

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**GEOPOLİMER HARÇLARDA SELÜLOZİK LİF KULLANIMININ  
ARAŞTIRILMASI**

**İbrahim YETİŞ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2022**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**GEOPOLİMER HARÇLARDA SELÜLOZİK LİF KULLANIMININ  
ARAŞTIRILMASI**

**İbrahim YETİŞ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2022**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEOPOLİMER HARÇLARDA SELÜLOZİK LİF KULLANIMININ  
ARAŞTIRILMASI**

**İbrahim YETİŞ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi  
tarafından FYL-2021-5628 nolu projeyle desteklenmiştir.**

**HAZİRAN 2022**

**T.C.**  
**AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEPOLİMER HARÇLARDA SELÜLOZİK LİF KULLANIMININ**  
**ARAŞTIRILMASI**

**İbrahim YETİŞ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bu tez 29/06/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL (Danışman)

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

## ÖZET

### GEOPOLİMER HARÇLARDA SELÜLOZİK LİF KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

İbrahim YETİŞ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Haziran 2022; 77 sayfa

Bu tez çalışması, selülozik liflerin geopolimer harçlarda kullanımının incelenmesinin yanı sıra çevre kirliliğine neden olan atıkların tekrar kullanılarak ekonomiye kazandırılması amacı gütmektedir. Bu amaç doğrultusunda endüstri atığı olan silis dumanı ve bazik pomza (scoria) geopolimer harç yapımında kullanılmış ve atık kağıt liflerle desteklenmiştir. Üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini tespit etmek için yayılma çapı değeri, taze hal birim ağırlık, gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, su emme, açık gözeneklilik, toplam gözeneklilik, kompasite, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ilgili testler ve formüller kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen veriler kontrol numuneleri ile kıyaslanarak selülozik liflerin geopolimer harçlardaki etkinliği ve kullanılabilirliği hakkında bilgi edinilmiştir. En yüksek eğilme ve basınç dayanımı sırasıyla 7,62 ve 14,38 MPa olmak üzere %2 oranında lif içeren 10M'lık karışımdan elde edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Geopolimer, kağıt atık, mekanik özellikler, pomza, selülozik lif

**JÜRİ:** Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

**ABSTRACT**  
**INVESTIGATION OF CELLULOSIC FIBER USE IN GEOPOLYMER  
MORTARS**

**İbrahim YETİŞ**

**MSc Thesis in Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL**

**June 2022; 77 pages**

The thesis aims to examine the use of cellulosic fibers in geopolymer mortars as well as to reuse the wastes that cause environmental pollution. For this purpose, industrial waste silica fume and basaltic pumice (scoria) were used in the production of geopolymer mortars and were supported with wastepaper fibers. In order to determine the physical and mechanical properties of the produced samples, the flow diameter, fresh state unit weight, true density, apparent density, water absorption, open porosity, total porosity, compactness, compressive strength, bending strength were obtained by using the relevant tests and formulas. By comparing the obtained data with the control samples, information about the effectiveness and usability of cellulosic fibers in geopolymer mortars was obtained. The highest flexural and compressive strengths were obtained from the 10M mixture containing 2% fiber as 7,62 and 14,38 MPa, respectively.

**KEYWORDS:** Cellulosic fibers, geopolymer, mechanical properties, physical properties, wastepaper

**COMMITTEE:** Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen ve yol gösteren sayın hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                        | i    |
| ABSTRACT.....                                                     | ii   |
| ÖNSÖZ.....                                                        | iii  |
| AKADEMİK BEYAN .....                                              | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                     | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                             | ix   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                           | xiv  |
| 1. GİRİŞ .....                                                    | 1    |
| 2. KAYNAK TARAMASI .....                                          | 3    |
| 3. MATERYAL VE METOD .....                                        | 14   |
| 3.1. Materyal.....                                                | 14   |
| 3.1.1. Bağlayıcılar.....                                          | 14   |
| 3.1.2. Silis dumanı.....                                          | 14   |
| 3.1.3. Pomza.....                                                 | 16   |
| 3.2. Selüloz.....                                                 | 19   |
| 3.3. Aktivatör.....                                               | 20   |
| 3.3.1. Sodyum hidroksit.....                                      | 20   |
| 3.4. Agregat.....                                                 | 21   |
| 3.5. Lif.....                                                     | 22   |
| 3.6. Metot.....                                                   | 23   |
| 3.7.1.Lifler.....                                                 | 23   |
| 3.7.1. Karışımların hazırlanması.....                             | 24   |
| 3.7.2. Taze harcın yayılma çapı tespiti.....                      | 26   |
| 3.7.3. Taze harcın birim ağırlık tespiti.....                     | 26   |
| 3.7.4. Sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler..... | 27   |
| 3.7.5. Eğilmede çekme dayanım testi.....                          | 27   |
| 3.7.6. Basınç dayanım testi.....                                  | 28   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                     | 29   |
| 4.1. Sem görüntüleri ve EDX spektrumları.....                     | 61   |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 5. SONUÇLAR.....   | 73 |
| 6. KAYNAKLAR ..... | 74 |
| ÖZGEÇMİŞ           |    |



## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Geopolimer harçlarda selülozik lif kullanımının araştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

29/06/2022

İbrahim YETİŞ



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                |                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| A              | : Yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )                      |
| cm             | : Santimetre                                          |
| d <sub>1</sub> | : Numunenin genişliği (mm)                            |
| d <sub>2</sub> | : Numunenin yüksekliği (mm)                           |
| dk             | : Dakika                                              |
| dm             | : Desimetre                                           |
| F              | : Maksimum yük (N)                                    |
| gr             | : Gram                                                |
| L              | : Mesnetler arası mesafe (mm)                         |
| m              | : Metre                                               |
| M              | : Molarite                                            |
| M <sub>1</sub> | : Agreganın etüv kuru ağırlığı                        |
| M <sub>2</sub> | : Agreganın numunenin suya doymun kuru yüzey ağırlığı |
| MPa            | : Megapaskal                                          |
| $\sigma$       | : Gerilme (MPa)                                       |
| °C             | : Santigrat derece                                    |

Bu tez çalışmasında, ondalık ayırıcı olarak “virgül (,)” kullanılmıştır.

### **Kısaltmalar**

|                                     |                                          |
|-------------------------------------|------------------------------------------|
| BET                                 | : Yüzey alanı ölçümü                     |
| CNF                                 | : Selüloz nano lif                       |
| EDX                                 | : Enerji dağıtıcı x-ışını spektroskopisi |
| FRGC                                | : Lif takviyeli geopolimer betonlar      |
| GP                                  | : Geopolimer matris                      |
| GPBF                                | : Bambu lifli geopolimer kompozit        |
| HCl                                 | : Hidroklorik asit                       |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>      | : Sülfirik asit                          |
| MCC                                 | : Mikrokristalin selüloz                 |
| NaOH                                | : Sodyum hidroksit                       |
| Na <sub>2</sub> (SiO <sub>2</sub> ) | : Sodyum silikat                         |
| OPCC                                | : Normal portland çimentolu betonlar     |
| PVA                                 | : Polivinil alkol                        |
| SiO <sub>2</sub>                    | : Silisyum oksit                         |
| SEM                                 | : Taramalı elektron mikroskobu           |
| TS EN                               | : Türkiye standartları enstitüsü         |
| XRF                                 | : X-ışını florans spektrometresi         |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1</b> 1.0% olarak değişen pamuk lif takviyeli güçlendirilmiş geopolimerin kırılma yüzeylerini gösteren SEM görüntüleri (Samal ve Blanco 2021) ..... | 5  |
| <b>Şekil 2.2</b> Asit konsantrasyon oranlarına göre 7 gün sonunda meydana gelen kütle kaybı (Ribeiro vd. 2021) .....                                           | 7  |
| <b>Şekil 2.3</b> Farklı kompozitlerin eğilme-yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Ranjbar ve Zhang 2020).....       | 8  |
| <b>Şekil 2.4</b> Yük-deformasyon grafiği (da Silva vd. 2022).....                                                                                              | 9  |
| <b>Şekil 2.5</b> Yorulma kırılmasının meydana gelmesi için gereken çevrim sayısı (da Silva vd. 2022) .....                                                     | 9  |
| <b>Şekil 2.6</b> Lif içeriği ve akma arasındaki korelasyon (Ranjithkumar vd. 2022) .....                                                                       | 12 |
| <b>Şekil 2.7</b> Lif içeriğine göre yığın yoğunluk değerleri (Ranjithkumar vd. 2022) .....                                                                     | 13 |
| <b>Şekil 3.1</b> Silis dumanının görüntüsü .....                                                                                                               | 14 |
| <b>Şekil 3.2</b> Kullanılan pomzanın öğütülmeden önceki hali .....                                                                                             | 17 |
| <b>Şekil 3.3</b> Selüloz molekülünün kimyasal gösterimi.....                                                                                                   | 19 |
| <b>Şekil 3.4</b> Sodyum metasilikatın açık formülü.....                                                                                                        | 20 |
| <b>Şekil 3.5</b> Sodyum hidroksit peletlerinin görüntüsü .....                                                                                                 | 20 |
| <b>Şekil 3.6</b> Sodyum hidroksit peletlerinin suda çözünmesi .....                                                                                            | 21 |
| <b>Şekil 3.7</b> 4mm altı kırma taş agregası.....                                                                                                              | 21 |
| <b>Şekil 3.8</b> Kağıt lif boyutları .....                                                                                                                     | 22 |
| <b>Şekil 3.9</b> Kağıt liflerin görüntüsü .....                                                                                                                | 22 |
| <b>Şekil 3.10</b> Sodyum hidroksit çözeltisi içerisine batırılan kağıt lifler.....                                                                             | 23 |
| <b>Şekil 3.11</b> Kağıt liflerin süzülmesi.....                                                                                                                | 23 |
| <b>Şekil 3.12</b> Sodyum hidroksit çözeltisine doyurulup etüvde kurutulmuş lifler.....                                                                         | 24 |
| <b>Şekil 3.13</b> Sodyum silikat çözeltisine doyurulup etüvde kurutulmuş lifler.....                                                                           | 24 |
| <b>Şekil 3.14</b> Karışımında kullanılan öğütülmüş pomza .....                                                                                                 | 25 |
| <b>Şekil 3.15</b> Akma tablası deneyi .....                                                                                                                    | 26 |
| <b>Şekil 3.16</b> Arşimet terazisi .....                                                                                                                       | 26 |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.17</b> Üç nokta eğilme testi .....                                                                         | 27 |
| <b>Şekil 3.17</b> Basınç testi.....                                                                                   | 28 |
| <b>Şekil 4.1</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımları.....                     | 29 |
| <b>Şekil 4.2</b> 60 °C 24 saat kürlenmiş 7 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımları                             | 30 |
| <b>Şekil 4.3</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin ortalama eğilme dayanımları.....                     | 30 |
| <b>Şekil 4.4</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük ortalama eğilme dayanımları .....                                 | 31 |
| <b>Şekil 4.5</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin basınç tokluk değerlerinin karşılaştırılması .....    | 32 |
| <b>Şekil 4.6</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük basınç tokluk değerlerinin karşılaştırılması .....               | 33 |
| <b>Şekil 4.7</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük elastisite modüllerinin karşılaştırılması .                       | 34 |
| <b>Şekil 4.8</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük elastisite modüllerinin karşılaştırılması .....                  | 35 |
| <b>Şekil 4.9</b> Taze hal birim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması.....                                           | 36 |
| <b>Şekil 4.10</b> Hazırlanan harçların yayılma çaplarının karşılaştırılması .....                                     | 37 |
| <b>Şekil 4.11</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük gerçek yoğunluklarının karşılaştırılması .....                  | 38 |
| <b>Şekil 4.12</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin görünür yoğunluklarının karşılaştırılması .....     | 39 |
| <b>Şekil 4.13</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin yüzde su emme değerlerinin karşılaştırılması.....   | 40 |
| <b>Şekil 4.14</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin yüzde açık gözeneklilik.....                        | 41 |
| <b>Şekil 4.15</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük toplam gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması .....        | 42 |
| <b>Şekil 4.16</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin yüzde kompasite değerlerinin karşılaştırılması..... | 43 |
| <b>Şekil 4.17</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin gerçek yoğunluklarının karşılaştırılması .....       | 44 |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.18</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin görünür yoğunluklarının karşılaştırılması .....                  | 45 |
| <b>Şekil 4.19</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzdece su emme değerlerinin karşılaştırılması .....             | 46 |
| <b>Şekil 4.20</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzdece açık gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması .....   | 47 |
| <b>Şekil 4.21</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzdece toplam gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması ..... | 48 |
| <b>Şekil 4.22</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzdece komposite değerlerinin karşılaştırılması .....           | 49 |
| <b>Şekil 4.23</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....                  | 50 |
| <b>Şekil 4.24</b> 60 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiş numunelerin 7 günlük basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....          | 51 |
| <b>Şekil 4.25</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin eğilme gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....                  | 52 |
| <b>Şekil 4.26</b> 60 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiş numunelerin 7 günlük eğilme gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....           | 53 |
| <b>Şekil 4.27</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....                  | 54 |
| <b>Şekil 4.28</b> 60 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiş numunelerin 7 günlük basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....          | 55 |
| <b>Şekil 4.29</b> 8M'lık 8% lif içeren numunenin basınç dayanım testi esnasında görüntüsü .....                                   | 55 |
| <b>Şekil 4.30</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin eğilme gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....                  | 56 |
| <b>Şekil 4.31</b> 60 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiş numunelerin 7 günlük eğilme gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....           | 57 |
| <b>Şekil 4.32</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....                  | 58 |
| <b>Şekil 4.33</b> 60 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiş numunelerin 7 günlük basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....          | 59 |

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.34</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin eğilme basınç gerilme-<br>şekil değiştirme eğrileri.....  | 60 |
| <b>Şekil 4.35</b> 60 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiş numunelerin 7 günlük eğilme gerilme-<br>şekil değiştirme eğrileri..... | 61 |
| <b>Şekil 4.36</b> %8 lif içeren 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (100x)<br>.....                        | 62 |
| <b>Şekil 4.37</b> %8 lif içeren 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (250x)<br>.....                        | 63 |
| <b>Şekil 4.38</b> %8 lif içeren 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (500x)<br>.....                        | 63 |
| <b>Şekil 4.39</b> %8 lif içeren sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü<br>(100x).....                        | 64 |
| <b>Şekil 4.40</b> %8 lif içeren sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü<br>(250x).....                        | 64 |
| <b>Şekil 4.41</b> %8 lif içeren sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü<br>(500x).....                        | 65 |
| <b>Şekil 4.42</b> Lif içermeyen, 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü<br>(100x).....                        | 65 |
| <b>Şekil 4.43</b> Lif içermeyen, 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü<br>(250x).....                        | 66 |
| <b>Şekil 4.44</b> Lif içermeyen, 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü<br>(250x).....                        | 66 |
| <b>Şekil 4.45</b> Lif içermeyen, sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü<br>(100x).....                       | 67 |
| <b>Şekil 4.46</b> Lif içermeyen, sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü<br>(250x).....                       | 67 |
| <b>Şekil 4.47</b> Lif içermeyen, sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü<br>(500x).....                       | 68 |
| <b>Şekil 4.48</b> Lif içermeyen, sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait EDX spektrumları<br>.....                          | 69 |
| <b>Şekil 4.49</b> Lif içermeyen, 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait EDX spektrumları                                    | 70 |
| <b>Şekil 4.50</b> 8% lif içeren, sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait EDX spektrumları<br>.....                          | 71 |

**Şekil 4.51** 8% lif içeren, 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait EDX spektrumları.. 72



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 3.1</b> Alaşımların üretimi esnasında elde edilen silis dumanının SiO <sub>2</sub> içeriği (Aldred vd. 2006). ..... | 15 |
| <b>Çizelge 3.2</b> Farklı malzemelerin özgül yüzey değerleri (Aldred vd. 2006).....                                            | 15 |
| <b>Çizelge 3.3</b> Pomza bileşenlerinin ağırlıkça yüzdesi (XRF analizi) .....                                                  | 16 |
| <b>Çizelge 3.4</b> Agregaların silika içeriklerine göre sıralanması (Evan vd. 1999) .....                                      | 16 |
| <b>Çizelge 3.5</b> 1dm <sup>3</sup> karışma giren malzeme miktarları .....                                                     | 18 |
| <b>Çizelge 3.6</b> Çalışmada kullanılan bazik pomzanın BET analizi sonuçları .....                                             | 25 |
| <b>Çizelge 4.1</b> 60°C sıcaklıkta kurlenmiş numunelerin tokluk değerleri .....                                                | 32 |
| <b>Çizelge 4.2</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış tokluk değerleri.....                                                            | 33 |
| <b>Çizelge 4.3</b> 60°C sıcaklıkta kurlenmiş numunelerin elastisite değerleri .....                                            | 34 |
| <b>Çizelge 4.4</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış elastisite değerleri .....                                                       | 35 |
| <b>Çizelge 4.5</b> Karışımların taze hal birim ağırlıkları .....                                                               | 36 |
| <b>Çizelge 4.6</b> Hazırlanan harçların yayılma çapları.....                                                                   | 37 |
| <b>Çizelge 4.7</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin gerçek yoğunlukları .....                                            | 38 |
| <b>Çizelge 4.8</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin görünür yoğunlukları .....                                           | 39 |
| <b>Çizelge 4.9</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin yüzdece su emme değerleri .....                                      | 40 |
| <b>Çizelge 4.10</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin yüzdece açık gözeneklilik değerleri.....                            | 41 |
| <b>Çizelge 4.11</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin toplam gözeneklilik değerleri .....                                 | 42 |
| <b>Çizelge 4.12</b> Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin kompasite değerleri .....                                           | 43 |
| <b>Çizelge 4.13</b> 60°C sıcaklıkta kurlenmiş numunelerin gerçek yoğunlukları .....                                            | 44 |
| <b>Çizelge 4.14</b> 60°C sıcaklıkta kurlenmiş numunelerin görünür yoğunlukları .....                                           | 45 |
| <b>Çizelge 4.15</b> 60°C sıcaklıkta kurlenmiş numunelerin yüzdece su emme değerleri.....                                       | 46 |
| <b>Çizelge 4.16</b> 60°C sıcaklıkta kurlenmiş numunelerin yüzdece açık gözeneklilik değerleri.....                             | 47 |
| <b>Çizelge 4.17</b> 60°C sıcaklıkta kurlenmiş numunelerin toplam gözeneklilik değerleri .....                                  | 48 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 4.18</b> 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin kompasite değerleri..... | 49 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|



## 1. GİRİŞ

Kağıdın yazma, taşıma ve saklanmasıdaki kolaylıklar herhangi bir yerdeki bilgilerin çok kısa bir zamanda dünyanın her tarafına kolayca yayılmasını sağlamıştır. Fakat sanayileşmenin ve nüfusun artması ile artan kağıt tüketimi sonucu ortaya çıkan atık kağıtlar çevre kirliliği oluşturmaktadır. Herhangi bir alanda kullanım fonksiyonunu tamamlayan her türlü mukavva, kağıt ve kartonlar atık kağıt olarak tanımlanır. Bu kapsamda, her ne kadar son kullanım yerine gönderilmemiş olsa da kâğıt fabrikalarından çıkan kopuk kâğıtlar, dönüşüm sırasında çıkan kırpıntı kâğıtlar ve gazete basan matbaalardan çıkan hatalı gazete baskıları ve baskı fazlası gazete kâğıtları da atık kâğıt kabul edilmektedir.

Bu çalışmanın amacı kağıt atıkların geopolimer harç içerisinde lif olarak değerlendirilmesini ve bu atık malzemenin harç özelliklerine olan etkisini incelemektir. Üretilecek olan harçlarda, farklı oranlarda hacimce alınan kağıt lif atıklar ilave edilmiştir. Geopolimer harç üretiminde silis dumanı ve bazik pomza (scoria) kullanılmıştır. Harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Oranların kesin değerleri deneme karışımlarıyla belirlenmiştir. Bileşenler üzerinde özgül ağırlıkları, boşluk hacimleri ve su emme oranları tayini, taze harçlar üzerinde kıvam tayini ve sertleşmiş harçlar üzerinde basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede kağıt atık malzemelerin değerlendirilmesi ve aynı zamanda geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Atık kağıdın, çevre bilincinin geliştirilerek, çöpe atılmasının önlenmesi öncelikle katı atıkları taşımak ve bertaraf etmek için yapılan masrafları azaltmaktadır. Bu çalışmanın amacı, selülozik atıkları geopolimer harçlarda lif olarak kullanılmak, farklı lif oranlarıyla hazırlanan numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırmak ve kağıt liflerin geopolimer harçlar üzerindeki etkisini incelemektir. Ayrıca bu bilinçle yok olan veya doğru değerlendirilemeyen kağıt atıklar ekonomiye kazandırılmış olacaktır. Kaynakları tüketirken uzun vadeli düşünmek sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Kağıtların kullanıldıktan sonra doğaya atılmaları çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Atıkları çöp olarak bertaraf edecek sistemlerinde doğaya zarar verdiği ayrı bir gerçektir. Kağıt atıkların tekrar değerlendirilmesi çevreyi korumak için önemli bir adımdır. Selülozik atık malzemeler, inşaat sektöründe harç ve beton üretiminde de kullanılma potansiyeline sahiptir. Literatürde kağıt atıkların geopolimer harçlarda lif olarak kullanılmasını konu alan çalışmaya rastlanılmamıştır. Fakat geopolimer harçların çeşitli liflerle takviye edilerek mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır.

Geopolimer kompozitler son zamanlarda geleneksel çimento esaslı malzemelere umut verici bir ekolojik alternatif haline gelmiştir. Çevre dostudurlar ve üretimleri nispeten az miktarda enerji gerektirir. Ayrıca aleve ve ısıya karşı oldukça dirençli olmalarına ek iyi basınç dayanımı, dayanıklılık ve termal özelliklere sahiptirler. Bununla birlikte, bu kompozitler, birçok alanda kullanımlarını sınırlayan nispeten düşük çekme ve eğilme mukavemetine sahiptir (Korniejenko vd. 2016).

Çalışmanın başarıyla sonuçlanması halinde literatürde eksik olan kağıt atıkların selülozik lif olarak kullanımından elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiğine bağlı veriler elde edilmiştir. Kağıt lifler ile hazırlanan harçların süneklik ve tokluk değerlerine

etkileri belirlenmiş ve bu atık malzemenin kullanılabilirliği hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Kağıt ve ambalaj atıkları atık zincirinde büyük miktarda yer almaktadırlar. Bu yüzden tekrar değerlendirilmeleri çevreye büyük ölçüde fayda getirecektir. Enerjiden tasarruf elde edilecek ve atık olarak elden çıkarılması gereken kağıt miktarı da azaltılarak çöp alanlarının dolması engellenecektir. Bu atık malzemenin yapı malzemeleri sektöründe kullanılarak malzemenin çevreye verdiği zararlı etkiler azaltılmış olacak ve yeni nesil yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi sağlanacaktır.



## 2. KAYNAK TARAMASI

Literatürde kağıt atıkların geopolimer harçlarda lif olarak kullanılmasını konu alan çalışmaya rastlanılmamıştır. Fakat geopolimer harçların çeşitli liflerle takviye edilerek mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır.

Lif takviyesi, geopolimerlerin kırılma dayanımını iyileştirmenin bir yolu olarak ortaya çıkmıştır. Şu anda piyasada çeşitli lif türleri mevcuttur. Polipropilen lif kullanıldığında, yüksek esnekliği ve düşük sertliği nedeniyle genellikle ilk çatlamadan hemen sonra mukavemette büyük bir düşüş gösterir. Bu sorunları çözmek için, çelik lif gibi yüksek mukavemet ve sertliğe sahip lifler kullanılması önerilmiştir (Sukontasukkul vd. 2017). Lif takviyeli geopolimer malzemeler, iyi aderans özelliklerinden dolayı son zamanlarda beton güçlendirme ve onarımı için önde gelen sürdürülebilir onarım malzemeleri olarak kabul edilmektedir. Geopolimer malzemelere liflerin eklenmesi, mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilir, ancak aynı zamanda sertleşme, işlenebilirlik, yoğunluk, gözeneklilik gibi fiziksel özellikler de lif takviyesinden etkilenir. Tamirat işlerinde kullanmak için geopolimer harçlar-mikro lifleri optimize etmeden önce mikro lif takviyeli geopolimer harçların özelliklerini anlamak çok önemlidir (Bhutta vd. 2019).

Zulfiati vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada doğal lif ile takviye edilmiş uçucu kül bazlı polimerlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Doğal lif olarak 10 mm, 20 mm, 30 mm, uzunluğundaki ananas lifleri ağırlıkça %0, %0.25, %0.5 olarak harçlara eklenmiştir. Numuneler üzerinde yapılan basınç ve eğilme dayanımı testlerinde 30mm, %0.5 ananas lifi içeren numunelerin en yüksek basınç ve eğilme dayanımı sağladığı görülmüştür. Assaedi vd. (2015) yaptıkları çalışmalarda ise geopolimer kompozitler keten kumaş lifleriyle takviye edilmiş numunelerin mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. Keten lifler ağırlıkça %2,4, %3,0, %4,1 oranında kullanılmıştır. Elde edilen veriler lif içeriğinin arttıkça geopolimer harcın mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Termal testler keten liflerin 300°C'de çok yüksek oranda bozunmaya uğradığını ortaya koymuştur. Bir başka çalışmada ise Al-Mashhadani vd. (2017) tarafından lif takviyeli uçucu kül bazlı geopolimerlerin mekanik ve mikro yapı karakteristiği incelenmiştir. Geopolimer kompozitlere çelik, polipropilen ve polivinil alkol (PVA) lifler eklenmiştir. Numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin test edilmesi sonucunda takviye edilen liflerin geopolimer kompozitlerin dayanımını arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Çelik ve PVA lifler geopolimer kompozitin eğilme dayanımını sırasıyla %31,45 ve %39,84 oranında arttırmıştır. Ayrıca tüm lifler kontrol numunelerine göre kuruma büzülmesini oldukça azaltmıştır.

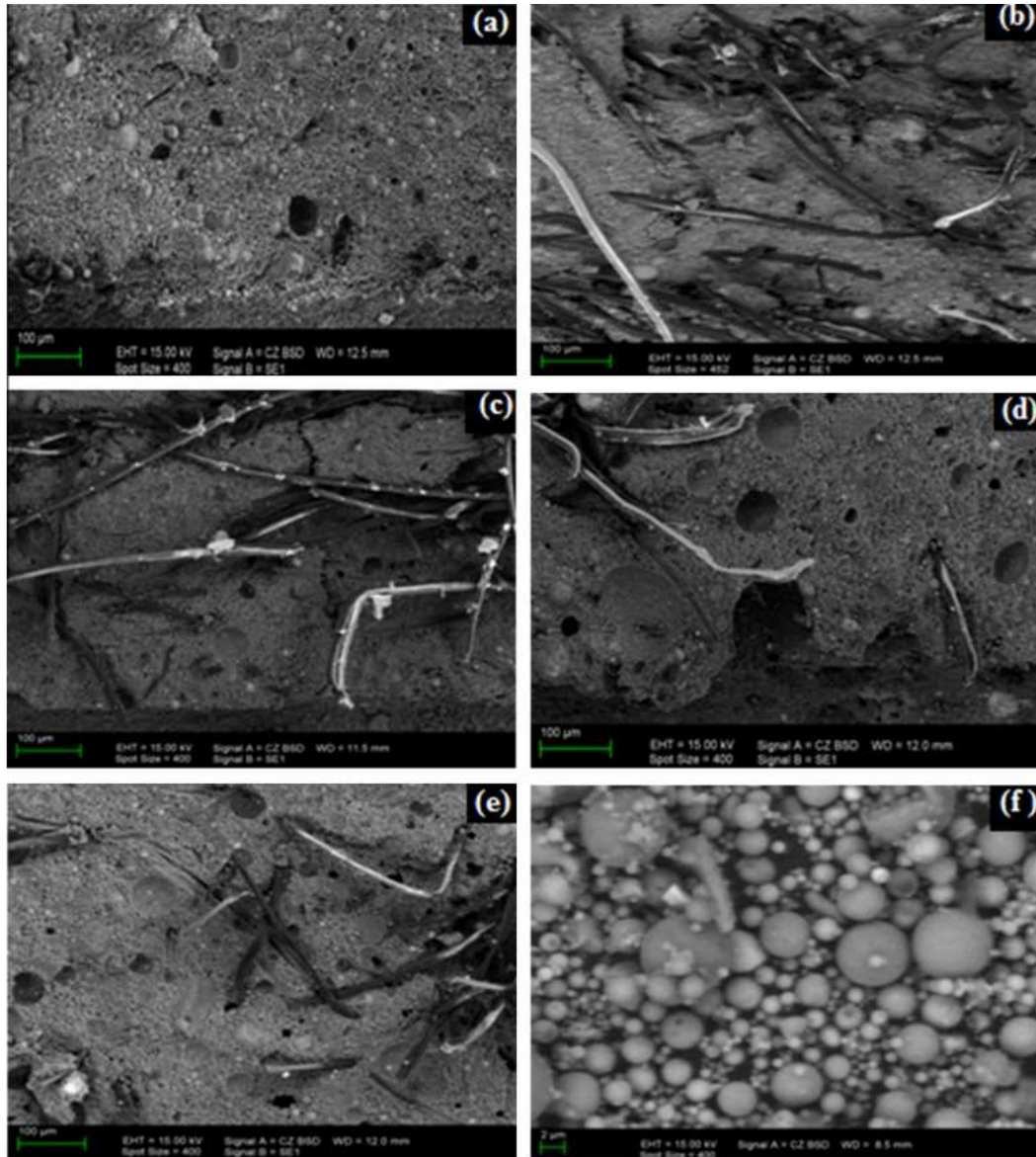
Shaikh (2013) tarafından yapılan çalışmada kısa lif takviyeli uçucu kül bazlı geopolimerin pekleşme davranışı incelenmiştir. Çalışmada geopolimer üretiminde kullanılan F sınıfı uçucu kül alkali sıvılar ile (sodyum hidroksit ve sodyum silikat) aktifleştirilmiştir. Numunelere çelik lif ve PVA eklenmiştir. Çalışma sonucunda geopolimer kompozitler çimento bazlı kompozitlere benzer pekleşme davranışı göstermiştir. Maksimum yüklemde ise geopolimer kompozitler daha fazla pekleşmiş ve geopolimer kompozitlerin sertlik değeri daha yüksek çıkmıştır. Bernal vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada alkali ile aktive edilmiş çelik lif takviyeli betonların erken dönem mekanik ve geçirimsizlik özellikleri irdelenmiştir. Elde edilen verilere göre takviye lifler basınç dayanımını düşürmüştür fakat çekme dayanımını lif miktarıyla orantılı olarak arttırdığı belirlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş betonların lifli veya lifsiz bir şekilde yapı

malzemesi olarak kullanılabilme potansiyelinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Al-Majidi vd. (2017) tarafından geliştirilmiş mikro yapı ve lif-matris ara yüzeyli çelik lif takviyeli geopolimer betonlar üzerine çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada önceki çalışmalardan farklı olarak birden fazla bağlayıcı madde ile oluşturulan harç numuneleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda hem yalın geopolimer betonların hem de çelik lif takviyeli geopolimer betonların basınç dayanımı cüruf içeriğine bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca çatlak davranışı ve enerji emme kapasitesindeki iyileşmenin cüruf içeriğine ve silika dumanının inceliğine bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Guo ve Pan (2018) yapmış olduğu çalışmada uçucu kül ve silika dumanının bir arada kullanıldığı geopolimer harçları polipropilen , bazalt ve çelik lifler ile takviye edilmiş ve numunelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Veriler polipropilen ve bazalt liflerin geopolimer harcın geç dönem mekanik özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir.

Geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özellikleri Zhang vd. (2018) tarafından tekrar gözden geçirilmiştir. Çalışmada geopolimer harçların işlenebilirliği , sertleşme zamanı, taze beton sıcaklığının yanı sıra sertleşmiş geopolimer betonların mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda şu ana kadar yapılan çalışmalar baz alındığında, geopolimer harçların çevre dostu olmasının yanında uygulanabilirliğinin yüksek olmasından dolayı yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi ve hatta gelecekte geopolimer harçların geleneksel çimentonun yerini alabileceği olduğu ön görülmüştür.

Yan ve Crensil (2012) tarafından atık kağıt tortularının geopolimer harçlara eklenmesiyle oluşturulan kompozitlerin yapı malzemesi üretiminde kullanılabilirliğini araştırılmıştır. Taze ve sertleşmiş geopolimer harçların özellikleri kuru atık kağıt tortu takviyesiyle iyileşmiş ve yapı malzemesi olarak kullanıma potansiyeli olduğunu göstermiştir. Geopolimer betonların dayanımını iyi olmasına rağmen kullanım alanı oldukça sınırlıdır. Geopolimer betonların daha büyük yapısal uygulamalarda kullanabilmek için gevrekliğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda Ohno ve Li (2014) yılında yaptığı çalışmada pekleşen, lif takviyeli, uçucu kül bazlı geopolimerlerin uygulanabilirliğini araştırmıştır. Numuneler PVA lifler ile takviye edilerek hazırlanmış ve numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma ile numunelerin sıcak küremeye tabi tutulması halinde dayanım ve süneklik özelliklerini arttırdığı tespit edilmiştir. Basınç , çekme dayanımı ve çekme sünekliği sırasıyla 27,6 Mpa, 3,4 MPa ve %4,3 mertebesinde artık göstermiştir. Alomayri vd. (2012) yaptıkları çalışmada, pamuk lifleri (ağırlıkça %0,3-%1,0) ile güçlendirilmiş uçucu kül bazlı geopolimerlerin fiziksel ve mekanik davranışları incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, uygun pamuk lifi takviyesiyle geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu görülmüştür. Numunelerin özellikle eğilme mukavemetleri ve kırılma tokluklarında artış elde edilmiştir. Buna ek olarak lif içeriğinin artmasıyla birlikte gözeneklilik artmış ve geopolimer kompozitlerin yoğunlukları düşmüştür. Lif içeriğinin fazla artması işlenebilirliğin düşüşüne ve dolaylı olarak mekanik özelliklerde zayıflamaya neden olmaktadır. SEM sonuçlarına göre daha düşük lif içeriğine sahip kompozitlerin gösterdiği lif-matris ara yüzey bağının daha iyi olduğu görüşmüştür. Samal ve Blanco (2021) tarafından lif takviyeli geopolimer kompozit uygulamalarının incelendiği çalışma FRGC'lerin çeşitli zorluklarını, mevcut bulgularını ve olası uygulamalarını ortaya koymaktadır. Lifler, geopolimer matrisinde takviye için düşünülen sentetik lifler, organik lifler, inorganik lifler ve doğal lifler gibi çeşitli tiplere ayrılırlar. Organik liflerden olan pamuğun farklı yüzdelerde, geopolimer harçlarda kullanımı Şekil 2.1'deki SEM

görüntüsü üzerinden incelenmiştir. Çeşitli lif takviyesi türlerinin ve hibrit liflerin bir kombinasyonunun kompozitin genel performansı üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Geopolimer kompozitlerin genel mukavemeti ile ilgili araştırmalar, kompozitin dayanıklılığına yönelik eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve darbe mukavemeti gibi çeşitli teknikler göz önünde bulundurularak rapor edilmiştir. Ayrıca, hibrit lif takviyesi, geopolimer kompozitlerde liflerin mekanik mukavemetini geliştirmek için yeni teknolojilerden biri olarak ortaya çıkmıştır. Temel inşaat endüstrisinden gelişmiş köpüklere ve termal yalıtkanlara kadar çok çeşitli geopolimer uygulamaları çalışma kapsamında irdelenmiştir. Bu derlemede, lif veya dolgu takviyeli geopolimer kompozit malzemelerin uygulanmasına ilişkin daha ayrıntılı bilgiler ortaya koymuştur.



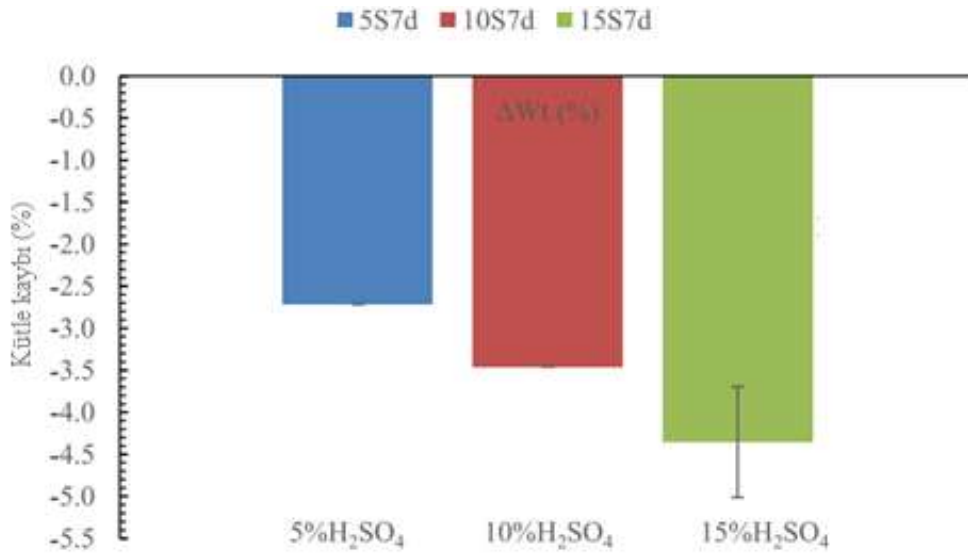
**Şekil 2.1** Ağırlıkça (a) %0, (b) %0,3, (c) %0,5, (d) %0,7 ve (e) %1,0 olarak değişen pamuk lif takviyeli güçlendirilmiş geopolimerin kırılma yüzeylerini gösteren SEM görüntüleri. (f) ise uçucu külün mikro yapısını göstermektedir (Samal ve Blanco 2021).

Ultrasonik olarak dağıtılan selüloz nano lif (CNF) süspansiyonu ile metakaolin bazlı geopolimerler Lazorenko vd. (2022) tarafından incelenmiştir. Çalışma kapsamında ağırlıkça %0,025, %0,05, %0,1 ve %0,25 CNF içeren geopolimer kompozitlerin taze ve sertleştirilmiş hal özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar selüloz nano liflerin geopolimer harçlarda takviye olarak etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Selüloz nano lifler harcın mukavemetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Lakin (CNF) içeriğinin artmasıyla beraber işlenebilirlikte hızlı bir düşüş gözlemlendiği için nano fibril içeriğinin belli bir orandan daha fazla olması kompozitin pratik olarak kullanılabildiğini kısıtlamaktadır. Veriler nano liflerin etkin bir şekilde kullanılabildiği %0,25'lik takviye oranının harç mukavemetine katısının en yüksek olduğunu göstermektedir. Çekme mukavemeti kontrol numunesine kıyasla %33 oranında artış göstermiştir.

Huang vd. (2021) bu çalışmada, hammadde olarak endüstriyel atık cürufu ve tarımsal kalıntı pirinç samanı kullanılarak pirinç samanı takviyeli geopolimerler kompozitleri hazırlanmıştır. İşlenmemiş ve alkali işlem görmüş pirinç samanı takviyeli geopolimerler üzerinde yapılan çalışmada hem işlenmemiş hem de alkali ile işlenmiş pirinç samanının geopolimerin eğilme mukavemetini önemli ölçüde iyileştirebildiği gözlenmiştir. Bu çalışmada, hammadde olarak endüstriyel atık cürufu ve tarımsal kalıntı pirinç samanı kullanılarak pirinç samanı takviyeli geopolimerler kompozitleri hazırlanmıştır. Pirinç samanı takviyesinin artması su emme oranlarında yüksek artışa neden olmaktadır. Taramalı elektron görüntüleri incelendiğinde, alkali ile muamele edilmiş pirinç samanına bağlanan geopolimer matrisin, muamele edilmemiş pirinç samanından daha iyi bağlandığı gözlemlenmiştir. Ye vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada selüloz, hemiselüloz ve ligninin metakaolin bazlı geopolimer morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış, çalışmada karşılaştırmalı değerlendirmeler, morfoloji analizi ve mekanik dayanımlar incelenmiştir. Sonuçlar, sırasıyla selüloz, hemiselüloz ve lignin ile geopolimer bazlı malzemelerin farklı mikroyapılarını ve mekanik özellikleri hakkında bilgi vermiştir. Düşük bir lignin, selüloz ve hemiselüloz içeriği (ağırlıkça %5) saf geopolimerin eğilme ve basınç dayanımını arttırmıştır. Daha yüksek lignin ve hemiselüloz, geopolimer bazlı kompozitlerde ise gözenekli morfolojiye, daha düşük yoğunluğa ve gevrek kırılmalara yol açmıştır. Bu durum geopolimer bazlı kompozitlerin eğilme ve basınç dayanımlarında azalmaya yol açmıştır. Geopolimerizasyon derecesinin, hemiselülozun alkali bozunmasıyla açıkça düştüğü kaydedilmiştir. Buna karşılık selüloz içeriğindeki artışla birlikte, geopolimer matrisinin daha yoğun yapısı ve daha az gözenekli yapısının yanı sıra geopolimer esaslı kompozitlerin kırılmalarının sünek olarak gerçekleştiği görülmüştür. Geopolimer matrisi ile selüloz lifleri arasında iyi bir bağlanma görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, doğal lif takviyeli geopolimerlerde lignoselülozik biyokütlenin etkisinin daha iyi anlaşılmasını kolaylaştırarak ve gelecek araştırmalar için yol gösterici olduğu düşünülmektedir.

Mikrokristalin selülozun geopolimer ve portland çimentosu macunlarının mekanik performansı üzerindeki etkisi Ferreira vd. (2021) tarafından araştırılmıştır. MCC kullanımı, incelenen her iki bağlayıcı için 7 günlük basınç dayanımını ve numune sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir. 28 gün sonra geopolimer hamurunun mekanik özellikleri MCC bozunması nedeniyle düşüş göstermiştir. Öte yandan, MCC ilavesi geopolimer priz süresini %15 hızlandırırken, çimento hamuru üzerinde ise prizi önemli derecede geciktirmiştir.

Metakaolin bazlı, bambu lifli geopolimer kompozitlerin asit direnci üzerinde bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada, geopolimer üretimi için kalsine kaolin, ticari sodyum silikat ve amazon bambusu kullanılmıştır. Geopolimer matris (GP) ve bambu lifli geopolimer kompozit (GPBF) malzemelerinin dayanıklılığı, ağırlıkça %0 ila %15 konsantrasyonlarda sülfürik ve hidroklorik asitlere maruz kalmaya karşı dirençleri incelenmiş ve iki farklı numune geometrisi test edilmiştir. Ham ve kompozit malzemelerin mikro yapısı, X-ışını floresan ve taramalı elektron mikroskobu ile araştırıldı. Geopolimer oluşumu, 28° iki teta ve birkaç kristal kuvars pikinde karakteristik amorf bir tümsek ile X-ışını kırınımı ile doğrulanmıştır. 7, 28 ve 112 gün boyunca ağırlıkça %0, %5, %15 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HCl'ye daldırılan tüm GP ve GPBF numunelerinin görsel görünümü, kütle değişimi ve basınç dayanımı davranışı incelenmiştir. İncelemeler sonucunda GP kütle kaybı Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, ağırlıkça %5, %10 ve %15 arasında değişen sülfürik asit konsantrasyonları ile artmış ve sırasıyla %2,7, %3,5 ve %4,4 oranlarında kütle kaybıyla sonuçlanmıştır (Ribeiro vd. 2021).

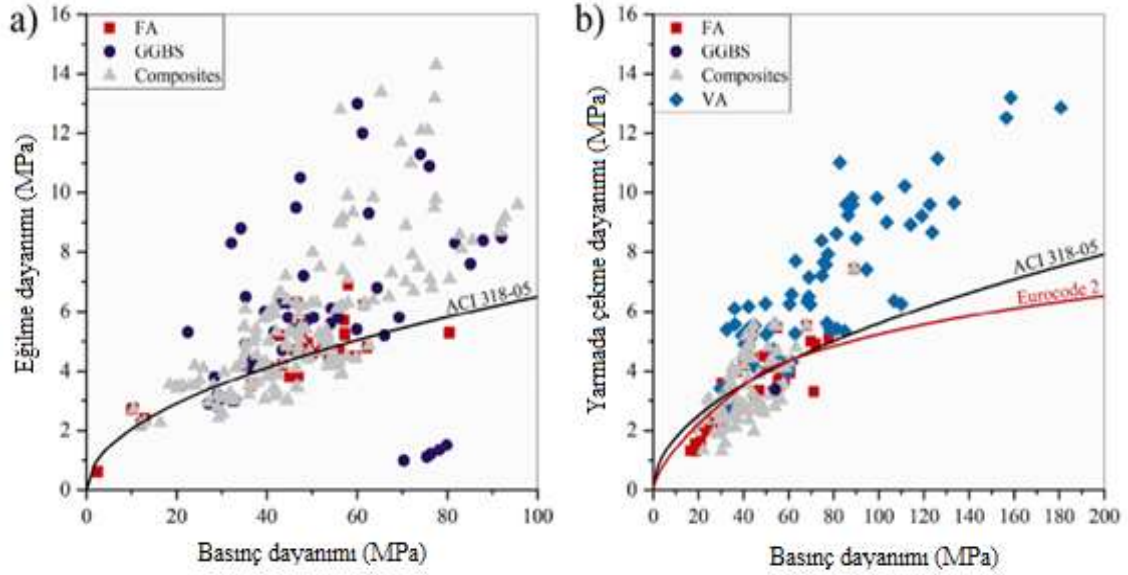


**Şekil 2.2** Asit konsantrasyon oranlarına göre 7 gün sonunda meydana gelen kütle kaybı (Ribeiro vd. 2021)

Genel olarak, GP ve GPBF numuneleri, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'e maruz kaldıklarında HCl'ye göre daha yüksek basınç dayanım kaybı yaşamıştır. GP ve GPBF, kanalizasyon sistemleri de dahil olmak üzere ağırlıkça %15'e kadar sülfürik veya hidroklorik asit ortamlarına maruz kalan uygulamalarda yapı malzemesi olarak güvenle uygulanabileceği çalışmada gösterilmiştir (Ribeiro vd. 2021).

Lif takviyeli geopolimer kompozitler üzerinde yapılan incelemeyi konu alan bu makale, inşaat liflerinin malzeme ve geometrik özelliklerine odaklanarak, lif takviyeli geopolimer kompozitlerin hızla gelişen son teknoloji durumunu ve taze ve sertleşmiş halde lif-bağlayıcı etkileşimi, mekanik özellikler, toklaştırma mekanizmaları, termal özellikler üzerindeki temel mekanizmaları tartışmaktadır. Son yıllarda, sürdürülebilir inşaat ve yüksek sıcaklığa dayanıklı imalat gibi çok çeşitli uygulamalar için geopolimerlerin geliştirilmesi, karakterizasyonu ve uygulanmasına artan bir ilgi olmuştur. Bununla birlikte, geopolimerler genellikle dayanım olarak zayıftır ve gevrek

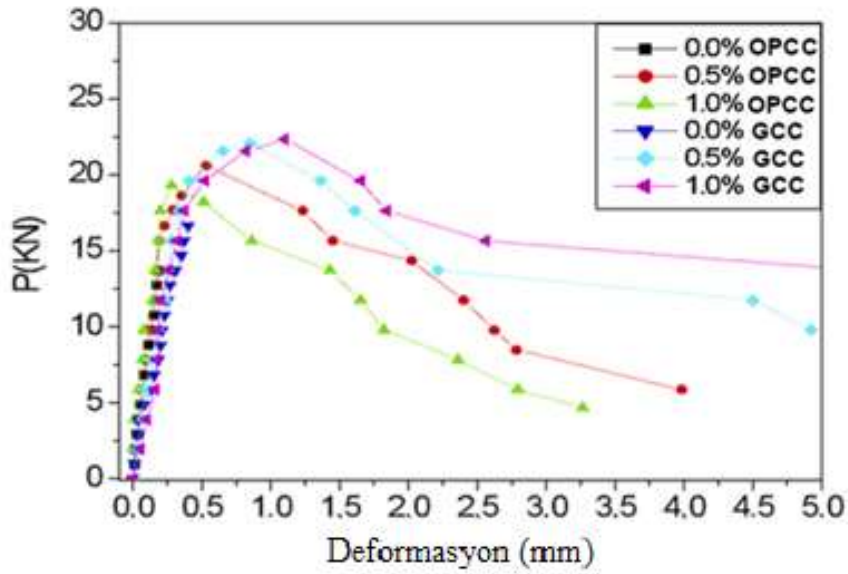
kırılma yaparlar. Bu zayıflığın üstesinden gelmek için, her bir özel uygulama için arzu edilen mekanik ve termal özellikleri elde etmek için farklı lif türlerinin geopolimer kompozitlere dahil edilmesine odaklanan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Malzemenin çeşitliliği ve liflerin geometrik özellikleri, bağlayıcının kimyasal bileşimi, döküm prosedürü ve çevre koşulları nedeniyle farklı kompozitler için farklı özellikler elde edilir (Ranjbar ve Zhang 2020) (Şekil 2.3).



**Şekil 2.3** Farklı kompozitlerin eğilme-yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Ranjbar ve Zhang 2020).

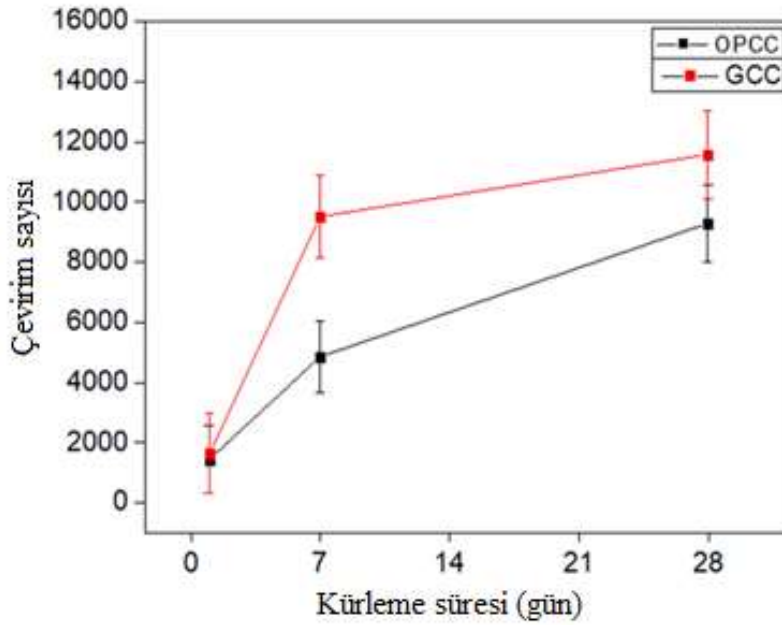
da Silva vd. (2022) tarafından çelik lif takviyeli geopolimer betonların yorulma davranışının incelendiği bu çalışmada çelik lif ile güçlendirilmiş GCC'nin yorulma davranışı, dinamik çevrimli çekme testleri ile değerlendirilmiş ve sıradan portland betonu (OPCC) ile karşılaştırılmıştır. Her iki beton tipinde de farklı çimento yaşlandırma süresinin (1, 7 ve 28 gün) ve uygulanan minimum gerilme seviyesi oranının ( $R = \sigma_{min} / \sigma_{flex}$ ) yarı statik eğilme mukavemeti (0,07, 0,20 ve 0,40) ile etkileri de aynı şekilde belirlenmiştir. Eklenen çelik lifin hacimce oranı ise (%0,5 ve %1) olarak belirlenmiştir.

- Hacimce %0,5 ve %1,0 çelik lif ile güçlendirilmiş geopolimer betonun (GCC) yorulması ilk kez dinamik döngülü eğilme testleri ile araştırılmış ve benzer şekilde güçlendirilmiş sıradan Portland çimento betonu (OPCC) ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Yük-deformasyon grafiği (da Silva vd. 2022)

- Başlangıçta yorulma testi yapılan donatısız beton numuneleri, 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde kürlenme süresinin artmasıyla birlikte kırılmaya kadar geçen çevrim sayısında önemli bir artış göstermiştir. 7 günlük GCC, 104 döngü civarında parçalanmış ve OPCC'den %96 daha yüksek yorulma direnci ortaya koymuştur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Yorulma kırılmasının meydana gelmesi için gereken çevrim sayısı (da Silva vd. 2022)

- Yaklaşık 6 MPa'lık yarı statik eğilme mukavemeti ile ilgili yorulmanın minimum stres seviyesinde kopmaya kadar olan döngü sayısı üzerindeki etkisi hem GCC hem de OPCC'de 0,07 ile 0,40 arasındaki oranlar için pratik olarak değişmeden kaldığı gözlemlenmiştir.

Uçucu kül bazlı geopolimer yapı malzemelerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için selüloz nano kristallerin kullanılmasını konu alan çalışmada ana amaç öncelikli olarak selüloz nano kristallerinin uçucu kül bazlı geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek, selüloz nano kristal konsantrasyonunun ve aktivatör konsantrasyonunun oluşturulan geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin bir veri tabanını oluşturmak, doğa dostu inşaat malzemeleri geliştirmek için ampirik bir çerçeve formüle etmektir. İstatistiksel bir deneysel tasarım kullanılarak optimize edilen selüloz nano kristallerle güçlendirilmiş geopolimerlerin yanında, deneysel bir çerçeve de geliştirilmiştir. Düşük selüloz nano kristal konsantrasyonlarının (%0.5'ten az) geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu katkı gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, değişen selüloz nano kristal konsantrasyonlarının oluşun geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Daha düşük selüloz nano kristalleri konsantrasyonlarının daha yüksek mukavemetli geopolimer üretimine olanak vermesi ve bazı durumlarda korozyon direnci sağlaması önemli bir noktadır. Daha yüksek selüloz nano kristal konsantrasyonlarının ise kararsız kürlenme ortamlarında geopolimerlerin çatlamasını engellediği göz önüne alındığında, selüloz nano kristalleri için başka bir uygulama yaratmıştır (Roopchand vd. 2022).

Raj ve Ramachandran (2019) Hibrit lif takviyeli geopolimer beton kirişlerin performansının incelendiği çalışmada çelik liflerin ve hibrit liflerin (çelik ve polipropilen) düşük kalsiyumlu kül bazlı geopolimer beton kirişlerin kesme altındaki performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dikkate alınan ana değişkenler, çelik liflerin hacimce oranı (%0,5 ve %1) ve hibrit liflerin hacim oranı (%0,25 çelik lifler ve %0,25 polipropilen lifler, %0,25 çelik lifler ve %0,75 polipropilen lifler ve %0,5 çelik lifler ve %0,5 polipropilen lifleri). Test sonuçları, hibrit lifli betonarmenin yarma çekme mukavemeti, eğilme mukavemet ve elastisite modülünün çelik lifli betona göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Lif ve hibrit lif takviyeli kirişlerin kesme altındaki performansını incelemek için, değişen hacim oranları ile 1200x100x150 mm boyutlarında kirişler hazırlanmıştır. Kirişler, 28 günlük kürlenmeden sonra iki nokta yükleme altında test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, hibrit lif takviyeli geopolimer beton kirişlerin çelik lif takviyeli kirişlere göre daha iyi kesme mukavemetine ve üstün davranışa sahip olduğunu göstermiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar:

- Geopolimer beton karışımlarında lif ilavesi işlenebilirlikte önemli bir azalmaya neden olur ama basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi yoktur.
- Geopolimer betonun çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti, çelik lif içeriğinin artmasıyla artar. %1 hacim oranına sahip çelik lif takviyeli kiriş, düz GPC kirişlere göre direkt çekme mukavemetinde %20 ve eğilme mukavemetinde sırasıyla %20 ve %21 artışa sahiptir.

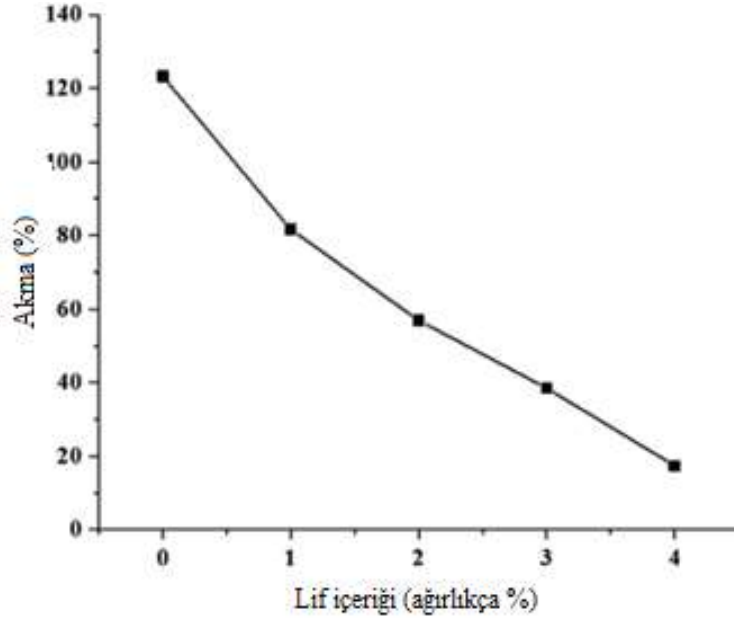
Selüloz liflerle güçlendirilmiş cam esaslı geopolimer matris kompozitlerin mekanik performansı Taveri vd. (2018) tarafından araştırılmıştır. Uçucu kül ve

borosilikat cam içeren cam bazlı geopolimerler yüksek alkalilik (NaOH 10-13 M) koşullarında işlenmiştir. Farklı formülasyonlar (sırasıyla ağırlıkça %70-30 ve ağırlıkça %30-70 karışımlarında uçucu kül ve borosilikat) ve fiziksel koşullar (ısıtma süresi ve bağıl nem) baz alınmıştır. Optimize edilmiş koşullarda dökülen numuneler sırasıyla üç noktalı eğilme testi ve şerit çentik testine tabii tutulmuş, eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğu değerlendirilmiştir. Kırılma mikro mekanizmalarını değerlendirmek için SEM görüntülerinden yardım alınmıştır. Sonuçlar, geopolimerizasyon verimliliğinin  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranından ve kürlenme koşullarından, özellikle hava neminden güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermiştir. Geopolimer numunelerinin mekanik performansları, farklı lif içeriklerine sahip selüloz lif-geopolimer matris kompozitleri ile karşılaştırılmıştır (ağırlıkça %1, %2 ve %3). Kompozitler, ağırlıkça %2'lik lif içeriği ile daha yüksek mukavemet ve kırılma direnci sergilemiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir:

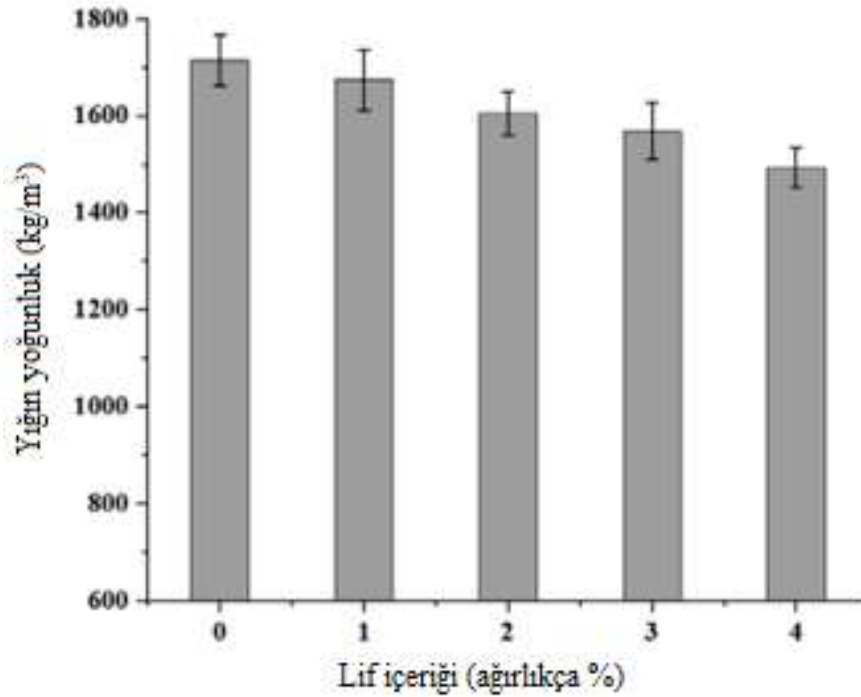
- Geopolimerlerin kırılma tokluğu, ağırlıkça %2 selüloz lifi içeren geopolimer matris numunelerinde 4 kata kadar arttığı gözlemlenmiştir.
- Geopolimer matris kompozitinin içerdiği lifler sayesinde çatlak köprüleme mekanizması da göstermektedir.

Doğal lif katkılı geopolimer köpükler üzerine yapılan bir inceleme yazısında özellikle doğal lif takviyesine odaklanan lif takviyeli geopolimer köpük beton alanındaki en son araştırma bulgularına genel bir bakış sunmaktadır. Ayrıca, doğal liflerin ve geopolimer köpüklerin bazı temel ve arka plan bilgileri rapor edilmektedir. Araştırmaların çoğunda, köpükler ya hidrojen peroksit ya da alüminyum tozu ile kimyasal köpürtme yoluyla ya da bir köpürtücü madde içeren mekanik köpürtme yoluyla üretilmektedir. Bununla birlikte, önceki incelemeler, söz dizimsel köpükler tarafından geopolimer köpüklerin imalatına yeterince değinmemiştir. Son olarak, geopolimer betonda lif bozulmasını azaltmaya yönelik denemeler, doğal lif takviyeli geopolimer köpük beton üzerinde zorluklarla birlikte tartışılmaktadır. Sonuçlar, doğal liflerin (örneğin, abaka ve kenevir) eklenmesinin, köpüklü geopolimerlerin ısıl iletkenliğinin yanı sıra eğilme ve basınç mukavemetini iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, doğal liflerin ve nano partiküllerin kombinasyonu, geopolimer matrisi içindeki liflerin daha yüksek dayanıklılığına yol açmaktadır. Bununla birlikte, bu kompozitler, lif-matris aderansının veya köpük stabilitesinin iyileştirilmesi gibi birçok zorlukla karşı karşıyadır. Ek olarak, doğal liflerin değişken kalitesi, bileşimi ve mekanik işlemi de araştırma çabaları arasında karşılaştırma yapmayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir alternatifler için son zamanlarda atılan adımlar, geleneksel ısı yalıtım malzemelerinin doğal lif takviyeli geopolimer köpük beton ile değiştirilmesi için henüz erken olduğu, bu konu üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerektiği ortaya konmuştur (Walbrück vd. 2020).

Ranjithkumar vd. (2022) tarafından sürdürülebilir doğal lif takviyeli geopolimer kompozitlerin karakterizasyonunun incelendiği bu makale Phoenix sp.'nin özelliklerinin araştırılmasına odaklanmaktadır. Lif bazlı geopolimer kompozitler, kontrol numuneleri ve elyaf lif takviyeli numuneler olarak (ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4) üretilmiş ve numuneler üzerinde fiziksel, mekanik, morfolojik, ultrasonik darbe hızı, su emme, ısıl iletkenlik ve kırılma değerlerinin tespiti için gerekli testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6 Lif içeriği ve akma arasındaki korelasyon (Ranjithkumar vd. 2022)



Şekil 2.7 Lif içeriğine göre yığın yoğunluk değerleri (Ranjithkumar vd. 2022)

Liflerin geopolimerlere takviye edilmesi dönüştürülmesi, yarma gerilmesini (1,28–2,35 MPa), basınç (27,85–32,18 MPa) ve eğilme mukavemetlerini (3,34–6,53 MPa) iyileştirmiştir. Buna karşılık, lif takviyesi ağırlıkça 4%'e yükselince geopolimerin

işlenebilirliği ve yığın yoğunluğu sırasıyla %86 ve %13'e düştü (Şekil 2.6, Şekil 2.7). Ayrıca, kütle yoğunluğu ve termal iletkenlik ile ultrasonik darbe hızı ve basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu kanıtlanmıştır. Phoenix sp.'nin hidrofilik karakteri nedeniyle lif içeriği arttıkça su emiliminde de artış gözlemlenmiştir. Köprüleme aktivitesi sonucunda Phoenix sp. lifler kompozitlerin kırılma tokluğunu iyileştirmiştir. Lif içeriğindeki artış, işlenebilirlik, yığın yoğunluk ve su absorpsiyonu üzerinde olumsuz bir etki göstermiştir. Düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle bu kompozitlerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği görülmektedir.



### 3. MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında üretilen numuneler üzerinde yapılan deneyler ve bu deneylerin dayandırıldığı standartların yanı sıra, numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler, materyal ve metot başlığı altında belirtilerek incelenmiştir.

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Bağlayıcılar

Geopolimer harç üretiminde doğal puzolan olan bazik pomza (scoria) ve Antalya Eti Elektrometalürji A.Ş. tarafından laboratuvarımıza hibe edilen, yapay puzolan, silis dumanı kullanılmıştır. Bağlayıcıların lif ve aktivatör ile uyumunu saptayıp kesin karışım oranlarını belirlemek üzere birçok farklı bağlayıcı-lif-aktivatör oranları denenmiştir. Denemeler sonucunda elde edilen veriler incelenerek beklenen işlenebilirliğin elde edilebildiği en yüksek lif içeriğine sahip karışım belirlenmiş, bağlayıcı oranları, aktivatör çeşidi ve miktarı kesinleştirilmiştir.

##### 3.1.2. Silis dumanı

Ferrosilisyum, silisyum metali ve alaşımlarının üretiminde kullanılan elektrikli ark fırınlarında kuvarsitin, kömür ve odun parçacıklarıyla indirgemesiyle oraya çıkan çok ince taneli toz baca tozu ya da literatürdeki adıyla silis dumanı olarak adlandırılır (Yeğinobalı 2006) (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1** Silis dumanının görüntüsü

Ülkemizde silis dumanının başlıca üretim merkezi Antalya’da bulunan Eti Elektrometalürji A.Ş.’dir. Tesisin yıllık silis dumanı üretimi 1.000-2.000 ton arasındadır. Silis dumanının dünyada üretimin miktarına baktığımızda ise A.B.D ve Norveç ilk sırada yer almaktadır. Dünyada yıllık toplam silis dumanı üretimi yaklaşık 1 milyon ton kadardır.

Silis dumanı çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılmakta ve ülkemizde de silis dumanlı çimento standartlarda yer almaktadır. Farklı alaşımların elektrikli ark fırınlarında üretilmesi esnasında elde edilen silis dumanının  $\text{SiO}_2$  içeriği de değişiklik göstermektedir (Çizelge 3.1).

**Çizelge 3.1** Alaşımların üretimi esnasında elde edilen silis dumanının  $\text{SiO}_2$  içeriği (Aldred vd. 2006).

| Alaşım Türü       | $\text{SiO}_2(\%)$ |
|-------------------|--------------------|
| 50% Ferrosilisyum | 61-84              |
| 75% Ferrosilisyum | 84-91              |
| Metal Silisyum    | 87-98              |

Yüksek dayanım ve dayanıklı beton ihtiyacının olduğu hemen hemen her yerde silis dumanı katkı olarak kullanılabilir. Silis dumanı çimento ve puzolanlara kıyasla çok ince taneli bir yapıya sahiptir (Çizelge 3.2). Bu özelliği nedeniyle beton içerisindeki boşlukları iyi bir şekilde doldurma kapasitesine sahiptir.

Ancak, aşağıdaki değerler yine de silis dumanının inceliği konusunda bir fikir vermektedir.

**Çizelge 3.2** Farklı malzemelerin özgül yüzey değerleri ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) (Aldred vd. 2006).

| Malzeme Türü        | Özgül Yüzey ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) |
|---------------------|----------------------------------------|
| Portland çimentosu  | 300-400                                |
| Uçucu kül           | 400-700                                |
| Yüksek fırın cürufu | 350-600                                |
| Silis dumanı        | 13000-20000                            |

Silis dumanının beton üretiminde kullanılmasıyla elde edilen olumlu özellikler ve potansiyel zararlı etkiler maddeler halinde özetlenmiştir (Erdoğan 2003):

#### Olumlu Etkileri

- Betonda basınç dayanımını artırır
- Taze betonda terlemeyi ve segregasyonu azaltır
- Betonun hidratasyon esnasında açığa çıkardığı ısıyı azaltır
- Sertleşmiş betonda geçirimsizliği artırır.
- Silis dumanı katkılı betonlarda alkali-silika reaksiyonu daha az görülür.
- Sülfata karşı direnç silis dumanı ihtivasıyla birlikte artar.

Potansiyel Zararlı Etkileri :

- Silis dumanı kullanılarak hazırlanan betonlarda su gereksinimi artar ve işlenebilirlik düşer. Bu durumun önüne geçilebilmesi için kimyasal akışkanlaştırıcılar gerekebilir.
- Silis dumanı çok ince taneli olması yüzey alanının artmasına ve terlemenin azalmasına neden olur. Bu durum beton perdahlama işlemi sırasında sıkıntı çıkarabilmektedir.
- Silis dumanı plastik büzülme çatlaklarının artmasına neden olur.
- Silis dumanıyla üretilen betonların renkleri normal betonlardan farklıdır.

### 3.1.3 Pomza

Volkanik bir kayaç olan pomza boşluklu yapısı sayesinde fiziksel ve kimyasal etkilere dayanıklı, camsı ve süngerimsi yapıdadır. Pomza puzolanik özellik gösterir ve puzolanik aktivitesi görece yüksektir. Pomzada bulunan irili ufaklı boşluklar oluşum aşamasında bünyesindeki gazların aniden yapıyı terk etmesinin bir sonucudur. Pomzanın gözenekli yapısı birim hacim ağırlığının da düşük olmasını sağlamaktadır. Gözenekli yapı ayrıca ses ve ısı yalıtımı da sağlar. Pomzada bulunan gözeneklerin birbiriyle bağlantılı olmaması geçirimsizliğin düşük olmasına neden olur (Özkan vd. 2001). Tez kapsamında kullanılan pomza bileşenlerinin ağırlıkça yüzdeleri gerçekleştirilen XRF analizi sonucunda elde edilmiştir (Çizelge 3.3). Buna göre Çizelge 3.4'te verilen agregaların silika içeriklerine göre sınıflandırılması göz önünde bulundurulduğunda çalışmada kullanılan pomzanın ultrabazik sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir.

**Çizelge 3.3** Pomza bileşenlerinin ağırlıkça yüzdesi (XRF analizi)

| Bileşen                        | Ağırlıkça (%) |
|--------------------------------|---------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 43,60         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 21,20         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8,46          |
| CaO                            | 8,02          |
| MgO                            | 4,03          |
| K <sub>2</sub> O               | 3,99          |
| TiO <sub>2</sub>               | 2,64          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,74          |
| SO <sub>3</sub>                | 0,16          |
| Cl                             | 0,13          |

**Çizelge 3.4** Agregaların silika içeriklerine göre sınıflandırılması (Evan vd. 1999)

| Nitelik    | Silika (%) |
|------------|------------|
| Asidik     | > 60       |
| Orta       | 52-66      |
| Bazik      | 45-52      |
| Ultrabazik | < 45       |



**Şekil 3.2** Kullanılan pomzanın öğütülmeden önceki hali

Şekil 3.2’de öğütülmeden önceki halinin görüntüsü verilen pomza soğuk kış aylarında soğuğa, sıcak yaz aylarında ise sığağı karşı yüksek izolasyon sağlar. Pomzanın sertlik değeri Mohs skalasına göre 5-6 civarındadır. Camsı yapıda olduğı için kırılıgandır. Bileşiminde yüksek oranda silise rastlanılır (Çizelge 3.3). Pomzanın yapısında bulunan  $Al_2O_3$  sayesinde pomza ateşe ve ısıya karşı dayanıklıdır. Pomzanın oluşma şekli asidik ve bazik olarak ikiye ayrılmasını sağlar. En yaygın olarak bulunanı asidik pomzadır. Renklerinden kolaylıkla ayırt edilebilir. Asidik pomza kirli beyaz bir renge sahipken bazik pomza kahverenginin tonlarında renk skalasına sahiptir. Asidik pomza bazik pomzaya kıyasla yoğunluk bakımından daha hafiftir (Özkan vd. 2001). Agregalar içerdikleri silika  $SiO_2$  oranına göre asidik veya bazik olarak sınıflandırılırlar (Evan vd. 1999) (Çizelge3.4).

Sertlik değeri ise bazik pomzayla eş olup Mohs skalasına göre 5-6’dır. Pomza en yaygın olarak inşaat sektöründe kullanılır. Gözenekli yapısı sayesinde ısı ve ses yalıtımı sağlaması, özgül ağırlığının normal agregalara kıyasla daha az olması pomzayı diğer agregalardan üstün kılan şeylerin başında gelir. Hafif agrega ile üretilen binalarda deprem esnasında binayı etkileyen kuvvetlerin daha az olmasına dolayısıyla depreme daha dayanıklı olmasına yol açar. Bu katkılara ek olarak donma-çözünme direncinde belirleyici parametre olan boşluk yapısı pomzalarda hali hazırda bulunduğundan yapılan çalışmalarda pomza ile üretilen betonların donma-çözünme etkilerine karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir (Özkan vd. 2001).

Çizelge 3.5 1dm<sup>3</sup> karışma giren malzeme miktarları

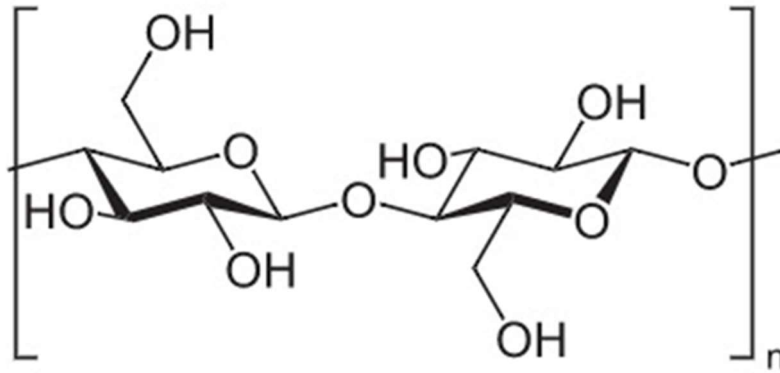
| Molarite   | Karışma Giren Kağıt Miktarı (Hacimce) | Pomza (gr) | Silis Dumanı (gr) | Agrega (gr) | NaOH (gr) | Kağıt (gr) | Ek Su (gr) |
|------------|---------------------------------------|------------|-------------------|-------------|-----------|------------|------------|
| <b>10M</b> | <b>%0</b>                             | 267        | 226               | 1201        | 140       | 0          | 27,6       |
|            | <b>%2</b>                             | 267        | 226               | 1126        | 140       | 18,5       | 53,5       |
|            | <b>%4</b>                             | 267        | 226               | 1046        | 140       | 37         | 78,5       |
|            | <b>%6</b>                             | 267        | 226               | 976         | 140       | 55,5       | 105,5      |
|            | <b>%8</b>                             | 267        | 226               | 900         | 140       | 74         | 131,7      |
| <b>8M</b>  | <b>%0</b>                             | 267        | 226               | 1201        | 112       | 0          | 27,6       |
|            | <b>%2</b>                             | 267        | 226               | 1126        | 112       | 18,5       | 53,5       |
|            | <b>%4</b>                             | 267        | 226               | 1046        | 112       | 37         | 78,5       |
|            | <b>%6</b>                             | 267        | 226               | 976         | 112       | 55,5       | 105,5      |
|            | <b>%8</b>                             | 267        | 226               | 900         | 112       | 74         | 131,7      |
| <b>6M</b>  | <b>%0</b>                             | 267        | 226               | 1201        | 84        | 0          | 27,6       |
|            | <b>%2</b>                             | 267        | 226               | 1126        | 84        | 18,5       | 53,5       |
|            | <b>%4</b>                             | 267        | 226               | 1046        | 84        | 37         | 78,5       |
|            | <b>%6</b>                             | 267        | 226               | 976         | 84        | 55,5       | 105,5      |
|            | <b>%8</b>                             | 267        | 226               | 900         | 84        | 74         | 131,7      |

Deneme karışımlarından elde edilen veriler irdelenerek kararlaştırılan nihai karışım oranları ve 1dm<sup>3</sup> karışma giren madde miktarları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

### 3.2. Selüloz

Bitki hücre duvarının ana maddesi olan selülozun formülü  $(C_6H_{10}O_5)_n$  şeklindedir (Şekil 3.3). Bir polisakkarit olan selüloz, binlerce glikozun birbirlerine bağlanarak zincir oluşturmasıyla meydana gelir. Nişasta da bir polisakkarit olmasına karşın, bünyesindeki glikozların birbirlerine bağlanmalarındaki farklılık bu iki organik bileşeni birbirlerinden tamamen farklı özellikte kılmaktadır (Crawford ve Ronald 1981). Bitkiler haricinde bazı alglerde ve bakterilerde de bulunan selüloz dünya üzerinde en çok bulunan organik polimerdir ve %44,44 karbon, %6,17 hidrojen ve %49,39 oksijenden oluşmaktadır. Bünyesindeki hidrojen bağları nedeniyle selüloz oldukça sert yapıdadır (Klemm vd. 2005).

Selüloz tatsız ve kokusuzdur. Hidrofil yani suyu bünyesine çeken yapıdadır. Suda çözünmez. Erime sıcaklığı  $467\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir ve yüksek sıcaklıkta mineral asitler yardımıyla parçalanarak glikoz moleküllerine ayrılabilir (Wymen ve Charles 1994). Bitkilerden elde edilen selüloz genellikle hemiselüloz, lignin ve ekstratlar ile karışık şekilde bulunur. Bakteriyel selüloz ise oldukça saf haldedir. Yüksek su içeriğine sahiptir ve daha uzun glikoz zincirine sahip olması nedeniyle daha yüksek çekme dayanımı gösterir Klemm vd. (2005). İnsanlarda gerekli enzimler bulunmadığından selülozun sindirimi gerçekleşmez. Selüloz ağırlıklı beslenen inek, at, gibi hayvanlar ise kendi bünyelerinde selülozun sindirimi için gerekli enzimi üretmeseler de sindirim sistemlerinde barındırdıkları bakteriler selülozu parçalayabilmektedir. Aynı şekilde termitlerin bünyesinde bulunan kamçıli tek hücreli yapılar selülozu sindirerek termitin kullanımına hazır hale getirirken, bu tek hücreli canlılar insanlarda ciddi parazit enfeksiyonlarına neden olmaktadır (La Reau vd. 2018).

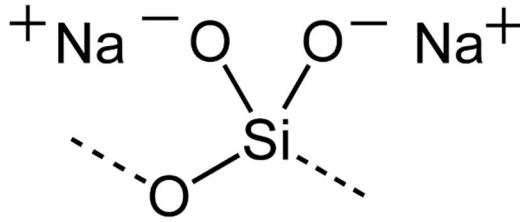


**Şekil 3.3** Selüloz molekülünün kimyasal gösterimi

Doğada selüloz nadiren saf halde bulunur. En saf bitkisel selüloz kaynağı olan pamukta %90 oranında selüloz bulunmaktadır. Odunsu selüloz kaynakları, selülozun yanında hemiselüloz, lignin ve çeşitli ekstratlar bulundurmaktadır (Piotrowski vd. 2011).

### 3.3. Aktivatör

Karışıma giren puzolanların bağlayıcı özellik kazanabilmeleri için aktive edilmeleri gerekmektedir. Geopolimer üretiminde en yaygın şekilde kullanılan aktivatörler cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat ( $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ ) ve sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) çözeltisidir (Greenwood vd. 2012). Üretilen deneme karışımlarında sodyum silikat serisinin bir üyesi olan sodyum metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kullanılmıştır (Şekil 3.4).  $\text{NaOH}$  ise 8M, 10M ve 12M'lık çözeltiler oluşturularak karışımlara eklenmiştir. İşlenebilirliğin de göz önüne alınarak incelendiği deney sonuçları sonucunda kesin karışımlarda aktivatör olarak 6M, 8M ve 10M  $\text{NaOH}$  çözeltisinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.4 Sodyum metasilikatın açık formülü

#### 3.3.1 Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) diğer bir adıyla kostik soda bazik bir yapıdadır ve 13,5 pH değerine sahiptir (Şekil 3.5). Özellikle hijyenik madde üretiminde kullanılmaktadır. Su içerisinde ekzotermik bir tepkime ile çözünür (Siemens vd. 1969) (Şekil 3.6). Çalışma kapsamında %99 saflıkta sodyum hidroksit pelletleri kullanılmıştır. Kullanılan pelletlerin molar kütlesi 40g/mol yoğunluğu ise 2,13 g/cm<sup>3</sup>'dür.



Şekil 3.5 Sodyum hidroksit pelletlerinin görüntüsü



**Şekil 3.6.** Sodyum hidroksit çözeltisi

### 3.4. Agregat

Harç üretiminde kırma kum agregası kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı suya doymun kuru yüzey haline getirildikten sonra Le Chatelier balonu yardımı ile hesaplanmıştır (ASTM C128-01).



**Şekil 3.7** 4mm altı kırma taş agregası

Bulunan özgül ağırlık değeri baz alınarak karışım hesapları yapılmıştır. Şekil 3.7’de görülen agregat üzerinde elek analizi gerçekleştirilmiş ve tane boyut dağılımı grafiği elde edilmiştir. (TS EN 933-1).

Su emme yüzdesinin belirlenmesi amacıyla suya doymun kuru yüzey hale getirilen agrega 100 °C etüvde 24 saat bekletilmiştir. Aşağıda belirtilen formül kullanılarak agreganın kütlece su emme yüzdesi belirlenmiştir. Bulunan su emme yüzdesi yardımı ile karışıma giren agregaların suya doymun kuru yüzey hale gelmesi için gereken ek su miktarı belirlenerek hesaplara dahil edilmiştir.

$$\text{Su emme (\%)} = (M_2 - M_1) / M_1 \cdot 100$$

$M_1$ : Agreganın etüv kurusu ağırlığı

$M_2$ : Agreganın numunenin suya doymun kuru yüzey ağırlığı

### 3.5. Lif

Karışımında kullanılan lifler atık A4 kağıtlarının kağıt öğütücü yardımı ile kırılmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen lifler standart A4 kağıdı özellikleri taşımaktadır. Lifler yaklaşık olarak 15 mm uzunluğundadır (Şekil 3.8, Şekil 3.9).



Şekil 3.8 Kağıt lif boyutları



Şekil 3.9 Kağıt liflerin görüntüsü

### 3.6. Metot

#### 3.6.1. Lifler

Selülozik liflerin aktivatör varlığında davranışını incelemek üzere lifler üzerinde aşağıda belirtildiği şekilde işlemler gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.10** Sodyum hidroksit çözeltisi içerisine batırılan kağıt lifler

Kağıt liflerin molariteye etkisini ve aktivatörlerle ilişkisini görmek için özgül ağırlıkları hesaplanan bir miktar sodyum hidroksit çözeltisi ve cam suyuna 5'er gram kağıt eklenip karıştırılarak aktivatörü emmesi sağlanmıştır (Şekil 3.10).



**Şekil 3.11** Kağıt liflerin süzülmesi

Şekil 3.11’de görüldüğü üzere süzülen lifler içinde bulundukları geopolimer karışımının kürlenmesi esnasında maruz kalacağı 60 °C sıcaklıkta fırında bekletilmiştir.



**Şekil 3.12** Sodyum hidroksit çözeltisine doyurulup etüvde kurutulmuş lifler



**Şekil 3.13** Sodyum silikat çözeltisine doyurulup etüvde kurutulmuş lifler

Sodyum silikat çözeltisine maruz kalan kağıt liflerde renk değişikliğinin yanı sıra mukavemet kazanımı ve gevrekleşme gözlemlenmiştir (Şekil 3.13). Çalışma kapsamında yapılan deneme karışımları ise kağıt liflerin sodyum hidroksit çözeltisi ile daha uyumlu olduğunu göstermiştir (Şekil 3.12). Lif içeren karışımlarda aktivatör olarak cam suyunun kullanılması geopolimerin çok hızlı bir şekilde dayanım kazanmasına neden olmakta dolayısıyla işlenebilirliği oldukça düşürmekte olduğu görülmüştür.

### 3.7.1 Karışımların hazırlanması

Puzolanların bağlayıcılık özellik gösterebilmesi için ince taneli olarak öğütülmüş olmaları gerekmektedir. Silis dumanının zaten çok ince bir yapısı olması nedeniyle bağlayıcı olarak kullanmadan önce herhangi bir işleme tabi tutulmamıştır. Pomza ise

öğütülüp elendikten sonra 0,125 mm altında kalan kısım karışımda kullanılmak üzere ayrılmıştır (Şekil 3.14). Öğütülen pomza üzerinde BET analizi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.6).

**Çizelge 3.6** Çalışmada kullanılan bazik pomzanın BET analizi sonuçları

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>BET Yüzey Alanı</b>            | 4,6481 m <sup>2</sup> /g    |
| <b>Langmuir Yüzey Alanı</b>       | 7,1332 m <sup>2</sup> /g    |
| <b>t-Plot Mikro Gözenek Alanı</b> | 1,2665 m <sup>2</sup> /g    |
| <b>t-Plot Dış Yüzey Alanı</b>     | 3,3816 m <sup>2</sup> /g    |
| <b>t-Plot Mikro Gözenek Hacmi</b> | 0,000650 cm <sup>3</sup> /g |



**Şekil 3.14** Öğütülmüş pomza görüntüsü

Deneme karışımları sonucunda aktivatör/bağlayıcı oranı 1,75 olarak belirlenip, aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit çözeltisi ise 6M, 8M ve 10M olarak karışımlara eklenmiştir. Karışımlardaki atık kağıt lifler ise karışım hesabına dahil edilmemiş, ek olarak karışımda kullanılmıştır. Mikserin el verdiği ölçüde harçlar 1 dm<sup>3</sup> olarak hazırlanmıştır. Bağlayıcılar agrega ile kuru halde karıştırıldıktan sonra aktivatör eklenmiştir. Lifler ise aktivatörle direkt temas edip çözeltiyi bünyelerine hapsedmemelerini önlemek adına karışıma en son eklenmiştir. Topaklaşma görülmesi halinde mikser durdurulmuş ve topaklaşma spatula yardımı ile giderildikten sonra mikser tekrar çalıştırılmıştır.

Üretilen harçlar 40x40x160 mm'lik kalıplara dökülüp üzerleri hava almayacak bir şekilde örtüldükten sonra 24 saat boyunca kalıplarda bekletilmiştir. 24 saatin sonunda kalıplardan çıkartılan numunelerin bir kısmı fırında 60 °C de kürlenirken diğer kısmı ise laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

### 3.7.2 Taze harcın yayılma çapı tespiti

Yayılma çapı TS EN 1015-3 standartı baz alınarak saptanmıştır. Taze harcın yayılma çapı tespitinde Şekil 3.15'te görülen akma tablası düzeneğinden faydalanılmıştır. Kesik koninin yaklaşık yarısı mertebesinde doldurulan harç 10 defa şişlenmiş daha sonra tüm koni harçla doldurularak 10 defa daha şişlenmiştir. Şişleme işlemi sonrasında koni üzerinde arta kalan harç kesik koninin spatula ile düzeltilmesiyle bertaraf edilmiştir. Daha sonra kesik konik dik bir şekilde çekilmiştir. Tabla üzerindeki harç akma tablası kolu 15 defa çevrilerek düşürülmüş ve tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Yayılan harcın en geniş iki kısmından birbirine dik olacak şekilde alınan ölçümler ikiye bölünerek ortalama yayılma çapı elde edilmiştir.



Şekil 3.15 Akma tablası düzeneği

### 3.7.3 Taze harcın birim ağırlık tespiti

Taze harcın birim ağırlık tespitinde 1dm<sup>3</sup>'lük kesik silindir kullanılmıştır. Kap önce yarısına kadar doldurulmuş ve yayılma tablası üzerinde çevirme kolu yardımıyla 10 defa düşmesi sağlanmıştır. Daha sonra kap tamamen harçla doldurulup 10 defa daha düşürme işlemi uygulanmıştır. Sonrasında yüzey düzlenmiş ve kap tartılmıştır. Sonuç kabın darasından çıkartılıp hacmine bölünerek harcın birim ağırlığı tespiti gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.16 Arşimet terazisi

### 3.7.4 Sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilen fiziksel deneyler

24 saat suda bekletilip suya doymun hale getirilen numuneler kuru bir bez yardımı ile silinip suya doymun kuru yüzey haline getirilmiştir. Numune tartılmış ve çıkan sonuç not alınmıştır. Sonrasında yine aynı numune tartının alt kısmında su içerisinde bulunan sepete koyularak sudaki ağırlığı belirlenmiştir (Şekil 3.16). Ardından etüv 60 °C olarak ayarlanmış ve numuneler etüv içerisine yerleştirilmiştir. Yerleştirilen numuneler etüv kurusu haline gelene kadar fırında tutulmuştur. Ardışık tartımlarla etüv kurusu haline geldiğine emin olunan numuneler tartılıp sonuçlar not alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ilgili formüllere yerleştirilerek sertleşmiş harçların fiziksel özellikleri hesaplanmıştır.

### 3.7.5 Eğilmede çekme dayanım testi

Eğilme testi TS-EN 1015-11'e göre gerçekleştirilmiştir. Test için dökülen 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler eğilme testini gerçekleştirmek üzere Şekil 3.17'de görülen düzeneğe ortalanarak yerleştirilmiştir. Mesnetler arası mesafe 100 mm'dir. Yükleme hızı şekil değiştirmeye bağlı olarak 2 mm/dk olarak belirlenmiştir. Test sonucunda elde edilen maksimum yük değeri üç nokta eğilme testinde kullanılan formül (3.1)'e yerleştirilerek numune dayanımı MPa cinsinden hesaplanmıştır. Parçalanan numuneler ise daha sonra basınç testinde kullanılmak üzere ayrılmıştır.



Şekil 3.17 Üç nokta eğilme testi

$$\sigma = (3Fl)/(2*d_1*d_2^2) \quad (3.1)$$

$\sigma$ : Gerilme değeri (MPa)

F: Maksimum yük (N)

l: Mesnetler arası mesafe (mm)

$d_1$ : Numunenin genişliği (mm)

$d_2$ : Numunenin yüksekliği (mm)

### 3.7.6 Basınç dayanım testi

Basınç dayanım testi TS EN 1015- 11'e göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme testi sonucunda ikiye bölünen parçalar 40x40mm'lik başlığa yerleştirilmiş ve numune şekil değiştirme baz alınarak 4mm/dk hızda yüklenmiştir (Şekil 3.18). Maksimum yük, (3.2)'de verilen formülde yerine yerleştirilerek numunenin MPa cinsinden basınç dayanımı elde edilmiştir.



**Şekil 3.18** Basınç testi

$$\sigma = F/A \quad (3.2)$$

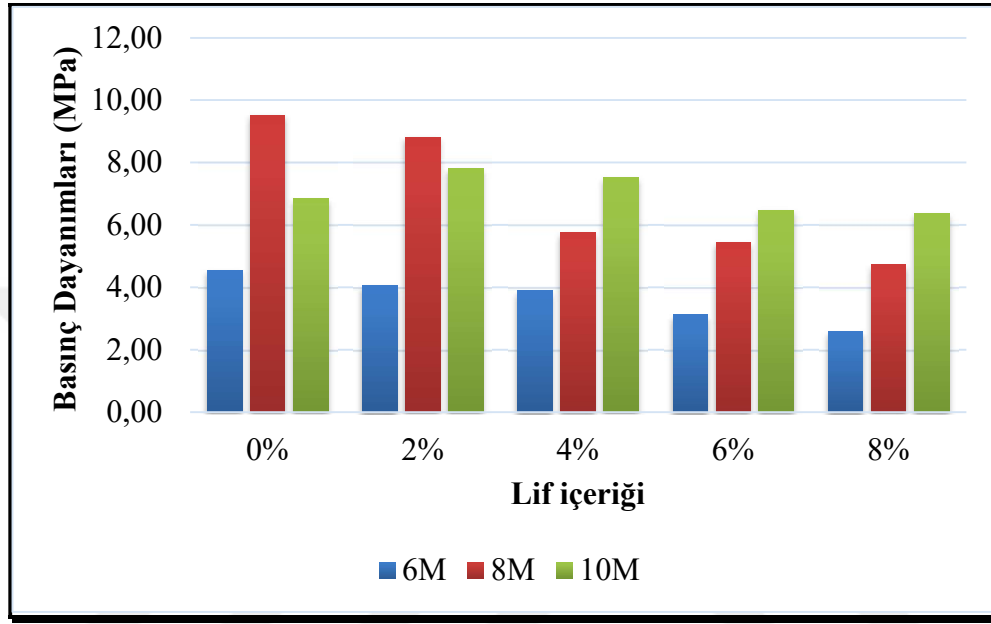
$\sigma$ : Gerilme değeri (MPa)

F: Maksimum yük (N)

A: Yüzey alanı (mm<sup>2</sup>)

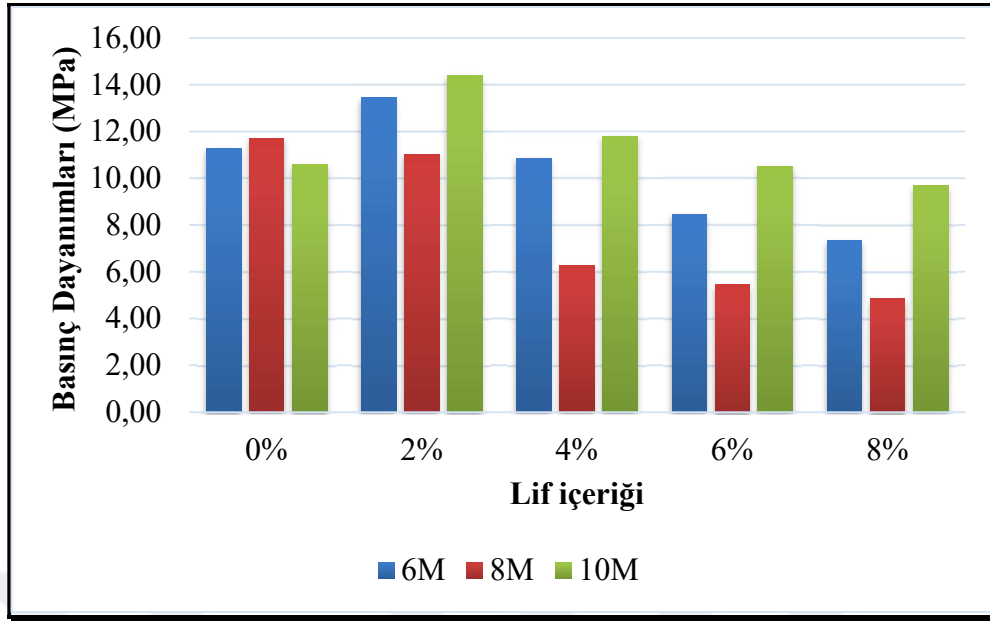
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma neticesinde elde edilen veriler çizelgeler, şekiller ve grafiklerle gösterilmiştir. Bulgular çizelgede yer alan değerlerin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için çizelgelerin yerine, verilerin ortalamaları alınarak oluşturulan sütunlar ve grafikler üzerinde ayrı ayrı değerlendirilme yoluna gidilmiştir.



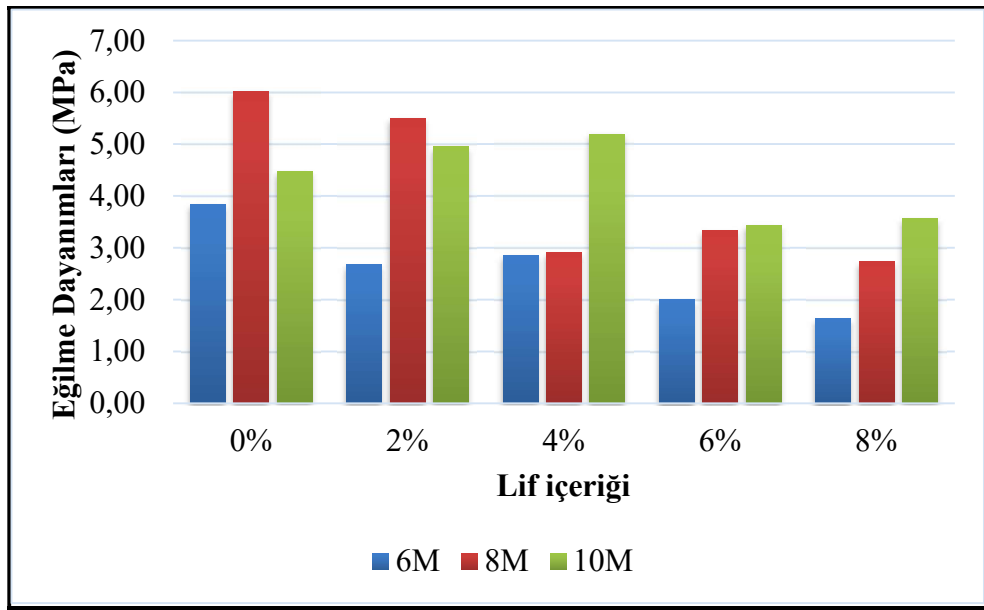
**Şekil 4.1** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımları

Şekil 4.1'deki basınç dayanım testleri sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde kağıt yüzdesinin artış göstermesi basınç dayanımında, beklendiği üzere, düşüş göstermiştir. Buna karşın molaritenin 10 olduğu karışımlarda kağıt yüzdesinin artması basınç dayanımının düşmesine neden olmamış, aksine basınç dayanım artışı sağladığı da görülmektedir. Lif içeriğinin artması her ne kadar enerji yutma kapasitesini arttırsa da numunede meydana getirdiği süreksizlikler ve buna ek olarak işlenebilirlikteki düşüş neticesinde numunenin kalıba yerleştirilmesi esnasında oluşan boşluklar basınç dayanımını olumsuz yönde etkiletmektedir.



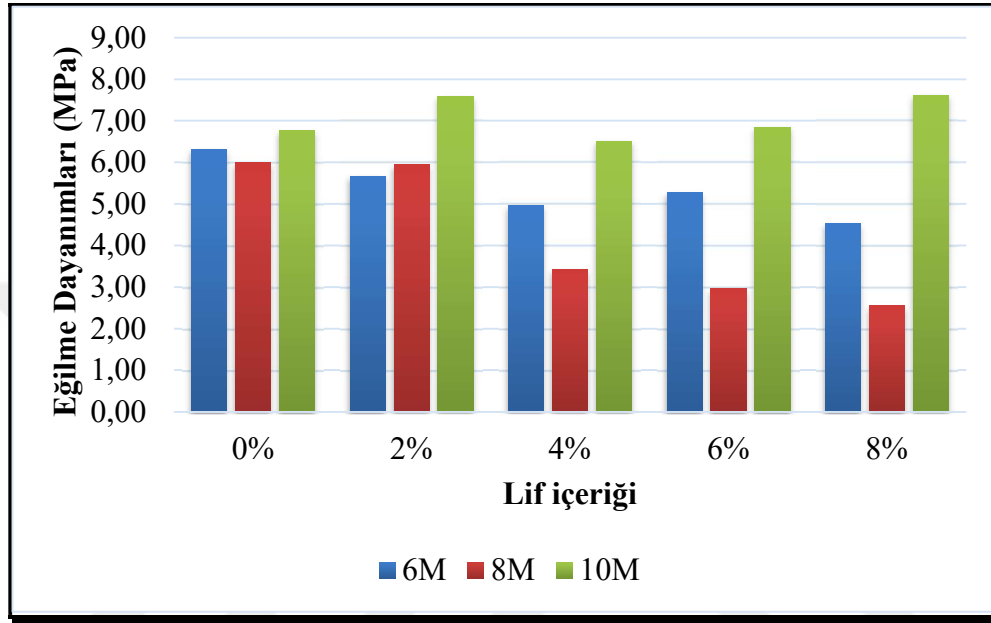
**Şekil 4.2** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımları

Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerde olduğu gibi kürlenmiş numunelerde kağıt yüzdesinin artışıyla beraber basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmektedir (Şekil 4.2). Geopolimer karışımlardaki, lif yüzdesinin %4'ü aştığı durumlarda, kağıt atıkların harcın maksimum basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği kanısına varılabilmektedir. Lakin çalışmanın ilerleyen safhalarında şekil değiştirme-gerilme grafiklerini incelediğimizde enerji yutma kapasitesinde kayda değer bir artış görülmektedir. Numunelerin tokluk değerleri grafikler üzerinde tartışılarak değerlendirilmiştir.



**Şekil 4.3** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin ortalama eğilme dayanımları

Şekil 4.3'te verilen eğilme dayanımlarına baktığımızda basınç dayanımlarına paralel olarak, eğilme dayanımlarının da kağıt yüzdesinin artmasıyla birlikte düşüş gösterdiği söylenebilir. Fakat görülen tutarsızlıklar böyle bir genel kanı oluşturmaya engel olacak büyüklükte olduğu görülmüştür. Bu durumda yapılması gereken şekil değiştirme-gerilme grafiklerinin incelenmesi ve eğilme dayanımlarının eş numunelerin basınç dayanımlarıyla karşılaştırmaktır. Yapılan karşılaştırma ve elde edilen çıkarımlara sonuç bölümünde yer verilmiştir.

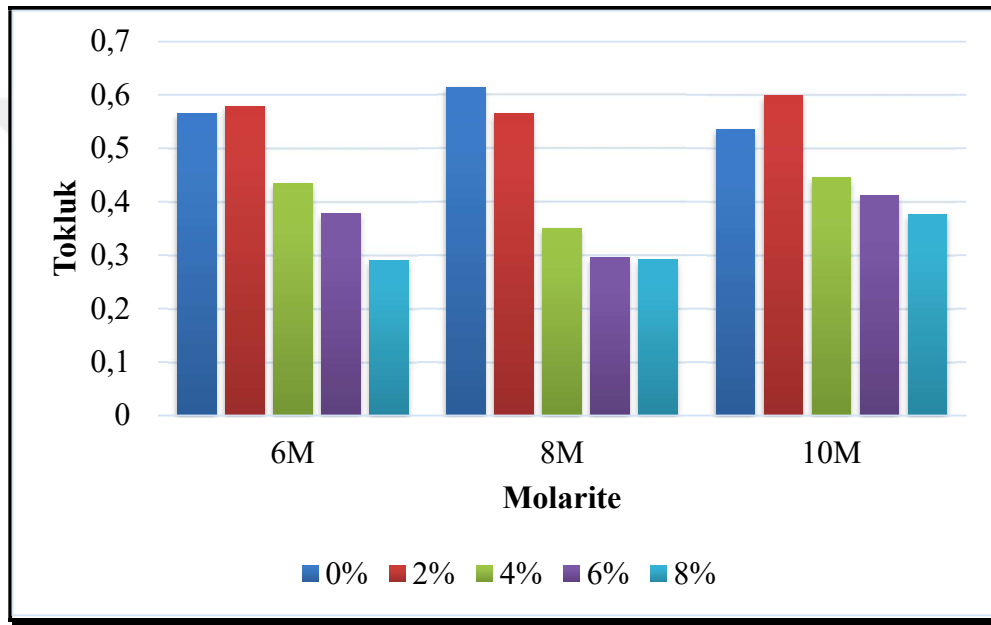


Şekil 4.4 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin ortalama eğilme dayanımları

Şekil 4.4'te verilen sonuçlar kürlenmemiş numunelerin sonuçlarıyla kıyaslandığında herhangi bir paralellik kurulamamaktadır. Bu duruma yol açan birden fazla sebep olduğu düşünülmektedir. Tüm dayanım değerlerinde olduğu gibi 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımlarını da sadece dayanım değerlerine bakarak değerlendirmek, selülozik lif-geopolimer matrisin meydana getirdiği kompozitin davranışını, bu davranışı etkileyen parametrelerin neler olduğu ve birbirlerine kıyasla etki derecelerini yanlış yorumlamaya yol açacaktır. Gerilme-Şekil değiştirme grafiğinden elde edilen elastisite modülü, rezilyans ve tokluk değerlerinin göz önünde bulundurulması üretilen geopolimer kompozitlerin davranışını değerlendirme hususunda elzemdir.

**Çizelge 4.1** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin tokluk değerleri

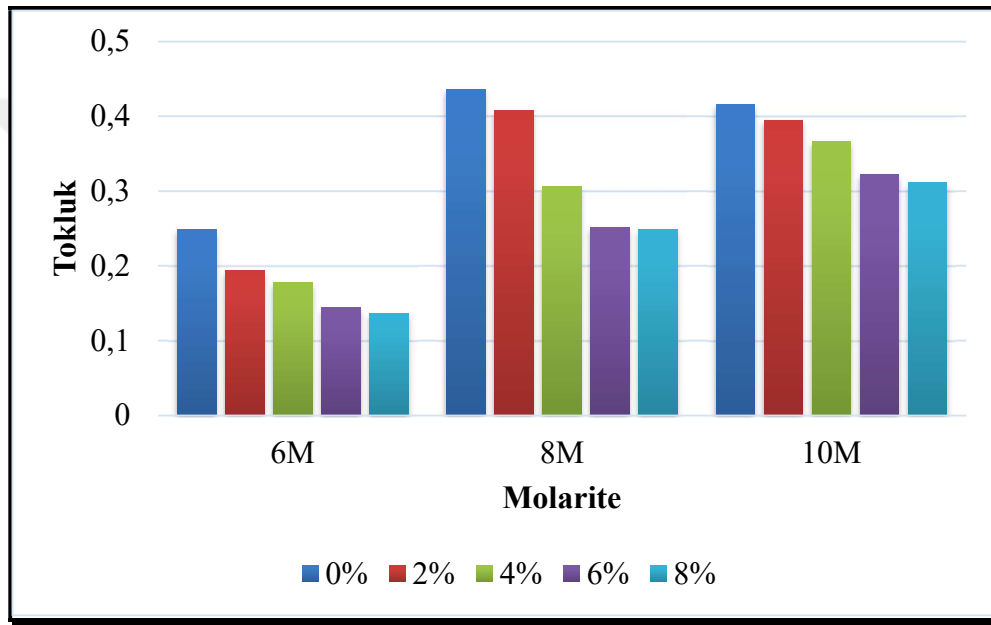
| Hacimce Kağıt (%) | TOKLUK |       |       |
|-------------------|--------|-------|-------|
|                   | 6M     | 8M    | 10M   |
| %0                | 0,567  | 0,614 | 0,536 |
| %2                | 0,578  | 0,564 | 0,599 |
| %4                | 0,435  | 0,350 | 0,446 |
| %6                | 0,378  | 0,295 | 0,411 |
| %8                | 0,290  | 0,291 | 0,376 |

**Şekil 4.5** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin basınç tokluk değerlerinin karşılaştırılması

Tokluk değerleri incelendiğinde genel olarak molaritenin artması enerji yutma kapasinde artış sağladığı görülmektedir (Şekil 4.5). Maksimum dayanımın yüksek olması tokluk değerinin de yükselmesini sağlamaktadır. Lakin lif katkısız geopolimer harçlarda yüksek dayanım beraberinde daha gevrek bir yapıyı meydana getirmektedir. Dolayısıyla maksimum dayanım yüksek olsa da numunenin dayanımını hızlı bir şekilde kaybetmesi enerji yutma kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Lif içeriği ise numuneyi daha sünek hale getirmekte, böylece harcın taşıyabileceği maksimum yük değerine ulaşıldıktan sonra dayanım kaybı daha yavaş olmakta ve enerji yutma kapasitesi optimum lif içeriği (%2) ile katkısız numunelere kıyasla daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Lif içeriğinin numuneyi daha sünek bir hale getirmesi, lif oranının artmasıyla birlikte maksimum taşıma kapasitesinde düşüşe neden olmaktadır.

**Çizelge 4.2** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin tokluk değerleri

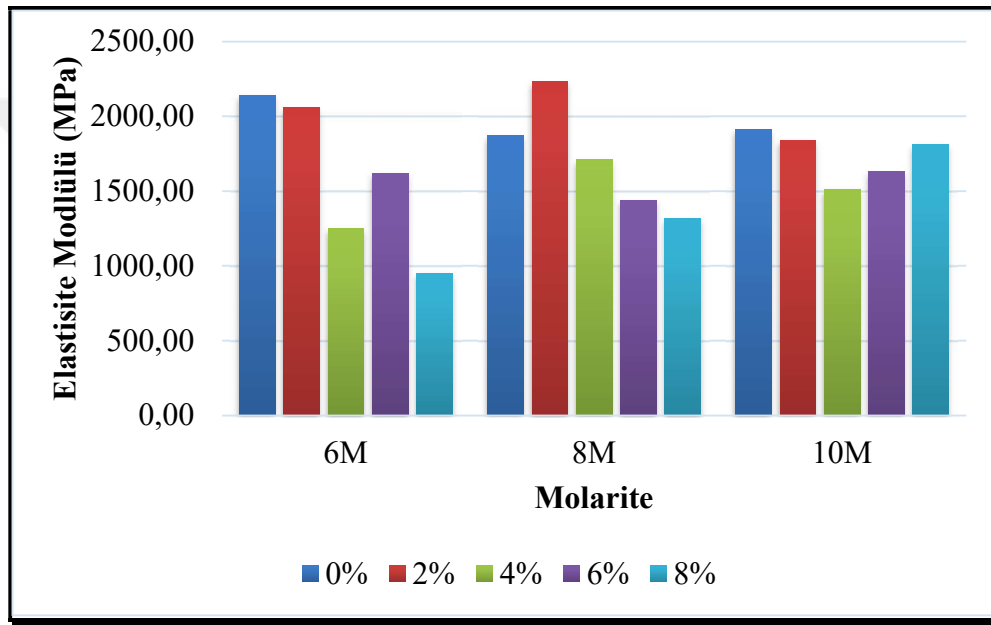
| Hacimce Kağıt (%) | TOKLUK |       |       |
|-------------------|--------|-------|-------|
|                   | 6M     | 8M    | 10M   |
| %0                | 0,248  | 0,435 | 0,415 |
| %2                | 0,193  | 0,407 | 0,395 |
| %4                | 0,178  | 0,305 | 0,366 |
| %6                | 0,144  | 0,252 | 0,322 |
| %8                | 0,137  | 0,248 | 0,311 |

**Şekil 4.6** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin basınç tokluk değerlerinin karşılaştırılması

Kürleme işlemi uygulanmamış örneklerin tokluk değerlerinin de kürlenmiş numunelerle paralellik göstermesi beklenir. Lakin tokluk değerleri hesaplanırken kontrol karışımının gerilme-şekil değiştirme grafiği baz alındığından molaritenin değişmesiyle birlikte numunenin maksimum dayanımına ulaşmadan önce yapacağı şekil değiştirme miktarı da değişmektedir (Şekil 4.6). Bu durum molarite ve kağıt yüzdelерinin çapraz karşılaştırılması durumunda yanlış çıkarımlar yapılmasına neden olmaktadır. Farklı molarite değerlerine sahip karışımlar ve kağıt yüzdeleri kendi aralarında değerlendirilmelidir. Bu durumun nedeni gerilme-şekil değiştirme grafikleri üzerinde daha ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Çizelge 4.3 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin elastisite değerleri

| Hacimce Kağıt (%) | KÜRLENMİŞ-ELASTİSİTE (MPa) |        |        |
|-------------------|----------------------------|--------|--------|
|                   | 6M                         | 8M     | 10M    |
| %0                | 2140,4                     | 1870,9 | 1910,8 |
| %2                | 2060,9                     | 2230,6 | 1840,2 |
| %4                | 1250,9                     | 1710,6 | 1510,6 |
| %6                | 1620,3                     | 1440,1 | 1630,5 |
| %8                | 950,3                      | 1320,2 | 1810,1 |

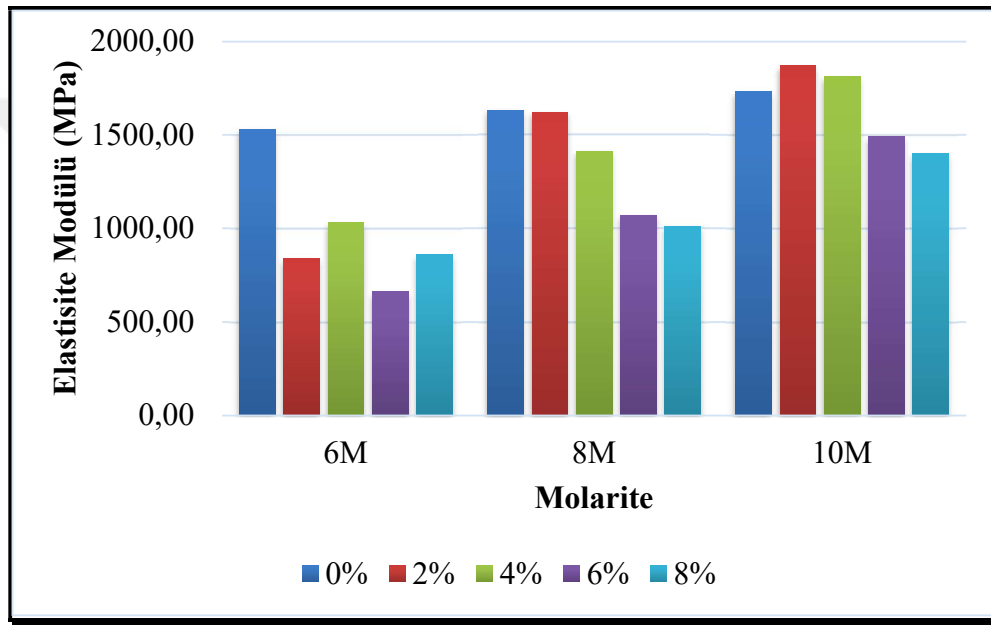


Şekil 4.7 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere molaritenin artmasıyla birlikte geopolimer harçın dayanımında artış gerçekleşmektedir. Bu artışa bağlı olarak elastisite modülü de artmaktadır. Harç dayanımındaki artış geopolimer harç üzerinde, gerilme altında meydana gelen şekil değişiminde azalmaya neden olacaktır. Böylece elastisite modülü daha yüksek molariteye sahip karışımlarda daha yüksek değerler alması beklenir.

Çizelge 4.4 Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin elastisite değerleri

| Hacimce Kağıt (%) | KÜRSÜZ-ELASTİSİTE (MPa) |        |        |
|-------------------|-------------------------|--------|--------|
|                   | 6M                      | 8M     | 10M    |
| %0                | 1530,5                  | 1630,5 | 1730,8 |
| %2                | 840,4                   | 1620,3 | 1870,7 |
| %4                | 1030,9                  | 1410,2 | 1810,5 |
| %6                | 660,3                   | 1070,8 | 1490,5 |
| %8                | 860,8                   | 1010,3 | 1400   |

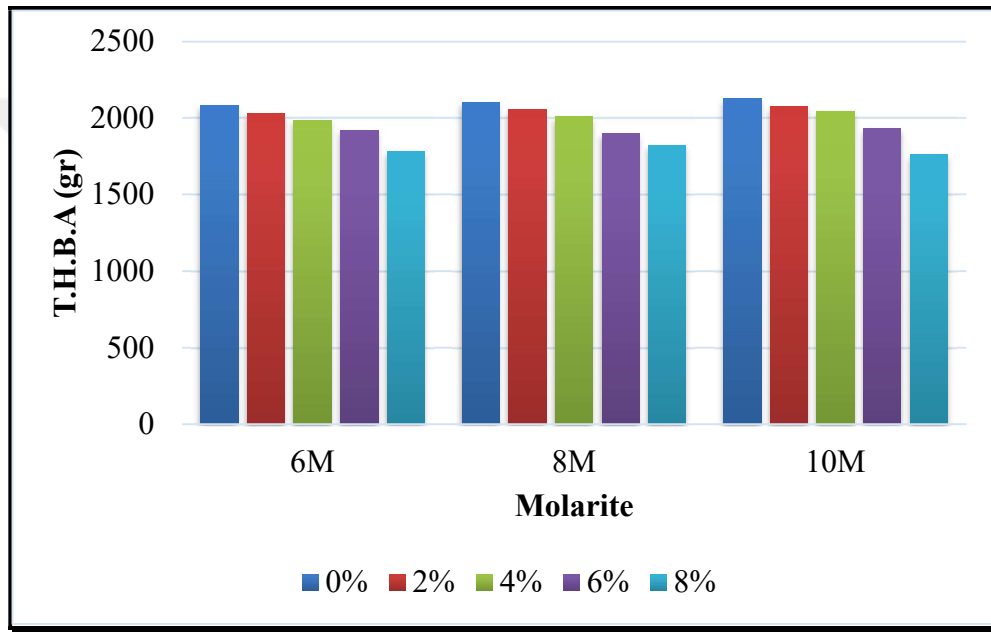


Şekil 4.8 Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Karışımındaki kağıt lif yüzdesinin artması ise numuneye süneklik kazandırması ve dolayısıyla elastisite modülünde düşüşe neden olması beklenir. Fakat Şekil 4.8'deki değerler incelendiğinde veriler beklentileri karşılamakla birlikte bazı uyumsuzluklar göstermiştir. Bu uyumsuzluklar döküm esnasında veya harç karışımı hazırlanırken yapılan herhangi bir hataya bağlanamamıştır. Bu durum, verilerin, çalışma dahilinde şimdiye kadar göz önünde bulundurmadağımız birtakım parametrelerden etkilendiğini göstermektedir.

Çizelge 4.5 Karışımların taze hal birim ağırlıkları

| Hacimce Kağıt (%) | Taze Hal Birim Ağırlık (gr) |      |      |
|-------------------|-----------------------------|------|------|
|                   | 6M                          | 8M   | 10M  |
| %0                | 2080                        | 2102 | 2124 |
| %2                | 2032                        | 2055 | 2075 |
| %4                | 1983                        | 2007 | 2045 |
| %6                | 1920                        | 1899 | 1930 |
| %8                | 1780                        | 1819 | 1760 |

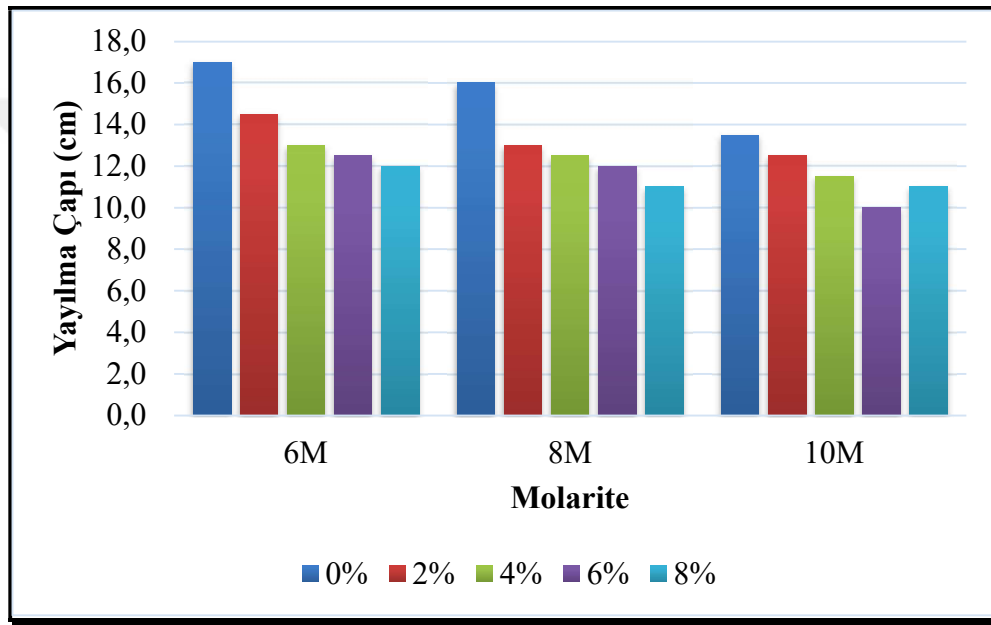


Şekil 4.9 Taze hal birim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması

Kağıt liflerin özkütlelerinin  $0,93 \text{ cm}^3$  olması kağıt içeriğinin artmasıyla birlikte hem taze hem de sertleşmiş hal birim ağırlıklarında düşüşe neden olmaktadır. Bunun tam aksi yönde molariteninin daha yüksek değerler alması, aktivatör çözeltisinin daha yoğun olmasına böylece taze hal birim ağırlıkların düşük molariteli karışımlara kıyasla daha yüksek çıkmasını sağlamaktadır (Şekil 4.9).

Çizelge 4.6 Hazırlanan harçların yayılma çapları

| Hacimce Kağıt (%) | Yayılma Çapı (cm) |      |      |
|-------------------|-------------------|------|------|
|                   | 6M                | 8M   | 10M  |
| %0                | 17,0              | 16,0 | 13,5 |
| %2                | 14,5              | 13,0 | 12,5 |
| %4                | 13,0              | 12,5 | 11,5 |
| %6                | 12,5              | 12,0 | 10,0 |
| %8                | 12,0              | 11,0 | 11,0 |

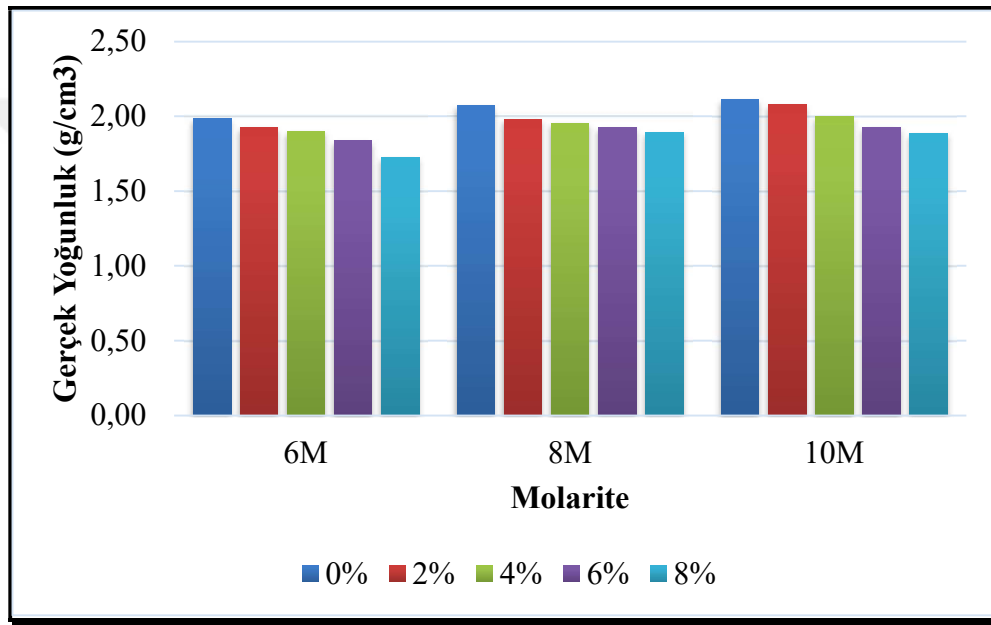


Şekil 4.10 Hazırlanan harçların yayılma çaplarının karşılaştırılması

Molaritenin artmasıyla birlikte aynı kağıt yüzdesine sahip olan karışımların yayılma çapı değerlerinde azalma görülmektedir (Şekil 4.10). Bu durumun nedeni olarak daha yüksek molaritenin daha yoğun bir çözelti oluşturmasıyla birlikte çözeltinin viskozitesinin daha düşük molariteye sahip olan çözeltilere kıyasla daha yüksek olması gösterilebilir. Buna ek olarak yüksek molaritenin beraberinde getirdiği yüksek dayanım kazanma hızı, harç karıştırıldıktan sonra yayılma çapı deneyinin gerçekleştirilmesi geciktirilirse, harcin daha yoğun bir hal almasına neden olacaktır. Benzer bir çalışmada Yan ve Crentsil (2012) taze harç özelliklerini, atık kağıt hamuru içeren numuneler için değerlendirmiş ve sonuçlar, geopolimer harca atık kağıt hamurunun eklenmesi karışım suyunun emilmesine dolayısıyla akışkanlık özelliğinin azalmasına neden olduğu göstermiştir. Aydın ve Baradan (2013), lif takviyeli geopolimer harçların işlenebilirliğinin lif yüzdesindeki artışla orantılı olarak azaldığını gözlemlemişlerdir.

**Çizelge 4.7** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin gerçek yoğunlukları

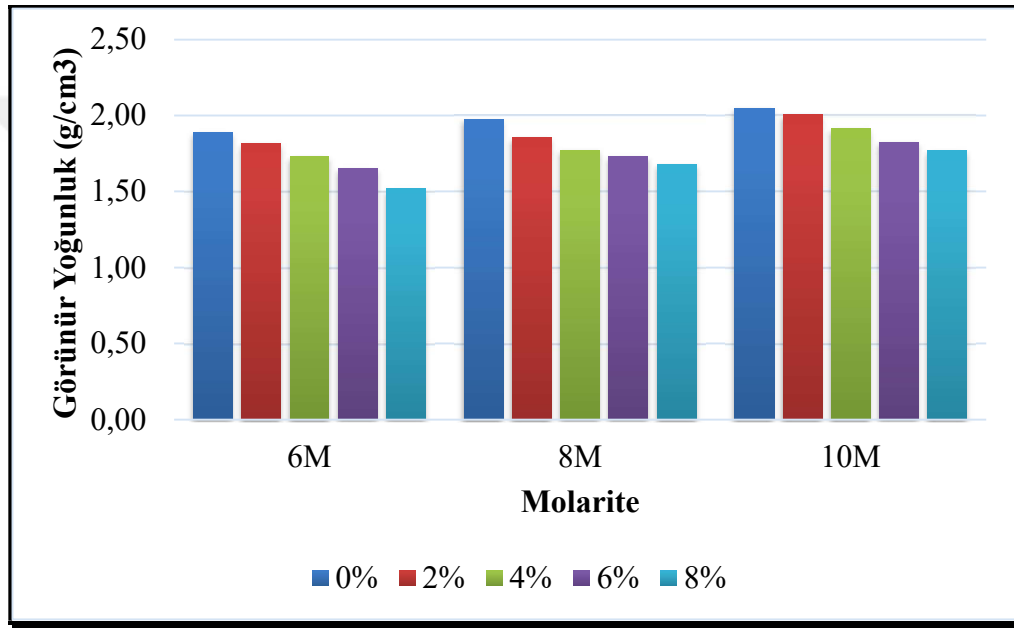
| Hacimce Kağıt (%) | Gerçek Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |      |      |
|-------------------|--------------------------------------|------|------|
|                   | 6M                                   | 8M   | 10M  |
| %0                | 1,98                                 | 2,07 | 2,11 |
| %2                | 1,93                                 | 1,98 | 2,08 |
| %4                | 1,90                                 | 1,95 | 2,00 |
| %6                | 1,84                                 | 1,93 | 1,93 |
| %8                | 1,72                                 | 1,89 | 1,89 |

**Şekil 4.11** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin gerçek yoğunluklarının karşılaştırılması

Gerçek yoğunluk değerleri beklendiği üzere kağıt oranının artmasıyla düşüş göstermiştir. Molaritenin artışıyla beraber geopolimer matrisin yoğunluğundaki artış gözlemlenmiştir. En yüksek gerçek yoğunluk değeri %0 kağıt oranıyla 10M'lık numunede 2,11 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuş (Şekil 4.11). En düşük gerçek yoğunluk değeri ise %8 lif içeriğine sahip 6M'lık karışımdan elde edilmiştir. Kağıt liflerin 0,93 g/cm<sup>3</sup> özgül ağırlığa sahip olması dolayısıyla, karışımda bulunan lif oranının artması harç yoğunluğunu azalmıştır.

**Çizelge 4.8** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin görünür yoğunlukları

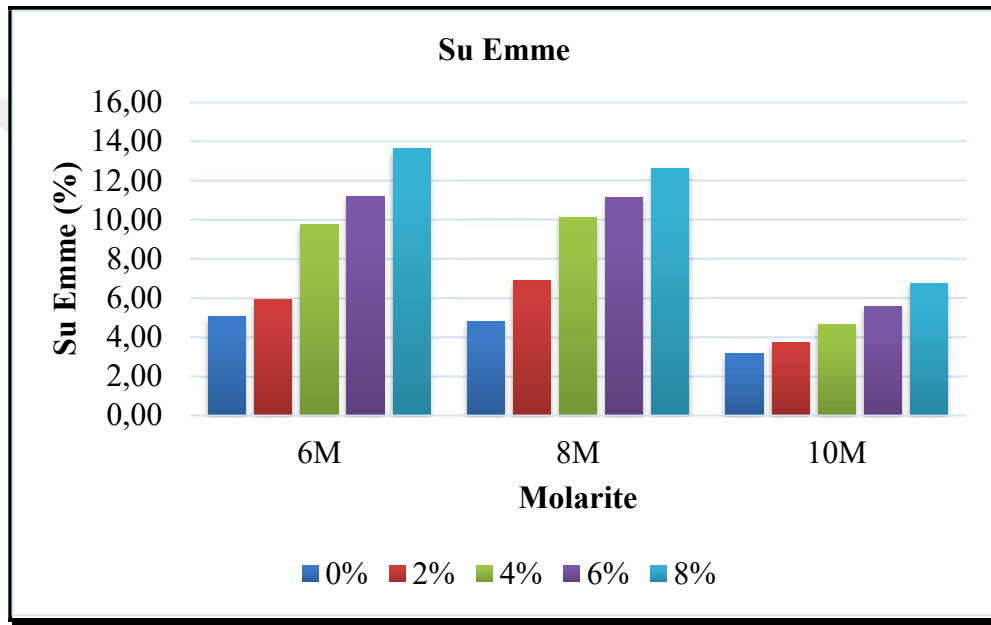
| Hacimce Kağıt (%) | Görünür Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |      |      |
|-------------------|---------------------------------------|------|------|
|                   | 6M                                    | 8M   | 10M  |
| %0                | 1,89                                  | 1,98 | 2,05 |
| %2                | 1,82                                  | 1,85 | 2,00 |
| %4                | 1,73                                  | 1,77 | 1,91 |
| %6                | 1,65                                  | 1,73 | 1,83 |
| %8                | 1,52                                  | 1,68 | 1,77 |

**Şekil 4.12** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin görünür yoğunluklarının karşılaştırılması

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere sonuçlar beklendiği gibi kürlenmiş numunelere kıyasla daha az olmakla birlikte molarite ve kağıt yüzdesinin değişimine paralellik göstermiştir.

**Çizelge 4.9** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin yüzde su emme değerler

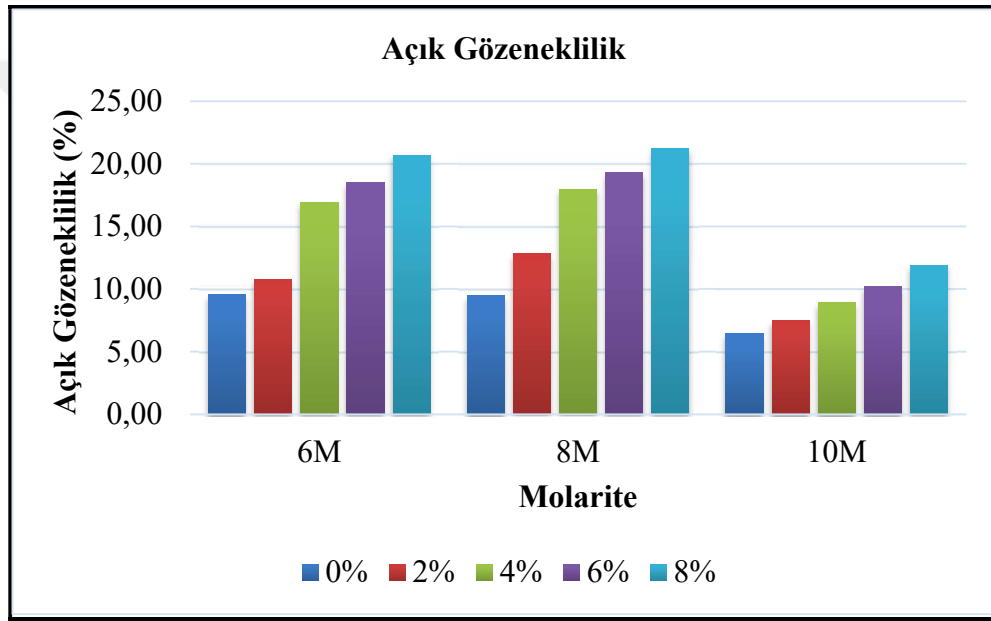
| Hacimce Kağıt (%) | Su Emme (%) |       |      |
|-------------------|-------------|-------|------|
|                   | 6M          | 8M    | 10M  |
| %0                | 5,06        | 4,80  | 3,17 |
| %2                | 5,92        | 6,92  | 3,73 |
| %4                | 9,78        | 10,15 | 4,66 |
| %6                | 11,17       | 11,14 | 5,58 |
| %8                | 13,62       | 12,65 | 6,72 |

**Şekil 4.13** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin yüzde su emme değerlerinin karşılaştırılması

Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin aynı oranda lif içeren ve aynı molariteye sahip karışımlara kıyasla su emme değeri daha yüksektir. Bu durumun neden olarak küre tabi tutulmadan 7 gün içerisinde tam olarak polimerizasyonunu tamamlayamayan karışımların bünyelerinde daha fazla boşluk bulundurması ve bu boşlukların su ile dolması gösterilebilir. Selülozun hidrofil yapıları kürlenmiş ya da kürlenmemiş fark etmeksizin su emme oranını arttırdığı görülmüştür (Şekil 4.13).

**Çizelge 4.10** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin yüzdece açık gözeneklilik değerleri

| Hacimce Kağıt (%) | Açık Gözeneklilik (%) |       |       |
|-------------------|-----------------------|-------|-------|
|                   | 6M                    | 8M    | 10M   |
| %0                | 9,57                  | 9,49  | 6,49  |
| %2                | 10,76                 | 12,82 | 7,48  |
| %4                | 16,93                 | 18,00 | 8,90  |
| %6                | 18,46                 | 19,29 | 10,19 |
| %8                | 20,67                 | 21,24 | 11,89 |

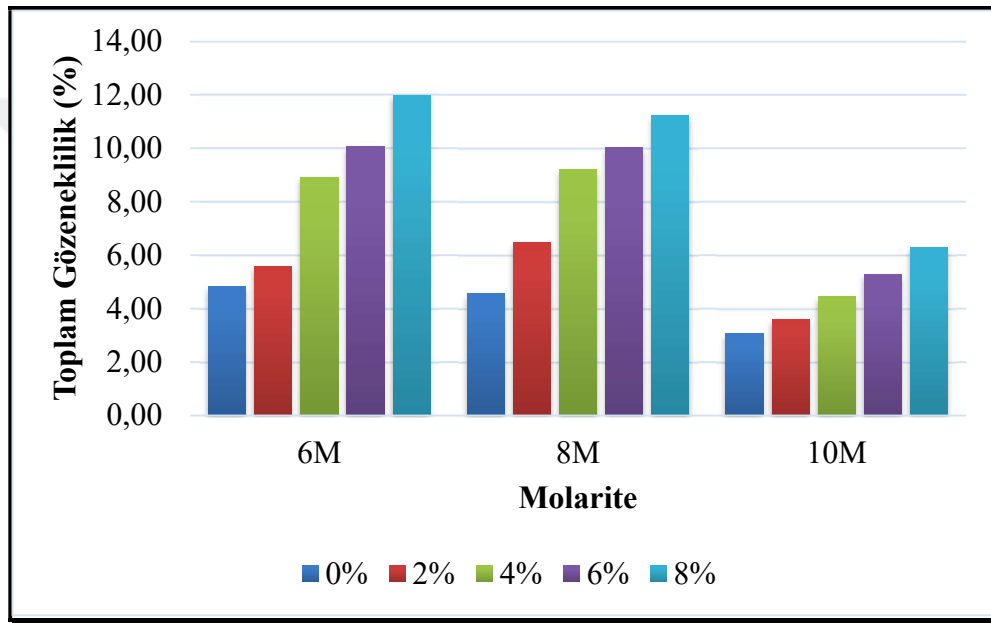


**Şekil 4.14** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin yüzdece açık gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması

Açık gözeneklilik yüzdesinin su emme yüzdesiyle paralellik göstermesi beklenmektedir. Elde edilen sonuçlar bu durumu desteklemiştir (Şekil 4.14).

**Çizelge 4.11** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin toplam gözeneklilik değerleri

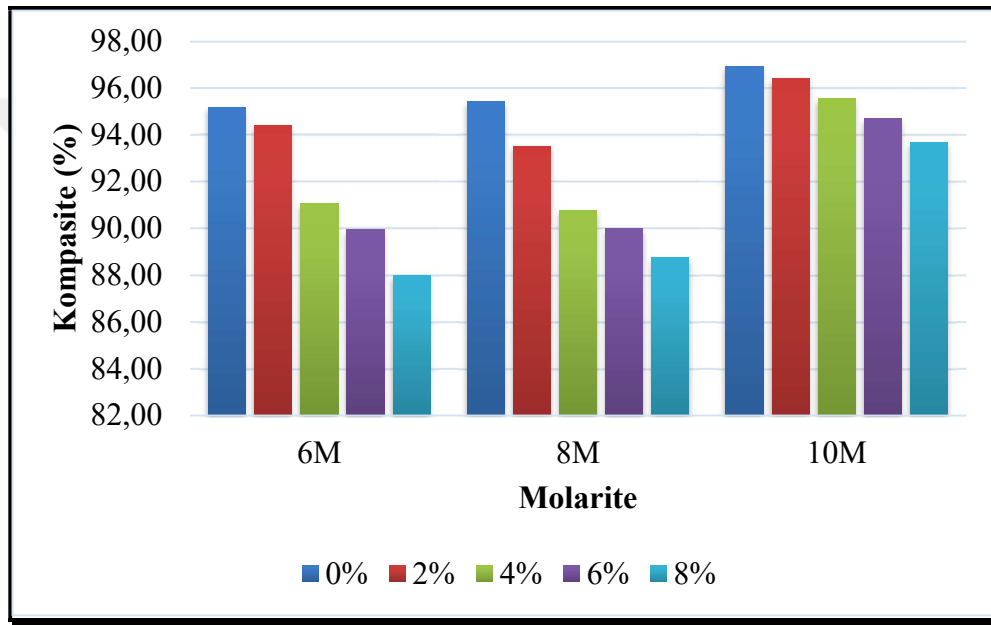
| Hacimce Kağıt (%) | Toplam Gözeneklilik (%) |       |      |
|-------------------|-------------------------|-------|------|
|                   | 6M                      | 8M    | 10M  |
| %0                | 4,82                    | 4,58  | 3,07 |
| %2                | 5,58                    | 6,47  | 3,60 |
| %4                | 8,91                    | 9,21  | 4,45 |
| %6                | 10,05                   | 10,02 | 5,28 |
| %8                | 11,99                   | 11,23 | 6,30 |

**Şekil 4.15** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin toplam gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması

Toplam gözeneklilik oranları da açık gözeneklilik oranı ile paralellik göstermektedir (Şekil 4.15). Geopolimer harçların işlenebilirlik, yoğunluk, gözeneklilik, mukavemet, elastisite modülü ve süneklik gibi özellikleri, bağlayıcı türü, aktivatör türü, aktivatör/bağlayıcı oranı, agrega/bağlayıcı oranı ve sıcaklık gibi birçok faktörden etkilenir. Kürlenme süresinin aktivatör çözeltisinin türü ve kürleme yönteminin polimerizasyon sürecinde önemli bir rol oynadığı ve geopolimer malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu önceki çalışmalarla ortaya konmuştur. Yüksek mukavemetli yüksek modüllü çelik lifler, lif içeriği ve kürleme rejiminden bağımsız olarak diğer tüm liflere kıyasla en üstün yanıtı sağlar (Bhutta vd. 2017).

**Çizelge 4.12** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin yüzde kompasite değerleri

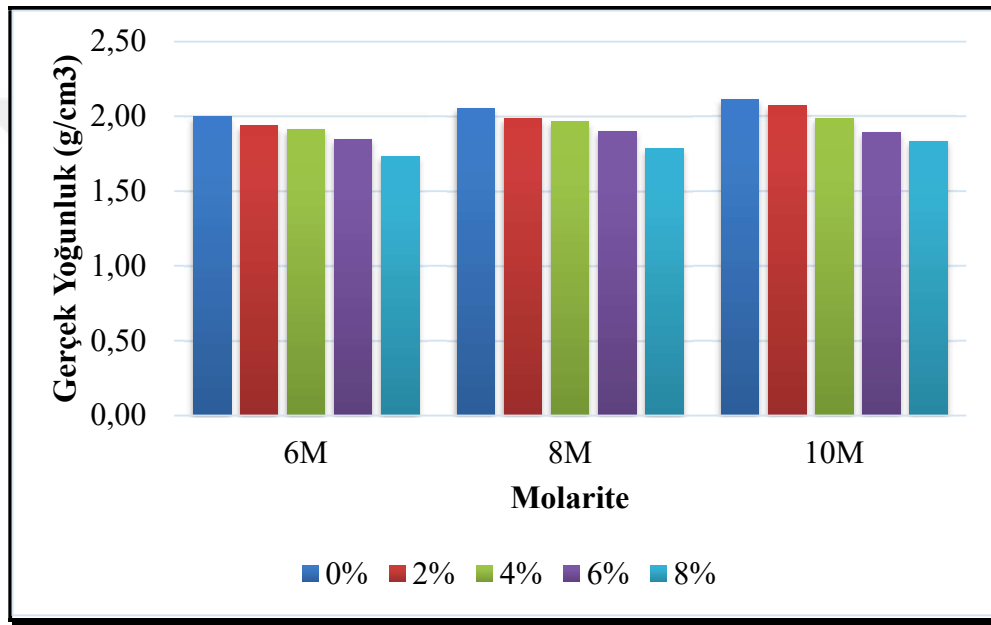
| Hacimce Kağıt (%) | Kompasite (%) |       |       |
|-------------------|---------------|-------|-------|
|                   | 6M            | 8M    | 10M   |
| %0                | 95,18         | 95,42 | 96,93 |
| %2                | 94,42         | 93,53 | 96,40 |
| %4                | 91,09         | 90,79 | 95,55 |
| %6                | 89,95         | 89,98 | 94,72 |
| %8                | 88,01         | 88,77 | 93,70 |

**Şekil 4.16** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin yüzdede kompasite değerlerinin karşılaştırılması

Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin kompasite değerleri molarite değişiminden kürlenmiş harçlara kıyasla daha fazla etkilenmiştir. Molaritenin düşmesi numunenin reaksiyon tamamlandıktan sonra kazanacağı nihai dayanımı doğrudan etkilemektedir. Nihai dayanımın yanı sıra dayanım kazanma hızı da aynı şekilde molaritenin azalmasıyla birlikte azalış göstermektedir. Buna ek olarak karışımın sıcaklık kürü uygulanmaması 6M'lık karışımların dayanımlarının ve kompasitesinin 7 gün sonunda oldukça düşük kalmasına neden olmuştur. Lif oranının artması da boşluk oranının artmasına yol açmıştır (Şekil 4.16).

**Çizelge 4.13** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin gerçek yoğunlukları

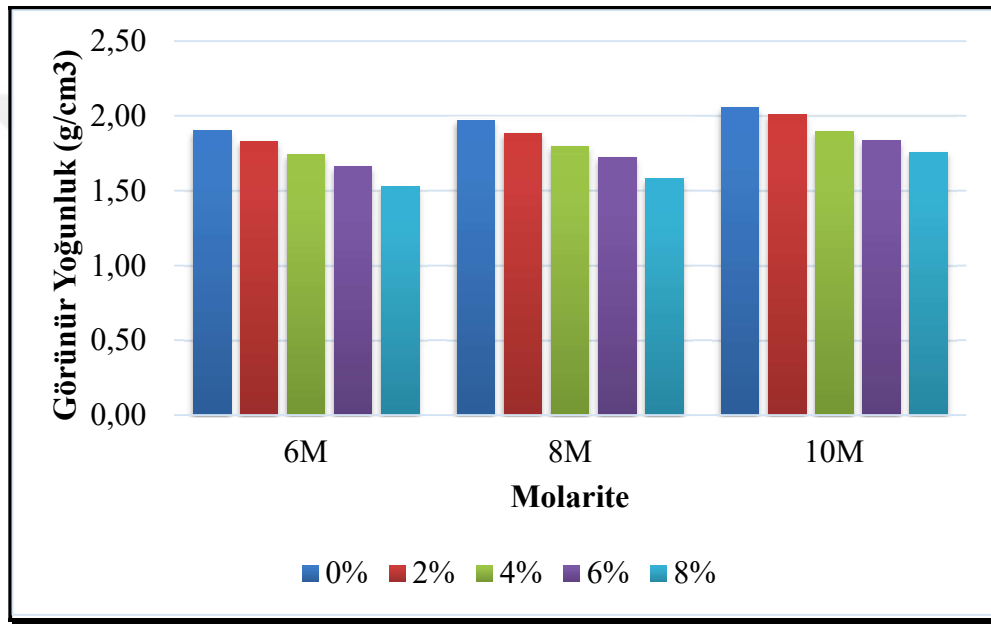
| Hacimce Kağıt (%) | Gerçek Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |      |      |
|-------------------|--------------------------------------|------|------|
|                   | 6M                                   | 8M   | 10M  |
| %0                | 2,00                                 | 2,05 | 2,11 |
| %2                | 1,94                                 | 1,99 | 2,07 |
| %4                | 1,91                                 | 1,96 | 1,98 |
| %6                | 1,85                                 | 1,90 | 1,89 |
| %8                | 1,73                                 | 1,78 | 1,83 |

**şekil 4.17** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin gerçek yoğunluklarının karşılaştırılması

K rlenen numunelerin sahip olduğu daha kompakt geopolimer matris yoğunluğu kürlenmemiş numunelere göre daha fazladır. Elde edilen veriler bu durumu desteklemektedir (şekil 4.17).

**Çizelge 4.14** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin görünür yoğunlukları

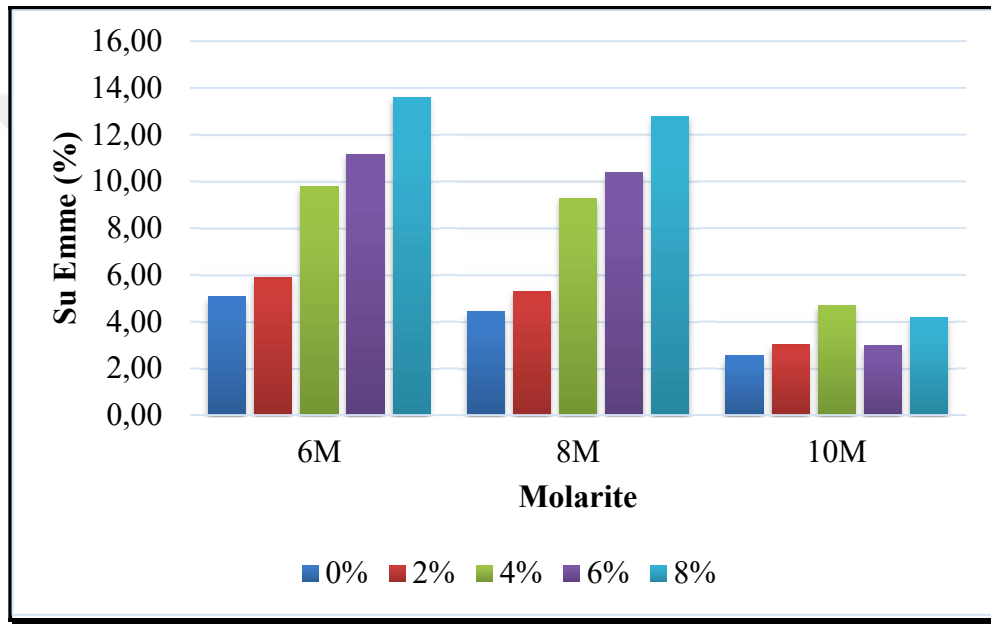
| Hacimce Kağıt (%) | Görünür Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |      |      |
|-------------------|---------------------------------------|------|------|
|                   | 6M                                    | 8M   | 10M  |
| %0                | 1,90                                  | 1,97 | 2,06 |
| %2                | 1,83                                  | 1,89 | 2,01 |
| %4                | 1,74                                  | 1,80 | 1,90 |
| %6                | 1,66                                  | 1,72 | 1,84 |
| %8                | 1,53                                  | 1,58 | 1,76 |

**Şekil 4.18** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin görünür yoğunluklarının karşılaştırılması

Molaritenin artması geopolimer matrisin daha güçlü, boşluksuz ve sıkı bir yapı oluşturmasını sağlar. Dolayısıyla aynı kağıt içeriğine sahip numunelerden molaritesi daha yüksek olan, diğer karışıma oranla daha kompakt bir yapıdadır (Şekil 4.18). Buna ek olarak molaritenin artmasıyla birlikte aktivatör çözeltisinin de yoğunluğunu arttırmakta böylece toplam karışımın da yoğunluğu artış göstermektedir. Bu artış taze birim ağırlıkların karşılaştırılmasıyla da görülebilir. Harç içerisinde yer alan liflerin özgül ağırlığı 0,93 cm<sup>3</sup> olduğundan lif oranının artması yoğunluğun düşmesine neden olmuştur.

**Çizelge 4.15** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin yüzde su emme değerleri

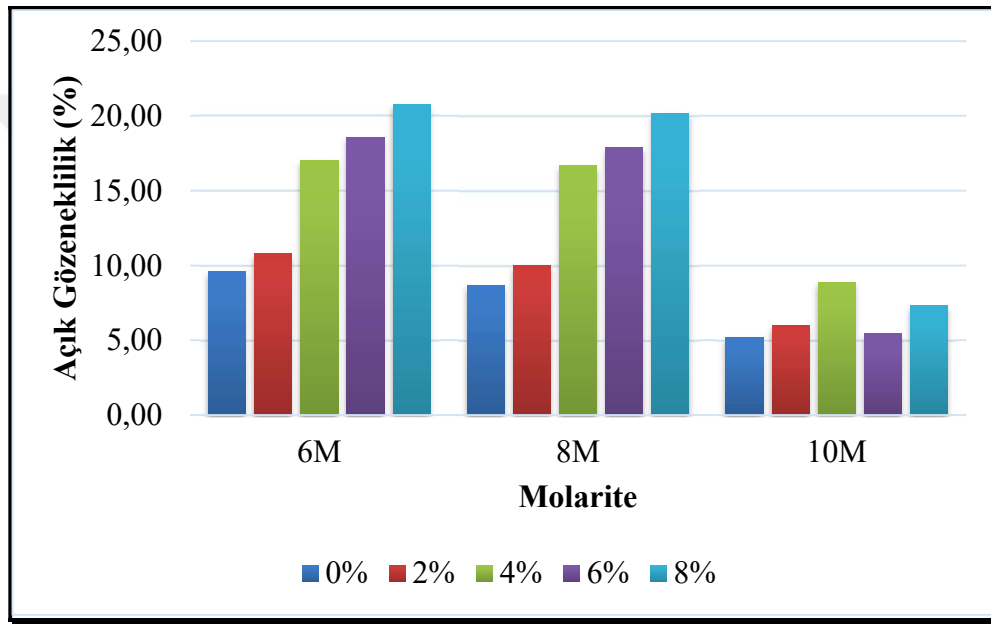
| Hacimce Kağıt (%) | Su Emme (%) |       |      |
|-------------------|-------------|-------|------|
|                   | 6M          | 8M    | 10M  |
| %0                | 5,05        | 4,43  | 2,53 |
| %2                | 5,90        | 5,31  | 3,00 |
| %4                | 9,76        | 9,29  | 4,69 |
| %6                | 11,15       | 10,39 | 2,96 |
| %8                | 13,59       | 12,77 | 4,17 |

**Şekil 4.19** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzde su emme değerlerinin karşılaştırılması

Kağıt liflerin hidrofil yapıları geopolimer harcın su çekmesindeki en büyük nedendir. Dolayısıyla kağıt yüzdesinin artmasıyla birlikte su emme yüzdesinin de arttığı görülmüştür (Şekil 4.19). Su ile temas eden selülozik lifler suyu bünyelerine hapseder. Kurumaya bırakılan numunelerde nem içeriğinin düşüş hızı lif içermeyen harçlarda lif katkılı karışımlara kıyasla daha fazladır. Selülozik lifler sadece suyu bünyelerine çekmekle kalmayıp bünyelerinde bulunan suyun buharlaşmasını da zorlaştırmaktadır.

**Çizelge 4.16** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin yüzdece açık gözeneklilik değerleri

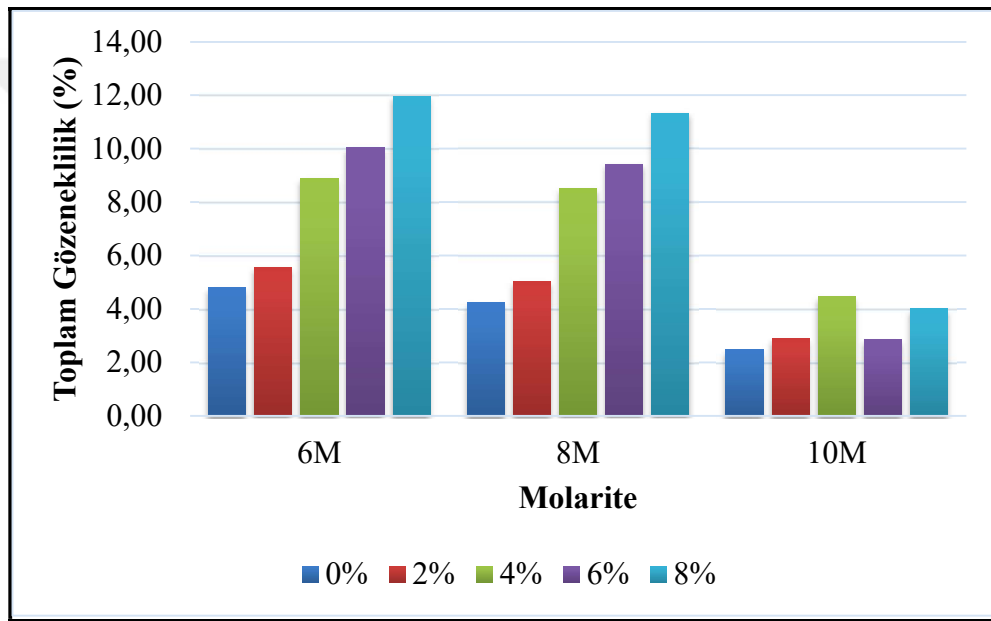
| Hacimce Kağıt (%) | Açık Gözeneklilik (%) |       |      |
|-------------------|-----------------------|-------|------|
|                   | 6M                    | 8M    | 10M  |
| %0                | 9,60                  | 8,70  | 5,21 |
| %2                | 10,79                 | 10,01 | 6,03 |
| %4                | 16,99                 | 16,69 | 8,89 |
| %6                | 18,53                 | 17,89 | 5,44 |
| %8                | 20,75                 | 20,18 | 7,33 |

**Şekil 4.20** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzdece açık gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.20’de yer alan veriler kağıt yüzdesinin artmasıyla açık gözenekliliğin arttığını göstermiştir. Sadece açık gözeneklilik değil toplam gözeneklilikte de artış beklenmelidir. Lif yüzdesindeki artış geopolimer harcın işlenebilirliğini düşürmekte de dolayısıyla harcın kaba yerleştirilmesi işlemini zorlaştırmaktadır. İşlenebilirliğin düşüşüne bağlı olarak gerçekleşen karıştırma ve yerleştirme esnasında doldurulamayan boşluklar gözeneklerin oluşma nedenlerinden biridir.

**Çizelge 4.17** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin yüzdece toplam gözeneklilik değerleri

| Hacimce Kağıt (%) | Toplam Gözeneklilik (%) |       |      |
|-------------------|-------------------------|-------|------|
|                   | 6M                      | 8M    | 10M  |
| %0                | 4,81                    | 4,24  | 2,47 |
| %2                | 5,57                    | 5,04  | 2,91 |
| %4                | 8,90                    | 8,50  | 4,48 |
| %6                | 10,03                   | 9,41  | 2,88 |
| %8                | 11,96                   | 11,33 | 4,00 |

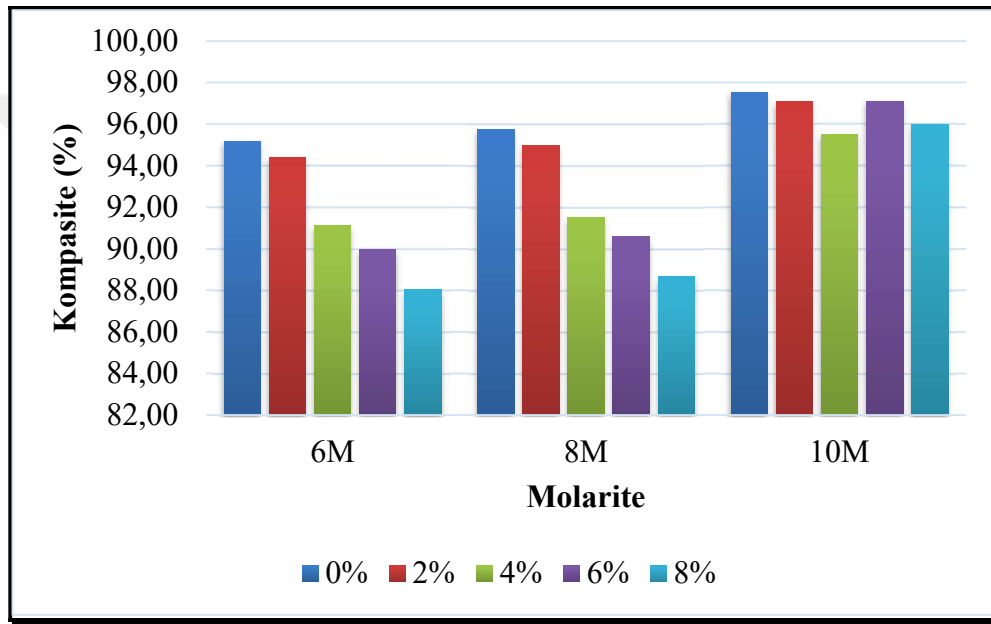


**Şekil 4.21** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzdece toplam gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması

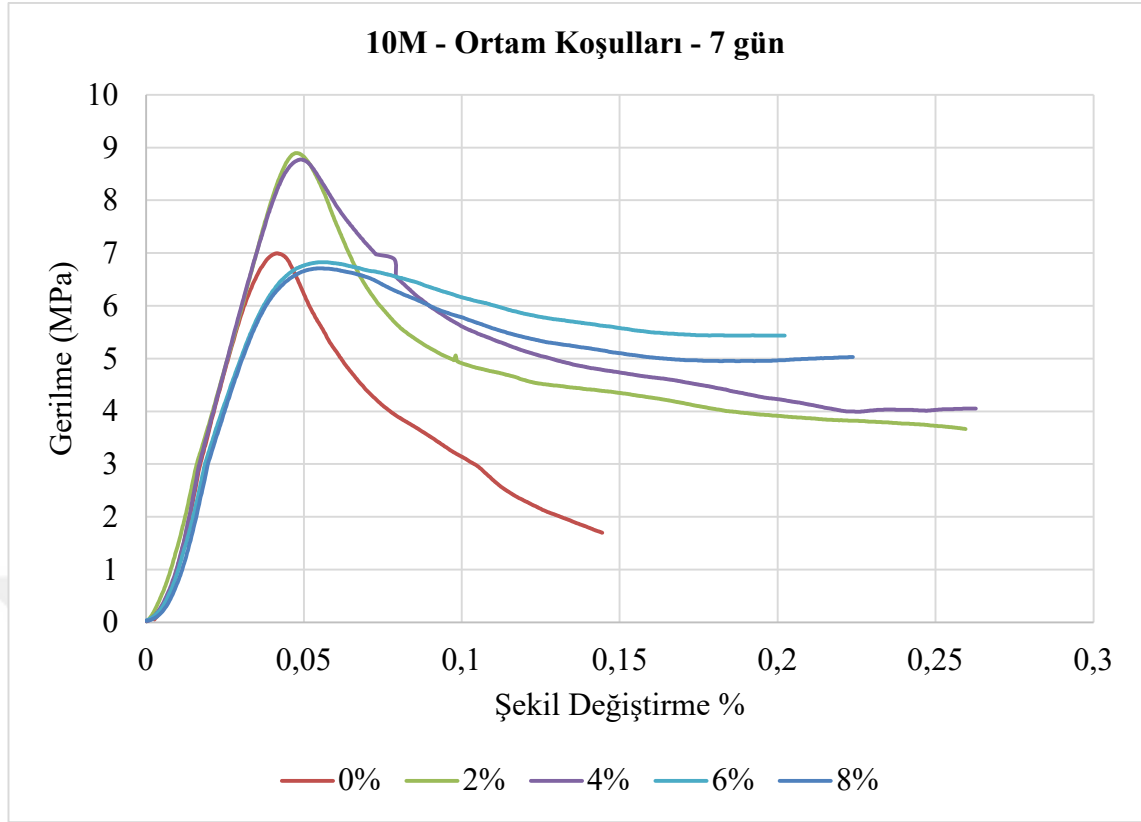
Gao vd. (2017) yaptıkları çalışmada çelik lif takviyesinin çatlak oluşmasına ve büyümesine karşın etkin bir rol oynamasının yanı sıra lif ilavesinin poroziteyi arttırdığını ve dayanım azalmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Bunun yanında lif uzunluğunun artmasının işlenebilirliği düşürdüğü, dolayısıyla gözeneklilik artışına neden olduğunu belirtmiştir. Edindikleri sonuçlara göre lif takviyesi içermeyen geopolimer numunelerin porozitesi %17,2 mertebesinde iken %1 kısa lif ilavesi bu değeri %17,8'e çıkartmıştır.

**Çizelge 4.18** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin yüzde kompasite değerleri

| Hacimce Kağıt (%) | Kompasite (%) |       |       |
|-------------------|---------------|-------|-------|
|                   | 6M            | 8M    | 10M   |
| %0                | 95,19         | 95,76 | 97,53 |
| %2                | 94,43         | 94,96 | 97,09 |
| %4                | 91,10         | 91,50 | 95,52 |
| %6                | 89,97         | 90,59 | 97,12 |
| %8                | 88,04         | 88,67 | 96,00 |

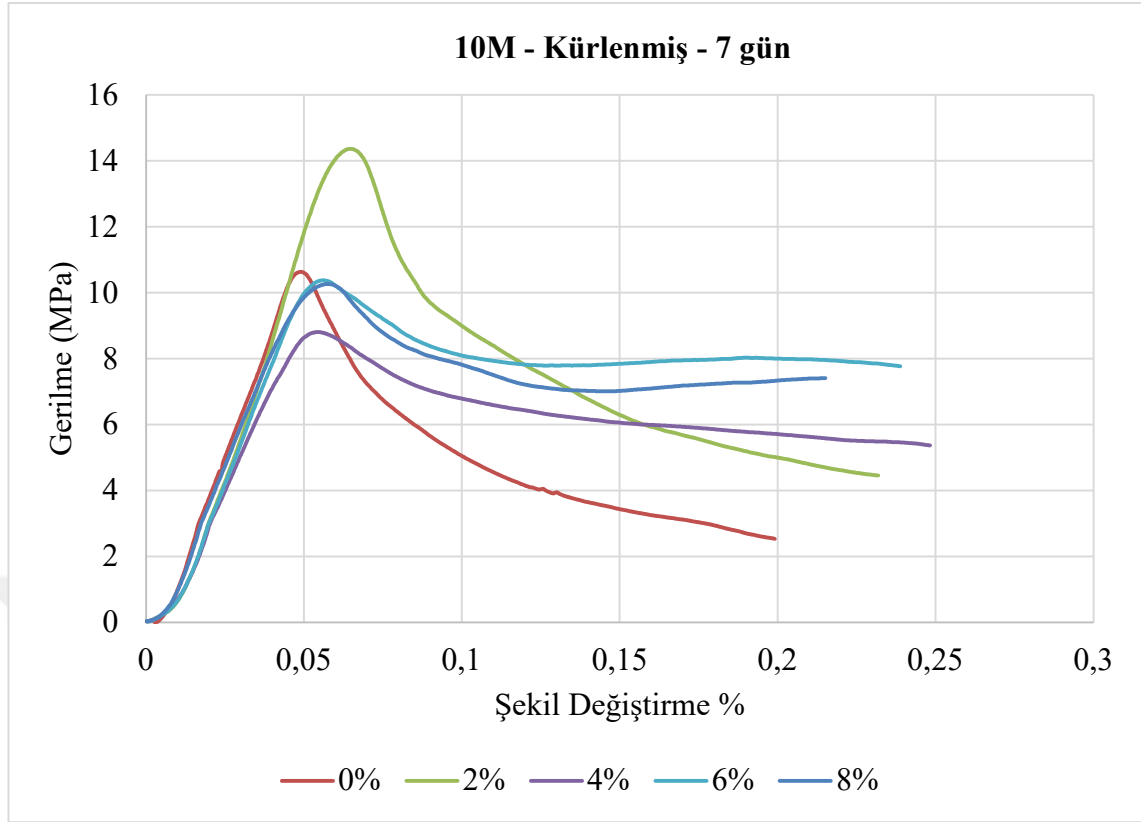
**Şekil 4.22** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin yüzde kompasite değerlerinin karşılaştırılması

Molaritenin artmasıyla doğru orantılı olarak kompasite artmaktadır (Şekil 4.22). Lif oranının artması ise kompasite değerinde düşüşe neden olmaktadır. Lifin geopolimer içerisinde kapladığı kendi hacmin yanı sıra, işlenebilirlikte meydana getirdiği düşüş, lif yüzdesinin artmasıyla kompasitenin azalmasına yol açmıştır.



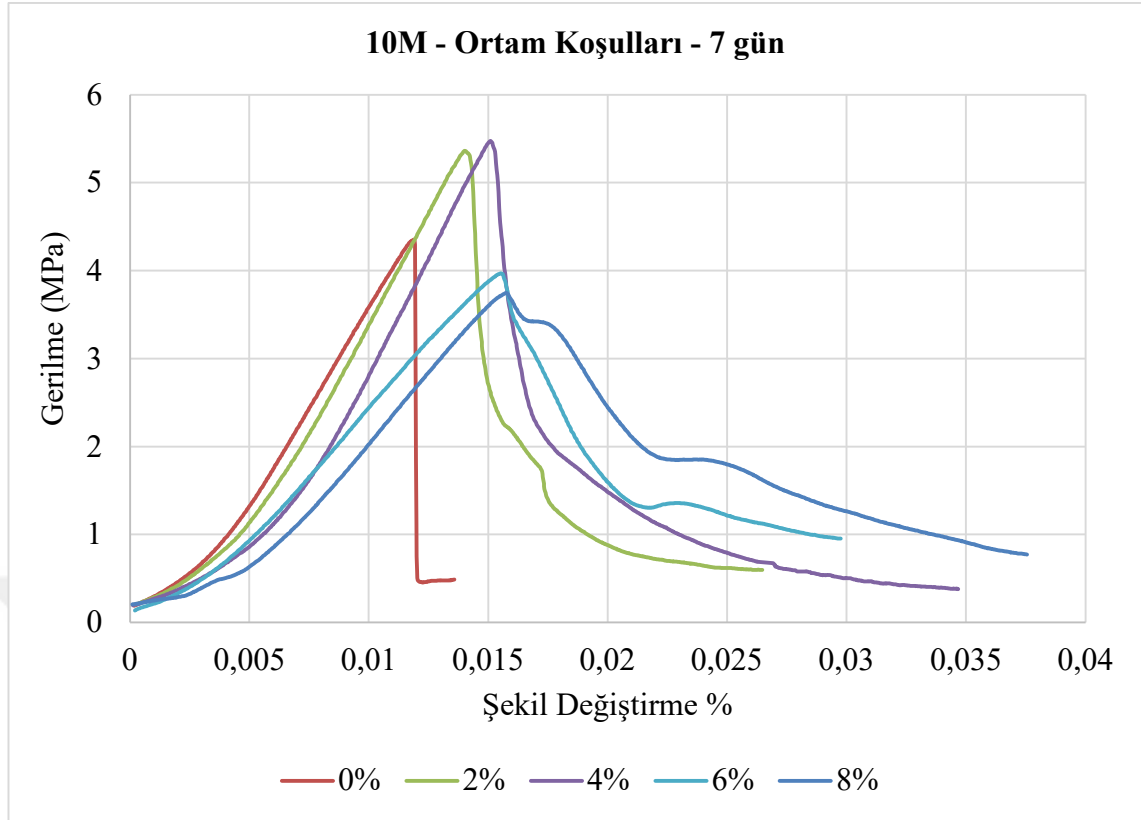
**Şekil 4.23** Sıcaklık kürü uygulanmamış numunelerin 7 günlük basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Kağıt liflerin numunelerin tokluğa etki ettiğini daha önce de belirtilmişti. Burada dikkat çeken nokta, kağıt liflerin enerji yutma kapasitesine ek olarak dayanım üzerindeki olumlu etkisidir. Çalışmalar incelendiğinde, genel olarak zayıf liflerin harçlara katılması eğilme dayanımı ve tokluğu üzerinde bir miktar iyileşme sağlayabilirken basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada elde edilen verilerin gösterdiği üzere kağıt liflerin tokluğun yanı sıra basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisini ve bu etki mekanizmasının mikro düzeyde nasıl çalıştığının incelenmesinin önem arz ettiği düşünülmektedir.



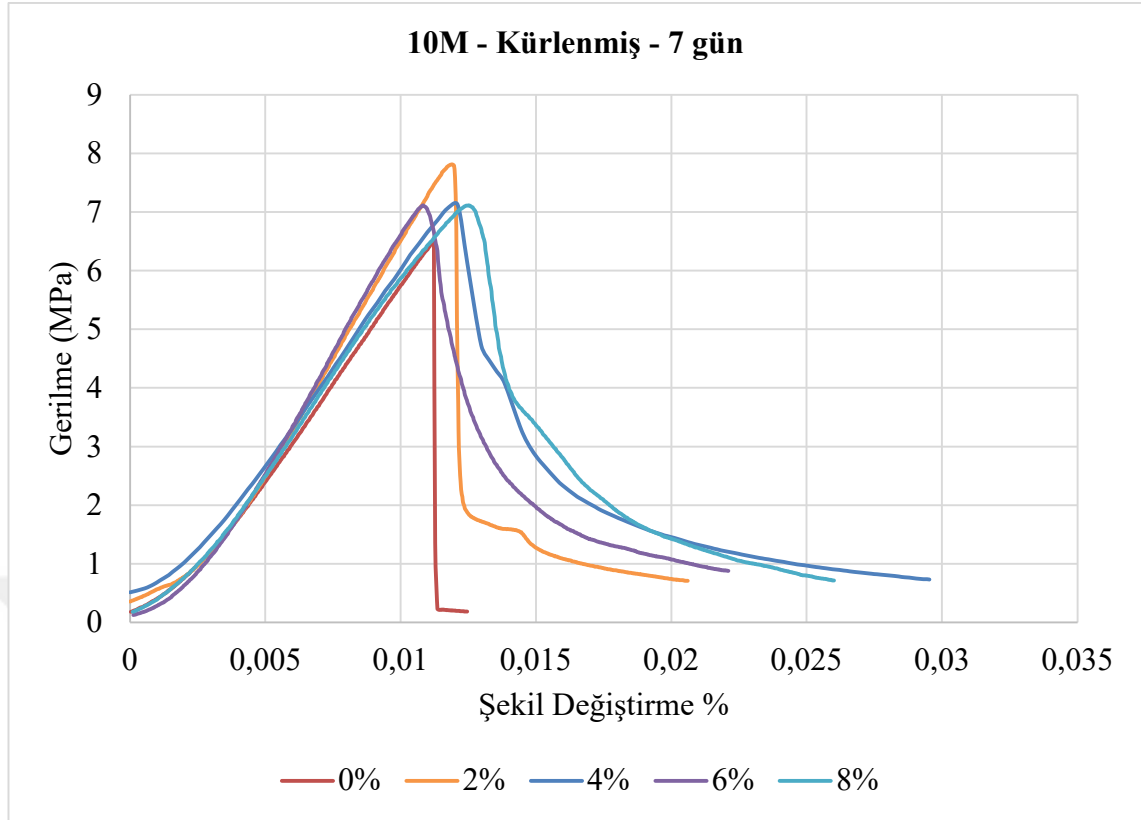
**Şekil 4.24** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin eğilme gerilme- şekil değiştirme eğrileri

Kürlenmiş numuneler de benzer şekilde davranış göstermektedir. Kağıt lifler basınç tokluğuna olumlu etki göstermektedir. %2 lif içeren numune daha yüksek basınç dayanımı göstermesinin yanı sıra daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. %4, %6 ve %8 oranında kağıt lif içeren örneklerin maksimum basınç dayanımlarında bir miktar azalma meydana gelse de numune tokluğuna yaptığı katkı bu dayanım düşüşünü kabul edilebilir kılmaktadır. Özellikle %6 ve %8 oranında lif içeren karışımlar maksimum dayanım değerlerini aştıktan sonra dayanımda büyük bir kayıp yaşamaksızın şekil değiştirmeye devam edebilmektelerdir (Şekil 4.24). Oldukça sünek bir hale gelen geopolimer harçların parçalanmadan sıkışmaya devam ettiği gözlemlenmiştir.



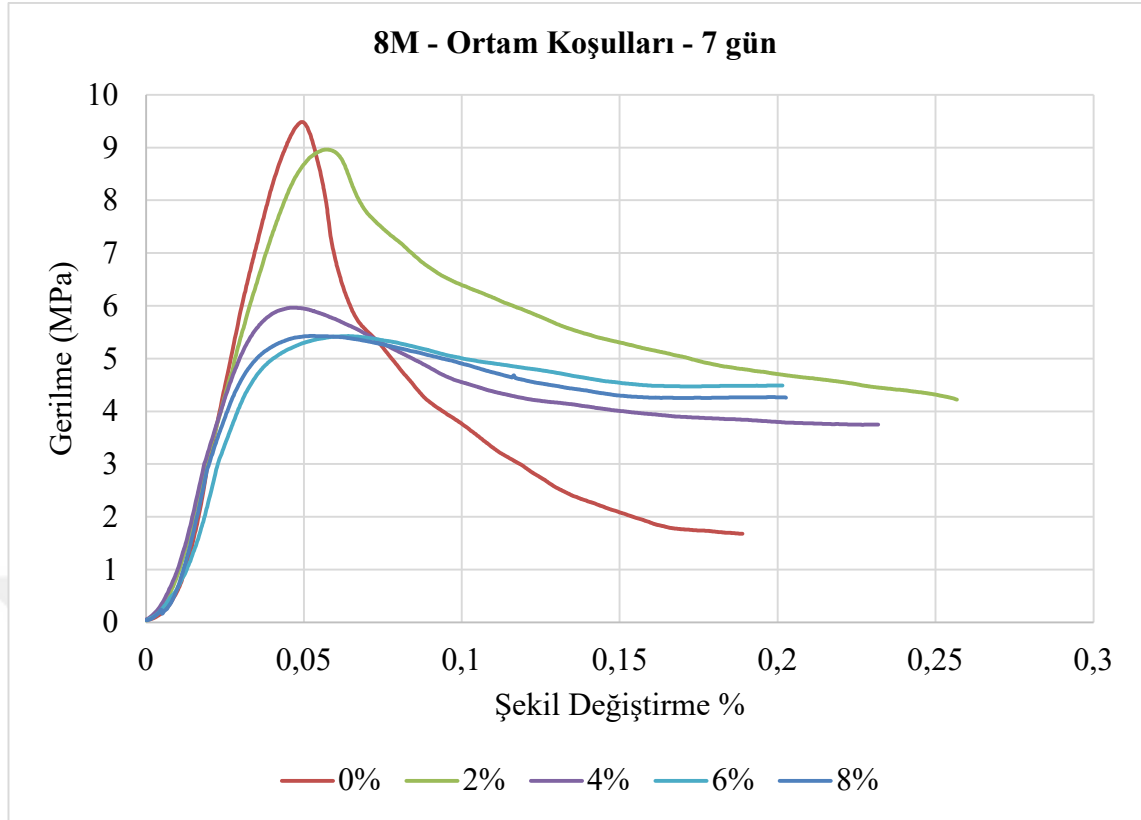
**Şekil 4.25** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin eğilme gerilme- şekil değiştirme eğrileri

Kağıt lifler %2 ve %4 oranında yer aldıkları numunelerde hem dayanımı hem de tokluğu arttırırken %6 ve %8 oranında yer aldıkları numunelerde dayanımda az bir düşüşe karşın eğilme tokluğunu önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür (Şekil 4.25). Buna karşın kağıt lifin numuneye kattığı süneklik elastisite modülünün kağıt içermeyen numunelere kıyasla daha düşük kalmasına neden olmaktadır. Ortam şartlarında bırakılan örneklerin teste tabii tutulmasıyla elde edilen grafiklerde görüldüğü üzere, lif katkısı kürsüz numunelerde daha net bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeni olarak karışıma katılan kağıt liflerin dayanımlarının düşük olması numune dayanımındaki artışla birlikte kağıdın dayanıma katkısının oransal olarak azalması olarak gösterilebilir.



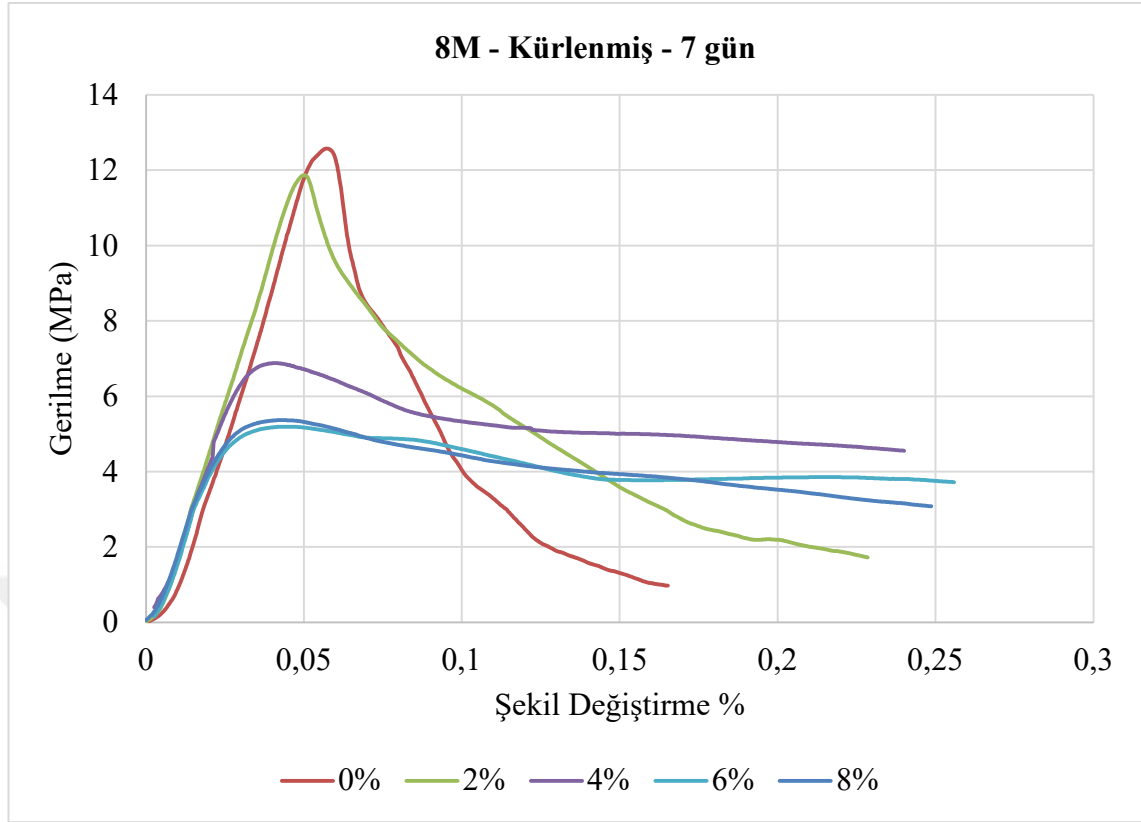
**Şekil 4.26** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin eğilme gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4.26'da 60°C sıcaklıkta kürlenmiş lif içeren numunelerin eğilme dayanımlarında ve tokluklarında artış gözlemlenmiştir. Fakat bu artış kürlenmemiş numunelere kıyasla gerilme-şekil değiştirme davranışını ve numunenin mekanik özelliklerini daha az etkilemiştir. Bu etkinin neden daha az olduğu kürlenmemiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiğinde açıklanmıştır. Maksimum eğilme dayanımı %2 lif içeren karışımdan elde edilmiştir. Aydın ve Baradan (2013) ise gerçekleştirdikleri çalışmada çelik lif içeriğinin geopolimer harçların eğilme dayanımı üzerindeki pozitif etkisinin basınç dayanımına etkisine kıyasla daha fazla olduğunu belirtmiştir. Tez kapsamında kullanılan selülozik liflerin zayıf yapısı nedeniyle, lif etkisi görece düşük kalmıştır. Karunanithi ve Anandan (2014), geopolimer harca %1,5 oranında çelik lif takviye ederek 13,2 MPa eğilme dayanımı elde edebilmiştir. Dayanımda lif katkısız numuneye göre %46 oranında artış görülmüştür.



**Şekil 4.27** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri

%2 lif içeren karışımın basınç testine uygulanması maksimum basınç dayanımında bir miktar düşüşe neden olurken, basınç tokluğunda kayda değer bir artış sağlamıştır (Şekil 4.27). %4, %6 ve %8 oranında lif içeren karışımlar benzer davranış göstermekle birlikte dayanımdaki düşüş oldukça yüksektir. Al-Mashhadani vd. (2017) tarafından yapılan çalışma sonucunda ise lif takviyesinin geopolimer kompozitlerin mukavemet özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir, örneğin, çelik ve polivinil alkol liflerinin takviyesi, geopolimer kompozitin eğilme mukavemetini kontrol numunesine göre sırasıyla %31,45 ve %39,84 oranında arttırmıştır. Lif mukavemeti geopolimer harc özelliklerini doğrudan etkilediği görülmüştür.

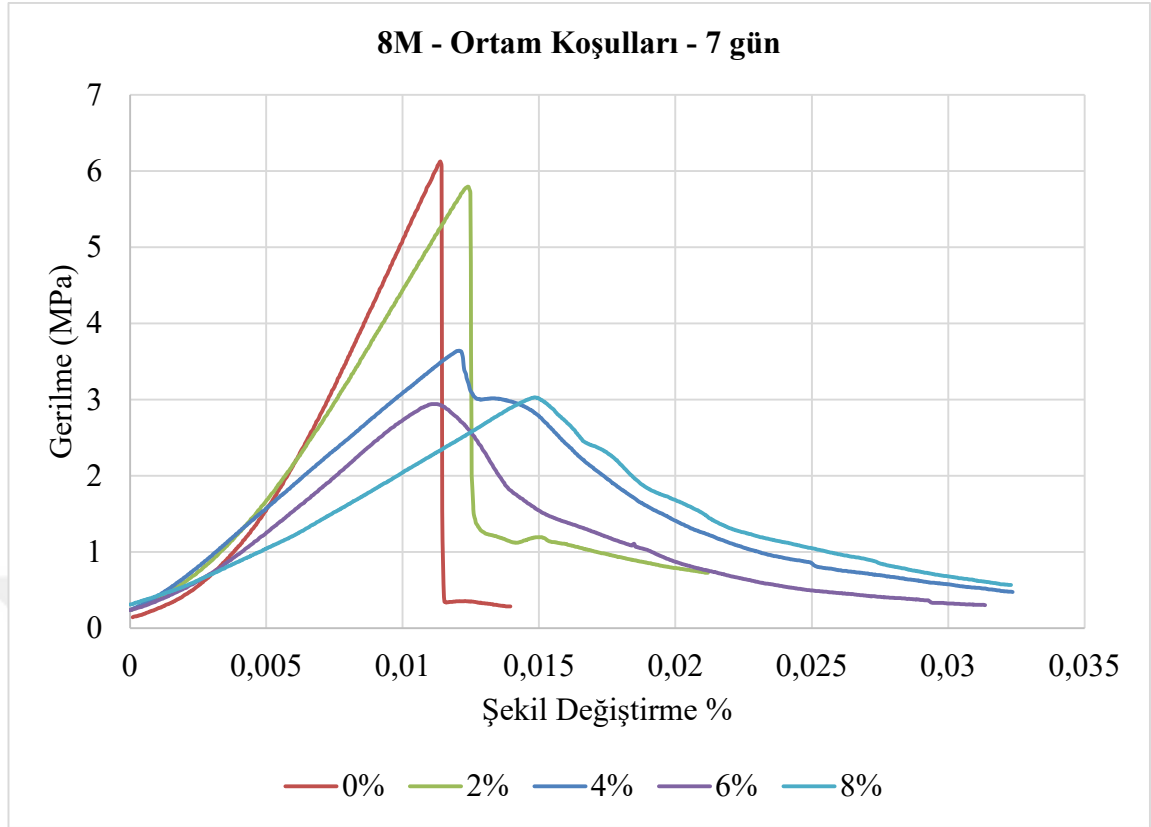


**Şekil 4.28** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Maksimum dayanımda farklılık görülmesine karşın gerilme-şekil değiştirme grafikleri kürsüz numunelerle oldukça benzerlik taşımaktadır. Basınç ve yarmada çekme testlerinin sonuçlarına göre, maksimum dayanıma ulaşmak için lif tipine bağlı olarak değişen olarak optimum bir lif içeriğinin olduğu tespit edilmiştir (Silva vd. 2020).



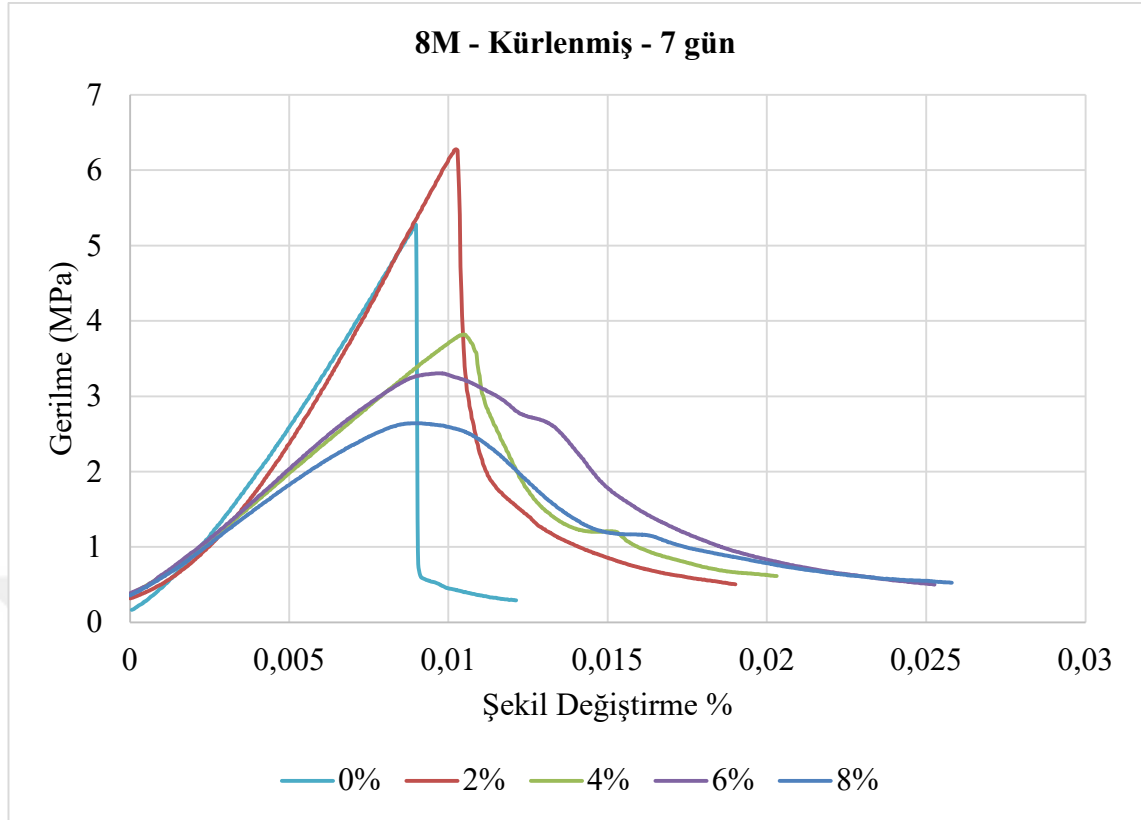
**Şekil 4.29** 8M'lık 8% lif içeren numunenin basınç dayanım testi esnasında görüntüsü



**Şekil 4.30** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin eğilme gerilme-şekil değişirme eğrileri

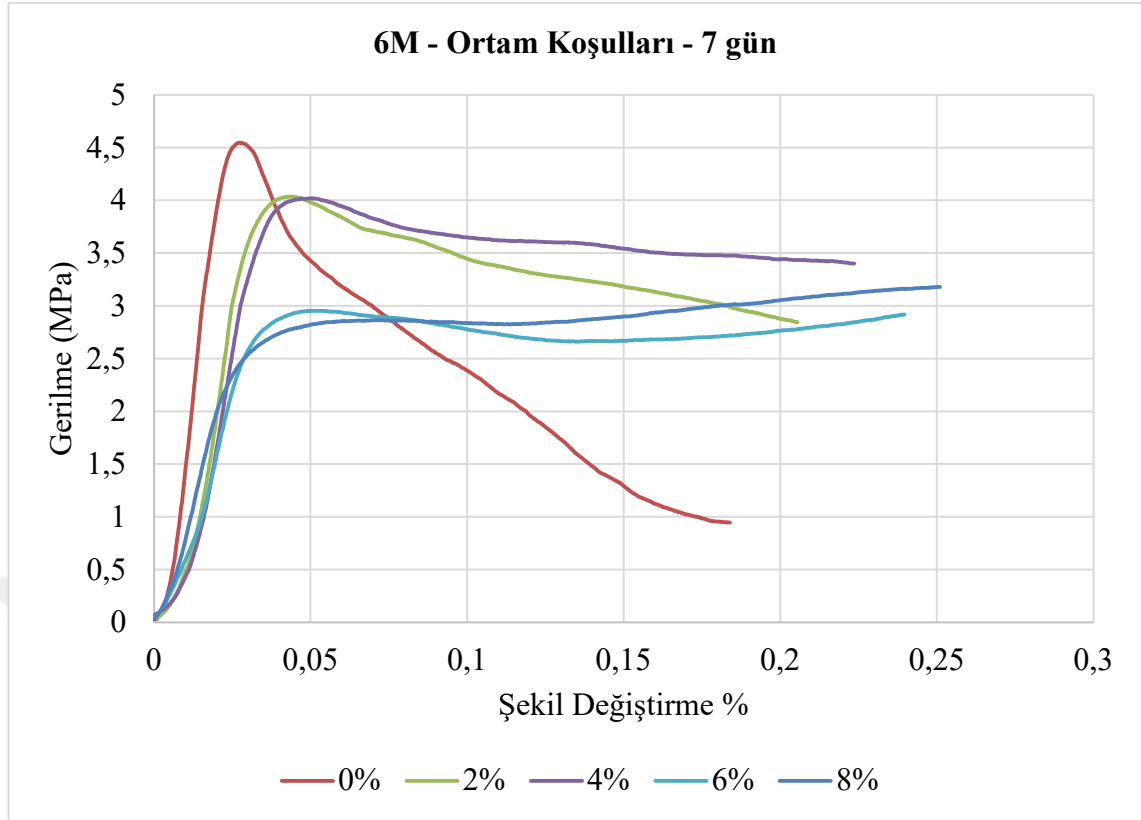
Eğilme testi gerçekleştirilen 8M'lık numunelerin gerilme-şekil değişirme grafikleri incelendiğinde kürlemenin maksimum eğilme dayanımı üzerinde etkisi fazla görülmektedir. Lakin kürleme işlemi numunelerin elastisite modülünü arttırmıştır. Maksimum eğilme dayanım değeri %0 kağıt içeren numuneden elde edilmiştir (6,12 MPa).

Günümüzde geopolimer kompozitler, Portland çimentosuna yapı malzemesi olarak en umut verici alternatiftir. İyi mekanik özelliklere sahiptirler. Ayrıca, sisal ve pamuk gibi doğal liflerin eklenmesi, eğilme özelliklerini iyileştirebilir. Endüstriyel atıklardan (uçucu kül) ve yenilenebilir kaynaklardan nispeten iyi özelliklere sahip kompozitler üretmek mümkündür, bu da onları çevre dostu malzeme sınıfı haline getirir. (Korniejenko vd. 2016).



**Şekil 4.31** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin eğilme gerilme-şekil değiştirme eğrileri

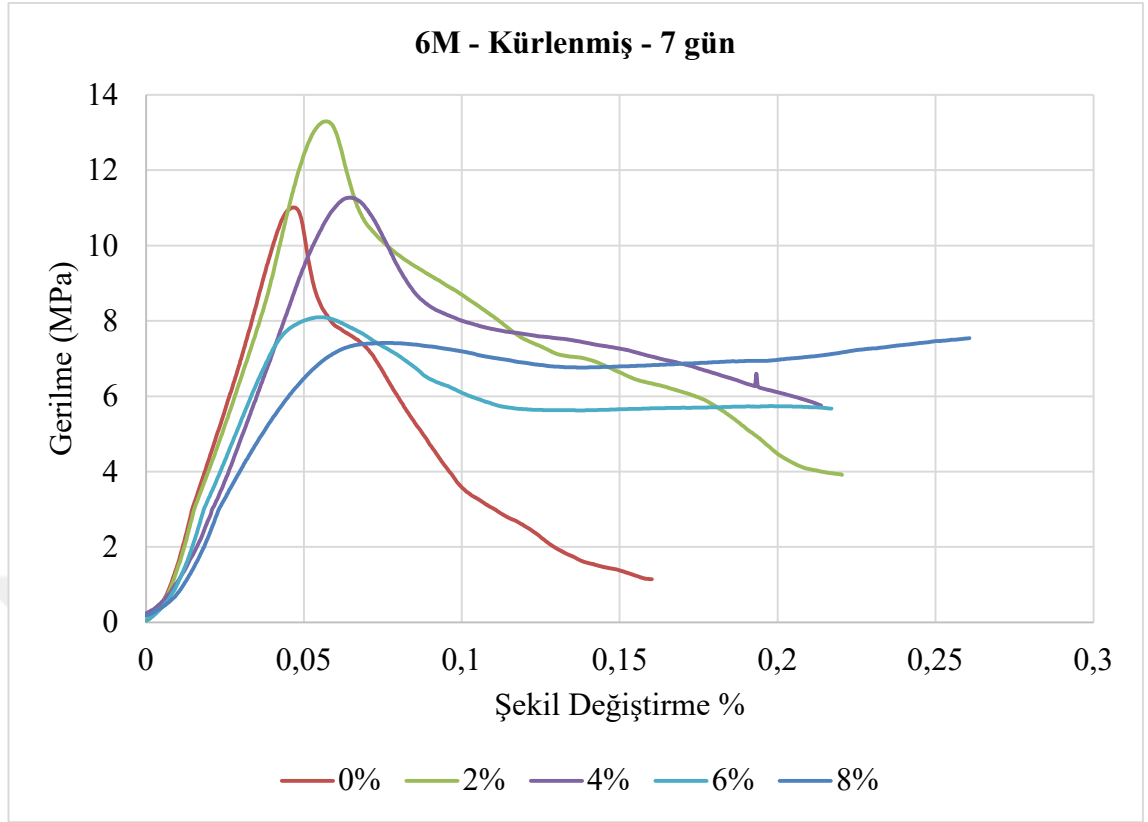
Silva vd. (2020) yaptıkları çalışmada üç nokta eğme testi sonuçları doğrultusunda, eğilme mukavemeti ile lif içeriği arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Lakin tez kapsamında yapılan test sonuçları bu bağlantının kağıt lif gibi düşük çekme mukavemetine sahip lifler için geçerli olmadığını ortaya koymaktadır. Bernal vd. (2010) tarafından gerçekleştirdikleri çalışmada çelik lif takviyeli geopolimer betonların eğilme dayanımlarının 28 günlük numuneler için 6,40 ile 8,86 MPa arasında, lif artışına bağlı olarak arttığını göstermiştir.



**Şekil 4.32** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri

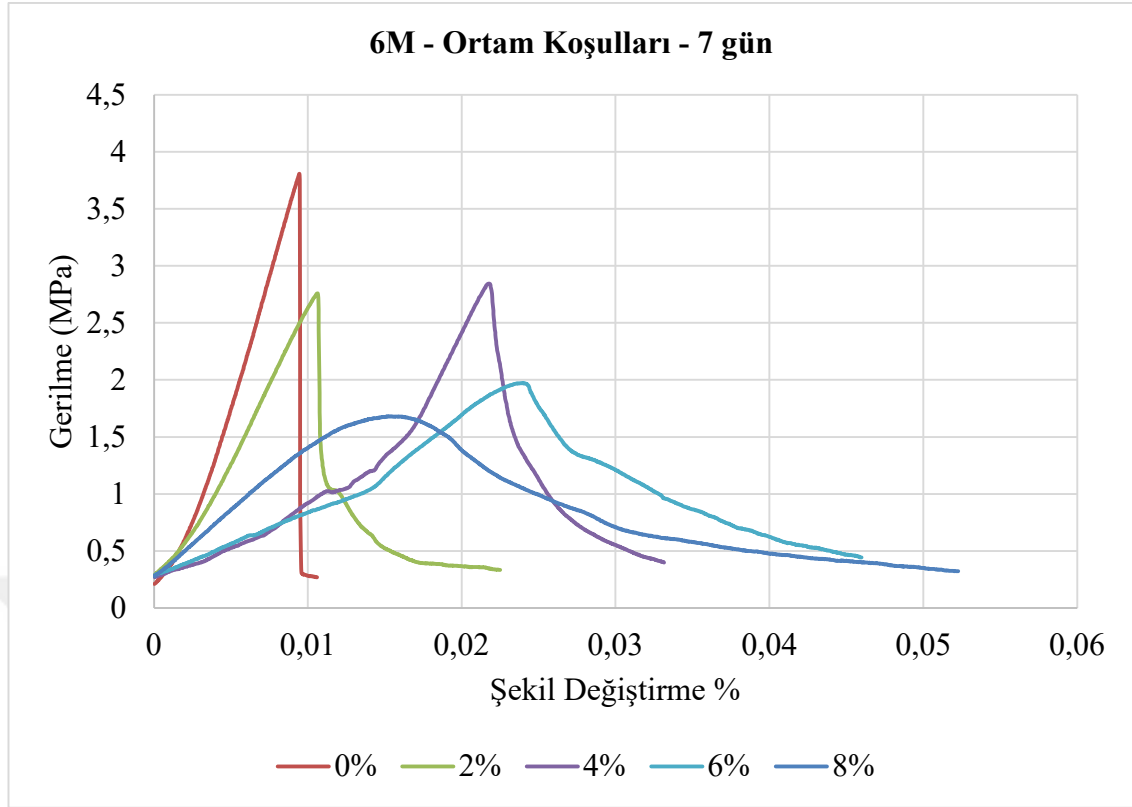
Molariteye bağlı olarak düşen basınç dayanım değerleri lif etkisinin daha belirgin olmasına yol açmıştır (Şekil 4.32). Lif içeren numuneler tüm lif oranlarında, lif içermeyen numunelere kıyasla daha sünek bir davranış sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte lif içeriğindeki artışa bağlı olarak basınç dayanım değerlerinde azalma görülmekle beraber tokluk değerinde artış gözlemlenmiştir.

Tokluk, plastik deformasyon esnasında malzeme tarafından emilen enerjinin bir ölçüsüdür. Düşük tokluğa sahip malzemeler ani gevrek kırılma sergileme eğilimindedir. Bununla birlikte, yeterli dayanıklılık ve tokluklara sahip sistemler tamamen göçmeden önce daha uzun süreli ve belirgin uyarı verir (Noushini vd. 2018).



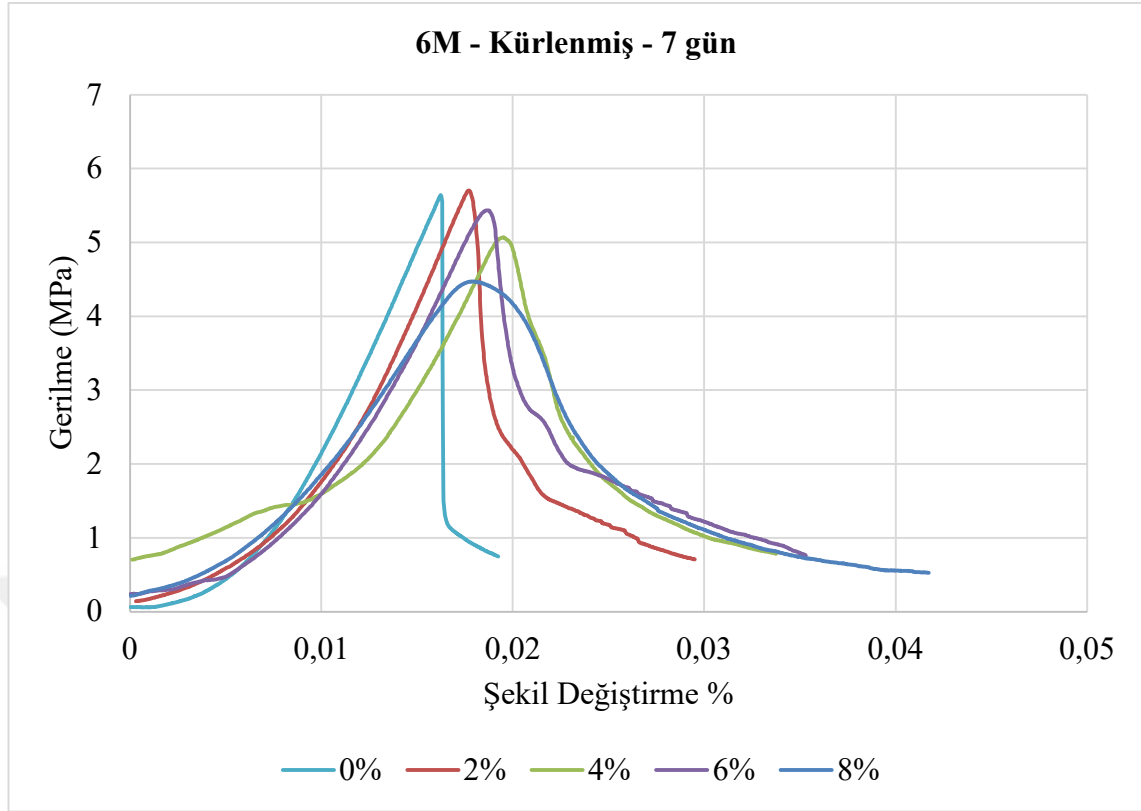
**Şekil 4.33** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Kürlenmemiş numunelere kıyasla basınç dayanımlarında bariz bir artış görülen 6M'lık numunelerde lif içeriğinin etkisi görece daha kısıtlı olmasına rağmen yüksek lif oranlarına (%6, %8) kürlenmemiş numunelere benzer gerilme-şekil değiştirme davranışı göstermektedir. Lif yüzdesi arttıkça numune daha sünek bir hale gelmektedir (Şekil 4.33).



**Şekil 4.34** Sıcaklık kürü uygulanmamış 7 günlük numunelerin eğilme gerilme-şekil değiştirme

Molariteye bağlı olarak düşüş gösteren dayanım değerleri lif içeriğinin numune üzerindeki etkisini oldukça arttırdığı görülmektedir (Şekil 4.34). Ng vd. (2018) yaptıkları çalışmadan elde ettikleri sonuçlar NaOH molaritesi arttığında uçucu kül geopolimer karolarının eğilme mukavemetinin genel olarak arttığını göstermiştir. 12M'lık üretilen geopolimer karolar ise en yüksek eğilme mukavemetini göstermiştir. Artan lif etkisi beraberinde liflerin numune içerisindeki dağılımının önemini de arttırmıştır. Liflerin momentin maksimum olduğu bölgelerde daha sık ve etkiyen kuvvete paralel olarak dizilmesi, eğilme dayanımı ve tokluğu üzerinde etkisinin yüksek olduğu görülmektedir.



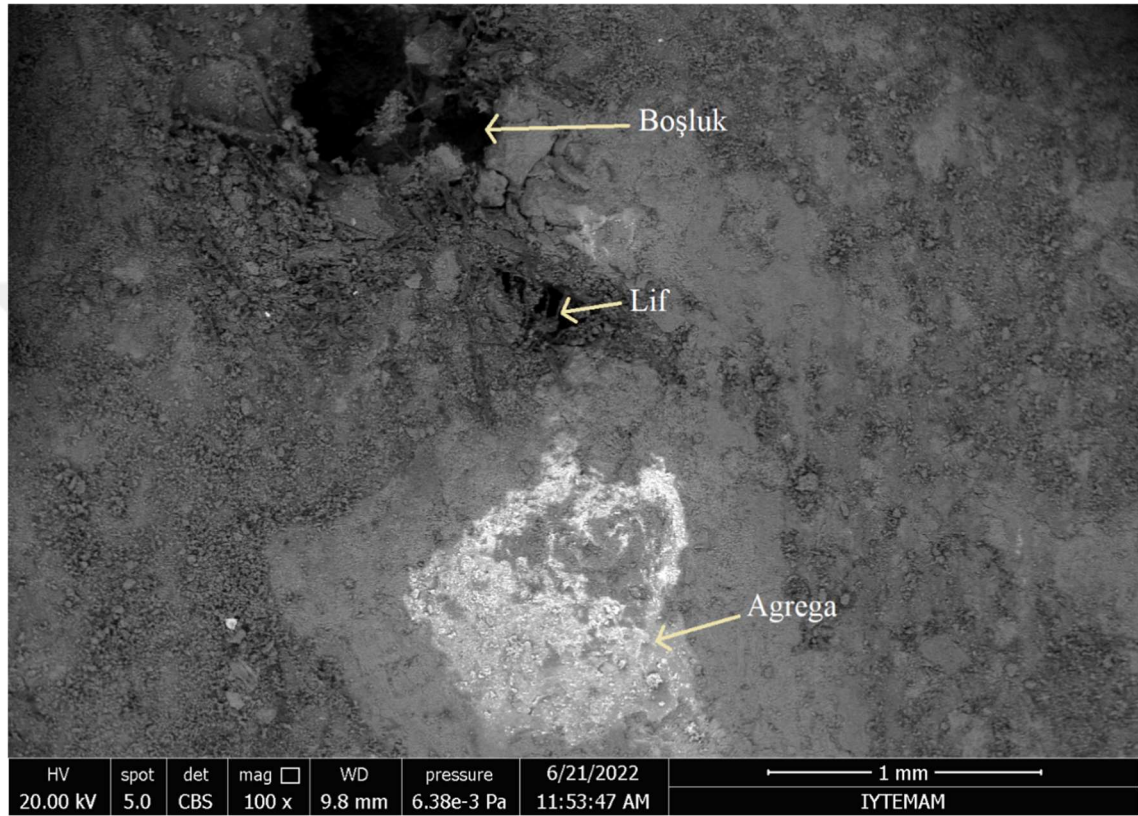
**Şekil 4.35** 60°C sıcaklıkta kürlenmiş 7 günlük numunelerin eğilme gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Lif içeriğindeki artışa bağlı olarak dayanımda kısmen düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 4.35). Bu düşüşün yanı sıra maksimum yüklemeye maruz kalan numunelerin dayanım kaybetme hızı lif içeriğinin artışıyla birlikte azalma göstermektedir.

#### 4.1. SEM görüntüleri ve EDX spektrumları

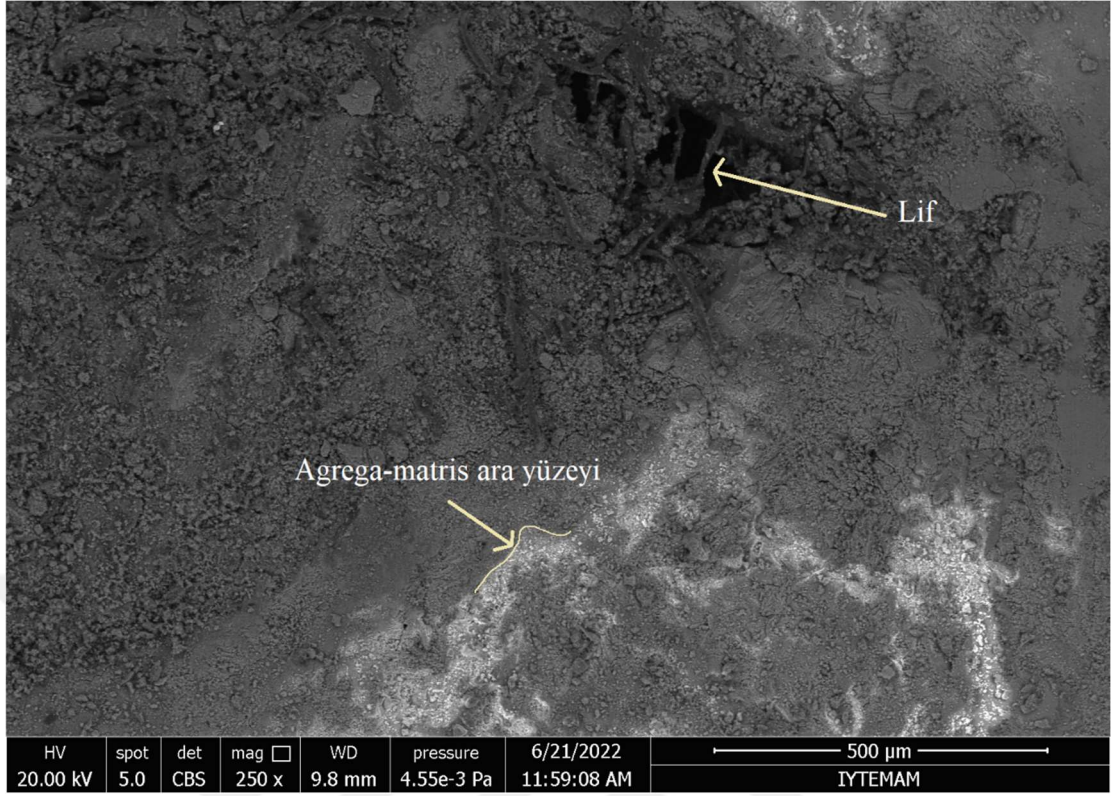
Test esnasında elde edilen numune parçalarından SEM (100x, 250x, 500x) görüntüleri elde edilmiştir. Görüntüler üzerinde bölgeler belirlenmiş ve bu bölgeler üzerinde EDX spektrum analizi gerçekleştirilmiştir. SEM sonuçları, liflerin matristeki gerilme yığılmasını azaltabileceğini ve çatlakların yayılmasını önleyebileceğini göstermiştir. Özellikle çelik lif takviyesinin enerji yutma kapasitesini büyük ölçüde arttıracığı ön görülmüştür (Guo vd. 2018). Liflerin karışıma girdiği gibi kalmadığı, ince ve uzun parçalara ayrıldığı ise Şekil 4.37’de görülmektedir. Geopolimer matris bünyesindeki boşluklarda bulunan lifler SEM görüntülerinde gözlemlenmiştir. Şekil 4.37 incelendiğinde karışıma katılan kağıt liflerin daha küçük parçalara ayrıldığı fark edilmiştir. Bu durumun liflerin matris içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmasına neden olduğu düşünülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde büyük boşlukların lif içeren numunelerin numunelerde bulunduğu gözlemlenmiştir. Lif içermeyen numunelerde yer alan boşluklar görece daha yüzeysel ve küçük kalmıştır. Şekil 4.36’da agrega ve geopolimer hamur arasında iyi bir aderans gözlemlenmiştir. Geopolimer hamur ve agrega arasında boşluk yapısına rastlanılmamıştır. Şekil 4.36-37’de bu durum daha iyi gözlemlenebilmiştir. Şekil 4.44’te ise sıcaklık kürü uygulanmamış numunede agrega ve

geopolimer hamuru arasında oldukça fazla boşluk olduğu görülmüştür. Şekil 4.45'te bu durum daha iyi bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Şekil 4.39 incelendiğinde lif içeren kürlenmemiş numunelerde boşluğunun daha çok ve daha sık olduğu görülmüştür. Şekil 4.41'de görüldüğü üzere harç içerisindeki lifler ayrıca etraflarında mikro boşluklar meydana getirmiştir. Lif yüzdesinin artmasının poroziteyi arttırdığını ortaya koyan veriler SEM görüntüleriyle desteklenmiştir.

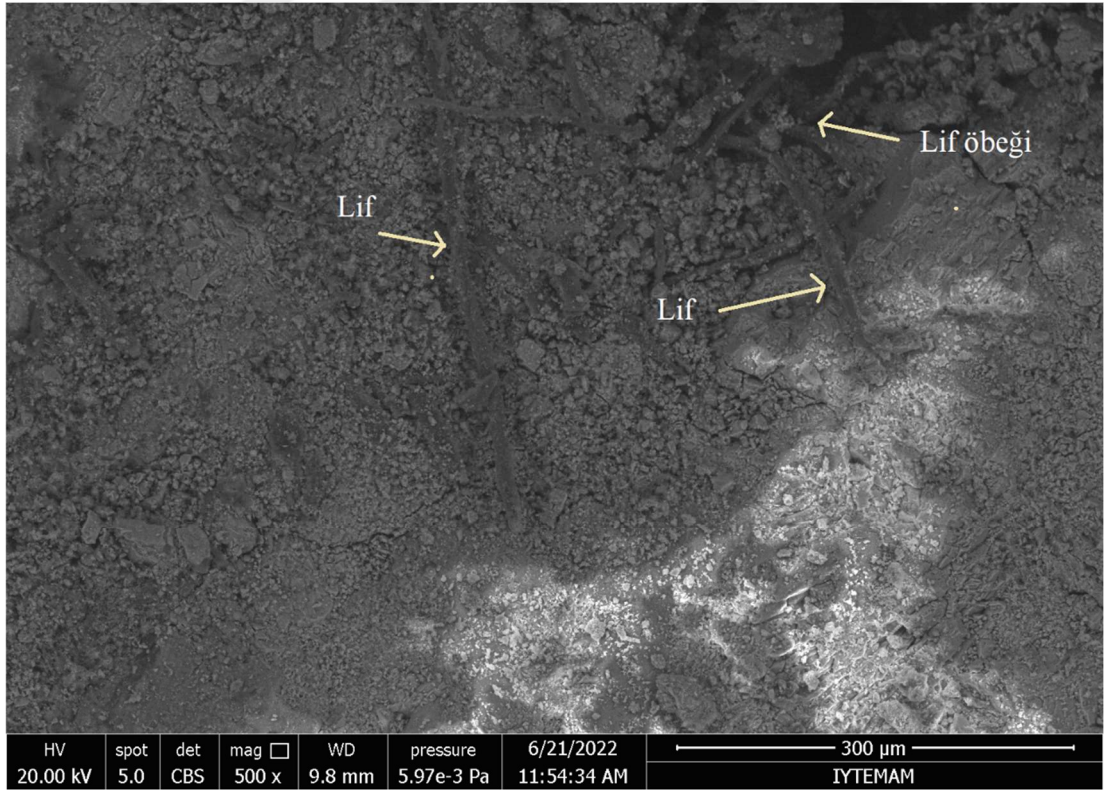


**Şekil 4.36** %8 lif içeren 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (100x)

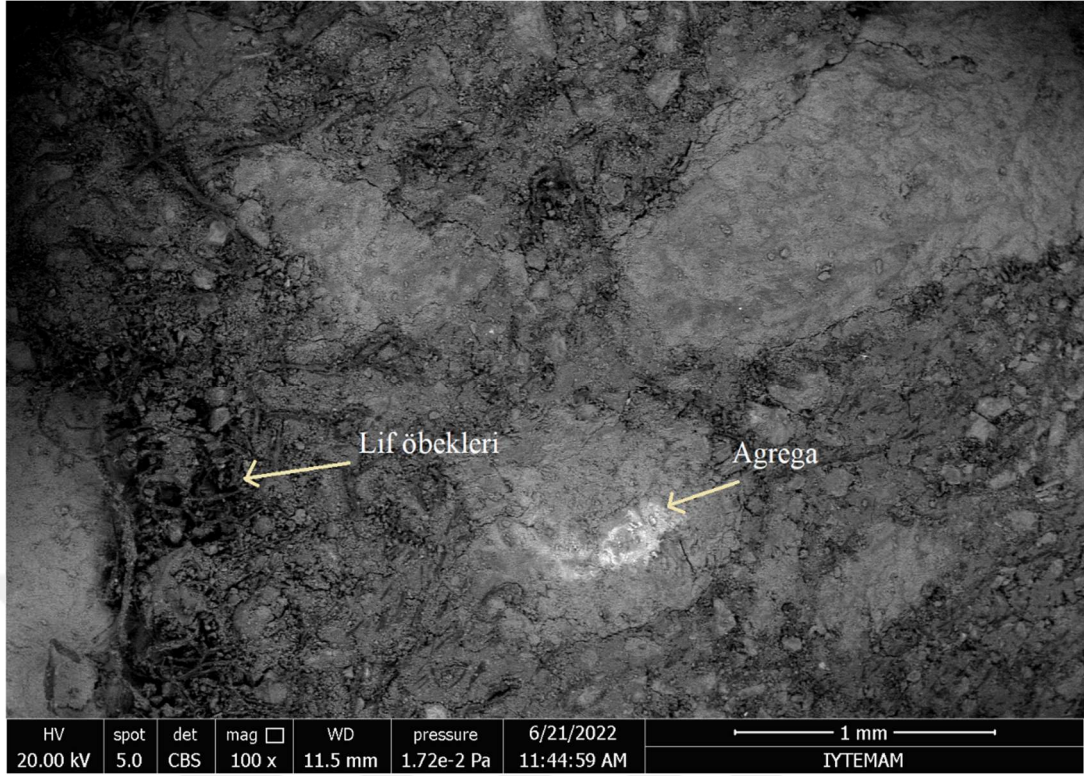
Rostami ve Behfarnia (2017) yaptıkları çalışmada silis dumanı ihtiva etmeyen geopolimer numunelerde silis dumanı içeren numunelere kıyasla daha fazla gözenek barındırdığını saptamıştır. Hu vd. (2008) ise yaptıkları çalışmada SEM görüntülerini inceledikleri geopolimer malzemelerin mikroyapılarının geopolimerin yaşına bağlı olarak oldukça farklı bir yapıya dönüştüğünü gözlemlemiştir. Mozgowa ve Deja (2009), geopolimerlerin SEM görüntülerinde, inceledikleri numunenin kompakt yapısını geopolimer hamurun ana bileşeni C-S-H oluşumuna bağlamıştır. Şekil 4.43'te görüldüğü üzere lif



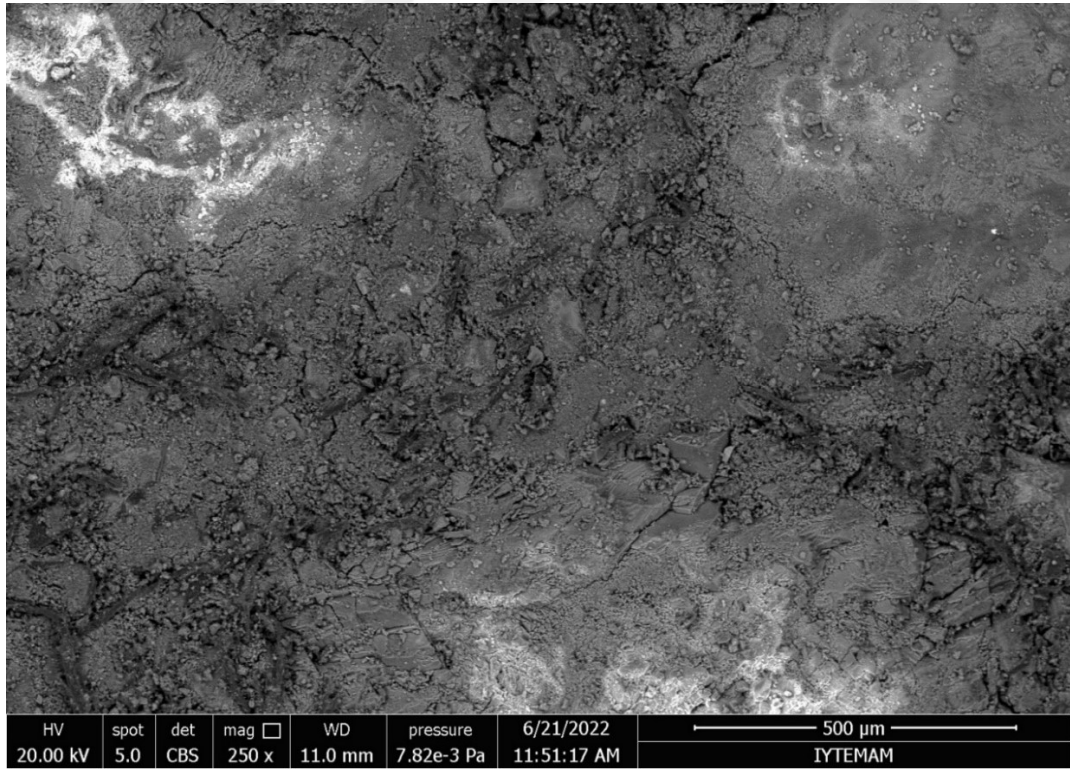
Şekil 4.37 %8 lif içeren 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (250x)



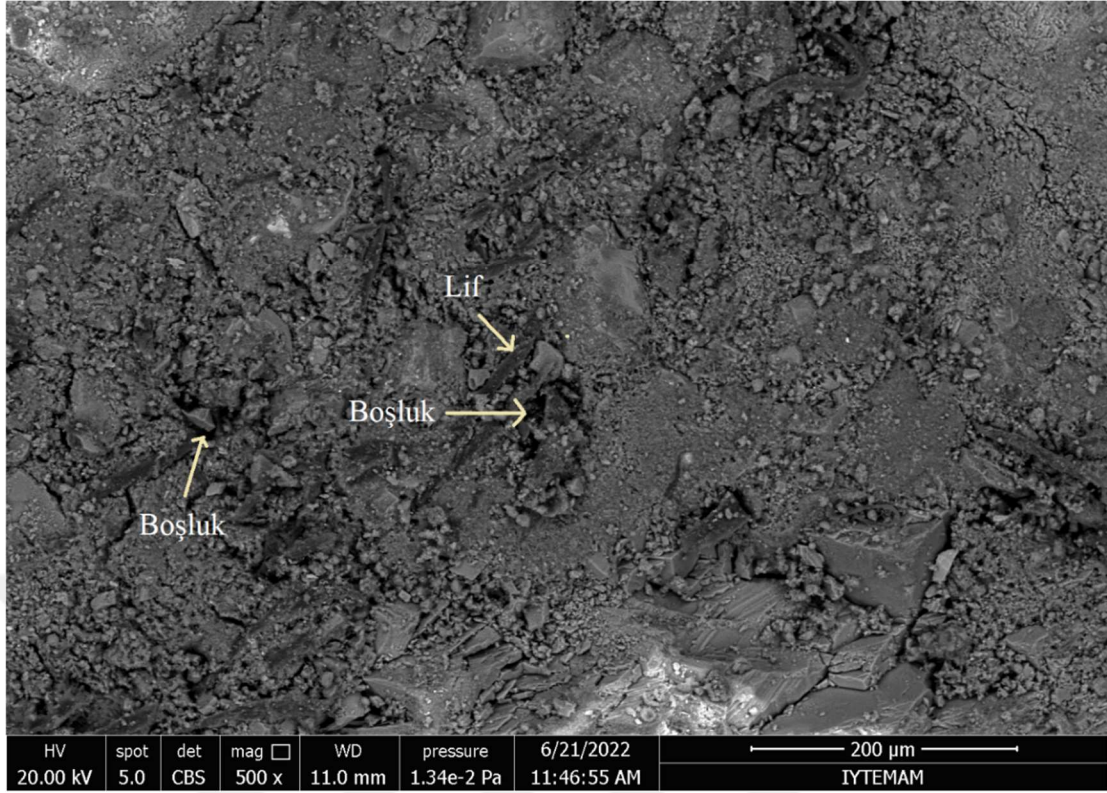
Şekil 4.38 %8 lif içeren 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (500x)



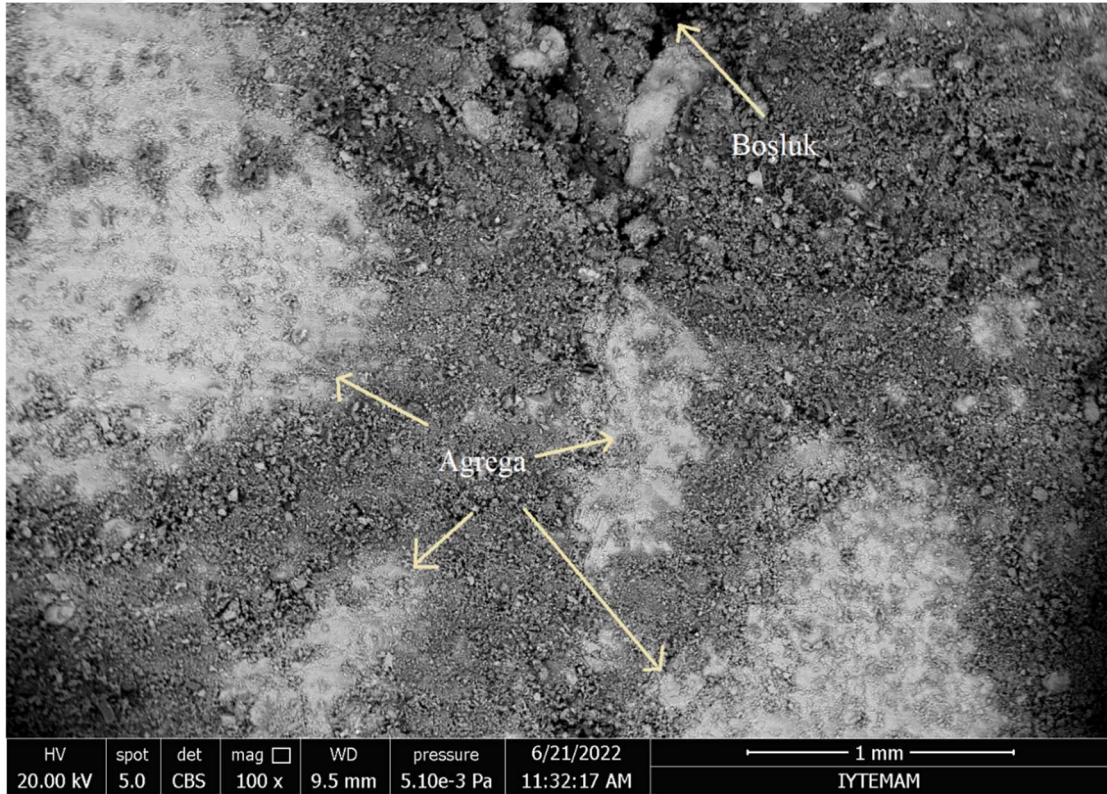
**Şekil 4.39** %8 lif içeren sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü (100x)



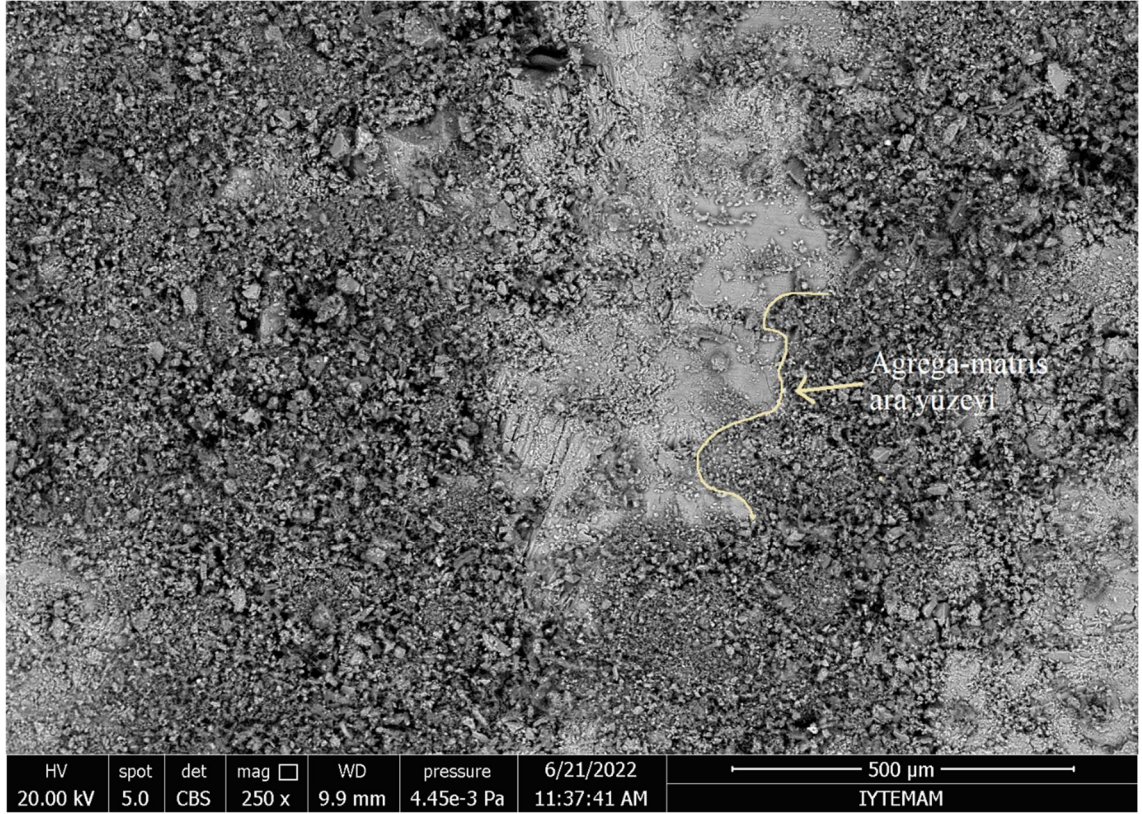
**Şekil 4.40** %8 lif içeren sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü (250x)



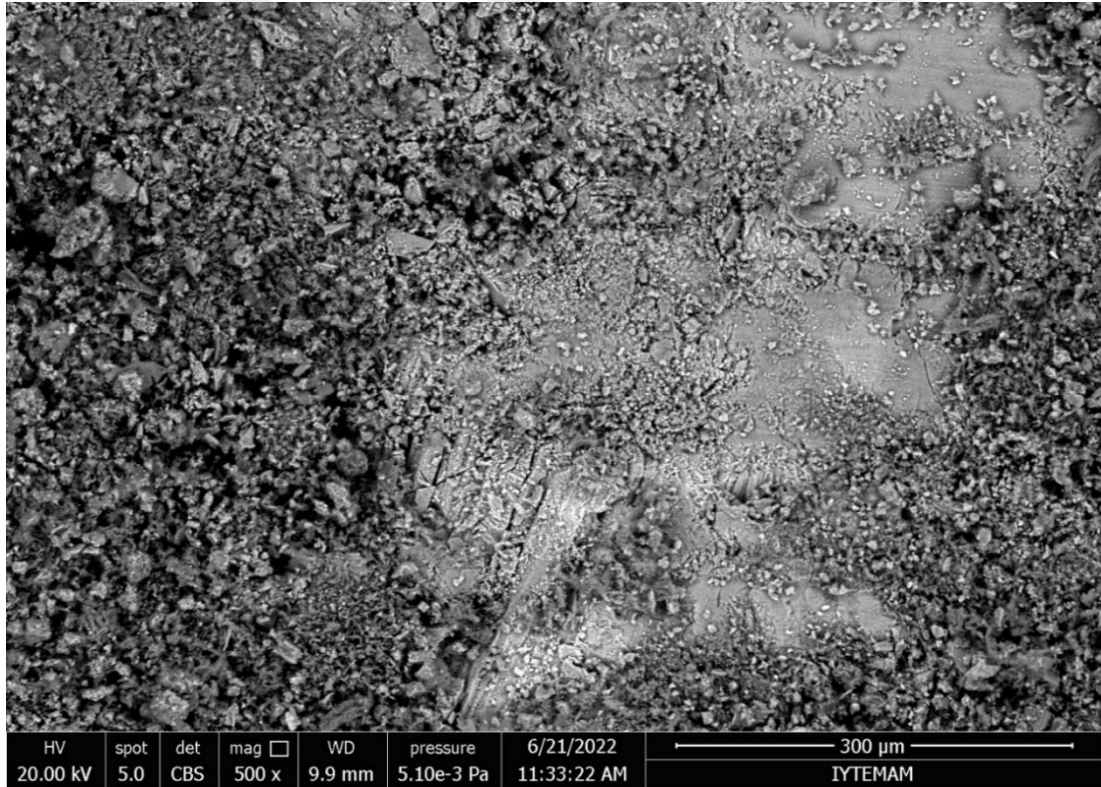
**Şekil 4.41** %8 lif içeren sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü (500x)



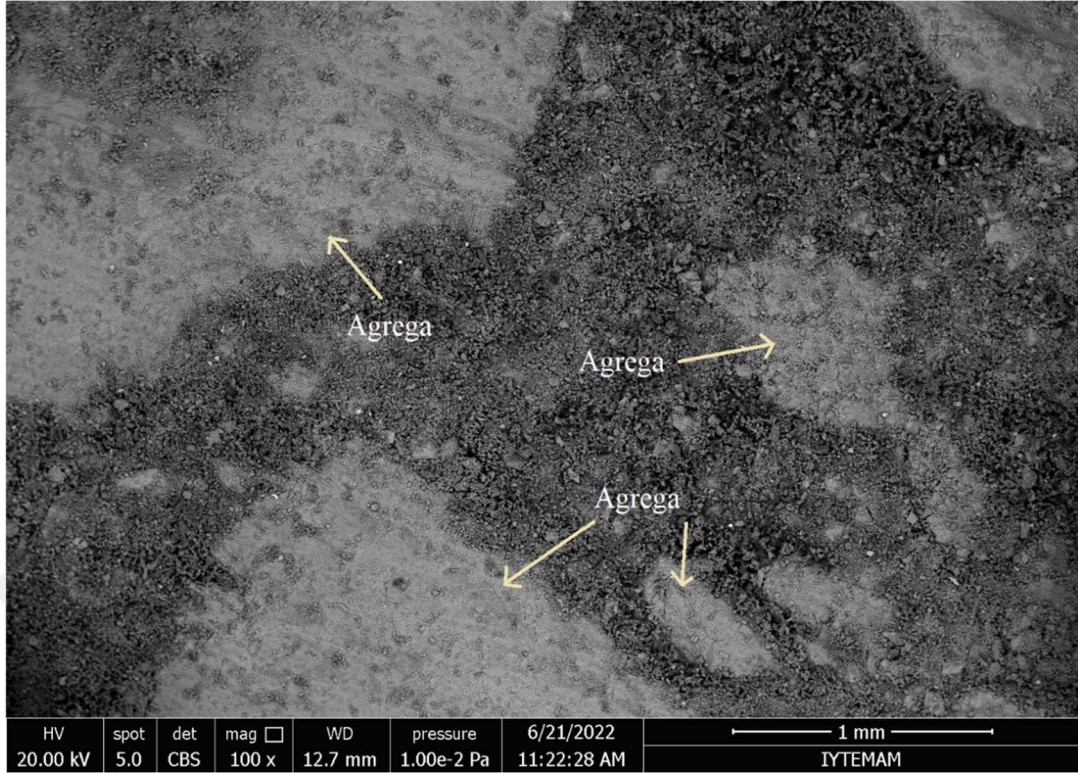
**Şekil 4.42** Lif içermeyen 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (100x)



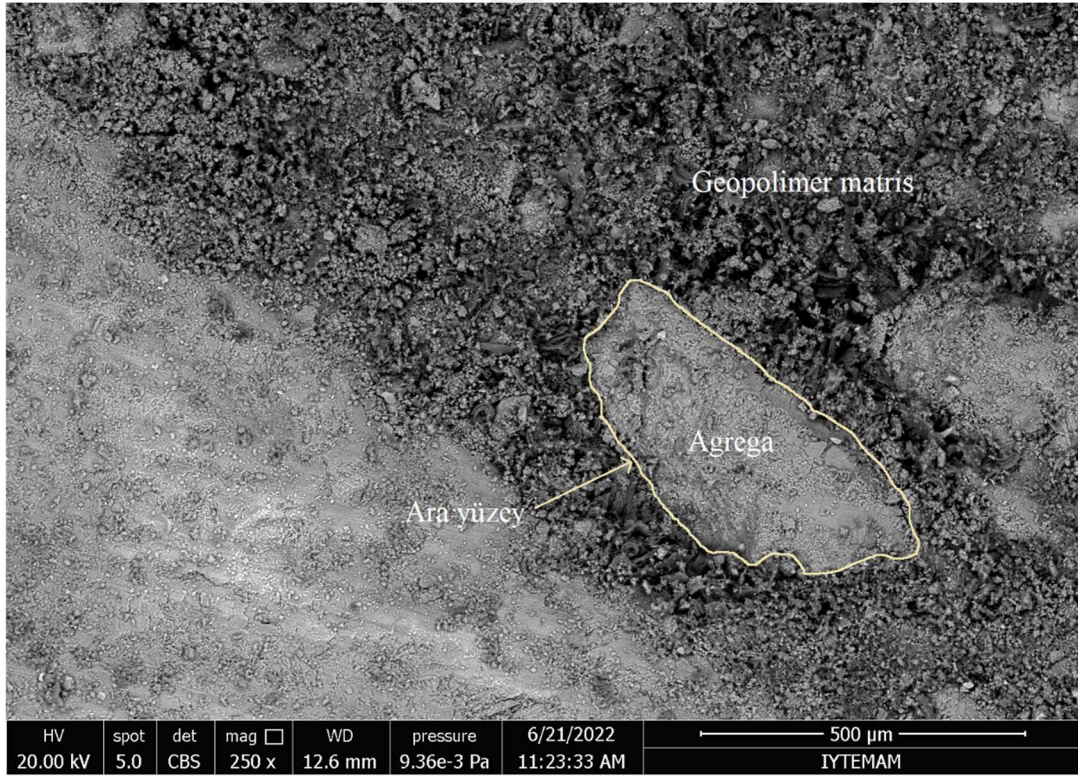
Şekil 4.43 Lif içermeyen 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (250x)



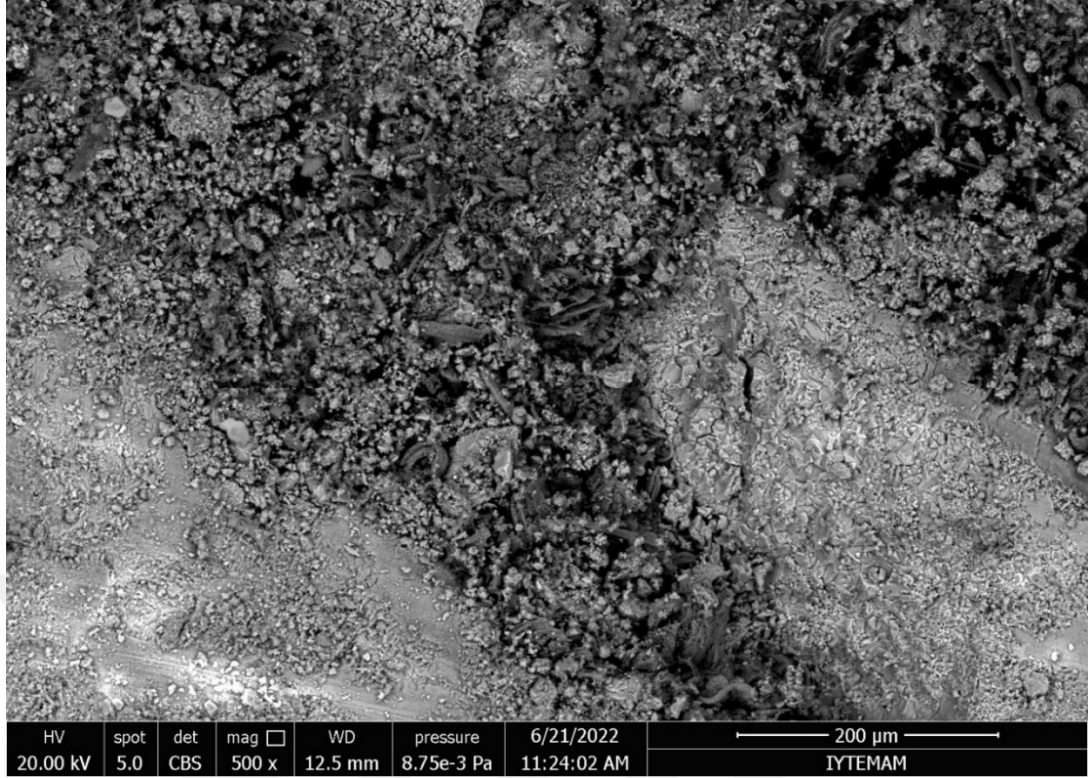
Şekil 4.44 Lif içermeyen 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait SEM görüntüsü (500x)



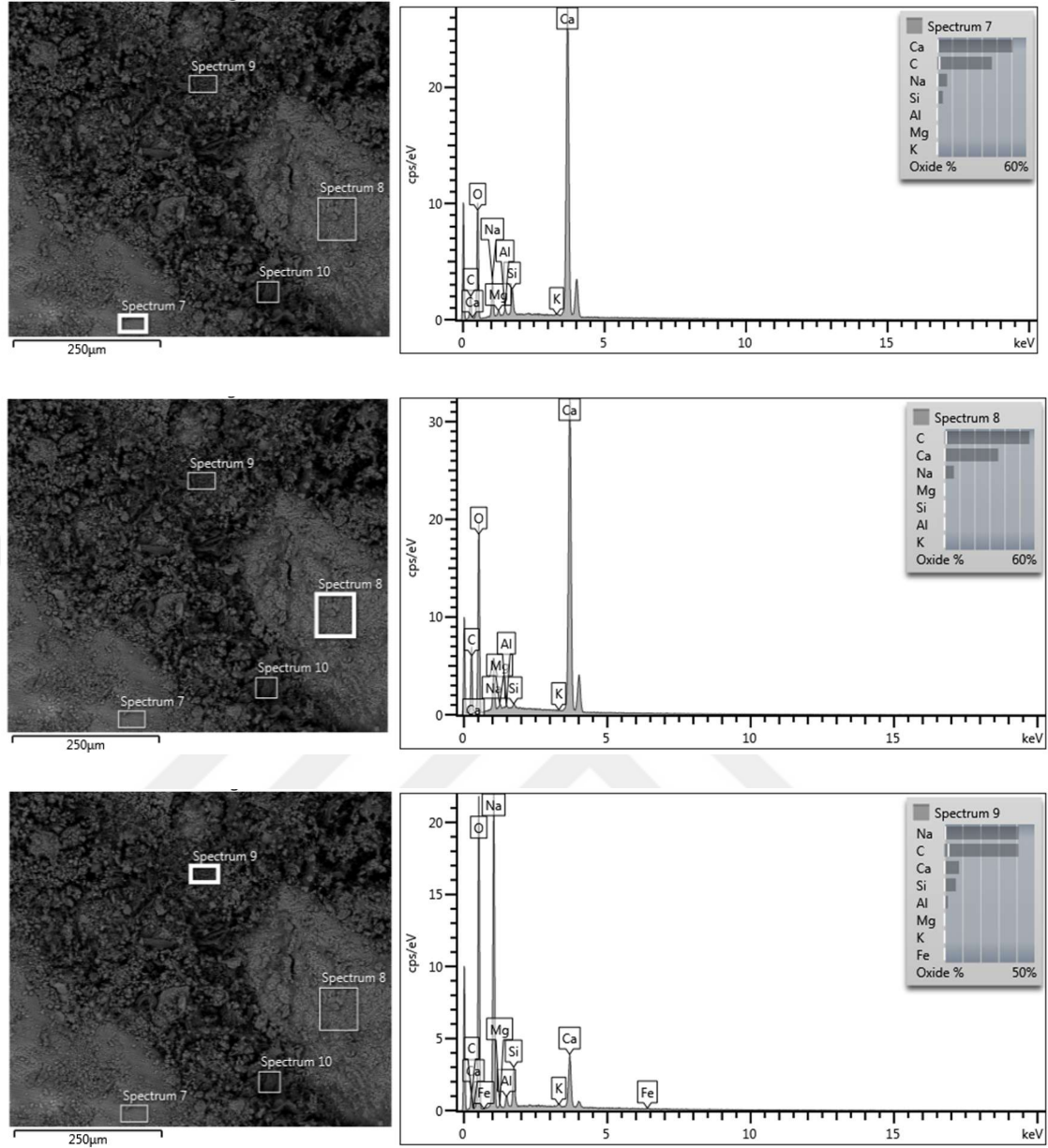
**Şekil 4.45** Lif içermeyen sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü (100x)



**Şekil 4.46** Lif içermeyen sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü (250x)

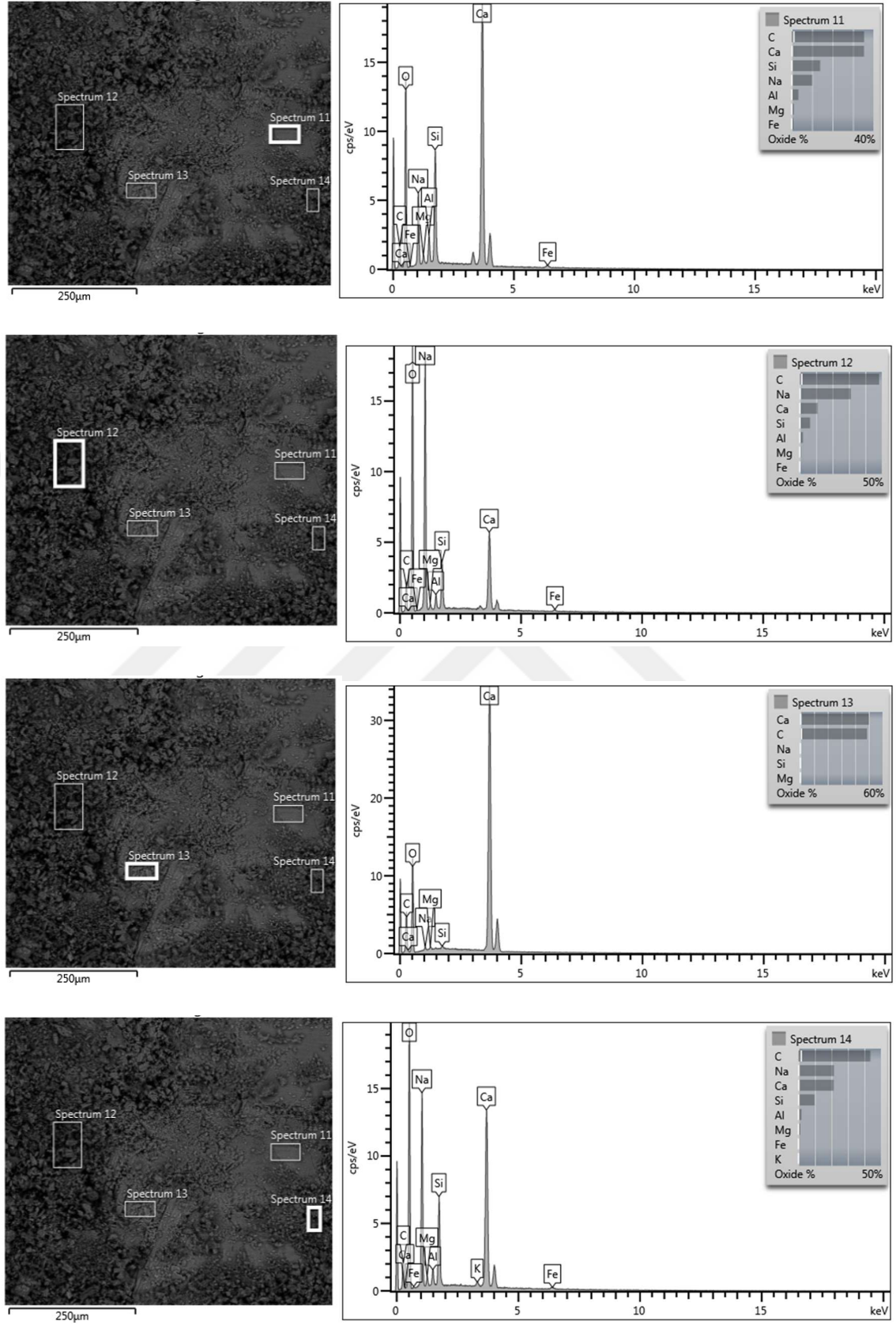


**şekil 4.47** Lif içermeyen sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait SEM görüntüsü (500x)

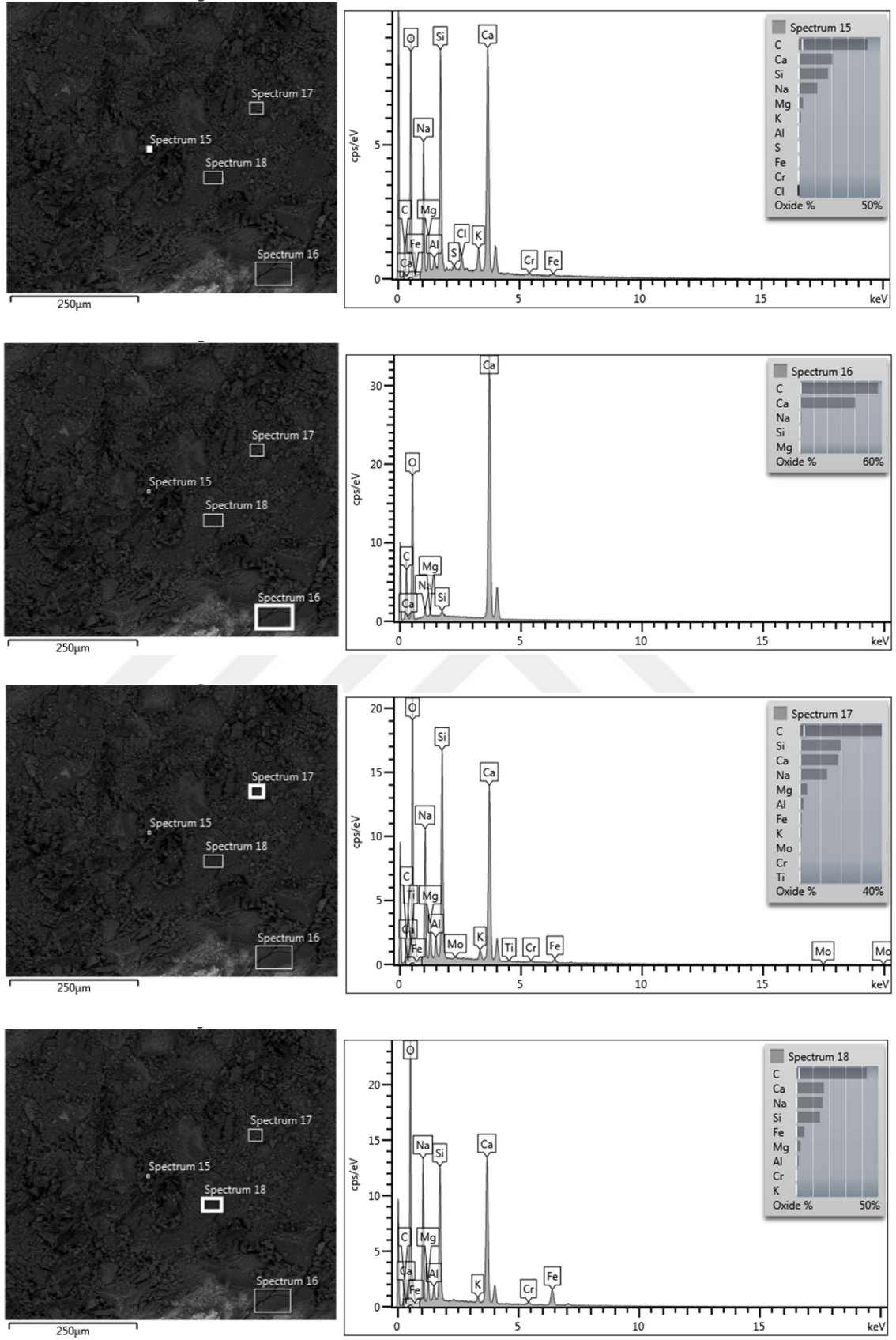


**Şekil 4.48** Lif içermeyen, sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait EDX spektrumları

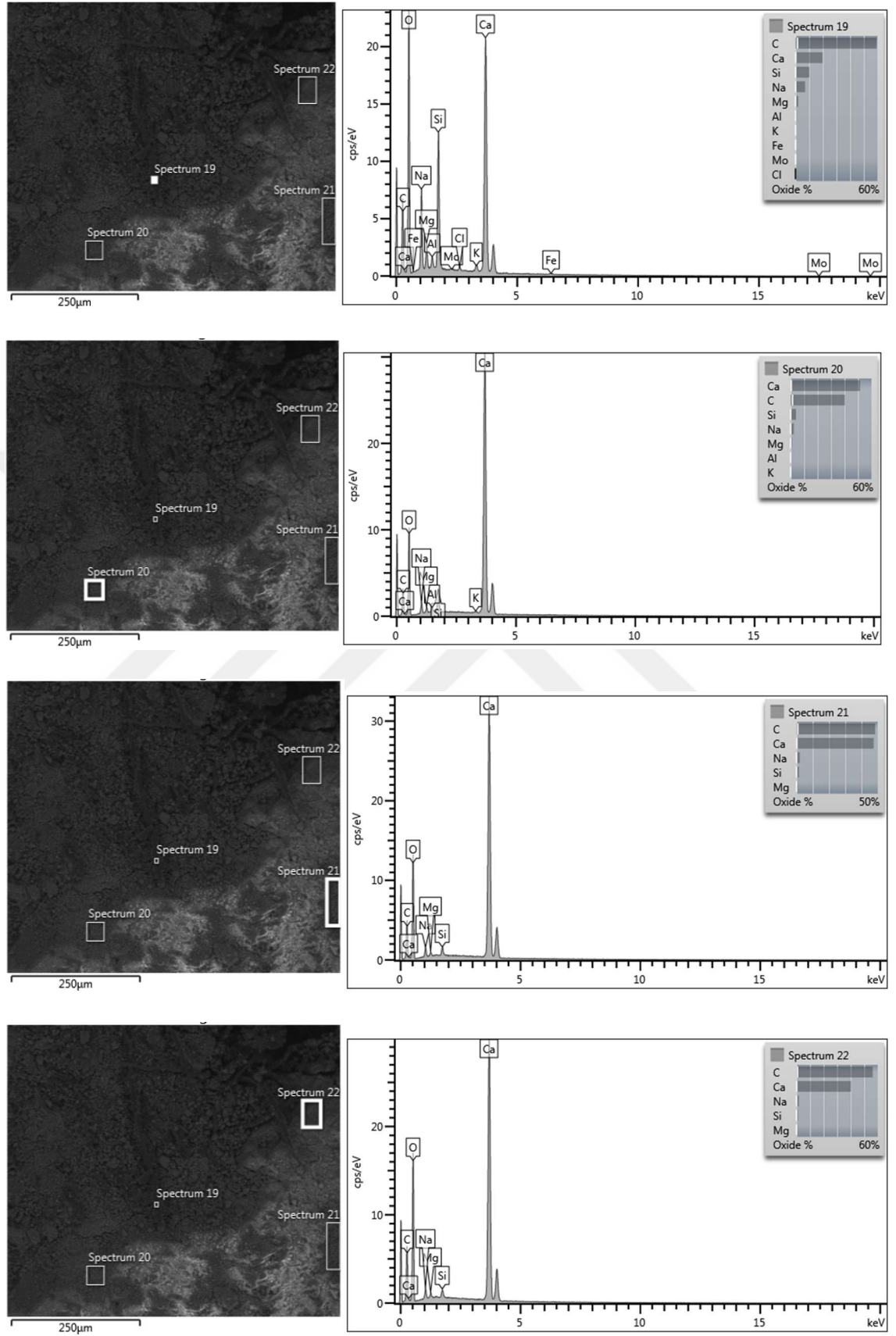
Çalışma kapsamında SEM görüntüleri incelenen numunelerin ayrıca çeşitli bölgeleri X-ışını spektrometresi kullanılarak bileşen analizi gerçekleştirilmiştir. İncelenen numunelerde esas bileşenler oksijen, kalsiyum, silisyum ve sodyum olarak görülmektedir. Özellikle kalsiyum tüm bölgelerde oldukça yüksek oranda görülmüştür. Oksit olarak ise en çok  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  bulunmuştur. Spektrum 12’de görülen boşluklu yapıyı içerisine alan bölgede diğer bölgelere kıyasla daha çok sodyum bulunmuştur (Şekil 4.49). Tezde kullanılan kırma taş agregası kalker kökenli olduğundan agregaya denk gelen spektrum ölçümlerinde yüksek oranda kalsiyuma rastlanılmıştır (Şekil 4.48, Spektrum 7). Agreganın içerdiği  $\text{CaCO}_3$  bu durumun gözlemlenmesinde etkili olmuştur. Ölçümlerde rastlanılan sodyumun büyük bir bölümü kullanılan alkali aktivatörden gelmektedir.



Şekil 4.49 Lif içermeyen, 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait EDX spektrumları



Şekil 4.50 %8 lif içeren, sıcaklık kürü uygulanmamış numuneye ait EDX spektrumları



Şekil 4.51 %8 lif içeren, 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numuneye ait EDX spektrumlar

## 5. SONUÇLAR

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler göz önünde bulundurulduğunda selülozik liflerin geopolimer harçların özelliklerine yaptığı olumlu katkı, bu konu üzerinde yeni araştırmacıların yoğunlaşması ve bu şekilde imal edilmiş malzemelerin bir yapı malzemesi olarak pratik anlamda kullanım potansiyelini ortaya çıkarılması açısından umut verici görülmektedir. Çalışmada neticesinde çıkarılan sonuçlar şu şekildedir:

- Selülozik geopolimer harçlarda uygun şekilde ve miktarda kullanılması harcın mekanik özelliklerine katkıda bulunacağı görülmüştür. Ayrıca deney esnasında numunenin nem içeriğinin, kağıt liflerin dayanıma yapacağı katkıyı etkilediği tespit edilmiştir.
- Geopolimer harca eklenen liflerin eklendikleri boyutlarında kalmadıkları daha küçük liflere ayrıştığı görülmüştür. SEM görüntülerinin incelenmesiyle beraber bu ayrışmanın, lifin harç içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmasında etkin bir rol oynadığı anlaşılmıştır.
- Lif yüzdesinin artmasıyla birlikte gözeneklilik artmaktadır. Bu durum beraberinde yüzdece su emme değerinin de artışını getirir. En yüksek toplam gözeneklilik değeri %11,99 olarak %8 oranında lif içeren 6M'lık sıcaklık kürü uygulanmamış karışımda gözlemlenmiştir.
- En yüksek eğilme ve basınç dayanımı sırasıyla 7,62 ve 14,38 MPa olarak %2 oranında lif içeren 10M'lık karışımlardan elde edilmiştir.
- SEM görüntüleri incelendiğinde kağıt liflerin geopolimer matris içerisinde daha küçük liflere ayrıştığı gözlemlenmiştir. Liflerde yer yer öbikleşme görülse de büyük oranda homojen dağılım gözlemlenmiştir. Liflerin numune içerisinde meydana gelen çatlaklarda köprüleme görevi üstlendiği görülmüştür.
- En yüksek enerji yutma kapasitesi 60°C sıcaklıkta kürlenmiş %2 oranında lif içeren 8M'lık karışım ile hazırlanan numunelerden elde edilmiştir.
- Taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelendiğinde tüm molarite değerleri için optimum kağıt yüzdesi %2 olarak tespit edilmiştir. Lif içeriği arttıkça lifin harç özelliklerine olumlu katkısının azaldığı gözlemlenmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- A. Ashori, T. Tabarsa, I. Valizadeh (2011). Fiber Reinforced Cement Boards Made From Recycled Newsprint Paper. *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 7801–7804
- A. Bhutta, P.H.R. Borges, C. Zanotti, M. Farooq, N. Banthia, Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers Elsevier Ltd, *Cem. Concr. Compos.* 80 (2017)
- A. Kaçar (2018). Atık Kağıt Katkılı Çimento Harçlarının Bazı Mekanik Özellikleri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6(1), 1-6.
- Al-Mashhadani, M. M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M., & Erdem, S. (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and building materials*, 167, 505-513.
- Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2013). Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 50, 1-6.
- Aydın, S., Baradan, B. 2013. The effect of fiber properties on high performance alkaliactivated slag/silica fume mortars. *Composites: Part B*, 45: 63–69.
- Bernal, S., De Gutierrez, R., Delvasto, S., Rodriguez, E. 2010. Performance of an alkaliactivated slag concrete reinforced with steel fibers. *Constr. Build. Mater.* 24: 208–214.
- Bhutta, A., Farooq, M., & Banthia, N. (2019). Performance characteristics of micro fiber-reinforced geopolymer mortars for repair. *Construction and Building Materials*, 215, 605-612.
- Boerjan, W., Ralph, J., & Baucher, M. (2003). Lignin biosynthesis.
- C. Aciu, D. A. Ilutiu – Varvara, N. Cobirzan ve A. Balog (2013). Recycling of Paper Waste in the Composition of Plastering Mortars. *Procedia Technology* 12 ( 2014 ) 295 – 300
- Crawford, R. L. (1981). *Lignin biodegradation and transformation*. John Wiley and Sons..
- C. Varkey, J.P John, V N Neema, N. Joshy (2016). Study On Utilization Of Waste Paper Sludge By Partial Replacement Of Cement In Concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Vol. 3 Issue 5 May (2016)
- da Silva, A. C. R., Almeida, B. M., Lucas, M. M., Candido, V. S., da Cruz, K. S. P., Oliveira, M. S., ... & Monteiro, S. N. (2022). Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00829
- Deepa Raj, S., & Ramachandran, A. (2019). Performance of hybrid fibre reinforced geopolymer concrete beams. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1-8.
- E. Gemellia, N.H.A. Camargob, J. Brescansinc (2001). Evaluation of Paper Industry Wastes in Construction Material Applications. *Materials Research*, Vol. 4, No. 4, 297-304
- Eti Elektrometalürji A.Ş. İşletmesi yetkililerinden alınan bilgiler, Antalya, 1993, 2001

- Evans, E. J., Inglethorpe, S. J. D., & Wetton, P. D. (1999). *Evaluation of Pumice and Scoria samples from East Africa as lightweight aggregates*. British Geological Survey.
- Ferreira, S. R., Ukrainczyk, N., e Silva, K. D. D. C., Silva, L. E., & Koenders, E. (2021). Effect of microcrystalline cellulose on geopolymer and Portland cement pastes mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 288, 123053.
- Gao, X., Yu, Q.L., Yu, R., Brouwers, H.J.H. 2017. Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites. *Mater. Struct.* 50(165): 1-14.
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (2012). *Chemistry of the Elements*. Elsevier.
- Gibson, L. J. (2012). The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *Journal of the royal society interface*, 9(76), 2749-2766.
- Guo, X., & Pan, X. (2018). Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 633-641.
- H.S. Wong, R. Barakat, A. Alhilali, M. Saleh, C.R. Cheeseman (2015). Hydrophobic Concrete Using Waste Paper Sludge Ash. *Cement and Concrete Research* 70 (2015) 9–20
- Hu, S., Wang, H., Zhang, G., Ding, Q. 2008. Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. *Cem. Concr. Compos.* 30: 239–244.
- Huang, Y., Tan, J., Xuan, X., Liu, L., Xie, M., Liu, H., ... & Zheng, G. (2021). Study on untreated and alkali treated rice straw reinforced geopolymer composites. *Materials Chemistry and Physics*, 262, 124304.
- Karunanithi, S., Anandan, S. 2014. Flexural toughness properties of reinforced steel fibre incorporated alkali activated slag concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2014: 1-12.
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte chemie international edition*, 44(22), 3358-3393.
- Korniejenko, K., Frączek, E., Pytlak, E., & Adamski, M. (2016). Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers. *Procedia Engineering*, 151, 388-393.
- La Reau, A. J., & Suen, G. (2018). The Ruminococci: key symbionts of the gut ecosystem. *Journal of microbiology*, 56(3), 199-208.
- L.R. Singh, A. Saleem, B. Geeta (2015). Application of Paper Waste in Cement Concrete. *Int. Journal of Engineering Research and Applications* ISSN 2248-9622, Vol. 5, Issue 4, Part-7 April1 ( 2015), pp.95-98
- Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., Mischinenko, V., & Kruglikov, A. (2022). Fabrication and characterization of metakaolin-based geopolymer composites reinforced with cellulose nanofibrils. *Materials Letters*, 308, 131146.

- Mozgawa, W., Deja, J. 2009. Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. *J. Mol. Struct.* 924–926: 434–441.
- Ng, Y. S., Liew, Y. M., Heah, C. Y., & Abdullah, M. M. A. B. (2018, December). Effect of molarity of sodium hydroxide on fly ash geopolymer tiles. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2045, No. 1, p. 020101). AIP Publishing LLC.
- Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., & Aslani, F. (2018). Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 454-475.
- N. Stevulova, V. Hospodarova, J. Junak (2016). Potential Utilization of Recycled Waste Paper Fibres in Cement Composites. *Cheminè Technologija*. 2016. Nr. 1 (67)
- N. Stevulova, V. Hospodarova (2015). Cellulose Fibres Used in Building Materials. *Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 “Advanced HVAC and Natural Gas Technologies”* Riga, Latvia, 6 – 9, (2015)
- Özkan, Ş. G., & Tuncer, G. (2001). Pomza madenciliğine genel bir bakış. 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 18-19.
- Piotrowski, S., & Carus, M. (2011). Multi-criteria evaluation of lignocellulosic niche crops for use in biorefinery processes. *Nova-Institut GmbH, Hürth, Germany*, 5.
- Ranjbar, N., & Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498.
- Ranjithkumar, M. G., Chandrasekaran, P., & Rajeshkumar, G. (2022). Characterization of sustainable natural fiber reinforced geopolymer composites. *Polymer Composites*.
- Ribeiro, M. G. S., Ribeiro, M. G. S., Keane, P. F., Sardela, M. R., Kriven, W. M., & Ribeiro, R. A. S. (2021). Acid resistance of metakaolin-based, bamboo fiber geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 302, 124194.
- Rostami, M., Behfarnia, K. 2017. The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Constr. Build. Mater.* 134: 262–268.
- Roopchund, R., Andrew, J., & Sithole, B. (2022). Using cellulose nanocrystals to improve the mechanical properties of fly ash-based geopolymer construction materials. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 25, 100989.
- S. Ahmad, M.I. Malik, M.B Wani, R. Ahmad (2013). Study of Concrete Involving Use of Waste Paper Sludge Ash as Partial Replacement of Cement. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJENVol. 3, Issue 11 November (2013), V3. pp 06-15*
- Samal, S., & Blanco, I. (2021). An Application Review of Fiber-Reinforced Geopolymer Composite. *Fibers*, 9(4), 23.
- Siemens, P. R., & Giauque, W. F. (1969). Entropies of the hydrates of sodium hydroxide. II. Low-temperature heat capacities and heats of fusion of NaOH. 2H<sub>2</sub>O and NaOH. 3.5 H<sub>2</sub>O. *The Journal of Physical Chemistry*, 73(1), 149-157.
- Silva, G., Kim, S., Bertolotti, B., Nakamatsu, J., & Aguilar, R. (2020). Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes. *Construction and Building Materials*, 258, 119697.

- Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P., & Songpiriyakij, S. (2018). Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. *Construction and Building Materials*, 161, 37-44.
- Taveri, G., Bernardo, E., & Dlouhy, I. (2018). Mechanical performance of glass-based geopolymer matrix composites reinforced with cellulose fibers. *Materials*, 11(12), 2395.
- V. Hospodarova, N. Stevulova, V. Vaclavik, T. Dvorsky (2017). Influence of Cellulosic Fibres on the Physical Properties of Fibre Cement Composites. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 251 (2017) 012015
- V. Hospodarova, N. Stevulova, V. Vaclavik, T. Dvorsky (2018). Investigation of Waste Paper Cellulosic Fibers Utilization into Cement Based Building Materials.
- Walbrück, K., Maeting, F., Witzleben, S., & Stephan, D. (2020). Natural fiber-stabilized geopolymer foams—A review. *Materials*, 13(14), 3198.
- Weiner, M. L. (1999). *Excipient toxicity and safety*. CRC Press.
- Wyman, C. E. (1994). Ethanol from lignocellulosic biomass: technology, economics, and opportunities. *Bioresource Technology*, 50(1), 3-15.
- W. Zhongping, L. Haoxin, J. Zhengwu, C. Qi (2018). Effect of Waste Paper Fiber on Properties of Cementbased Mortar and Relative Mechanism. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. April (2018)
- Yeğınobalı A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı.
- Ye, H., Zhang, Y., Yu, Z., & Mu, J. (2018). Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 173, 10-16.
- Yan, S., & Sagoe-Crentsil, K. (2012). Properties of wastepaper sludge in geopolymer mortars for masonry applications. *Journal of environmental management*, 112, 27-32.

## ÖZGEÇMİŞ

### İBRAHİM YETİŞ

#### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

|               |                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| Yüksek Lisans | Akdeniz Üniversitesi                                                |
| 2018-2022     | Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya |
| Lisans        | Akdeniz Üniversitesi                                                |
| 2011-2016     | Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya          |

#### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

|                     |                                                            |
|---------------------|------------------------------------------------------------|
| Araştırma Görevlisi | Akdeniz Üniversitesi                                       |
| 2020- Devam Ediyor  | Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya |

#### ESERLER:

##### Projeler

"Kağıt atıkların harçlarda lif olarak kullanılabilirliğinin araştırılması", BAP Kapsamlı Araştırma Projesi, FBA-2019-4578, Araştırmacı, 2021.