlak oluşumunu kısıtlamıştır. Araştırma sonuçları ileriki yaşlarda su/çimento oranının azalmasıyla mekanizma daha belirgin bir hale gelmiştir.

Iorio vd. (2018), bazalt liflerin durabilitesini ve çimento matrisi ile aderansını artırmak için lif yüzeyini aminosilanlar ile kaplamışlardır. Liflerin üzerinde normalde var olan yüzey uygulaması kaldırılmış ve yerine yüzey işlemleri uygulanarak ve aktifleştirilerek silanol yenilemesi yapılmıştır. Kontrol lifleri, kalsine lifler, yüzeyi aktifleştirilmiş lifler, silanlanmış lifler gibi lif çeşitleri kullanılarak çeşitli incelemelerde bulunulmuştur. Muhtemel beton katkısı olabilecek bu lifler derin bir incelemeye tabi tutulmuş ve XRD, FTIR gibi yöntemler kullanılmıştır. Sonuçlar malzemenin yüzeyinin kaplanması için kullanılan aminosilanlarda trietoksilan

miktarının artmasının yüzeyde daha fazla organik malzeme depolanmasını, yüzeyin daha heterojen olmasını sağladığı görülmüştür. Bu durumun matris ve lif arasındaki aderansı artıracak bir sonuç olduğu ortaya konmuştur.

Larrinaga vd. (2014), harç örneklerin içerisine tek, iki, üç ve dört kattan oluşan bazalt lifi tabakası yerleştirmişlerdir. 31 seri örnek üretilmiştir. Üretilen örneklerin eğilme dayanımı testleri gerçekleştirilmiş ve gerilme değerleri, uzama değerleri ve elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen verilen Aveston-Cooper-Kelly (ACK) teorisi ve 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ile modellenmiştir. Lif katmanının artması elastisite modülünü sürekli artırmış, en iyi gerilme değeri ise çift katlı lif kullanılan örnekten elde edilmiştir. Aynı şekilde ilk çatlak oluşumdaki maksimum şekil değiştirme değeri de çift katlı örnekten elde edilmiştir. Maksimum toplam şekil değiştirme değeri ise tek katlı bazalt lifi kullanılan örnekten elde edilmiştir.

Jiang vd. (2014), bazalt liflerinin hacimsel oranı ve uzunluklarının liflerle güçlendirilmiş betonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bunun için 12mm ve 22mm boyutlarında iki farklı boyda bazalt lifi kullanmışlardır. Her bir liften hacimce %0; 0,05; 0,1; 0,3 ve 0,5 oranlarında kullanılmıştır. Örneklere basınç, yarmada çekme ve eğilme testleri uygulanmıştır. Sonuçlar 12mm boyunda bazalt lifi kullanıldığında basınç dayanımı %0,18-%4,68, yarmada çekme dayanımı %14,08-24,34 ve eğilme dayanımı %6,30-9,58 kadar artmıştır. 22mm boyutunda lif kullanıldığında ise basınç dayanımı %0,55-5,72, yarmada çekme dayanımı %14,96-25,51 ve eğilme dayanımı %7,35-10,37 oranlarında artmıştır. Erken yaşlarda bazalt lifi ile matris arasındaki bağın kuvvetli olduğu ancak bu bağın ilerleyen yaşlarda bozulduğu görülmüştür. Ayrıca örnekler cıvalı porozimetre cihazı ile incelenmiş ve bazalt lifi kullanımının boşluk miktarını artırdığı gözlenmiştir.

Lipatov vd. (2015), %0'dan %7'ye kadar zirkonyum dioksit içeren bazalt liflerinin alkali çözeltiler içerisindeki kütle ve çekme dayanımı kaybını incelemiştir. En iyi sonuç %5,7 oranında zirkonyum dioksit içeren bazalt liflerinden elde edilmiştir. Alkali uygulanması lifin yüzeyinde koruyucu bir tabaka meydana gelmesine neden olmuştur. Zirkonyum dioksit katılmış bazalt liflerin alkali dayanımının lifteki tabakada bulunan çözünmeyen  $Zr^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$  ve  $Mg^{2+}$  bileşenlerinden kaynaklandığı görülmüştür.

Bhat vd. (2017), bazalt liflerle güçlendirilmiş polimerlerin basınç altında yapısal yangın dayanımları incelenmiştir. Deney sonuçları cam lifi kullanılan örnekler ile karşılaştırılmıştır. Bazalt lifi içeren örneklerin soğurma katsayısının cam lifi içeren örneklere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bazalt lif içeren örneklerin yüksek ısıtılma oranlarında daha hızlı yanal deformasyonlar yaptığı görülmüştür. Ancak gelen olarak yapısal bütünlüğün bazalt lifi içeren örneklerde daha kalitesiz olduğu görülmüş ve bu durum bazalt liflerinin yüksek soğurma katsayısına bağlanmıştır.

Kabay (2014), bazalt lifi içeren betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 0,45 ve 0,60 su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı ve normal dayanımlı betonlar üretilmiştir. 12mm ve 24mm boyutlara sahip iki tür bazalt lifi kullanılmıştır. Bu lifler karışımda 2 kg/m<sup>3</sup> ve 4 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere iki farklı oranda kullanılmıştır. Bazalt lifi kullanımının basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Lif boyunun iki katına çıkması ise basınç dayanımına katkı sağlamıştır ancak yine de referans değerinin altında kalmıştır. Eğilme dayanımı ile lif kullanımı ile iyileşmiştir. Aynı zamanda bazalt lifleri kırılma enerjisinin belirgin biçimde artmasına neden olmuştur. Lif miktarının artması maksimum yükü, kırılma enerjisini ve deformasyon miktarını artırmıştır. Bazalt lifi kullanımı beton örneklerin aşınma değerlerinde %2-18 kadar bir azalma meydana getirmiştir.

Kizilkanat vd. (2015), yüksek performansı betonlarda bazalt lifi ve cam lifi kullanımı araştırmış ve karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre lif katkısının betonun basınç dayanımına ve elastisite modülüne belirgin bir katkısının olmadığı görülmüştür. Ancak yarmada çekme dayanımı bazalt lifi miktarının artmasıyla artmıştır. Cam lifi ise yarmada çekme dayanımına %0,5 katkı miktarından daha yüksek oranda kullanıldığında herhangi bir katkıda bulunamamıştır. Aynı şekilde eğilme dayanımı sonuçları da bazalt lifi kullanımı arttıkça dayanım değerlerinin arttığını göstermiştir. Cam lifi ile karşılaştırıldığı bazalt lifinin çatlak direnci ve süneklik açısından beton performansını daha fazla artırdığı görülmüştür.

Branston vd. (2016b), iki tür bazalt lifini farklı oranlarda kullanarak eğilme ve çapma dayanımını araştırmışlardır. Liflerin ara yüz özelliklerini SEM görüntülemesi ile incelemişlerdir. Çalışmada demet lifler ve mini bar şeklinde iki tür bazalt lifi

kullanılmıştır. Mini bar lifler 43mm boyundadır. Demet lifler 36 mm ve 50 mm olmak üzere iki boydadır. Demet lifler hacimce %0,15; 0,31 ve 0,46 oranlarında kullanılırken, mini bar lifler %0,31; 1 ve 2 oranlarında kullanılmıştır. Her iki lif türünde de yüksek oranlarda lif kullanımı işlenebilirlik problemlerine yol açmıştır. Demet lifler ilk çatlak dayanımını etkilese de çarpma dayanımını çok fazla etkilememişlerdir. Uzun demet lifler daha etkili bulunmuştur. Mini bar lifler ise hem eğilme hem de çarpma dayanımı üzerinde etkili olmuştur. Demet liflerin kırılma sonrası çatlak performansı üzerine ciddi bir etkisi görülmezken mini bar lifler etkin olmuşlardır. Demet lifler lif göçmesi sebebiyle kırılırken, mini bar lifler içeren örneklerin lif sıyrılması sebebiyle kırıldığı görülmüştür.

Dong vd. (2017), yaptıkları çalışmada geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonlarda bazalt liflerinin performanslarını incelemişlerdir. Çalışmada geri dönüşüm agregaları %0; 50 ve 100 oranlarında kullanılırken bazalt lifleri 0; 2 ve 4 kg/m<sup>3</sup> oranlarında kullanılmıştır. Üretilen örneklerin üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı incelenmiştir. Sonuçlar geri dönüşüm agregası içeren betonların mekanik özelliklerinin bazalt lifleri kullanılarak iyileştirilebileceğini göstermiştir. SEM görüntülemeleri bazalt liflerinin boşluklarda ve yüzeyde biriktiğini sadece dayanımı değil ara yüz fazının mikro yapısını da iyileştirdiğini göstermiştir. Böylece dayanım ve süneklik değerleri de artmıştır.

Katkhuda ve Shatarat (2017), geri dönüşüm agregası kullanılan betonlarda mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla hacimce %0,1; 0,3; 0,5; 1 ve 1,5 oranlarında bazalt lifi kullanımını araştırmışlardır. Geri dönüşüm agregaları yüzeyde kalan harç artıklarının yok edilmesi için yüzey işlemine tabi tutulmuş ve 24 saat boyunca 0,1 M hidroklorik asit çözeltisi emmesi sağlanmıştır. Sonuçlar bazalt liflerinin basınç dayanımını çok az bir şekilde etkilediğini ancak eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını ciddi şekilde etkilediğini göstermiştir. Normal betondaki yarmada çekme ve basınç dayanımını yakalamak için optimum bazalt lifi miktarı yüzey işlemi görmemiş geri dönüşüm agregalı betonlar için %0,5 ve yüzey işlemi görmüş geri dönüşüm agregalı betonlar için ise %0,3'tür. Aynı değerlerin eğilme dayanımı için ise %0,3 ve %0,1 olduğu görülmüştür.

Afroz vd. (2017), bazalt liflerin kimyasal performansını incelemek için 62 gün boyunca 12 farklı çözelti emdirmişlerdir. Liflerin kırılma modelleri ve hasar özellikleri SEM yöntemi ile incelenmiştir. EDX kullanılarak kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Uzun süreli kütle koruma durumları ayrıca değerlendirilmiştir. Bu liflerin betonda performanslarını incelemek amacıyla normal çimentolu beton ile ve yüksek oranda uçucu kül içeren betonlar üretilerek testler gerçekleştirilmiştir. Mekanik test sonuçları modifiye edilmiş bazalt liflerin dolaylı çekme ve eğilme özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Bazalt liflerinin uzun süreli klor ve sülfat etkisine dayanıklı olduğu görülmüştür. Ancak  $\text{Ca(OH)}_2$  ve NaOH ortamlarında zarar gördükleri ve yüzey özelliklerinin değiştiği tespit edilmiştir.

Zhao vd. (2018), betonda bazalt lifi kullanımının donma-çözünme direnci üzerine etkisini incelemişlerdir. Donma-çözünme çevrimlerinin betonun elastik deformasyon kapasitesini düşürdüğü görülmüş ve bu hasarı azaltma üzere bazalt lifleri kullanılmıştır. Normal betonda karışımda  $2,0 \text{ kg/m}^3$  oranında bazalt lifi kullanılması en iyi eğilme dayanımı sonucunu vermiştir. Ancak donma-çözülme etkisi liflerin betondaki performansı üzerinde etkili olarak hasar üzerinde liflerin etkisini azaltmıştır. Donma-çözülme etkisi ile betonun eğilme dayanımı düşerken lif içermeyen durumlara göre yine de bazalt lifi kullanılması dayanım üzerine etkili olmuştur.

Ma ve Zhu (2017), beton içerisinde nano silika ve bazalt liflerinin birlikte kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada %0; 0,6; 1,2 ve 1,8 oranlarında nano silika, 0; 2; 3; 4 ve  $5 \text{ kg/m}^3$  oranlarında ise bazalt lifi kullanılmıştır. Nano silika kullanımı ile CSH jellerinin miktarında artış görülmüş, %1,2 oranı ise optimum miktar olarak belirlenmiştir. 3 ve  $4 \text{ kg/m}^3$  oranında bazalt lifi kullanımı lifler ile matrisin iyi bir şekilde tutunmasını sağlamış ve yarmada çekme dayanımı değerlerinin yüksek olmasına neden olmuştur. Ancak lif oranının  $5 \text{ kg/m}^3$ 'e çıkması bu bağı zayıflatmıştır. Araştırma sonuçlarına göre her iki malzemenin optimum dozajı %1,2 nano silika ve  $3 \text{ kg/m}^3$  bazalt lifi olarak belirlenmiştir. Bu durumda basınç dayanımının %9,04 ve yarmada çekme dayanımının %17,42 oranında arttığı görülmüştür.

Niaki vd. (2018), epoksi bazlı polimer betonların mekanik özelliklerinin bazalt lifleri ve nano kil tanecikleri kullanımı ile iyileştirilmesini araştırmışlardır. Kıyılmış bazalt

liflerinin basınç, eğilme, yarmada çekme ve çarpma dayanımları aynı zamanda 250 °C'ye kadar ısı dirençleri incelenmiştir. Bazalt liflerinin mekanik özellikleri ve termal stabiliteyi iyileştirdiği görülmüştür.

Alnahhal ve Aljidda (2018), yapı yıkıntılarında meydana gelen geri dönüşüm agregaları ile üretilen betonlarda makro bazalt lifleri kullanarak betonun eğilme davranışı ve maksimum yükünü arttırmak üzerine deneysel ve analitik bir çalışma yapmışlardır. 16 seri betonarme kiriş üretilmiş ve eğilme testine tabi tutulmuşlardır. Geri dönüşüm agregası oranı ve lif oranı gibi parametreler incelenmiştir. Deney sonuçları makro bazalt lifi kullanımının kirişlerin eğilme kapasitelerini artırdığı ancak geri dönüşüm agregası kullanımının sonuçlar üzerine bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Quattrociochi vd. (2015), bazalt lif katkılı harçların fiziksel, mekanik ve içyapı özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı testleri yapmışlardır. Değişik özelliklere sahip bazalt lifleri farklı oranlarda kullanarak üretilen harçların mekanik davranışları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda; Bazalt lif katkılı harçların lif içermeyen normal harçlara göre eğilme ve basınç dayanımlarında iyileşme görülmüştür. Bunun durum matris dayanımının ve lif içeriğinin etkisinin büyük olduğu vurgulanmıştır. Kısa liflerin harç numunelerin yüzey sonlandırma işleminde iyileşme gösterdiği ifade edilmiştir. Ayrıca liflerin matris içerisinde homojen dağılması ile mekanik etkilerinin arttığı ifade edilmiştir. Yapısal uygulamalarda bazalt lif kullanımında; dayanım ve tokluk üzerindeki iyileşmeleri aynı anda sağlaması gerektiği belirtilmiştir.

Wojciech (2012), alkali ortamda bazalt lif dayanımını ve bazalt lif katkılı harçların kırılma davranışı, basınç ve eğilme dayanımı incelenmiştir. Bazalt lifi iki farklı uzunlukta ve 3 farklı oranlarda harç numunelerinde kullanılmıştır. Liflerin boyları 5mm ve 12mm olacak şekilde seçilmiştir. 0,4; 1; 2 kg/m<sup>3</sup> miktarlarında bazalt lifi içeren harçların 3, 7 ve 28 günlük mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bazalt lif katkısı eğilme dayanımında yaklaşık olarak %20 oranında artış, basınç dayanımında ise %15'e kadar düşüş meydana geldiği belirtilmiştir. Bu durum lif içeriğinin etkisinin daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. 10 gün boyunca 60 °C'de %10 sodyum hidroksit çözeltisinde bekletilen bazalt liflerin yüzeyinde ve çapında bozulmalar olduğu

belirtilmiştir. Yapılan içyapı incelemelerinde ve ED-XRF spektrometre analizi liflerin yüzeyinde polimer katmanı varlığı olmadığını doğrulamıştır. Çimentonun matrisinin alkali ortamda bozulmasını liflerin koruyabildiğini ve matris bazalt lif arasındaki bağın buna etkili olduğu görülmüştür.

Asprone vd. (2014), yüksek dinamik yükleme şartlarına karşı etkisini incelemek için bazalt lif katkılı doğal hidrolik harcın dinamik davranışını araştırmışlardır. Numunelerin iç ve boşluk yapısını incelemek için SEM analizi ve civa porozimetre testleri yapılmıştır. Ayrıca yarı-statik eğilme ve çekme deneyleri yapılarak dinamik artış faktörleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Lif katılmasıyla köprüleme etkisinden dolayı lif katkılı harç, normal harca kıyasla daha sünek bir davranış ve daha yüksek tokluk göstermiştir. Ayrıca lif eklenmesi ile porozite değerleri artmış ve daha gözenekli bir yapı oluşmuştur. Mekanik yarı statik eğilme ve basınç testleri ile lif oranı arttıkça lif katkılı harcın dayanım değerleri düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca şekil değiştirme oranı arttıkça kırılma enerjisi arttığı ifade edilmiştir. Bazalt lif katkılı çimento esaslı harçların iyi dinamik, mekanik özellikler ve dinamik yükleme koşullarına karşı koymak için iyi bir yapı malzeme olabileceği vurgulanmıştır.

Fenu vd. (2016), bazalt ve cam lifi katkılı çimento esaslı harçlarının dinamik davranışları araştırılmıştır. Aynı boyutlardaki lifler farklı oranlarda kullanılarak harç numuneleri üretilmiştir. Bazalt ve cam lifi ilavesiyle eğilme dayanımı önemli derecede artış gösterirken ve dinamik (çekme) dayanımında artış görülmemiştir. Fakat ancak dinamik yükleme altında tepe yükü davranışında iyileşme gözlemlenmiştir. %5 oranında bazalt lif katkılı harçların kırılma enerjisinde referans harca (lifsiz) oranla 2,2 kat artış elde edilmiştir. %3 oranında bazalt lif katkılı harç numunelerde; tepe yükünde iyileşme gözlenmiş, fakat toplam enerji yutma miktarında değişme gözlenmemiştir. Yüksek şekil değiştirmelerde dinamik yüklemeler altında aynı uzunluk ve çaptaki lifler için bazalt liflerin cam lifine oranla daha az performans gösterdiği vurgulanmıştır.

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1 Materyal

##### 3.1.1 Çimento

Yapılan çalışmalarda, Çimsa çimento fabrikasından temin edilen ÇİMSA RECIPRO 40 çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1’de

Tablo 3. 1 ÇİMSA RECIPRO 40 çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler	Çimento Değerleri (%)	Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
SiO <sub>2</sub>	3,66	Özgül Ağırlık		3,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38,82	Özgül Yüzey (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	3000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,21	Priz Başlangıcı	Dakika	275
CaO	36,32	Priz Sonu	Dakika	290
MgO	0,69	Kıvam Suyu	%	23,1
SO <sub>3</sub>	0,05	Hacim Sabitliği ( Le Chatelier)	mm	1,0
Kızdırma Kaybı	0,21	0,045 mm Elek Bakiyesi	%	23,0
		0,090 mm Elek Bakiyesi	%	6,5
		6 saat Basınç Dayanımı	MPa	47,6
		24 saat Basınç Dayanımı	MPa	69,3

##### 3.1.2 Agregası

Yapılan çalışmalarda, ince agregası olarak 500 µm altı atık mermer tozu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan agregası Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1 Atık mermer tozunun genel görünümü

### 3.1.3 Karışım Suyu

Karışımın üretimi ve kürlenme sürecinde Kastamonu Üniversitesi kampüsündeki içilebilir nitelikte, betona zararlı olabilecek organik madde ihtiva etmeyen ve sıcaklığı  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  sıcaklığında TS-EN 1008 standartlarına uygun şebeke suyu kullanılmıştır. Karışım ve kür de kullanılan suyun özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3. 2 Karışım ve kür de kullanılan suyun özellikleri

Analizler	Deney Sonuçları	Limit Değerler
Koku	Yok	Yok
Amonyum (mg/L)	0,02	
İletkenlik (mS/cm)	<2500	0- 2500 (TS 97, 2019)
Ph	7,93	

### 3.1.4 Bazalt Lif

Yapılan çalışmalarda kullanılan bazalt lif Şekil 3.2’de gösterilmiş olup mineral kökenlidir. Kullanılan bazalt life ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler ile ilgili bilgiler Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3. 2 Bazalt lif genel görünümü

Tablo 3. 3 Bazalt liflerin kimyasal kompozisyonu (Nataraja vd. 2000)

Bileşenler	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
%	49-54	12-17	7-10	5-11	3-5	< 3	10-14

Tablo 3. 4 Bazalt lifin fiziksel ve mekanik özellikleri (Nataraja vd. 2000)

Kullanılan Lif	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
Bazalt	0,015	4840	89	2800

### 3.1.5 Köpük Ajanı

Köpük üretebilmek için organik reçine esaslı bir ajan kullanılmıştır. Köpük maddesi, anti bakteriyel, enzim bazlı, aktif proteinlerden oluşmaktadır. Yoğunluğu 120 g/l'dir. Köpükler beton içerisinde birbirinden bağımsız kapalı hücreler oluşturur.

## 3.2 Metod

### 3.2.1 Köpük Beton Numunelerinin Üretimi

Numuneler Kastamonu Üniversitesi MYO İnşaat Atölyesinde hazırlanmıştır. Tablo 3.5'te gösterildiği gibi bazalt lifi 0-1-2 oranlarında ve %30-%40-%50 köpük oranlarıyla Tablo 3.6'de gösterildiği gibi toplamda 9 seri üretim yapılmıştır. Bunlardan 3 adet eğilme dayanımı ve 6 adet 40\*40\*160 mm numune basınç dayanımı için, 3 adet

25\*25\*285 mm numune kuruma büzülmesi için, 3 adet 25\*25\*285 mm numune sodyum sülfat genişmesi için, deney olarak 3'şer adet 40\*40\*160 mm numune H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HCl için, 3'şer adet 300-600-900-1200 °C hava ve su soğutmalı yüksek sıcaklık için, 3'er adet 50\*50\*50 mm küpler arşimet ve kapilerite deneyleri için, 3 adet 20\*30\*50 mm ısı iletkenlik için dökülmüştür.

Tablo 3. 5 Karışım değişkenleri

Mix ID	Bazalt lifi	Köpük
1	0	30
2	1	
3	2	
4	0	40
5	1	
6	2	
7	0	50
8	1	
9	2	

Tablo 3. 6 Karışım Hesapları (kg/m<sup>3</sup>)

Mix ID	Çimento	Agrega	Su	Köpük	Lif	S/Ç
1	350	1252	262,5	30	0	0,75
2		1226			26	
3		1200			52	
4		1122		40	0	
5		1096			26	
6		1070			52	
7		992		50	0	
8		966			26	
9		940			52	

Taze köpük betonlar Tablo 3.6'de yer alan malzeme miktarları kullanılarak aşağıdaki işlem basamakları ile hazırlanmıştır.

- İlk olarak çimento ve karışım suyu düşük hızda 1 dakika ardından yüksek hızda 1 dakika karıştırılmıştır.
- Hazırlanan çimento pastası 1 dk dinlendirilmiştir.

- Hazırlanan köpük pastaya eklenerek 1'er dakika düşük ve yüksek hızlarda karıştırılmıştır.
- Tartılan agregaya eklenerek 1'er dakika düşük ve yüksek hızlarda karıştırılmıştır.
- Bazalt lif karışımına ilave edilerek 1'er dakika düşük ve yüksek hızlarda karıştırılmıştır.
- Karıştırma işlemi sonrasında taze harç özelliklerini belirlemek için yayılma tablasında yayılma çapı ölçülmüştür.
- İşlemleri tamamlanan karışım kalıplara yerleştirilmiştir.

### 3.2.2 Taze Hal Özellikleri (Yayılma)

Köpük betonların yayılma çapları ASTM C 1437 standardına göre belirlenmiştir. Köpük betonların yayılma çapları X ve Y doğrultusunda ölçülerek tespit edilmiştir. Numunelerin yayılma çaplarını ölçmek için Şekil 3.3'te verilen yayılma tablası kullanılmıştır.



Şekil 3. 3 Yayılma tablasının genel görünümü

### 3.2.3 Fiziksel Özellikler

Köpük betonların su emme, porozite ve birim hacim ağırlık özelliklerini belirlemek amacıyla 50\*50\*50 mm boyutlu küp numuneler ile ASTM C 642 standartına göre arşimet deneyi yapılmıştır. 28 gün boyunca su küründe bekleyen numunelerin dayanımını alması ve suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır. Bu işlemin ardından

numunelerin arşimet terazisi yardımıyla su içindeki ağırlığı belirlenmiştir. Suyu doygun bu numunelerden kuru bez yardımıyla doygun kuru yüzey elde edilerek hassas terazide ağırlığı ölçülmüştür. Ardından bu numuneler 3 gün boyunca 50 °C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) etüvde bünyesindeki suyu atması sağlanmıştır. Etüvden çıkarılan numunelerin etüv kurusu ağırlığı tartılmıştır.

### **3.2.4 Mekanik Özellikler**

Köpük betonların basınç ve eğilme dayanımları 40\*40\*160 mm boyutlu prizma numunelerle belirlenmiştir. Karışımlar kalıba iki tabaka halinde ve sarsma tablası ile sıkıştırarak yerleştirilmiştir. Karışımların mekanik özellikleri EN 196-1 standartına göre tespit edilmiştir. Numuneler üzerinde ilk olarak üç noktalı eğilme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyinden sonra basınç dayanımı belirlenmiştir. Karışımların eğilme ve basınç dayanımları 6 saat, 1, 7 ve 28. günlerde belirlenmiştir.

### **3.2.5 Kapilerite Özellikleri**

Köpük betonların kapilerite özellikleri 50\*50\*50 mm boyutlarındaki küp numunelerde ve ASTM C 1585 standartına göre belirlenmiştir. 28 boyunca su küründe bekletilen numuneler 3 gün boyunca 50 °C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) etüvde bünyesindeki suyu atması sağlanmıştır. Etüv kurusu ağırlığa sahip numunelerin sadece tabandan su işlemesi istenildiğinden yan yüzeyleri likit su yalıtım malzemesi (su-tut) ile fırça yardımıyla kaplanarak yalıtılmıştır. Kaplanan numune tabandan suyu emmesi için 5 mm yüksekliğinde bir aparata yerleştirilmiştir. Belirtilen standarta göre süreleri belirlenerek 28.güne kadar tabandan su işleme derinlikleri ölçülmüştür.

### **3.2.6 Kuruma Büzülmesi Özellikleri**

Kuruma büzülmesi, boy değişimleri ASTM C 596 standarına göre 25\*25\*285 mm boyutlu numune çubuklarının dijital komparatör ile ölçülmesi ile belirlenmiştir. Kuruma büzülmesi değişimleri için kalıptan çıkarılan numuneler 3 gün su kürüne tabi tutulmuş başlangıç boyu sudan çıkarılıp kuru bez ile doygun kuru yüzey oluşturularak ölçülmüştür. Sonrasında bu numuneler oda sıcaklığında açık havada bekletilerek ilk

4.günde ardından ise 56.güne kadar her 7 günde 1 ölçülmüştür. Ardından 90. ve 120. gün ölçülmüştür.

### **3.2.7 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Dayanıklılığı**

Köpük betonların 25\*25\*285 mm boyutlarında elde edilen çubuklar kalıptan çıkarıldıktan sonra 3 gün su kürüne tabi tutulmasının ardından kuru bez ile doygun kuru yüzey oluşturularak dijital komparatör ile boyu ölçülmüştür. Boyu ölçülen çubuklar %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solüsyonu içeren su içerisinde küre tabi tutularak 1, 3, 7, 14, 28, 56, 90 ve 120.gün boy değişimleri ölçülmüştür.

### **3.2.8 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı**

Kür havuzunda 28 gün bekletilen numuneler, kür işlemi sonrasında oda sıcaklığında açık hava ortamına bırakılmıştır. Numunelerin bünyesinde bulunan suyun ve su buharının dışarı atılmasını sağlamak amacıyla 105 °C (±5°C) etüvde 24 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulacak numunelerin ilk ağırlıkları, ultrases geçiş hızları ölçülmüştür. 300, 600, 900 ve 1200°C yüksek sıcaklık uygulamaları için iki farklı tip soğutma tercih edilmiştir. Hazırlanan 9 karışım hava ve su soğutma için 3'er numune olmak üzere her seriden 6'şar numune bu işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemlerde 10°C/dakika ısınma ısısı olan yüksek sıcaklık fırınında 300, 600, 900 ve 1200°C'de 120 dakika bekletildi. Belirlenen yüksek sıcaklıktan çıkan numuneler hava soğutma işlemine tabi tutulacak ise 24 saat oda sıcaklığında bekletilerek; su soğutma işlemine tabi tutulacak ise itfaiyeleme metodu kullanılarak numune su ile temas ettirilerek soğutulduktan sonra 24 saat oda sıcaklığında bekletilen numunelerin ilk durumları ile karşılaştırmak üzere ağırlığı, ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. Bu veriler elde edildikten sonra eğilme ve basınç testine tabi tutulmuştur.

### **3.2.9 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HCl Dayanıklılığı**

Köpük betonların asit dayanımı belirlenmesi için 40\*40\*160 mm prizma numuneler su oranının %5 konsantrasyonunda Sülfirik Asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve Hidroklorik Asit (HCl) bulunan kür havuzlarında 28 gün boyunca her 7 günde bir sonrasında ise 56, 90 ve 120. gün boyunca ağırlık değişimler incelenmiştir.

### **3.2.10 Isıl İletkenlik**

TS EN 12667 standartına göre bu çalışma kapsamında elde edilen köpük betonların ısı iletkenliği, ısı iletkenlik ölçüm cihazı ile belirlenmiştir.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

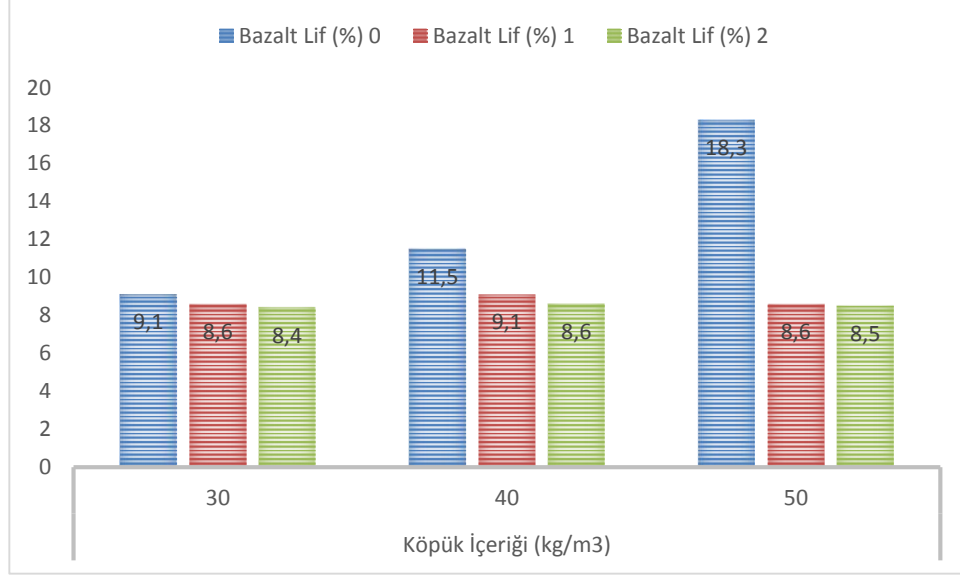
### 4.1 Köpük Betonların Taze Özellikleri

30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeren karışım oranları ile üretilen köpük betonun taze haldeki yayılma çapları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1'de tüm köpük içerikleri kendi içerisinde incelendiğinde, bazalt lif oranı arttıkça yayılma çaplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Buradan bazalt lifin işlenebilirliği düşürdüğü görülmüştür. Bu bağlamda 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımlar incelendiğinde bazalt lif oranı %0 referans alınarak, bazalt lif %1 olan karışımın yayılma çapı %5,49 azalırken bazalt lif oranı %2 olan karışımın %7,69 azaldığı gözlenmiştir. 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımlarda bazalt lif oranı %0 referans alındığında bazalt lif oranı %1 olan karışımın yayılma çapının %20,87 azaldığı, bazalt lif oranı %2 olanda ise %25,22 azaldığı gözlenmiştir. 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımlarda bazalt lif oranı %0 referans alındığında bazalt lif oranı %1 olan karışımın yayılma çapının %53 azaldığı, bazalt lif oranı %2 olanda ise %53,55 azaldığı gözlenmiştir.

Köpük içeriği 50 kg/m<sup>3</sup> olan ve bazalt lif oranı %0 olan karışımda en yüksek yayılma çapı 18,3 cm olarak elde edilmiştir. Köpük içeriğinin en fazla olması karışım içerisindeki agrega miktarının en az olması nedeniyle işlenebilirlik artarken karışım içerisinde bazalt lif bulunmaması da bu işlenebilirliği desteklemiş olduğu gözlemlenmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım %26,37 lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımda ise %101,1 lik bir artış gözlemlenmiştir. Köpük içeriğindeki artış, önceki köpük içeriğine kıyasla tüm karışımlar için daha yüksek yayılma çapı ortaya çıkarmıştır (Gencel vd. 2021). Bu daha düşük agrega oranı nedeniyle su oranının azalmasına neden olan köpük oranının artmasına bağlanabilir (Onprom vd. 2015).

Bazalt lif oranı %1 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım %5,81'lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımda ise herhangi bir artış gözlemlenmemiştir. Bazalt lif oranı %2 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40

kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım %2,38'lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım ise %1,19'lik bir artış gözlemlenmiştir.

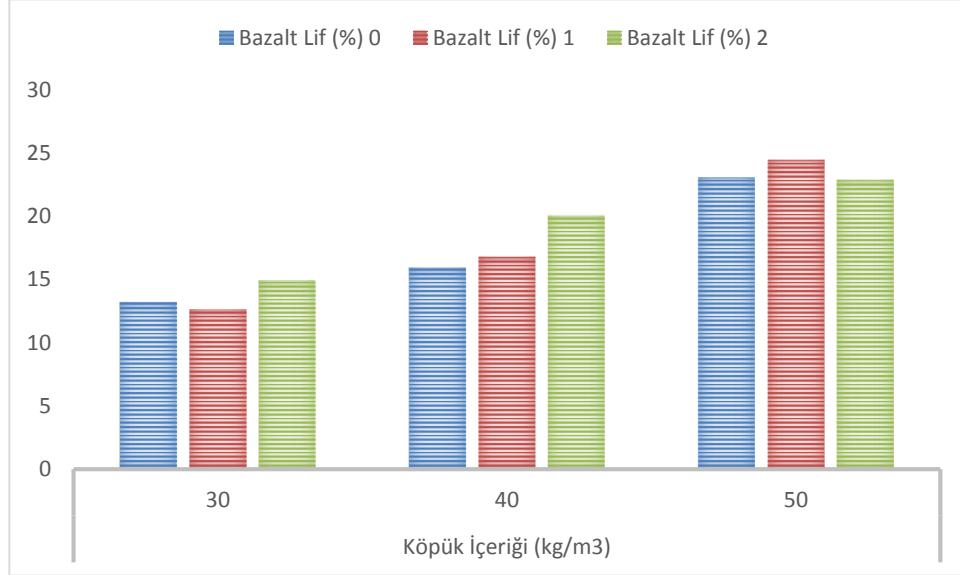


Şekil 4. 1 Köpük ve lif hacminin( $V_f$ ) yayılma çapına etkisi

#### 4.2 Köpük Betonların Fiziksel Özellikleri

30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli 90 günlük köpük beton numunelerinin porozite değerleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, bazalt lif oranı %1 ve köpük içeriği 50 kg/m<sup>3</sup> olan karışımın en yüksek poroziteye sahip olduğu gözlenmektedir. Yine bazalt lif oranı %1 olan köpük içeriği 30 kg/m<sup>3</sup> olan karışımın ise en düşük porozite değeri gösterdiği gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %0 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın porozite değeri %20,50'lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım ise %79,27'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bazalt lif oranı %1 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın porozite değeri %33,02'lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım ise %93,88'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bazalt lif oranı %2 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın porozite değeri %34,9'lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım ise %53,22'lik bir artış gözlemlenmiştir. Her lif içeriği kendi içinde değerlendirildiğinde köpük içeriği arttıkça porozitenin arttığı

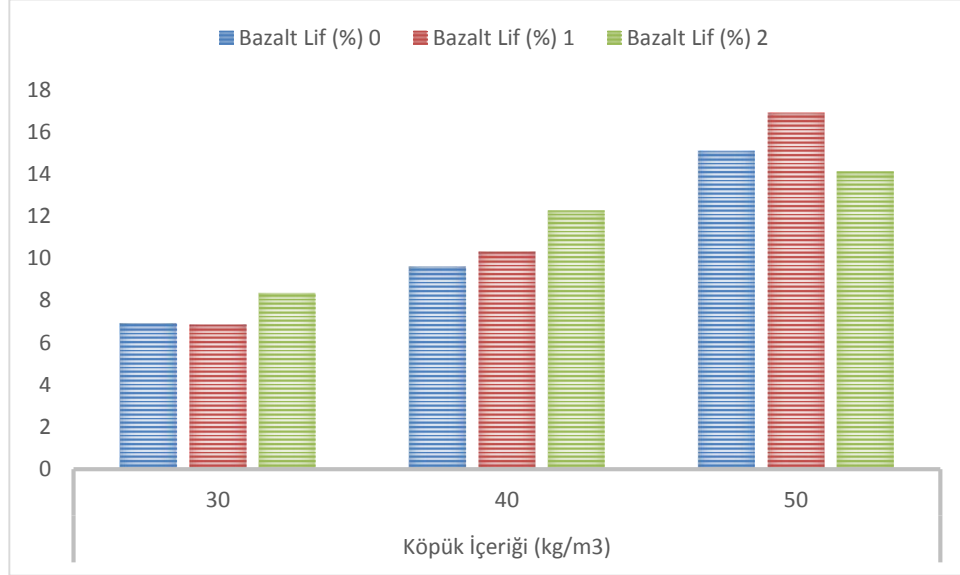
gözlenmiş bu durum köpük ajanının karışım içerisinde mikro boşluk oluşturmasıyla açıklanabilmektedir.



Şekil 4. 2 Köpük betonların poroziteleri(%)

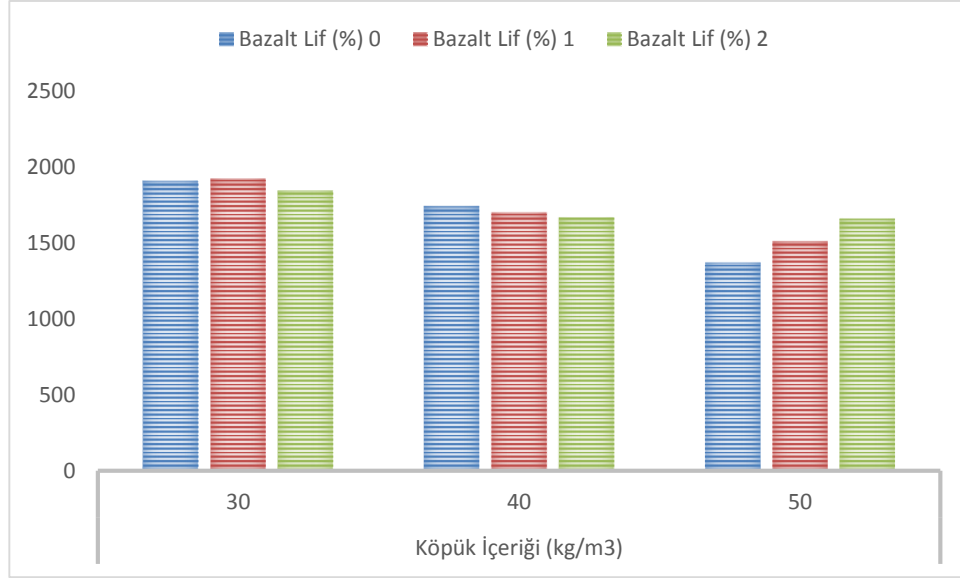
30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli 90 günlük köpük beton numunelerinin su emme değerleri Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Şekil 4.3’de gösterildiği gibi, bazalt lif oranı %1 ve köpük içeriği 50 kg/m<sup>3</sup> olan karışımın en yüksek su emmeye sahip olduğu gözlenmektedir. Yine bazalt lif oranı %1 olan köpük içeriği 30 kg/m<sup>3</sup> olan karışımın ise en düşük su emme değeri gösterdiği gözlenmektedir. Aynı durum porozite değerlerinde de gözlenmiştir. Bu durum porozitenin su emme değerleriyle paralel olduğunu yansıtmaktadır (Kaplan vd. 2021). Yani köpük betonların boşluk oranı arttığında su emme değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın su emme değeri %38,73’lük bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımında ise %117,92’lik bir artış gözlemlenmiştir. Bazalt lif oranı %1 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın su emme değeri %50,29’lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımında ise %146,50’lik bir artış gözlemlenmiştir. Bazalt lif oranı %2 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın su emme değeri %46,89’lik bir artış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımında ise %69,02’lik bir artış gözlemlenmiştir. Her lif içeriği kendi içinde değerlendirildiğinde

köpük içeriği arttıkça su emme değerlerinin arttığı gözlenmiş bu durum porozite ile paralellik göstermekte olup boşluk yapısı ile açıklanabilmektedir.



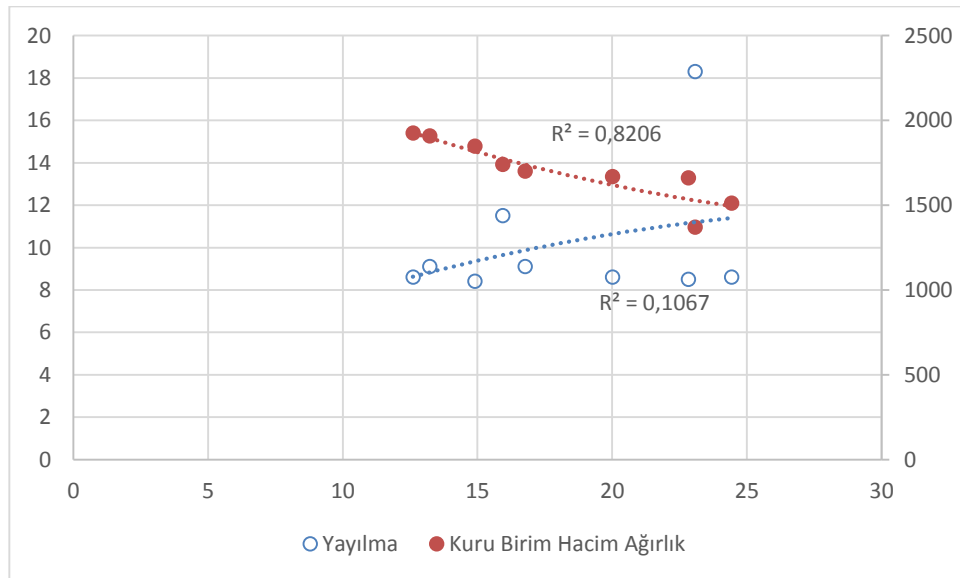
Şekil 4. 3 Köpük betonların su emmeleri(%)

30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli 90 günlük köpük beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlık değerleri Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Şekil 4.4'de gösterildiği gibi, en yüksek kuru birim hacim ağırlık değeri bazalt lif oranı %1, 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımda 1924 kg/m<sup>3</sup> olarak; en düşük kuru birim hacim ağırlık değeri ise bazalt lif oranı %0, 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımda 1370 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın kuru birim hacim ağırlık değeri %8,81'lik bir azalış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımda ise %28,20'lik bir azalış gözlemlenmiştir. Bazalt lif oranı %1 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın kuru birim hacim ağırlık değeri %11,59'luk bir azalış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımda ise %21,47'lik bir azalış gözlemlenmiştir. Bazalt lif oranı %2 olan 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip olan karışım referans alındığında 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın kuru birim hacim ağırlık değeri %9,63'lük bir azalış gözlemlenirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımda ise %13,67'lik bir azalış gözlemlenmiştir. Her lif içeriği kendi içerisinde değerlendirildiğinde köpük içeriği arttıkça kuru birim hacim ağırlığında azaldığı gözlenmektedir. Bu durum köpük içeriğinin ağırlığı hafifletmesiyle açıklanabilmektedir.



Şekil 4. 4 Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıkları (kg/m³)

Şekil 4.5, kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonun yayılma-kuru birim hacim ağırlık-basınç dayanımı korelasyon grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde basınç dayanımı ve kuru birim hacim ağırlık arasında  $R^2=0,82$  katsayısı mevcuttur. Basınç dayanımı arttıkça kuru birim hacim ağırlığının da arttığı gözlenmektedir. Fakat basınç dayanımı ve yayılma arasında  $R^2=0,10$  gibi düşük bir bağıntı mevcuttur.

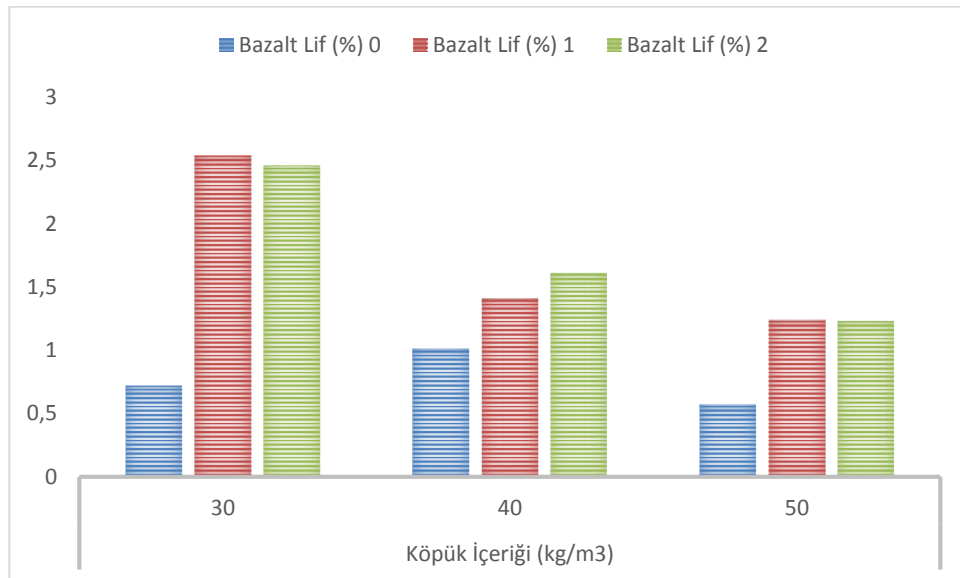


Şekil 4. 5 Köpük betonların yayılma-kuru birim hacim ağırlık-porozite korelasyonu

### 4.3 Köpük Betonların Mekanik Özellikleri

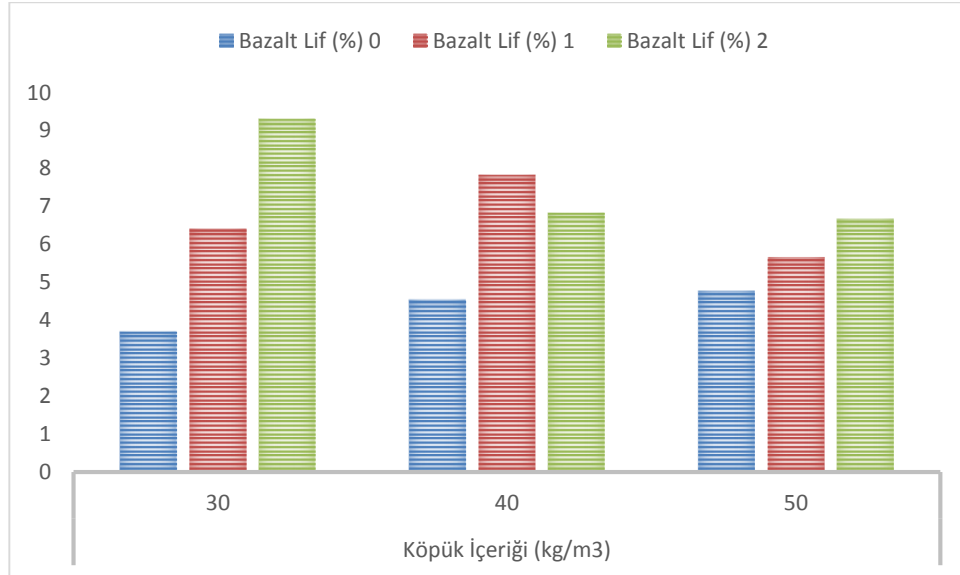
#### 4.3.1 Eğilme Dayanımı

30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 6 saatlik eğilme mukavemeti testi sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi 6 saat içerisinde köpük beton numunelerinin priz alıp eğilme mukavemeti göstermesinin nedeni karışımlarda kullanılan kalsiyum alüminat çimentosudur. Kalsiyum alüminat çimentosu normal portland çimentosuna göre daha hızlı priz almaktadır. Bazalt lif oranı %1 ve 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımda 6 saat sonunda en yüksek eğilme mukavemeti değeri 2,54 MPa olarak elde edilmiştir. Priz sonrası eğilme mukavemeti incelendiğinde tüm köpük içerikleri kendi içerisinde değerlendirildiğinde bazalt lif oranı %0 olan karışımların bazalt lif içeren karışımlara göre daha az mukavemet gösterdiği gözlenmiştir. Bu durumda bazalt lif köpük beton numunelerinin eğilme mukavemetini artırmıştır denilebilir. Priz sonrası eğilme mukavemetinde 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriklerine göre en fazla dayanımı, 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 30 kg/m<sup>3</sup> ve 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriklerine göre en az dayanımı gösterdiği gözlenmiştir. Bu durumda köpük içeriği arttıkça priz sonrası eğilme mukavemeti azalmıştır denilebilir.



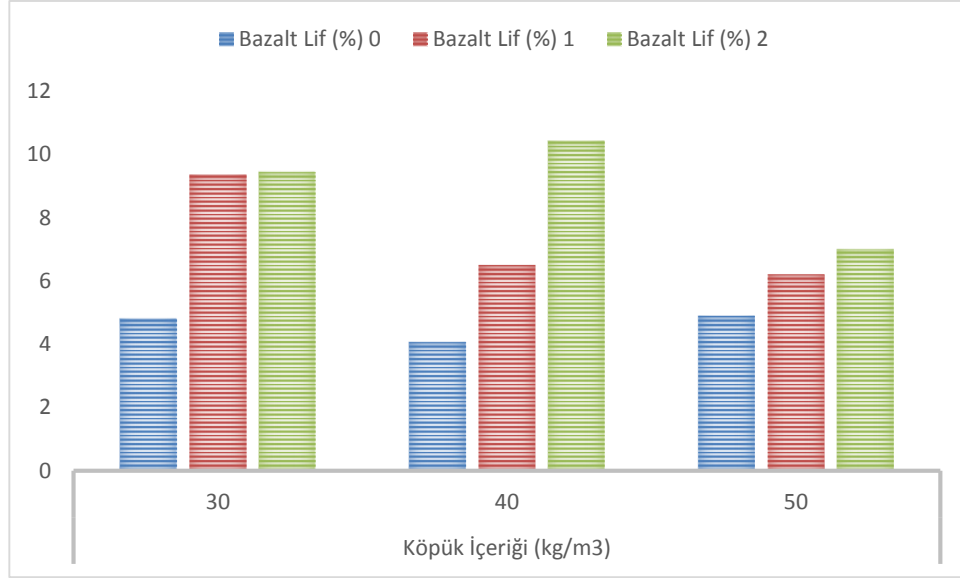
Şekil 4. 6 Köpük betonların 6 saatlik eğilme dayanımları

Şekil 4.7’de 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 1 günlük eğilme mukavemeti testi sonuçları gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 1 günde 9,3 MPa ile en fazla eğilme mukavemeti gösteren 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip %2 bazalt lif içeren karışımdır. 30 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içerisine sahip karışımlar ayrı olarak kendi içerisinde incelendiğinde bazalt lif oranı arttıkça eğilme mukavemetinin de arttığı gözlenmiştir. 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımlarda ise %0 bazalt lif içeriğine sahip karışıma göre %1 içeren karışımın 1 günlük eğilme mukavemeti %72,47 artarken %2 içeren karışım ise %50,44 artmıştır. Bu durum 30 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımlardan farklı olarak %2 bazalt lif içeren karışımın eğilme mukavemeti %1 bazalt lif içeren numuneden düşük kalmıştır.



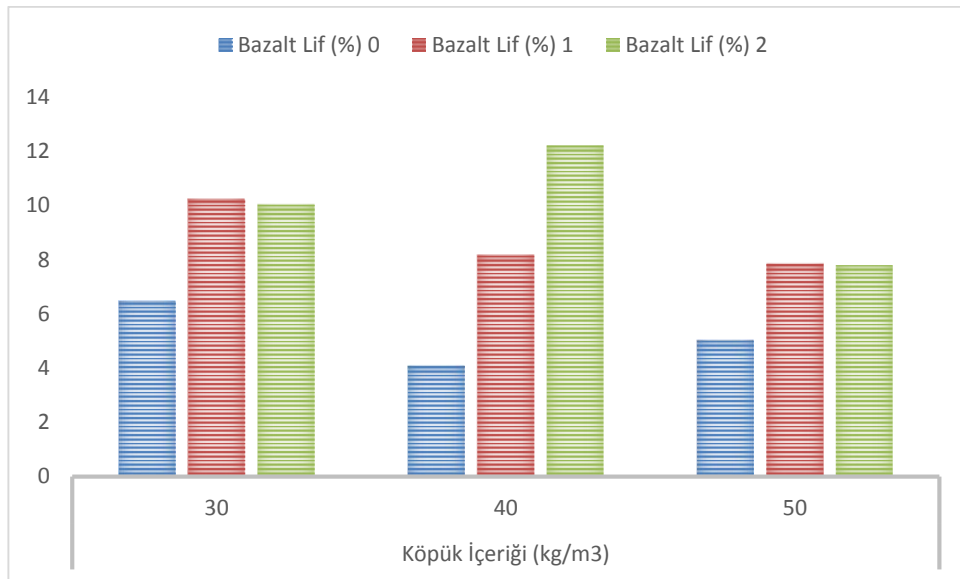
Şekil 4. 7 Köpük betonların 1günlük eğilme dayanımları

Şekil 4.8’de 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 7 günlük eğilme mukavemeti testi sonuçları gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm köpük içeriklerinde bazalt lif oranı arttıkça 7 günlük eğilme mukavemeti artmıştır. 7 günlük eğilme mukavemetinde en yüksek değer 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinde %2 bazalt lif içeren karışımda 10,42 MPa ile elde edilmiştir.



Şekil 4. 8 Köpük betonların 7 günlük eğilme dayanımları

Şekil 4.9’de 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 28 günlük eğilme mukavemeti testi sonuçları gösterilmiştir. 28 gün sonunda nihai dayanımlarına ulaşan köpük beton numuneleri 7 günlük eğilme mukavemetleri ile karşılaştırıldığında 30 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımlarda %2 bazalt lif içeren karışımlarda ihmal edilebilir bir azalma görülse de hemen hemen benzer eğilim göstermiştir. 7 günlük eğilme mukavemetinde olduğu gibi 28 günlük nihai eğilme mukavemetinde de en yüksek dayanımı 12,22 MPa ile 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki %2 bazalt lif içeren karışım ile elde edilmiştir.

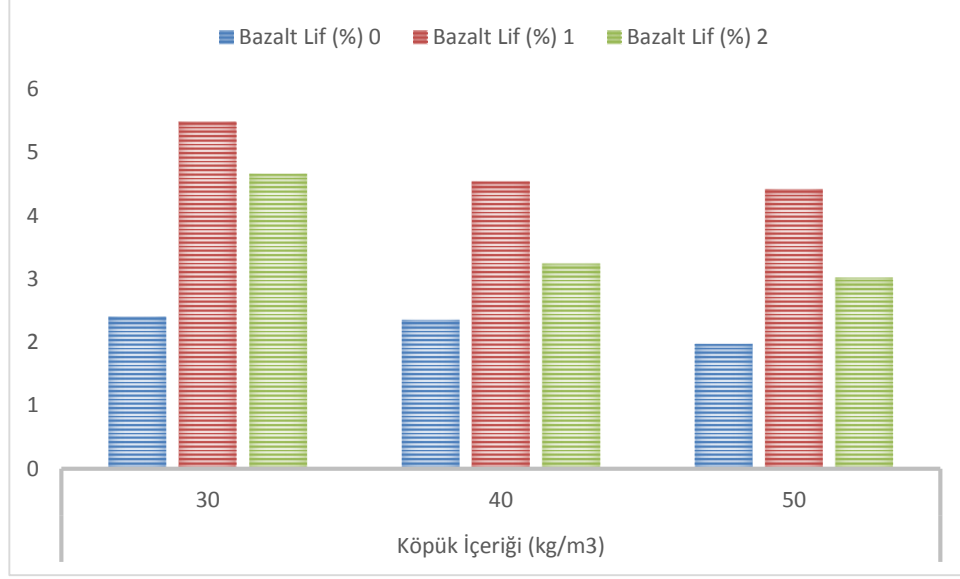


Şekil 4. 9 Köpük betonların 28 günlük eğilme dayanımları

Eğilme mukavemetleri incelendiğinde 28 günlük nihai dayanımının 6 saat içerisinde 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> göre sıralandığında bazalt lif %0 olan %11,13; %24,69; %11,33'ünü, bazalt lif %1 olan %24,83; %17,26; %15,80'ini, bazalt lif %2 olan %24,48; %13,17; %15,77'sini almıştır. Bu köpük beton numunelerinde erken eğilme mukavemeti göstermesinin sebebi kalsiyum alüminat çimentosudur. Yapılan deneyler sonucu tüm köpük içerikleri incelendiğinde bazalt lif içermeyen karışımlarda 6 saat içerisinde nihai dayanımın yaklaşık %15,72'sini kazandığı gözlenmiştir. Bu durum bazalt lif oranı %1 olan karışımlarda ise yaklaşık %19,30 ve bazalt lif oranı %2 olan karışımlarda ise yaklaşık %17,81 olarak gözlenmiştir. Bu gözlemler sonucu kalsiyum alüminat çimentosunun sağladığı hızlı dayanım özelliği eğilme mukavemeti açısından değerlendirildiğinde bazalt lif arttıkça hızlı dayanım kazanma oranı azalmıştır. Bu durumda bazalt lif priz süresini geciktirmiştir sonucuna varılabilir.

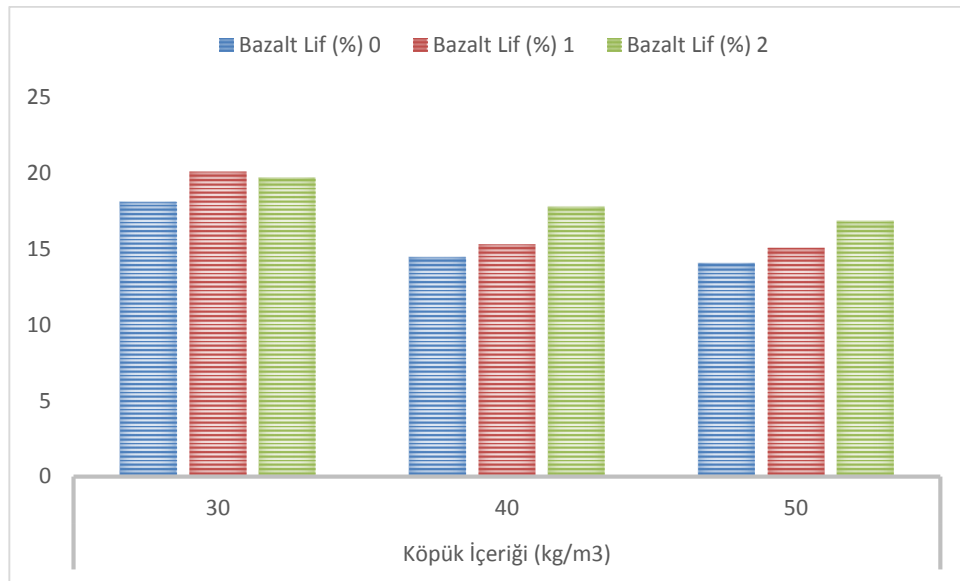
#### **4.3.2 Basınç Dayanımı**

Şekil 4.10'da 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 6 saatlik basınç dayanımı testi sonuçları gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm köpük içerikleri kendi içerisinde değerlendirildiğinde köpük içeriği arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosunun hızlı dayanım kazanma özelliği sayesinde 6 saat içerisinde en yüksek basınç dayanımı 5,49 MPa ile 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinde %1 bazalt lif içeren karışımda elde edilmiştir. 6 saatlik eğilme dayanımı incelendiğinde de yine aynı karışımın en yüksek eğilme mukavemeti sağlandığı gözlenmiştir. 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriği ve bazalt lif oranı %1 referans olarak alındığında, 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın %17,30 azaldığı ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın ise %19,49 azaldığı gözlenmiştir.



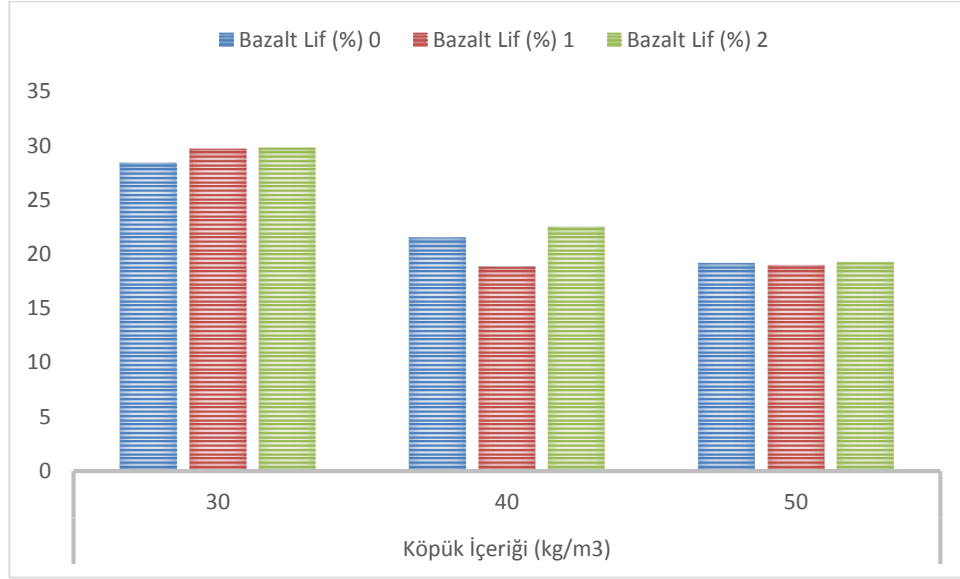
Şekil 4. 10 Köpük betonların 6 saatlik basınç dayanımları

Şekil 4.11’de 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 1 günlük basınç dayanımı testi sonuçları gösterilmiştir. Her köpük içeriği kendi içerisinde değerlendirildiğinde (30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki bazalt lif oranı %1 ile %2 olan karışımdaki %2,77’lik bir fark ihmal edilirse) bazalt lif oranı arttıkça 1 günlük basınç dayanımları da arttığı gözlenmiştir. 1 günlük basınç dayanımı testinde en yüksek dayanım 20,08 MPa ile 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinde bazalt lif oranı %1 olan karışımda elde edilmiştir. 6 saatlik basınç dayanımları incelendiğinde de yine aynı karışımda en yüksek basınç dayanımı elde edildiği gözlenmiştir.



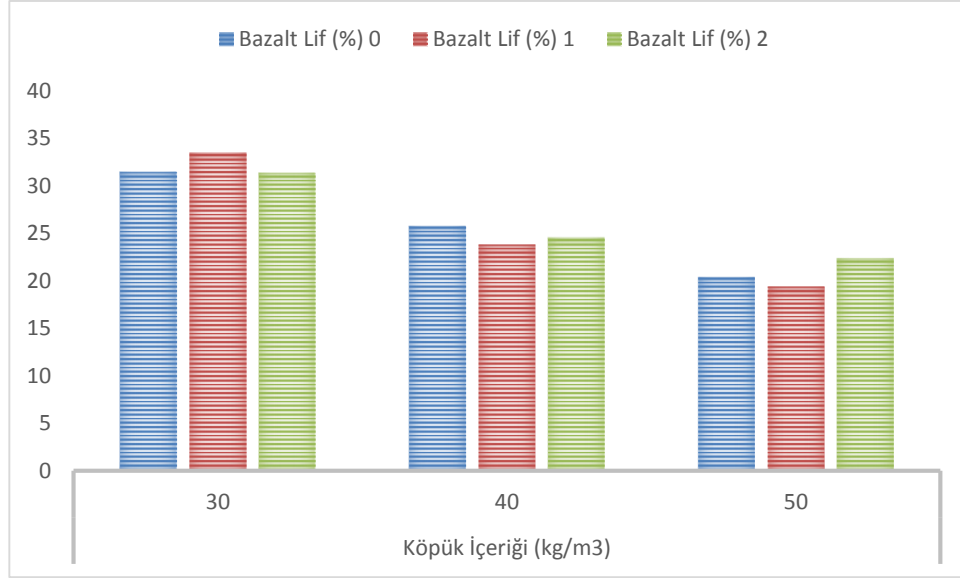
Şekil 4. 11 Köpük betonların 1 günlük basınç dayanımları

Şekil 4.12’de 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı testi sonuçları gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 7 günlük basınç dayanımında bazalt lif oranları ve köpük içerikleri ile alakalı belirli bir uyum yakalanamamıştır. Fakat 7 günlük basınç dayanımı içerisinde en yüksek dayanımı 29,84 MPa ile 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinde %2 bazalt lif oranı olan karışım ile elde edilmiştir.



Şekil 4. 12 Köpük betonların 7 günlük basınç dayanımları

Şekil 4.13’de 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki köpük beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı testi sonuçları gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde 7 günlük basınç değerleri ile aynı karakterde olduğu gözlenmiştir. 28 gün içerisinde en yüksek basınç dayanımını 33,53 MPa ile 30 kg/m<sup>3</sup> içeriğinde bazalt lif oranı %1 olan karışımdan elde edilmiştir.



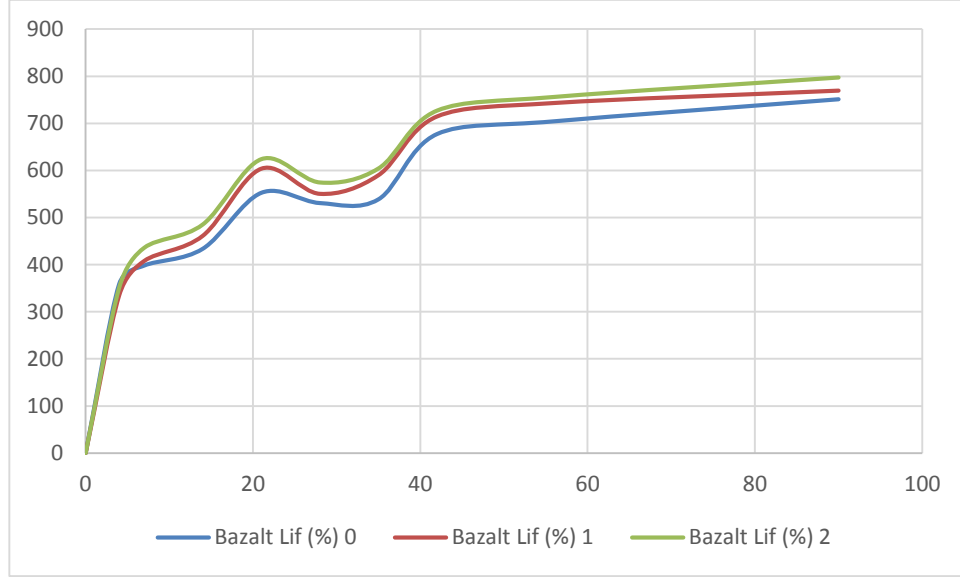
Şekil 4. 13 Köpük betonların 28 günlük basınç dayanımları

Basınç dayanımları incelendiğinde 28 günlük nihai dayanımının 6 saat içerisinde 30 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup> ve 50 kg/m<sup>3</sup> göre sıralandığında bazalt lif %0 olan %7,63; %9,13; %9,66'sını, bazalt lif %1 olan %16,37; %19,06; %22,78'ini, bazalt lif %2 olan %14,86; %13,20; %13,51'ini almıştır. Yapılan deneyler sonucu tüm köpük içerikleri incelendiğinde bazalt lif içermeyen karışımlarda 6 saat içerisinde nihai dayanımın yaklaşık %8,81'sini kazandığı gözlenmiştir. Bu durum bazalt lif oranı %1 olan karışımlarda ise yaklaşık %19,40 ve bazalt lif oranı %2 olan karışımlarda ise yaklaşık %13,86 olarak gözlenmiştir. Bu gözlemler eğilme mukavemeti ile karşılaştırıldığında bazalt lif içermeyen karışımlar haricinde aynı karakterde olduğu gözlenmiştir. Bazalt lif içermeyen karışımlarda ise basınç dayanımına göre daha hızlı eğilme mukavemeti kazandığı gözlenmiştir.

#### 4.4 Köpük Betonların Kuruma Büzülmesi

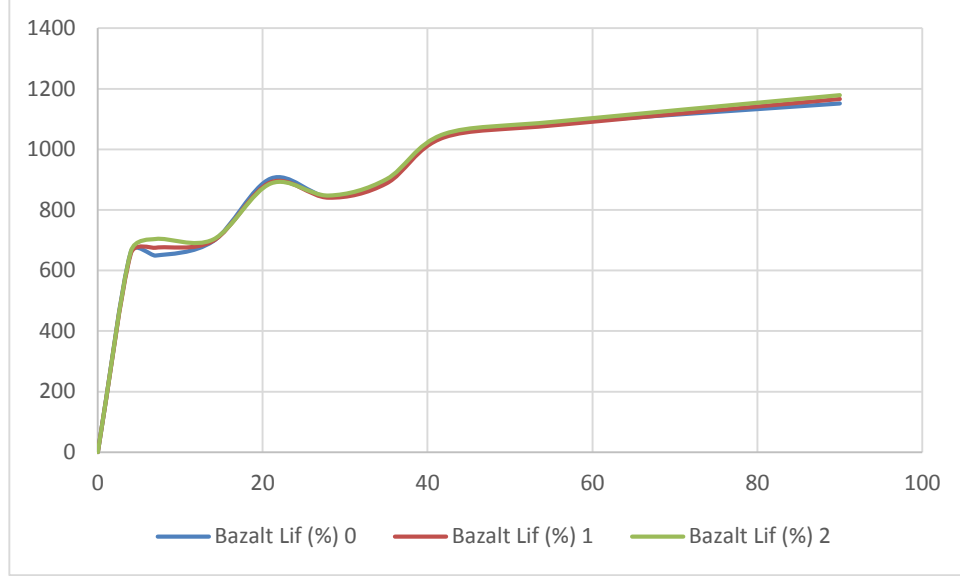
Şekil 4.14, 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin 90 günlük kuruma büzülmesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi köpük beton numunelerinin kuruma büzülmesi ilk 28 gün daha hızlı gerçekleştiği gözlenmiştir. Toplamda 56 gün büzülme hareketliliğini korumuş sonraki 90 güne kadar büzülme hızı oldukça yavaşlamış ve 56-90 günleri arasında sabit trendini korumuştur. Büzülme değerleri tüm bazalt lif oranlarında birbirine yakın olmasına karşılık en düşük büzülme değeri 751x10<sup>-6</sup> (µε) değeri ile bazalt lif oranı %0 olan karışım ile elde edilmiştir. Bazalt lif

oranı %0 olan karışım referans olarak alındığında, bazalt lif oranı %1 olan karışımın kuruma büzülmesi %2,53 artarken %2 bazalt lif oranına sahip karışım %6,13 arttığı gözlenmiştir. Bu oranlardan sonuçla 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinde karışımların bazalt oranı arttıkça büzülme miktarlarının da arttığı sonucuna varılmaktadır.



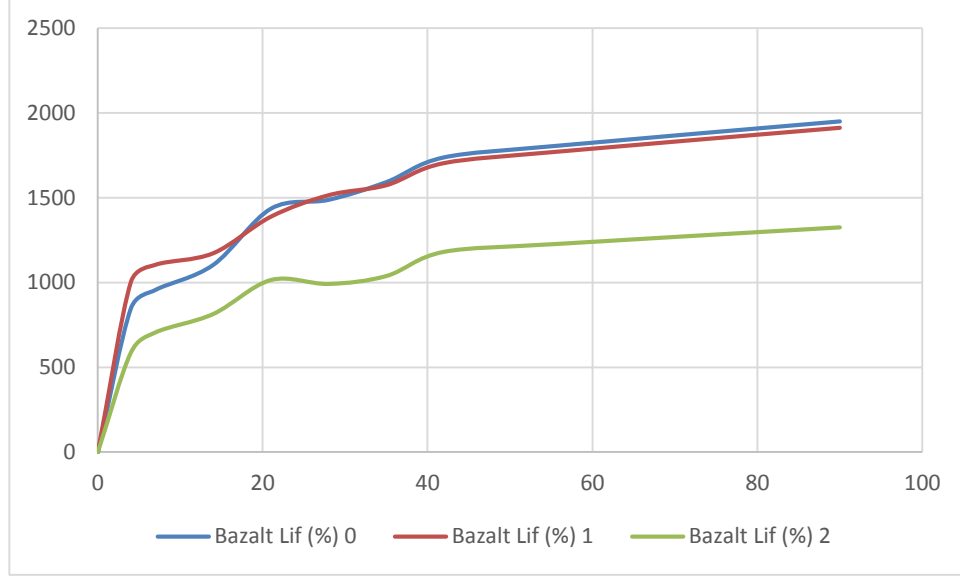
Şekil 4. 14 Köpük betonların 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin kuruma büzülmeleri (μϵ)

Şekil 4.15, 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin 90 günlük kuruma büzülmesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımların bazalt lif oranı fark etmeksizin hemen hemen aynı trendde büzülme göstermiştir. En düşük büzülme değeri  $1151 \times 10^{-6}$  (μϵ) ile bazalt lif oranı %0 olan karışım ile elde edilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında, bazalt lif oranı %1 olan karışımın büzülmesi %1,30 artarken %2 bazalt lif orana sahip karışım %2,43 artmıştır. 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine görüldüğü gibi 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımlarda da bazalt lif oranı arttıkça numunenin büzülmesi artmıştır.



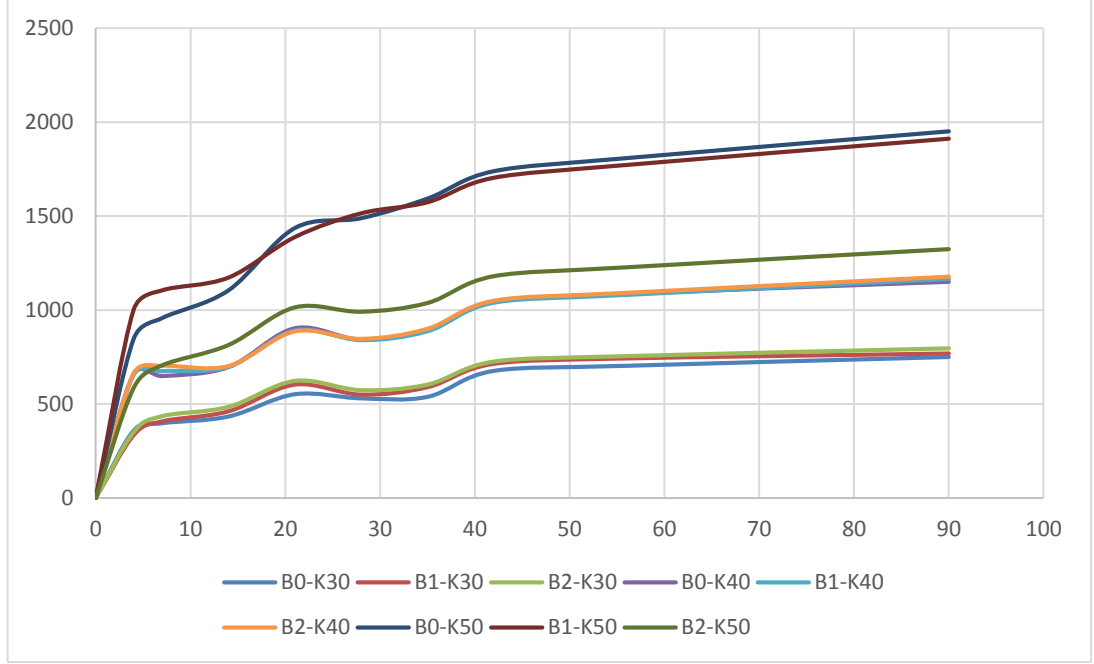
Şekil 4. 15 Köpük betonların 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin kuruma büzölmeleri (με)

Şekil 4.16, 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin 90 günlük kuruma büzölmesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi karışımların büzölmeleri 56 gün sonrasında sabit trendde devam etmiştir. En düşük büzölme değeri 1325x10<sup>-6</sup> με ile bazalt lif oranı %2 olan karışım ile elde edilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında, bazalt lif oranı %1 olan karışımın büzölmesi %2 azalırken bazalt lif oranı %2 olan karışımın büzölmesi %32,09 azalmıştır. 30 kg/m<sup>3</sup> ve 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriklerinden farklı bir durum gözlenerek 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinde sahip karışımlarda bazalt lif oranı arttıkça büzölmelerin azaldığı gözlenmiştir.



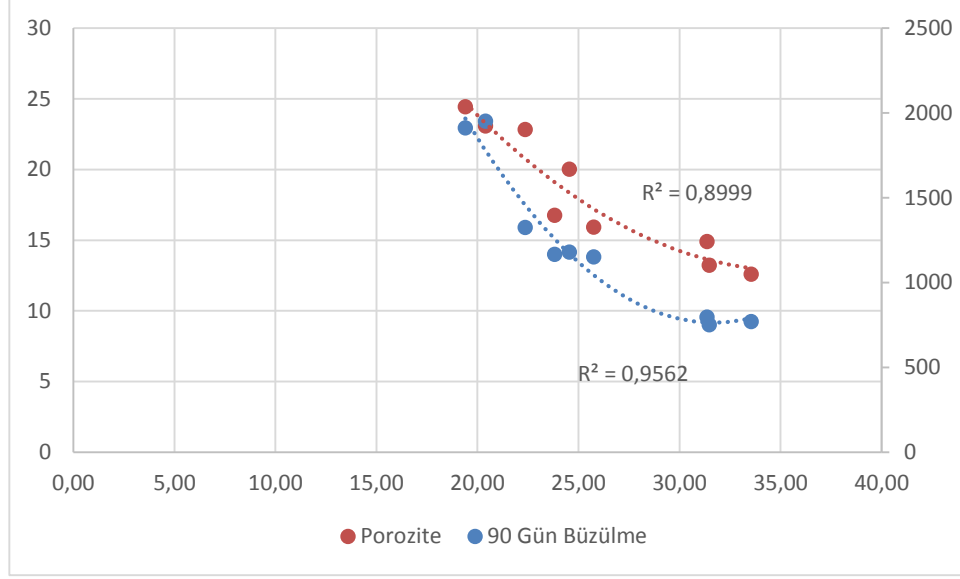
Şekil 4. 16 Köpük betonların 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin kuruma büzölmeleri (με)

Şekil 4.17, tüm köpük içeriğine sahip numunelerin 90 günlük kuruma büzölmesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi en düşük büzölme özelliği gösteren karışımların 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numuneler olduğu gözlenmektedir. Diğer köpük içerikleri incelendiğinde köpük içeriği arttıkça büzölme değerlerinin de arttığı gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %0 olan ve 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım referans alınarak 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın büzölmesi %53,26 arttığı ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın büzölmesi ise %159,79 arttığı gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %1 olan ve 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım referans alınarak 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın büzölmesi %51,43 arttığı ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın büzölmesi ise %148,31 arttığı gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %2 olan ve 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım referans alınarak 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın büzölmesi %47,93 arttığı ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın büzölmesi ise %66,25 arttığı gözlenmektedir. Bu oranlardan anlaşıldığı gibi karışımlardaki bazalt lif oranı fark etmeksizin köpük miktarı arttıkça büzölme değerleri de artmıştır.



Şekil 4. 17 Köpük betonların kuruma büzülmesinin genel görünümü

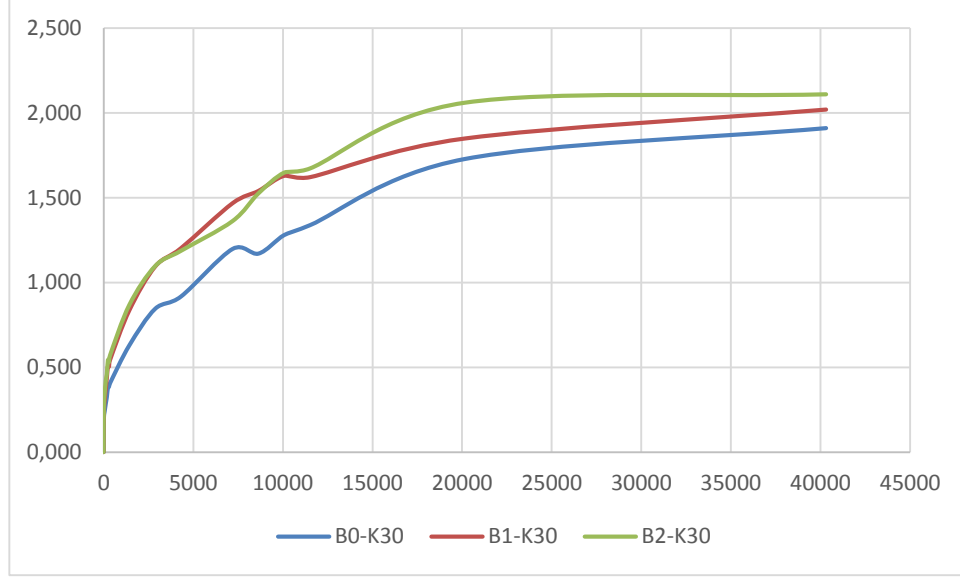
Şekil 4.18, kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların basınç dayanımı-kuruma büzülmesi-porozite korelasyonunu göstermektedir. Basınç dayanımı ve porozite arasında  $R^2=0,89$  gibi güçlü bir bağıntı mevcuttur. Basınç dayanımı arttıkça porozitenin düştüğü gözlenmektedir. Basınç dayanımı ve 90 günlük kuruma büzülmesi arasında ise  $R^2=0,95$  olan güçlü bir bağıntı mevcuttur. Basınç dayanımı arttıkça kuruma büzülmesi de azalmıştır.



Şekil 4. 18 Köpük betonların basınç dayanımı-kuruma büzülmesi-porozite korelasyonu

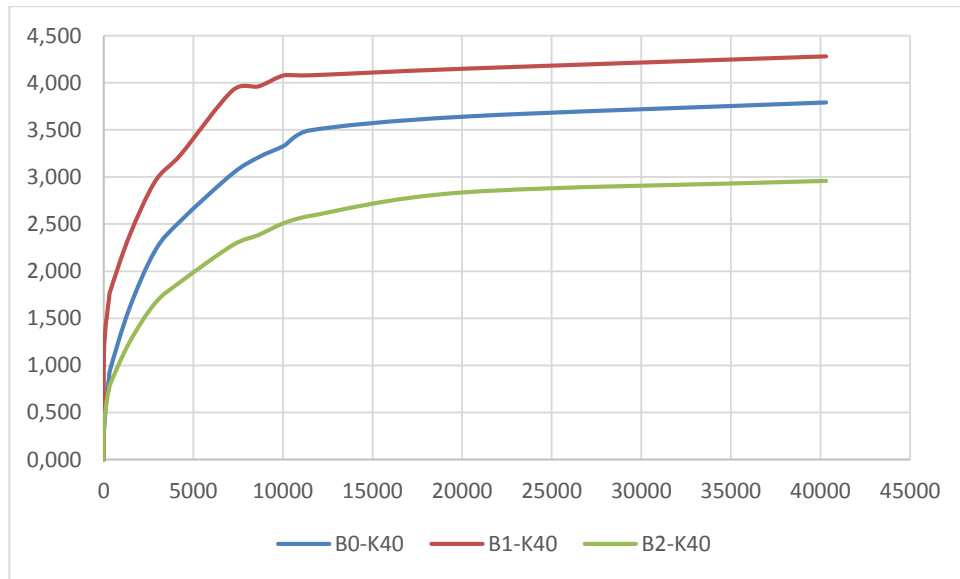
#### 4.5 Köpük Betonların Kapilerite Özellikleri

Bir betonun kılcal yol ile su taşıma özelliklerini bilmek, betonun istenilen servis ömrü süresince beklenen kalitede devam ettirmesi açısından önemlidir. Şekil 4.19, 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli karışımların 28 günlük zamana göre kapileritesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi ilk 8 gün kapileritelerinde hızlı bir artış göstermiştir. Sonraki 14.güne bir miktar daha yavaşlamış ve 28 güne kadar da hemen hemen sabit bir trend yakalamıştır. En düşük kapiler özelliği bazalt oranı %0 olan (B0- K30) karışımdan elde edilmiştir. B0- K30 karışımı referans alındığında B1- K30 karışımının kapileritesi %5,76 artmış ve B2- K30 karışımının ise %10,47 arttığı gözlenmiştir.



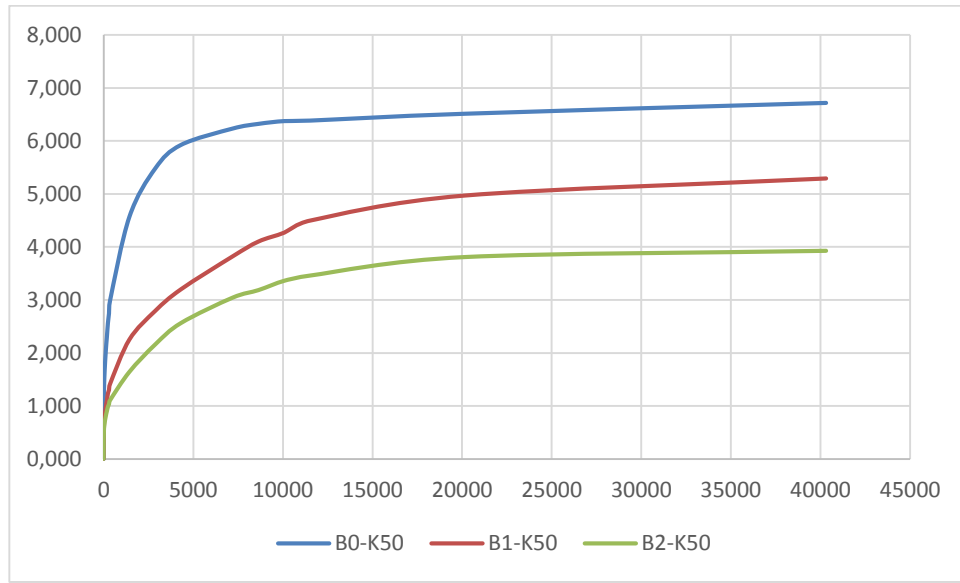
Şekil 4. 19 Köpük betonların 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin kapileritesi (mm/s<sup>1/2</sup>)

Şekil 4.20, 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli karışımların 28 günlük zamana göre kapileritesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi kapilerite değerleri farklı olsa da aynı karaktere sahiptir. 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinden farklı olarak bu köpük içeriğinde en düşük kapiler özelliği bazalt lif oranı %2 (B2- K40) olan karışımdan elde edilmiştir. Bazalt lif oranı %0 (B0- K40) olan karışım referans alındığında, bazalt lif oranı %1 (B1- K40) olan karışımın kapileritesi %12,93 arttığı fakat bazalt lif oranı %2 (B2- K40) olan karışımın ise %21,90 azaldığı gözlenmektedir.



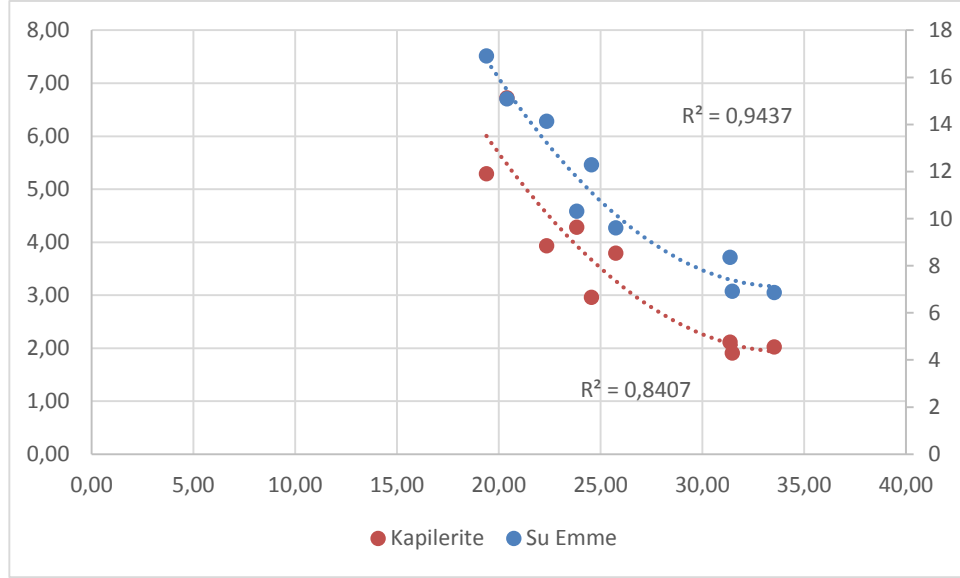
Şekil 4. 20 Köpük betonların 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin kapileritesi (mm/s<sup>1/2</sup>)

Şekil 4.21, 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli karışımların 28 günlük zamana göre kapileritesini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi bazalt lif oranı %0 (B0- K50) olan karışımın diğerlerinden farklı olarak kapilerite değerlerinin ilk 8 gün daha hızlı yükseldiği gözlenmiştir. En düşük kapilerite 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinde olduğu gibi bazalt lif oranı %2 (B2- K50) olan karışımdan elde edilmiştir. Bazalt lif oranı %0 (B0- K50) olan karışım referans olarak alındığında, bazalt lif oranı %1 (B1- K50) olan karışımın kapileritesi %21,28 azaldığı, bazalt lif oranı %2 (B2- K50) olan karışımın ise %41,52 azaldığı gözlenmektedir.



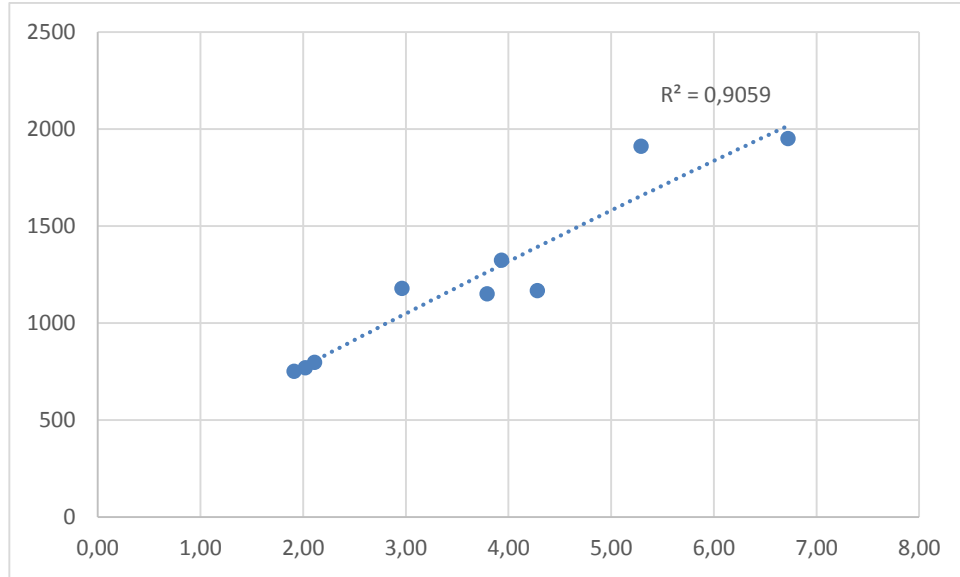
Şekil 4. 21 Köpük betonların 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip numunelerin kapileritesi (mm/s<sup>1/2</sup>)

Şekil 4.22, kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların basınç dayanımı-su emme-kapilerite korelasyonunu göstermektedir. Basınç dayanımı ve kapilerite arasında R<sup>2</sup>=0,84 katsayısı ile güçlü bir bağlantı vardır. Basınç dayanımı arttıkça kapileritesi düşmektedir. Basınç dayanımı ve su emme arasında R<sup>2</sup>=0,94 katsayısı ile güçlü bir bağlantı mevcuttur. Yine basınç dayanımı arttıkça su emme azalmaktadır.



Şekil 4. 22 Köpük betonların basınç dayanımı-su emme-kapilerite korelasyonu

Şekil 4.23, kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların kapilerite-büzülme korelasyonunu göstermektedir. Kapilerite ve büzülme arasında  $R^2=0,90$  katsayısı ile güçlü bir bağıntı mevcuttur. Kapileritenin artmasıyla büzülmede artmaktadır.

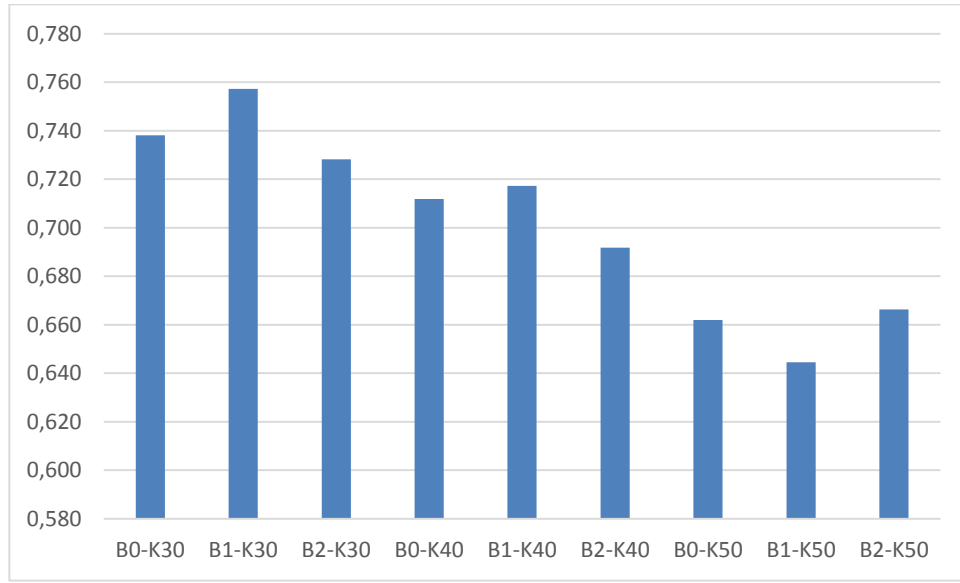


Şekil 4. 23 Köpük betonların kapilerite-büzülme korelasyonu

#### 4.6 Köpük Betonların Isıl İletkenlik Özellikleri

Betonların ısı iletkenlik katsayılarını bilmek kullanılacağı yer ve mekanda belirlenen süre içerisinde beklenen kalite ile servis ömrünü tamamlaması açısından önemlidir.

Şekil 4.24, kalsiyum alüminat çimentosu ile imal edilen köpük betonların ısı iletkenlik katsayılarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi en düşük ısı iletim katsayısını B1- K50 karışımı ile elde edilirken, en yüksek ısı iletim katsayısını B1- K30 karışımından elde edilmiştir. Şekil incelendiğinde her bazalt lif oranı kendi içerisinde değerlendirildiğinde köpük içeriği arttıkça ısı iletkenlik katsayılarının düştüğü gözlenmektedir. Bu durum, karışıma ilave edilen köpüğün özelliği olarak açıklanabilir.



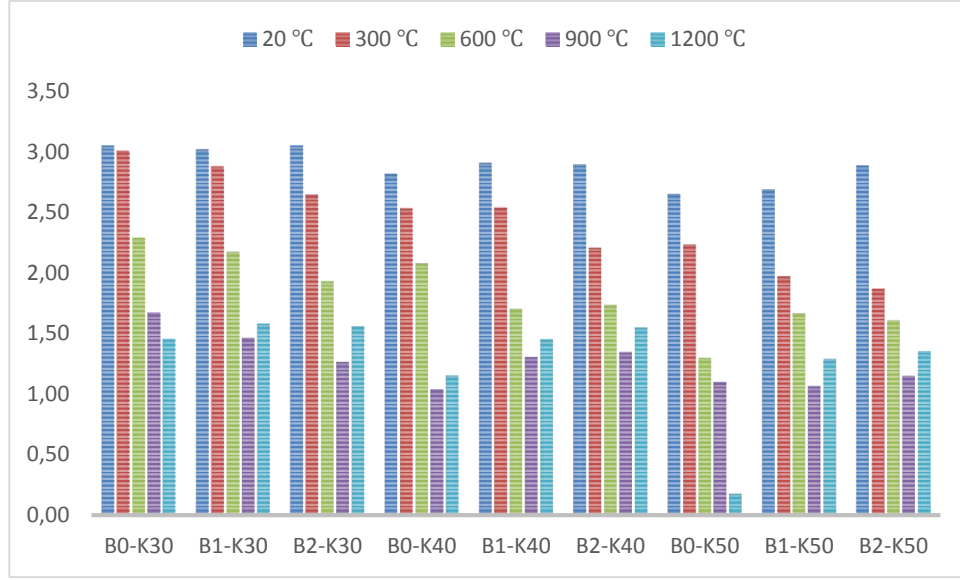
Şekil 4. 24 Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları  $\lambda$  (W/mK)

#### 4.7 Köpük Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı

Kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük beton numuneleri kür işlemi tamamlanmasının ardından 105 °C'de 24 saat kurutulması sonrasında 300 °C, 600 °C, 900 °C ve 1200 °C sıcaklıklara 120 dakika 10°C/dakika hızında yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Maruz bırakma işlemi tamamlanmasının ardından numuneler hava ile soğutma ve su ile soğutma şeklinde iki farklı soğutma türü ile soğutulmuştur. Her türdeki soğutma işlemleri de tamamlanan numuneler ultrases geçiş hızı değişimi ölçülüp sonrasında eğilme ve basınç testlerine tabi tutulmuştur.

#### 4.7.1 Hava ile Soğutma

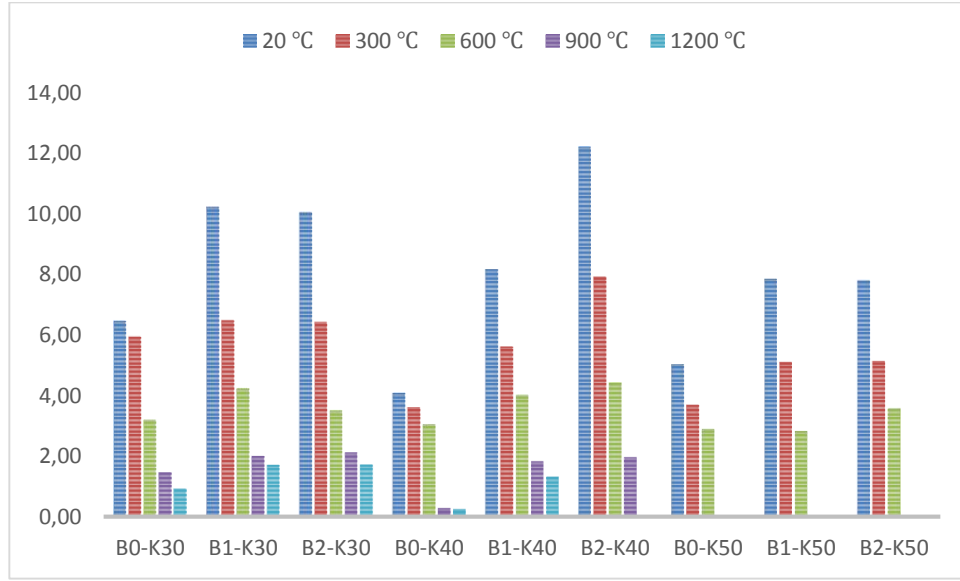
Şekil 4.25, Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların hava soğutma sonrası ultrases geçiş hızını (km/s) değişimi göstermektedir.



Şekil 4. 25 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların hava soğutma sonrası UGH değişimi (km/s)

Şekil 4.26, Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların hava soğutma sonrası eğilme dayanımlarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi her karışım kendi içerisinde maruz bırakıldığı sıcaklığa göre değerlendirildiğinde, maruz bırakılan sıcaklık derecesi arttıkça eğilme mukavemetinin azalmaktadır (Bayraktar, 2016). Her köpük içeriği kendi içerisinde değerlendirildiğinde bazalt lif içermeyen karışımların yüksek sıcaklık direncinin eğilme dayanımı açısından bazalt lif içeren karışımlara göre daha düşük kalmıştır. 300 °C değerlendirildiğinde en yüksek eğilme dayanımını B2-K40 karışımı ile elde ederken en düşük eğilme dayanımı ise B0-K40 karışımında gözlenmiştir. Bu durumda aynı köpük içeriğine sahip iki farklı numunenin bazalt lif içeren karışımın eğilme mukavemeti yüksek olması bazalt lifin yüksek sıcaklık etkisinde de dayanımını artırmıştır. 600 °C değerlendirildiğinde en yüksek eğilme mukavemeti 300 °C de olduğu gibi B2-K40 karışımından elde edilirken en düşük değer ise B0-K50 karışımında gözlenmiştir. 900 °C değerlendirildiğinde en yüksek eğilme mukavemeti B2-K30

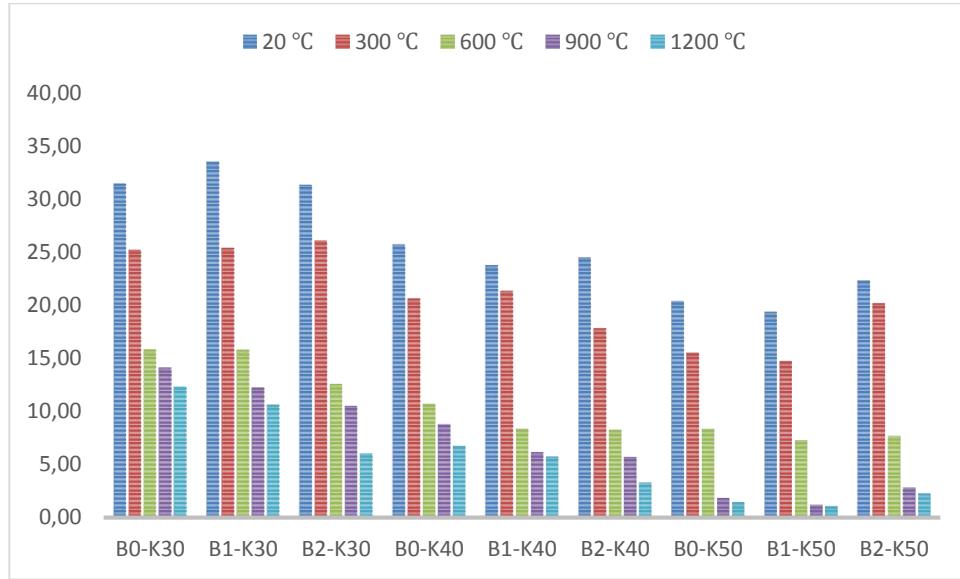
karışımından elde edilirken bunun aksine 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımlardan eğilme dayanımı alınamamıştır. 1200 °C değerlendirildiğinde ise en yüksek dayanımı B2-K30 karışımından elde edilirken, B2-K40, B0-K50, B1-K50 ve B2-K50 numunelerinin eğilme dayanımı göstermediği gözlenmiştir. Bu veriler incelendiğinde eğilme mukavemeti açısından her sıcaklık için en yüksek dayanımları bazalt lif oranı %2 olan karışımlar ile elde edilmiştir. Bu durumda bazalt lif yüksek sıcaklık etsinde eğilme mukavemetinde de etkili olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4. 26 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların hava soğutma sonrası eğilme dayanımları

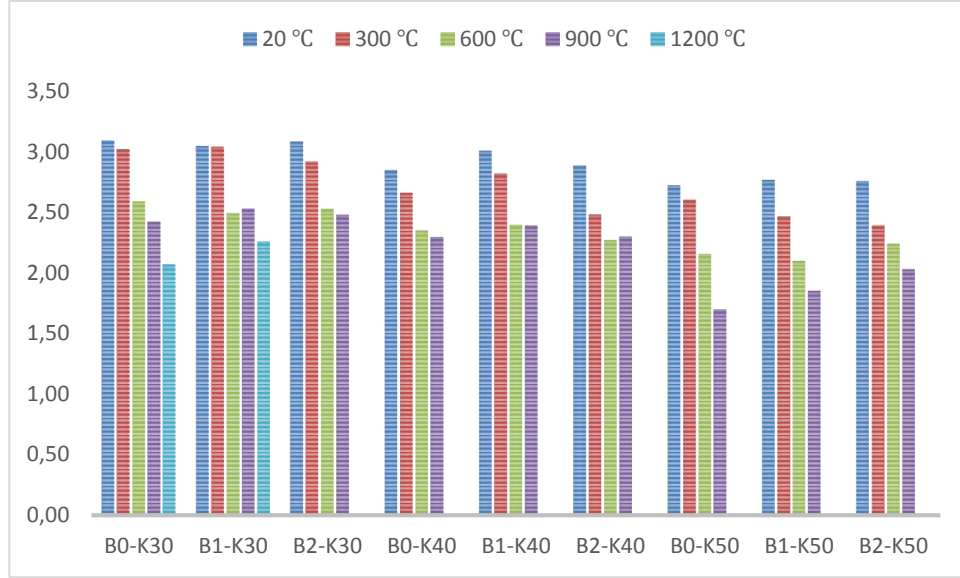
Şekil 4.27, Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların hava soğutma sonrası basınç dayanımlarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi her karışım kendi içerisinde değerlendirildiğinde numunelerin maruz bırakıldığı sıcaklık değeri yükseldikçe basınç dayanımları azalmıştır. Testte bulunan tüm sıcaklıklar ele genel manada alındığında köpük içeriği arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir. Testimizde bulunan 300 °C değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı B2-K30 karışımı ile elde edilirken en düşük değer ise B1-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 600 °C değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımını B0-K30 karışımından elde edilirken en düşük değer ise B1-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 900 °C değerlendirildiğinde B0-K30 karışım ile elde edilirken en düşük değer ise B1-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 1200 °C değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı B0-K30

karışımından elde edilirken en düşük dayanım ise B1-K50 karışımında gözlenmiştir. Veriler incelendiğinde yüksek sıcaklık etkisinde en yüksek basınç dayanımlarını 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımlardan elde edildiği fakat eğilme mukavemetindeki verilerden farklı olarak yüksek oranda bazalt lif içeren karışımlardan ziyade bazalt lif içermeyen karışımlarda bu yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.



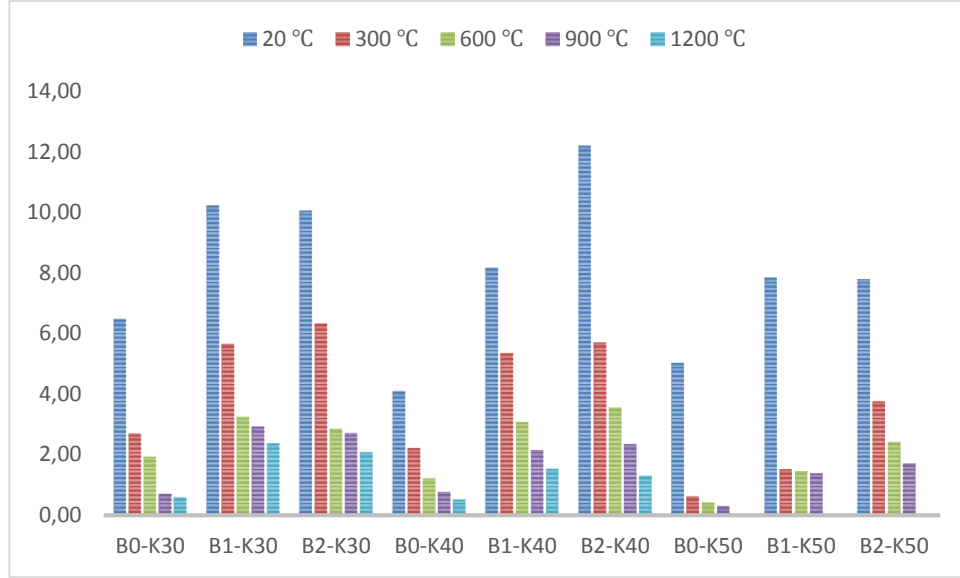
Şekil 4. 27 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların hava soğutma sonrası basınç dayanımları

Şekil 4.28, Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların su soğutma sonrası ultrases geçiş hızını (km/s) değişimi göstermektedir. Şekil incelendiğinde her karışım için sıcaklık değerleri arttıkça ultrases geçiş hızının azaldığı gözlenmektedir. Tüm sıcaklık değerleri için en yüksek değerler 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğinden elde edilmesinin yanında 1200 °C'de sadece B0-K30 ve B1-K30 karışımlarından değer alınmıştır.



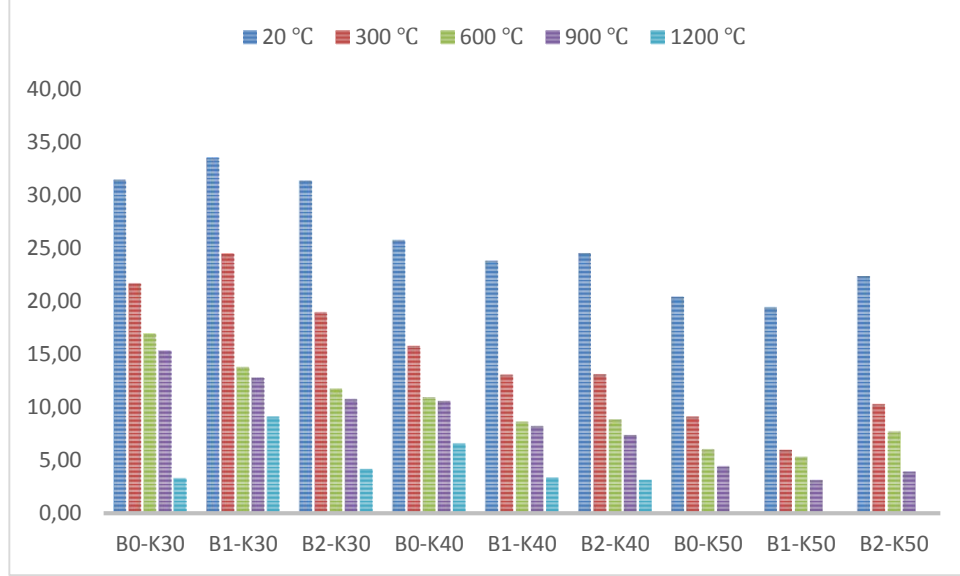
Şekil 4. 28 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların su soğutma sonrası UGH değişimi (km/s)

Şekil 4.29, Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların su soğutma sonrası eğilme dayanımını göstermektedir. Şekil incelendiğinde her karışım kendi içerisinde değerlendirilerek sıcaklık değeri yükseldikçe eğilme dayanımının da azaldığı gözlenmektedir. Testimizde bulunan 300 °C değerlendirildiğinde en yüksek eğilme dayanımı değeri 6,34 MPa ile B2-K30 karışımından elde edilirken en düşük değer 0,62 MPa ile B0-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 600 °C değerlendirildiğinde en yüksek eğilme dayanımı 3,55 MPa ile B2-K40 karışımından elde edilirken en düşük değer 0,42 MPa ile B0-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 900 °C değerlendirildiğinde en yüksek eğilme mukavemeti değeri 2,92 MPa ile B1-K30 karışımından elde edilirken en düşük değer ise 0,29 MPa ile B0-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 1200 °C değerlendirildiğinde ise en yüksek değer 2,37 MPa ile B1-K30 karışımından elde edilirken 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımlardan değer alınamamıştır. Veriler incelendiğinde 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımların yüksek sıcaklık etkisinde eğilme mukavemeti açısından diğer köpük içeriklerine göre daha yüksek dayanım gösterdiği gözlenmektedir.



Şekil 4. 29 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların su soğutma sonrası eğilme dayanımı

Şekil 4.30, Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların su soğutma sonrası basınç dayanımını göstermektedir. Şekil incelendiğinde her karışım kendi içerisinde değerlendirildiğinde sıcaklık değeri arttıkça basınç dayanımı değerleri düşmüştür. Testimizde bulunan 300 °C değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı 24,52 MPa ile B1-K30 karışımından elde edilirken en düşük değer ise 5,96 MPa ile B1-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 600 °C değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı 16,95 MPa ile B0-K30 karışımı ile elde edilirken en düşük değer ise 5,30 MPa ile B1-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 900 °C değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı 15,31 MPa değer ile B0-K30 karışımından elde edilirken en düşük değer ise 3,10 MPa değeri ile B1-K50 karışımında gözlenmiştir. Testimizde bulunan 1200 °C değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı 9,10 MPa ile B1-K30 karışımından elde edilirken hava soğutma değerlerinin aksine 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğine sahip karışımlardan basınç dayanımı alınamamıştır.



Şekil 4. 30 Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan köpük betonların su soğutma sonrası basınç dayanımı

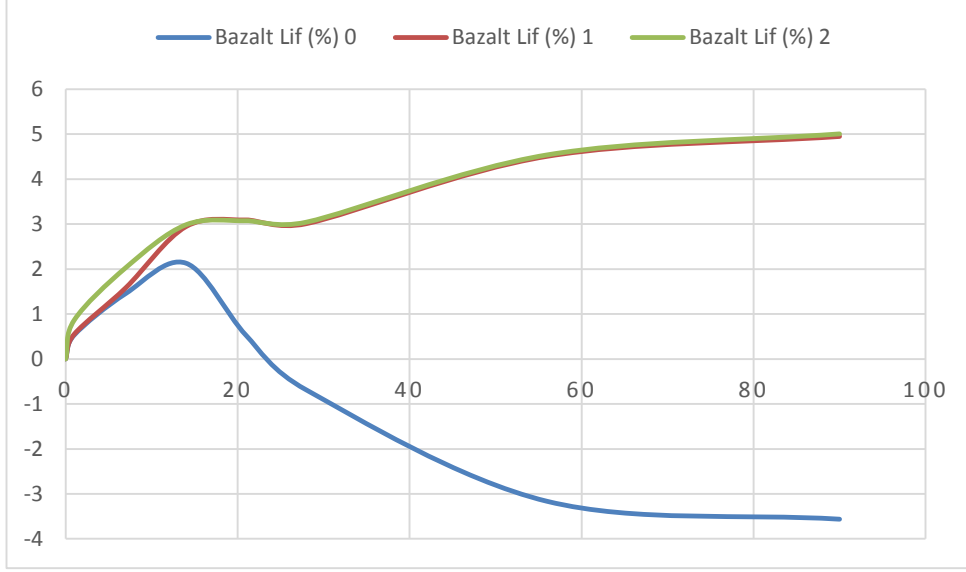
Yüksek sıcaklık etkisinin ardından soğutma yöntemleri değerlendirilecek olursa su soğutma yöntemi numunelere hava soğutma yöntemine göre daha fazla hasar verdiği veriler yardımıyla gözlenmiştir. En bariz örneği ise hava soğutma yöntemi sonrasında tüm numunelerden basınç dayanımı elde edilirken su soğutma yönteminde  $50 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğinden değer alınamamasıdır.

#### 4.8 Köpük Betonların Asit Dayanıklılığı

Kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük beton asit dayanıklılık deneyi iki farklı asit ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar (Sülfirik Asit) %5  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ve (Hidroklorik Asit) %5  $\text{HCl}$ 'dir.

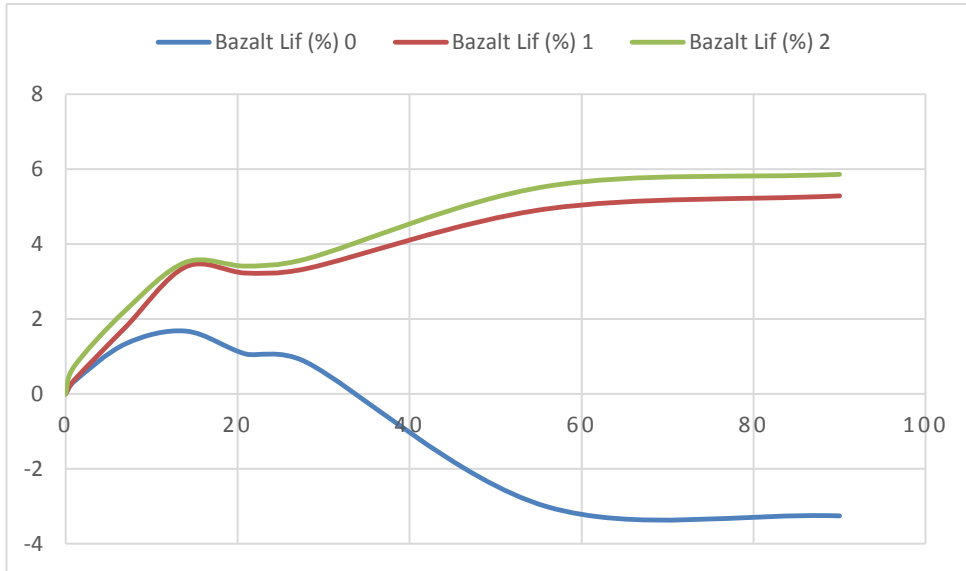
##### 4.8.1 Sülfirik Asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

$\text{H}_2\text{SO}_4$  etkisi altındaki  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içerikli karışımların ağırlık değişimleri Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışımın 90 gün maruz kalma nedeniyle ağırlığı yaklaşık % 3,6 azalmıştır. Bu durumun aksine bazalt lif oranı %1 olan karışımın ağırlığı yaklaşık % 4,95 artmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın ağırlığı yaklaşık %5,01 artmıştır. Bazalt lif içeren karışımların  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içerikli karışımlarda hemen hemen aynı özelliği gösterdiği gözlenmektedir.



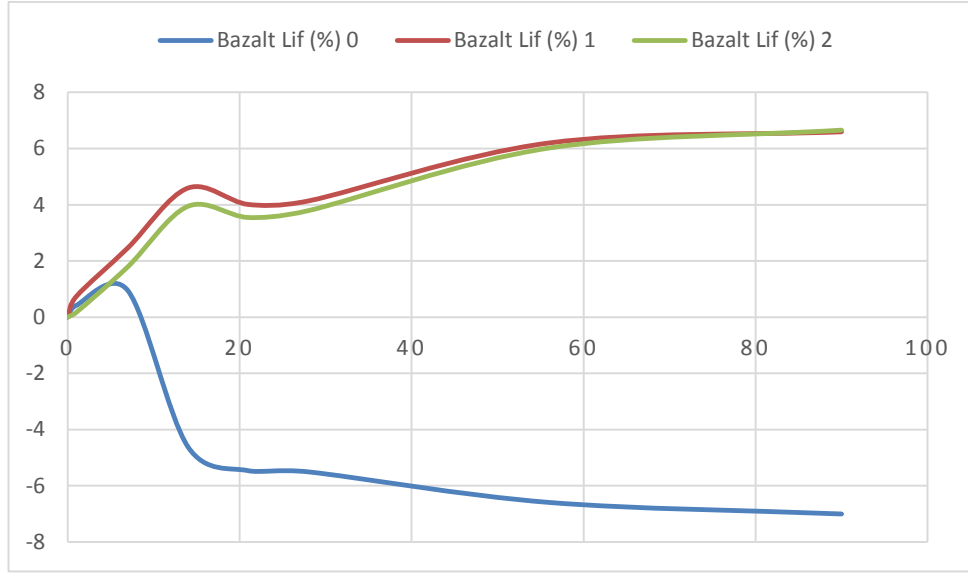
Şekil 4. 31 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi altındaki 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli karışımların ağırlık değişimleri Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 90 günlük maruz kalma nedeniyle ağırlığı yaklaşık % 3,25 azalmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın ağırlığı ise yaklaşık %5,28 artmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın ağırlığı yaklaşık %5,86 artmış olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4. 32 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi altındaki 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli karışımların ağırlık değişimleri Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 90 günlük maruz kalma nedeniyle ağırlığı yaklaşık % 7 azalmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın ağırlığı ise yaklaşık % 5,28 artmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın ağırlığı yaklaşık % 6,66 artmış olduğu gözlenmektedir.

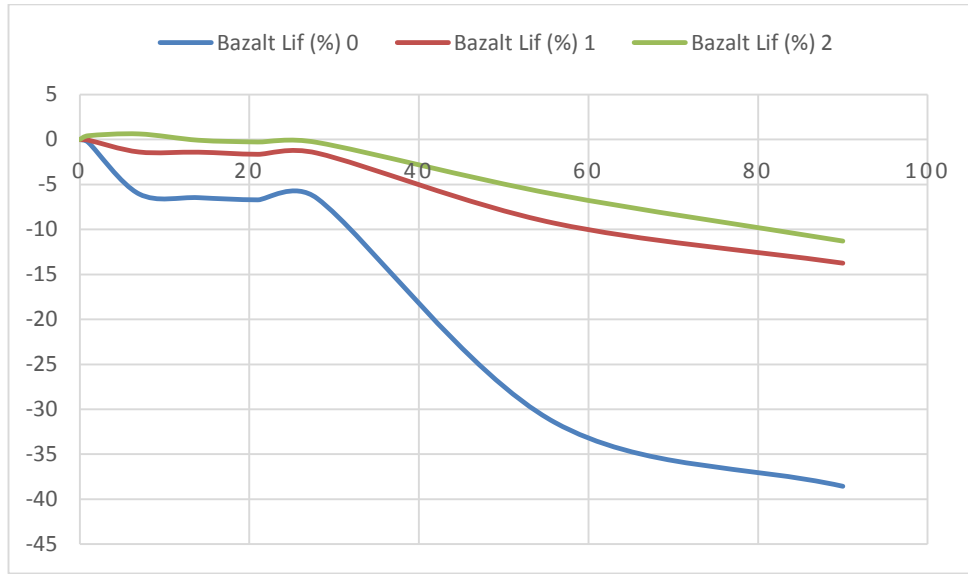


Şekil 4. 33 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi

90 gün boyunca H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz kalan tüm köpük içeriklerindeki karışımlar incelendiğinde, en çok ağırlık değişimlerinin köpük içeriği 50 kg/m<sup>3</sup> olduğu gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021). Bazalt lif oranı %0 olan karışımlarda 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriği referans alındığında, 40kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım yaklaşık % 8,70 daha az ağırlığının değiştiği fakat 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık % 96,63 ağırlığının daha fazla değiştiği gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %1 olan karışımlarda 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriği referans alındığında, 40kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım yaklaşık % 6,67 daha fazla ağırlığının değiştiği ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık % 33,13 ağırlığının daha fazla değiştiği gözlenmektedir. Aynı şekilde bazalt lif oranı %2 olan karışımlarda 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriği referans alındığında, 40kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım yaklaşık % 16,97 daha fazla ağırlığının değiştiği ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık % 32,93 ağırlığının daha fazla değiştiği gözlenmektedir.

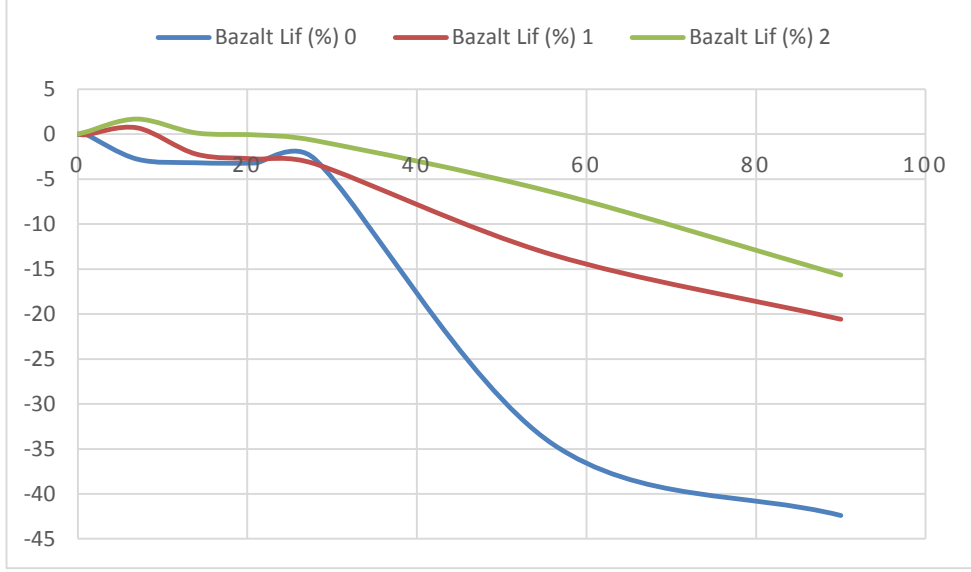
#### 4.8.2 Hidroklorik Asit (HCl)

HCl etkisi altındaki  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içerikli karışımların ağırlık değişimleri Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 90 günlük maruz kalma nedeniyle ağırlığı yaklaşık % 38,57 azalmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın ağırlığı ise yaklaşık % 13,76 azalmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın ağırlığı yaklaşık % 11,31 azalmış olduğu gözlenmektedir.



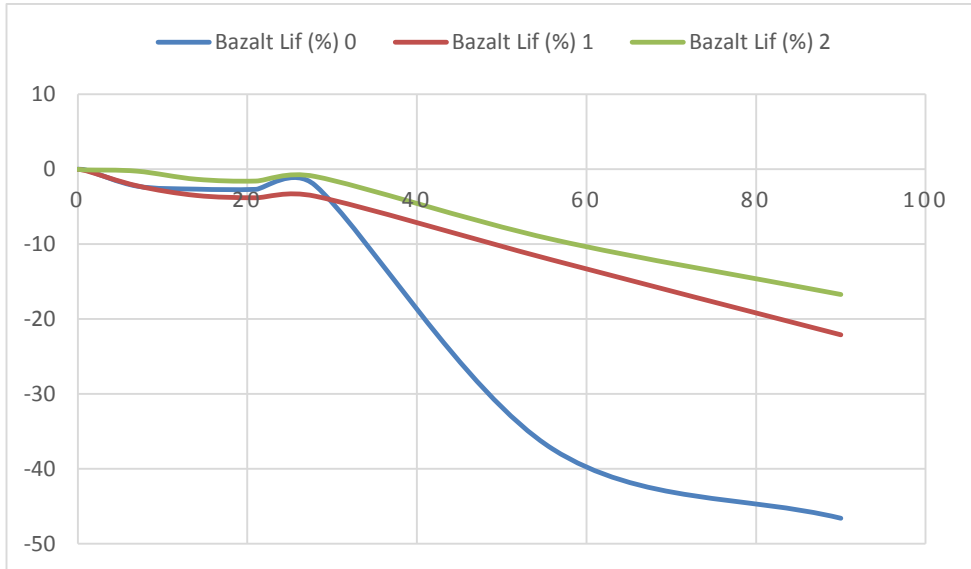
Şekil 4. 34 %5 HCl etkisine maruz bırakılan köpük betonların  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi

HCl etkisi altındaki  $40 \text{ kg/m}^3$  köpük içerikli karışımların ağırlık değişimleri Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 90 günlük maruz kalma nedeniyle ağırlığı yaklaşık % 42,39 azalmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın ağırlığı ise yaklaşık % 20,59 azalmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın ağırlığı yaklaşık % 15,67 azalmış olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4. 35 %5 HCl etkisine maruz bırakılan köpük betonların 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi

HCl etkisi altındaki 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içerikli karışımların ağırlık değişimleri Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 90 günlük maruz kalma nedeniyle ağırlığı yaklaşık % 46,58 azalmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın ağırlığı ise yaklaşık % 22,13 azalmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın ağırlığı yaklaşık % 16,73 azalmış olduğu gözlenmektedir.

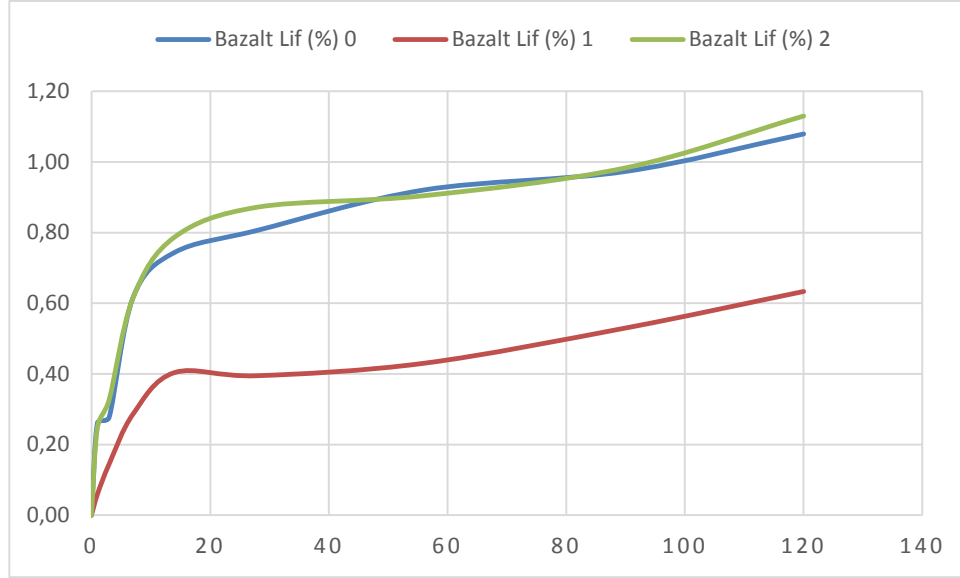


Şekil 4. 36 %5 HCl etkisine maruz bırakılan köpük betonların 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin ağırlık değişimi

90 gün boyunca HCl etkisine maruz kalan tüm köpük içeriklerindeki karışımlar incelendiğinde, en çok ağırlık değişimlerinin köpük içeriği  $50 \text{ kg/m}^3$  olduğu gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %0 olan karışımlarda  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriği referans alındığında,  $40 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki karışım yaklaşık % 9,90 daha fazla ağırlığının değiştiği ve  $50 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık % 20,77 ağırlığının daha fazla değiştiği gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %1 olan karışımlarda  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriği referans alındığında,  $40 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki karışım yaklaşık % 49,64 daha fazla ağırlığının değiştiği ve  $50 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık % 60,83 ağırlığının daha fazla değiştiği gözlenmektedir. Aynı şekilde bazalt lif oranı %2 olan karışımlarda  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriği referans alındığında,  $40 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki karışım yaklaşık %38,55 daha fazla ağırlığının değiştiği ve  $50 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık %47,92 ağırlığının daha fazla değiştiği gözlenmektedir. Verileri incelendiğinde, bazalt lif oranlarının kendi içlerindeki ağırlık değişiminin köpük içeriği arttıkça arttığı gözlenmektedir.

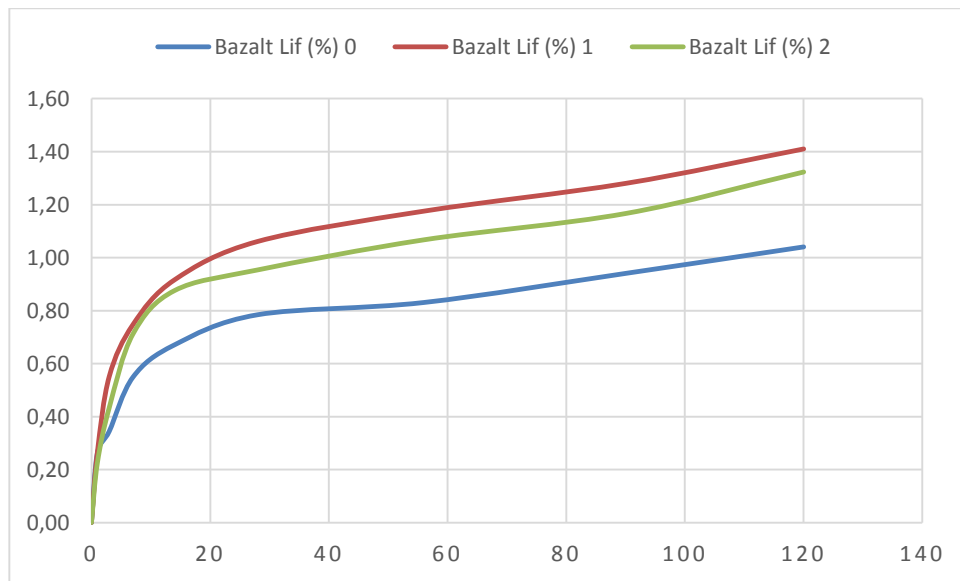
#### **4.9 Köpük Betonların Sülfat Dayanıklılığı**

Kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların sülfat dayanıklılığı %10  $\text{MgSO}_4$  (Magnezyum Sülfat) çözeltisindeki numunelerin genişmesi ile belirlenmiştir. Şekil 4.37'da %10  $\text{MgSO}_4$  etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların  $30 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğindeki numunelerin % olarak 120 günlük boy genişmesi gösterilmektedir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 120 günlük maruz kalma nedeniyle boy genişmesi yaklaşık % 1,08 artmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın boy genişmesi ise yaklaşık %0,63 artmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın boy genişmesi yaklaşık %1,13 artmış olduğu gözlenmektedir.



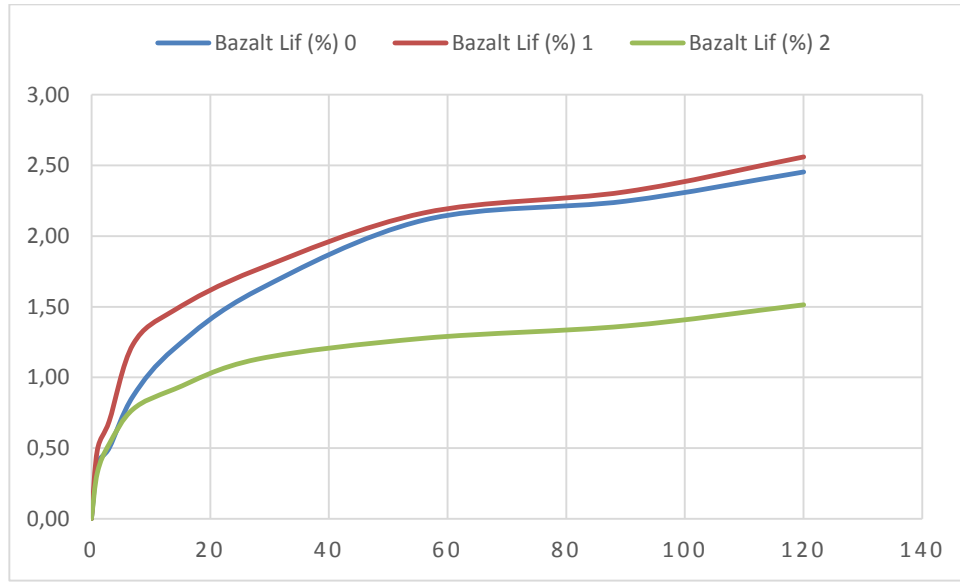
Şekil 4. 37 %10 MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin genişmesi (%)

Şekil 4.38’de %10 MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin % olarak 120 günlük boy genişmesi gösterilmektedir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 120 günlük maruz kalma nedeniyle boy genişmesi yaklaşık %1,04 artmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın boy genişmesi ise yaklaşık %1,41 artmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın boy genişmesi yaklaşık %1,32 artmış olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4. 38 %10 MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 40 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin genişmesi (%)

Şekil 4.39'da %10 MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen köpük betonların 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin % olarak 120 günlük boy genişmesi gösterilmektedir. Bazalt lif oranı %0 olan karışım referans alındığında 120 günlük maruz kalma nedeniyle boy genişmesi yaklaşık %2,45 artmıştır. Bazalt lif oranı %1 olan karışımın genişmesi ise yaklaşık %2,56 artmış ve bazalt lif oranı %2 olan karışımın boy genişmesi yaklaşık %1,51 artmış olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4. 39 %10 MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakılan köpük betonların 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki numunelerin genişmesi (%)

120 gün boyunca MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz kalan tüm köpük içeriklerindeki karışımlar incelendiğinde, en çok boy genişmelerinin köpük içeriği 50 kg/m<sup>3</sup> olduğu gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %0 olan karışımlarda 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriği referans alındığında, 40kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım yaklaşık %3,70 daha az boy genişmesi gösterdiği ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık %126,85 daha fazla boy genişmesi gösterdiği gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %1 olan karışımlarda 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriği referans alındığında, 40kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım yaklaşık %123,81 daha fazla boy genişmesi gösterdiği ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık %306,35 daha fazla boy genişmesi gösterdiği gözlenmektedir. Bazalt lif oranı %2 olan karışımlarda 30 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriği referans alındığında, 40kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışım yaklaşık %16,81 daha fazla boy genişmesi gösterdiği ve 50 kg/m<sup>3</sup> köpük içeriğindeki karışımın yaklaşık % 33,63 daha

fazla boy genleşmesi gösterdiği gözlenmektedir. Verileri incelendiğinde, bazalt lif oranı %1 olan karışımlarda köpük içeriği artması diğer lif oranlarına göre çok daha fazla boy değişimi yaptığı gözlenmiştir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmaya dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Bazalt lif köpük betonların işlenebilirliğini azaltmaktadır. Köpük içeriğinin artması durumunda ise işlenebilirlik artmıştır. Köpük içeriği pasta hacmini arttırdığı için işlenebilirlik iyileşmektedir.
- Köpük içeriğinin artmasından dolayı agrega içeriğinin azalması köpük betonun kuru birim hacim ağırlığının azaltmaktadır. Köpük içeriği arttıkça köpük beton içerisindeki hava kabarcıkları arttığından dolayı porozite değerleri de artış göstermiştir. Köpük içeriğinin artmasıyla porozitesi artan köpük betonların su emmesi de artmaktadır. Özellikle  $50 \text{ kg/m}^3$  köpük içeriğine sahip köpük betonların su emme değerleri %14'ü aşmıştır.
- Köpük içeriğinin artması köpük betonun eğilme ve basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Köpük içeriğindeki artış poroziteyi arttırdığı için mekanik özellikler azalmaktadır. Bazalt lif içeriğinin artması durumunda beklendiği gibi köpük betonların eğilme dayanımları artmıştır.
- Köpük içeriğinin artması kapilerite özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Köpük içeriğinin artması hava kabarcıklarının birbirine yaklaşmasına neden olduğu için kapiler yolla emilen su miktarında artış göstermiştir.  $50 \text{ kg/m}^3$  gibi yüksek köpük içeriğinde lifler mikro filler etki yaparak boşluklar arasını kapatmış ve su işleme derinliğini azaltmıştır.
- Erken yaşlardaki hızlı su kaybı nedeniyle köpük betonların kuruma büzülmesinde ilk 14 gün keskin bir artış gözlenmektedir. Köpük içeriğinin artmasıyla köpük betonların kuruma büzülmesinde bir artış gözlenmektedir. Köpük içeriğindeki artış boşluk oranını arttırmakta ve bu durumda suyun buharlaşmasını kolaylaştırmaktadır. Bazalt lif içeriğinin artması da kuruma büzülmesinde artışa sebep olmuştur. Çünkü bazalt lif içeriğindeki artış

işlenebilirlik kaybına yol açarak poroziteyi arttırmaktadır. Bu durumda da suyun buharlaşması kolaylaşmakta ve kuruma büzülmesi artmaktadır.

- Köpük içeriğinin artması sülfat genleşmelerini arttırmaktadır. Köpük içeriğindeki artış genellikle geçirimsizliği arttırdığı için sülfat kaynaklı genleşmeleri arttırmıştır. Lif içeriğindeki artış ise genellikle genleşmeleri kontrol etmede yardımcı olmuştur.
- Hava ve su soğutma ile yüksek sıcaklıklarda, köpük içeriğinin artmasıyla köpük betonun kütle kaybında artış, eğilme ve basınç dayanımlarında azalma gözlenmektedir. Bazalt lif kullanımı yüksek sıcaklık sonrasında mekanik özelliklerde oluşan dayanım kayıplarını azaltmıştır.
- Bazalt lif içermeyen köpük betonların asit direncinin zayıf olduğu gözlenmektedir. Köpük içeriğinin artması asit direncini azaltmaktadır. Ancak bazalt lif kullanımıyla asit etkisi sonrasında oluşan ağırlık kayıpları azaltılmıştır.
- Sonuç olarak yüksek sıcaklık ve kimyasal etkilere karşı kalsiyum alüminat çimentosunun köpük betonlarda kullanılabilmesi belirlenmiştir. Ayrıca bazalt lifi takviyesi ile köpük betonların dayanım ve dayanıklılık özellikleri de iyileştirilecektir.

## KAYNAKLAR

- ACI Committee 544.4R, 1989, Design Consideration for Steel and Creep-Shrinkage Interaction of Restrained Concrete, Civil Engineering Studies, FAA Center of Excellencer for Airport Technology, Coe Report No. 14, p.33, Illinois.
- Afroz, M., Patnaikuni, I., ve Venkatesan, S. (2017). Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Construction and building materials*, 154, 191-203.
- Alnahhal, W., ve Aljidda, O. (2018). Flexural behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 169, 165-178.
- Alpaslan, Ş. (2019). Kıvam koruma performansı açısından kalsiyum alüminat çimentosunun akışkanlaştırıcı kimyasal katkılarla uyumunun incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Amran, Y. M., Farzadnia, N., ve Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990-1005.
- Asprone, D., Cadoni, E., Iucolano, F., ve Prota, A. (2014). Analysis of the strain-rate behavior of a basalt fiber reinforced natural hydraulic mortar. *Cement and Concrete Composites*, 53, 52-58.
- Aydın, M. (2019). Kalsiyum Alüminat Çimentosu ile Portland Çimentosunun Karşılaştırılması. Çukurova Üniversitesi.
- Barborak, R. (2010). Calcium Aluminate Cement Concrete (Class CAC Concrete) TxDOT Special Specification SS-4491 Tip Sheet. *Construction and Bridge Divisions, Texas Department of Transportation: Austin, TX, USA*.
- Barnes, P., ve Bensted, J. (2002). *Structure and performance of cements*. CRC Press.
- Bayraktar, O. Y. (2016). Statistical comparison of mechanical behavior at the time of accident in the mortars produced with pozzolanic additives, Gazi University, Institute of Science and Technology (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Ankara).
- Bayraktar, O. Y., Soylemez, H., Kaplan, G., Benli, A., Gencel, O., & Turkoglu, M. (2021). Effect of cement dosage and waste tire rubber on the mechanical, transport and abrasion characteristics of foam concretes subjected to H2SO4 and freeze-thaw. *Construction and Building Materials*, 302, 124229.
- Bentur, A., ve Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. Crc Press.

- Bhat, T., Kandare, E., Gibson, A. G., Di Modica, P., ve Mouritz, A. P. (2017). Compressive softening and failure of basalt fibre composites in fire: Modelling and experimentation. *Composite Structures*, 165, 15-24.
- Bing, C., Zhen, W., ve Ning, L. (2012). Experimental research on properties of high-strength foamed concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 24(1), 113-118.
- Bizzozero, J. (2014). *Hydration and dimensional stability of calcium aluminate cement based systems*. Epfl.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., ve Taylor, C. (2016a). Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 74, 182-190.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., ve Taylor, C. (2016b). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 878-886.
- Çetin, C., Delibaş, T., ve Kırca, Ö. (2015). Köpük Beton İmalatlarında Kalsiyum Alüminat Çimentosu Kullanımı.
- Davraz, M., Koru M., & Yanardağ, B. (2021). Kalsiyum alüminat çimentolu hafif betonun fiziko-mekanik ve termal özelliklerinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 217-229.
- DBV-Sachstandsbericht. (1996). Faserbeton mit synthetischen organischen Fasern.
- Di Ludovico, M., Prota, A., ve Manfredi, G. (2010). Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement. *Journal of composites for construction*, 14(5), 541-552.
- Dong, J. F., Wang, Q. Y., ve Guan, Z. W. (2017). Material properties of basalt fibre reinforced concrete made with recycled earthquake waste. *Construction and Building Materials*, 130, 241-251.
- Erkmen, K. C. (2018). *Hydration behavior and strength development of mineral admixture incorporated calcium aluminate cements* [Master's Thesis]. Middle East Technical University.
- Fenu, L., Forni, D., ve Cadoni, E. (2016). Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres. *Composites Part B: Engineering*, 92, 142-150.
- Gencil, O., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Benli, A., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., ... & Bodur, B. (2021). Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, 294, 123607.
- Guirado, F., ve Galí, S. (2006). Quantitative Rietveld analysis of CAC clinker phases using synchrotron radiation. *Cement and concrete research*, 36(11), 2021-2032.

- Hall, N. G. (2012). Project management: Recent developments and research opportunities. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 21(2), 129-143.
- Halm, J., ve V, F. F. e. (1996). Ausgangsstoffe, Herstellverfahren und Eigenschaften von Glasfaserbeton. *Tagungsband zum Symposium: Glasfaserbeton–Von der Einzelanwendung zur industriellen Fertigung*, 1-7.
- Hong, G.-H., ve Shin, Y.-S. (2003). Structural performance evaluation of reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(1), 78-86.
- Ilhan, B., ve Yaman, H. (2015). IFC-based sustainable construction: BIM and green building integration. *CIB W78 International Conference*, 32.
- Iorio, M., Santarelli, M. L., González-Gaitano, G., ve González-Benito, J. (2018). Surface modification and characterization of basalt fibers as potential reinforcement of concretes. *Applied Surface Science*, 427, 1248-1256.
- Ismail, K. M., Fathi, M. S., ve Manaf, N. (2004). Study of lightweight concrete behaviour. *Universiti Teknologi Malaysia*.
- Jiang, C., Fan, K., Wu, F., ve Chen, D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials ve Design*, 58, 187-193.
- Kabay, N. (2014). Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, 50, 95-101.
- Kadir, A. (2015). *Kimyasal Katkılarının Harç Fazına Etkilerinin Araştırılması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Kaplan, G., Turkoglu, M., Bodur, B., & Bayraktar, O. Y. (2021). Usage of recycled fine aggregates obtained from concretes with low w/c ratio in the production of masonry plaster and mortar. *Environment, Development and Sustainability*, 1-30.
- Karthikeyan, B., Selvaraj, R., ve Saravanan, S. (2015). Mechanical properties of foam concrete. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 8(2), 115-119.
- Katkhuda, H., ve Shatarat, N. (2017). Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment. *Construction and Building Materials*, 140, 328-335.
- Ketan, G., ve Kulkarni, S. M. (2012). The Performance of basalt fibre in high strength concrete. *Journal of Information, Knowledge and Research in Civil Engineering*, ISSN, 0975-6744.
- Kırca, Ö. (2006). *Temperature effect on calcium aluminate cement based composite binders*.

- Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., ve Akça, A. H. (2015). Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 218-224.
- Kocabeyoğlu, E. T. (2016). *Bazalt lif içeren yüksek dayanımlı harçların yüksek sıcaklık dirençleri* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Springer Science ve Business.
- Larrinaga, P., Chastre, C., Biscaia, H. C., ve San-José, J. T. (2014). Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress. *Materials ve Design*, 55, 66-74.
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. John Wiley ve Sons.
- Lipatov, Y. V., Gutnikov, S. I., Manylov, M. S., Zhukovskaya, E. S., ve Lazoryak, B. I. (2015). High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete. *Materials ve Design*, 73, 60-66.
- Liu, M. Y. J., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., ve Mo, K. H. (2014). Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. *Energy and Buildings*, 72, 238-245.
- Ma, Q., ve Zhu, Y. (2017). Experimental research on the microstructure and compressive and tensile properties of nano-SiO<sub>2</sub> concrete containing basalt fibers. *Underground Space*, 2(3), 175-181.
- Majumdar, A. J., ve Laws, V. (1991). *Glass Fibre Reinforced Cement*. BSP. Oxford.
- Mangabhai, R. J. (1990). *Calcium Aluminate Cements: Proceedings of a Symposium dedicated to HG Midgley, London, July 1990*. CRC Press.
- Militký, J., Kovačič, V., ve Rubnerova, J. (2002). Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers. *Engineering fracture mechanics*, 69(9), 1025-1033.
- Mindess, S., Young, J. F., ve Darwin, D. (1981). *Concrete*, PrenticeHall Inc. Englewood Cliffs, NJ.
- Mydin, M. A. O., ve Wang, Y. C. (2012). Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 638-654.
- Nambiar, E. K., ve Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and concrete research*, 37(2), 221-230.
- Nambiar, E. K., ve Ramamurthy, K. (2009). Shrinkage behavior of foam concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 21(11), 631-636.
- Nataraja, M. C., Dhang, N., ve Gupta, A. P. (2000). Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cement and concrete research*, 30(4), 593-597.

- Niaki, M. H., Fereidoon, A., ve Ahangari, M. G. (2018). Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete. *Composite Structures*, 191, 231-238.
- Onprom, P., Chaimoon, K., ve Cheerarot, R. (2015). Influence of bottom ash replacements as fine aggregate on the property of cellular concrete with various foam contents. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- Panesar, D. K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and building materials*, 44, 575-584.
- Phillips, L. N. (1989). *Design with advanced composite materials*.
- Quattrociocchi, G., Albé, M., Tirilló, J., Sarasini, F., Valente, M., ve Santarelli, M. L. (2015). Basalt fibres as a sustainable reinforcement for cement based mortars: Preliminary study. *Mater. Charact.* VII, 109, 109-120.
- Ramadevi, K., ve Shri, S. D. (2015). Flexural behaviour of hemp fiber reinforced concrete beams. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, 1819-6608.
- Ramakrishnan, V., Tolmare, N. S., ve Brik, V. B. (1998). *Performance evaluation of 3-D basalt fiber reinforced concrete ve basalt rod reinforced concrete*.
- Ramamurthy, K., ve Narayanan, N. (2000). Factors influencing the density and compressive strength of aerated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52(3), 163-168.
- Scheinherrová, L., ve Trník, A. (2017). Hydration of calcium aluminate cement determined by thermal analysis. *AIP Conference Proceedings*, 1866(1), 040034.
- Schnütgen, B. (1992). „Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons“. *Vorträge der DBV-Arbeitstagung, Duisburg*.
- Scrivener, K., ve Capmas, A. (2003). Calcium aluminate cements. *Advanced concrete technology*, 1-31.
- Sim, J., ve Park, C. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512.
- Sucu, M., ve Delibaş, T. (2015). Kalsiyum Alüminat Çimentosu Bazlı Tamir Betonları. *Hazır Beton*, 88-94.
- Şengül, K. (2018). *Influence of perlite addition on the strength development and thermal stability of calcium aluminate cement mortars* [Master's Thesis].
- Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* (C. 2). Thomas Telford London.
- Turro, N. J., Ramamurthy, V., Ramamurthy, V., ve Scaiano, J. C. (2009). *Principles of molecular photochemistry: An introduction*. University science books.
- Türker, T. (2000). Betonarmede Oluşan İç Gerilimlere Karşı Gerçek Önlem. *İnşaat ve Malzeme*, 150, 24-25.

- Uğurlu, A. (1994). *Çelik liflerle güçlendirilmiş beton*.
- Vilches, J., Ramezani, M., ve Neitzert, T. (2012). Experimental investigation of the fire resistance of ultra lightweight foam concrete. *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 1(4), 15-22.
- Werner, K.-C., Chen, Y., ve Odler, I. (2000). Investigations on stress corrosion of hardened cement pastes. *Cement and concrete research*, 30(9), 1443-1451.
- Wojciech, K. (2012). Study on the properties of cement mortars with basalt fibres. İçinde *Brittle Matrix Composites 10* (ss. 155-166). Elsevier.
- Yıldız, S. (1998). Lifli Beton Boruların Durabilitesi Kırılma Performansı ve Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Elazığ*.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., ve Wang, H. (2015). Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 62, 97-105.
- Zhao, Y.-R., Wang, L., Lei, Z.-K., Han, X.-F., ve Shi, J.-N. (2018). Study on bending damage and failure of basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 163, 460-470.
- Zhou, H., Chen, Q., Li, G., Luo, S., Song, T. B., Duan, H. S., Hong, Z., You, J., Liu, Y., ve Yang, Y. (2014). Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells. *Science*, 345(6196), 542-546. <https://doi.org/10.1126/science.1254050>