

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ÖĞÜTÜLMÜŞ ASİDİK POMZA VE SİLİS DUMANI BAZLI GEOPOLİMER  
HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ**

**Afaf Rashid Ali FKINI**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2022**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ÖĞÜTÜLMÜŞ ASİDİK POMZA VE SİLİS DUMANI BAZLI GEOPOLİMER  
HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ**

**Afaf Rashid Ali FKINI**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS RA TEZİ**

**HAZİRAN 2022**

**ANTALYA**

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

**ÖĞÜTÜLMÜŞ ASİDİK POMZA VE SİLİS DUMANI BAZLI GEOPOLİMER**  
**HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ**

**Afaf Rashid Ali FKINI**  
**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

# ÖĞÜTÜLMÜŞ ASİDİK POMZA VE SİLİS DUMANI BAZLI GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ

**Afaf Rashid Ali FKINI**

**Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**Haziran 2022; 71 sayfa**

Çimentonun yüksek maliyeti ve çevreye verdiği zarar, ekonomik ve çevre dostu alternatif bağlayıcı malzemelerin üretilmesini gerektirmektedir. Portland çimentosunun üretimi önemli miktarda enerji gerektirir ve çevreye zarar veren yüksek CO<sub>2</sub> emisyonlarına neden olmaktadır. Bazı endüstriler, çevre üzerinde önemli bir olumsuz etkiye sahip olduğu için doğrudan doğaya salınamayan silis dumanı gibi atıklar üretmektedir. Atık malzemelerin ve yan ürünlerin inşaat sektörüne dahil edilmesi, doğal kaynakların tüketiminin önlenmesine katkı sağlamakta ve çevreye verilen zararı en aza indirmektedir.

Bu tez çalışması, polipropilen elyaf ile takviye edilmiş harçların özelliklerine bağlayıcı olarak silis dumanının öğütülmüş asidik pomza ile değiştirilmesinin etkisini kapsamaktadır. Harç numuneleri, asidik pomza ağırlığına göre %25 ve %50 silis dumanı ikame oranlarını kullanmıştır. Alkali aktivatör sodyum hidroksit olarak kullanılmıştır. Üretilen harçlara hacimce %0, 0.5 ve %1 oranında polipropilen elyaf ilave edilmiştir. Laboratuvar koşullarında ve yüksek sıcaklıkta fırında 60 °C'de 6 saat kürlenmiş iki kürlenme rejimi uygulanmıştır. Yayılma çapı testi yapılmıştır. Görünür boşluk oranı, kütle yoğunluğu ve su emme gibi fiziksel özellikler araştırılmıştır. Elyaf içeriğindeki artışla birlikte su emme yüzde değerlerinde ve görünen boşluk oranında bir artış olduğunu gözlemlenmiştir. Harçlarda asidik pomza içeriğinin artmasıyla ısıl kürenin numuneler üzerindeki etkisinin de arttığı fark edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı 7 ve 28 günlük kürlenmeden sonra belirlenmiştir. Polipropilen elyafın artması ile dayanımı arttığını gözlemlenmiştir. %75 oranında öğütülmüş asidik pomza serisini içeren karışım, yüksek sıcaklıklarda kürlenirken en düşük basınç ve eğilme dayanımlarını göstermiştir. Ayrıca kılcal su geçirimsizlik katsayısı kullanılarak geopolimerin dayanıklılığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar elyafli harçlarda katsayının elyafsız harçlara göre daha düşük olduğunu gözlemlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Asidik pomza, fiziksel özellikler, geopolimer harç, mekanik özellikler, polipropilen elyaf, silis dumanı.

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

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

## ABSTRACT

### PROPERTIES OF GROUND ACIDIC PUMICE AND SILICA FUME BASED GEOPOLYMER MORTARS

**Afaf Rashid Ali FKINI**

**MSc Thesis in in Civil Engineering**

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

**June 2022; 71 pages**

The high cost of cement and the damage it causes to the environment demands the production of economical and environmentally friendly alternative binding materials. The manufacturing of Portland cement requires a significant amount of energy, and it causes high CO<sub>2</sub> emissions that cause environmental damage. Additionally, some industries produce wastes like silica fume that cannot be directly released to nature because it has a significant negative effect on the environment. The inclusion of waste materials and by-products in the construction industry contributes to preventing the consumption of natural resources and minimizes environmental damage.

This thesis covers the effect of replacing silica fume with ground acidic pumice as a binder on the properties of mortars reinforced with polypropylene fiber. Mortar samples used silica fume substitution rates of 25% and 50% by weight of acidic pumice. Used as alkali activator sodium hydroxide. Polypropylene fiber was added to the produced mortars at the rate of 0, 0.5 and 1% by volume. Two curing regimens were applied, curing for 6 hours at 60 °C under laboratory conditions and in a high temperature oven. Spreading diameter test was carried out. Physical properties such as apparent void ratio, bulk density and water absorption were investigated. It was observed that there was an increase in water absorption percentage values and apparent void ratio with the increase in fiber content. It was noticed that the effect of thermal curing on the samples increased with the increase in the acidic pumice content of the mortars. Bending and compressive strength were determined after 7 and 28 days of curing. It shows that the strength increases with the increase of polypropylene fiber. The mixture containing 75% ground acidic pumice series showed the lowest compressive and flexural strengths while curing at high temperatures. In addition, the durability of the geopolymer was determined by using the capillary water permeability coefficient. Obtained results show that the coefficient of fibrous mortars is lower than non-fiber mortars.

**KEYWORDS:** acidic pumice, geopolymer mortars, mechanical properties, polypropylene fiber, physical properties, silica fume.

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

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

## ÖNSÖZ

Her şeyden önce danışmanım Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a yüksek lisans eğitimim boyunca verdiği değerli tavsiyeleri, sürekli desteği ve sabrı için çok teşekkür ederim. Onun engin bilgisi ve bol tecrübesi, akademik araştırma ve çalışmalarımda beni her zaman teşvik etti.

Ayrıca arkadaşlarıma ve sınıf arkadaşlarıma, özellikle oda arkadaşlarıma, düzenleme yardımları, gece geç saatlerde yapılan geri bildirim oturumları ve manevi destekleri için minnettarım.

Son olarak, ailemden, özellikle de anne babamdan ve kız kardeşlerimden bahsetmemekte kusur etmiş olurum. Bana olan inançları bu süreçte moralimi ve motivasyonumu yüksek tuttu.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. Geopolimer.....	3
2.2. Silis Dumanı.....	8
2.2.1. Geopolimerlerde silis dumanı kullanımı.....	9
2.3. Doğal puzolan.....	10
2.3.1. Asidik pomza.....	10
2.3.2. Geopolimerlerde asidik pomza kullanımı.....	11
2.4. Alkali Aktivatör.....	12
2.4.1. Geopolimer betonda sodyum hidroksit bazlı alkali aktivatör.....	13
2.5. Polipropilen Elyaf.....	15
3. MATERYAL VE METOT.....	18
3.1. Materyal.....	18
3.1.1. İnce Agrega.....	18
3.1.2. Bağlayıcı.....	20
3.1.3. Alkali Aktivatör.....	21
3.1.4. Polipropilen Elyaf.....	21
3.1.5. Su.....	22
3.1.6. Kimyasal katkı.....	22
3.2. Metot.....	22
3.2.1. Geopolimer Harçların Hazırlanması ve Karışım Oranları.....	22
3.2.2. Taze harçlar üzerinde uygulanan deneyler.....	26
3.2.2.1. Taze harç kıvamının belirlenmesi.....	26
3.2.2.2. Taze harçlarda birim hacim kütlesi tayini.....	27

3.2.3. Sertleşmiş harçların fiziksel özelliğinin belirlenmesi.....	27
3.2.3.1. Su emme, yığın yoğunluk ve görünür gözeneklilik.....	27
3.2.4. Sertleşmiş harçların durabilite özelliğinin belirlenmesi .....	28
3.2.4.1. Kılcal su emme katsayısı deneyi .....	28
3.2.5. Sertleşmiş harçların mekanik deneyleri.....	29
3.2.5.1. Eğilme dayanımı testi .....	29
3.2.5.2. Basınç dayanımı testi.....	30
3.2.5.3. Gerime şekil değiştirme .....	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	32
4.1. Taze Geopolimer Harç Testlerinin Bulguları.....	32
4.2. Sertleştirilmiş Harçların Fiziksel Özellikleri Bulguları.....	35
4.2.1. Kuru yığın yoğunluk değerleri.....	35
4.2.2. Suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerleri.....	37
4.2.3. Su emme yüzdesi değerleri .....	40
4.2.4. Görünür boşluk oranı değerleri.....	42
4.3. Sertleştirilmiş Harçların Mekanik Özelliklerine İlişkin Bulgular .....	45
4.3.1. Eğilme dayanımı testi değerleri .....	45
4.3.2. Basınç dayanımı testi değerleri.....	48
4.3.3. Gerilme şekil değiştirme.....	52
4.4. Sertleştirilmiş Harçların Durabilite Özelliklerine İlişkin Bulgular .....	58
4.4.1. Kılcal su geçirimsizlik deneyi.....	58
5. SONUÇLAR .....	61
6. KAYNAKLAR .....	63
ÖZGEÇMİŞ	



## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Öğütülmüş asidik pomza ve silis dumanı bazlı geopolimer harçların özellikleri” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

26/06/2022

Afaf Rashid Ali FKINI



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A	: Fırında kuru ağırlık (g)
B	: Kuru yüzey kütlesi
D	: Doymuş yüzey kuru ağırlık (g)
C	: Suya batırılmış numunenin ağırlığı (g)
E	: Elastisite modülü
K	: Kılcal su emme katsayısı (cm/sn <sup>1/2</sup> )
MPa	: Megapaskal
m	: Metre
sn	: Saniye
t	: Zaman (sn)
°C	: Santigrat derece
cm	: Santimetre
$\epsilon_1$	: $5 \times 10^{-05}$ değerindeki birim şekil değiştirme miktarı
$\epsilon_2$	: $\sigma_2$ değerindeki birim şekil değiştirme miktarı
$\rho_m$	: Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	: Basınç dayanımı (MPa)
$\sigma$	: Eğilmede çekme dayanımı (Mpa)
$\sigma_1$	: $5 \times 10^{-05}$ değerindeki birim şekil değiştirmesine denk gelen gerilme (MPa)
$\sigma_2$	: $(\sigma_{max}) \times 0.4$ değerine eşit olan gerilme miktarı (MPa)

Tez metni içerisinde ondalık sayıların gösterimi “nokta” kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials
EN	: Avrupa Birliği

SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
C-S-H	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
NaOH	: Sodyum hidroksit
PP	: Polipropilen
SD	: Silis Dumanı
TS EN	: Türkiye Standartları Enstitüsü
XRD	: X ışını difraktometresi
XRF	: X ışını floresans analizi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Geopolimer üretimi.....	3
Şekil 3.1. Kullanılan İnce Agregat.....	18
Şekil 3.2. (a) Le Chatelier Balonu; (b) Balon Joje.....	19
Şekil 3.3. Agreganın tane boyutu dağılımı .....	19
Şekil 3.4. Kullanılan asidik pomza (sol) ve silica füme (sağa) .....	20
Şekil 3.5. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı (Gülmez, 2018).....	21
Şekil 3.6. Kullanılan polipropilen elyaf.....	22
Şekil 3.7. Geopolimer harçların dökümünde kullanılan kalıplar.....	24
Şekil 3.8. Harç ve dökümün hazırlanması .....	24
Şekil 3.9. Taze harç kıvam tayini .....	26
Şekil 3.10. Taze harçlarda birim hacim kütle tayini .....	27
Şekil 3.11. Numunelerin suya konulması .....	28
Şekil 3.12. Kılcal su geçirimsizlik deneyi.....	29
Şekil 3.13. Eğilme dayanımı testi .....	29
Şekil 3.14. Basınç dayanımı testi.....	30
Şekil 4.1. Yayılma çapı değerleri.....	34
Şekil 4.2. Birim hacim kütlesi değerleri .....	35
Şekil 4.3. 28 günlük harçların kuru yığın yoğunluk değerleri .....	37
Şekil 4.4. 28 günlük harçların suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerleri .....	39
Şekil 4.5. Laboratuvarında kürlenme sertleşmiş harçların kuru yığın yoğunluk, suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerleri .....	39
Şekil 4.6. Etüvde kürlenme sertleşmiş harçların kuru yığın yoğunluk, suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerleri.....	40
Şekil 4.7. 28 günlük harçların su emme yüzdesi değerleri .....	42
Şekil 4.8. 28 günlük harçların görünür boşluk oranı değerleri .....	45
Şekil 4.9. harçların eğilme dayanımı değerleri .....	48

<b>Şekil 4.10.</b> Karışımların basınç dayanımı değerleri (Mpa).....	52
<b>Şekil 4.11.</b> AP50SD50 serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	53
<b>Şekil 4.12.</b> AP50SD50 serisinin eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	54
<b>Şekil 4.13.</b> AP75SD25 serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	54
<b>Şekil 4.14.</b> AP75SD25 serisinin eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	55
<b>Şekil 4.15.</b> AP50SD50 serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	56
<b>Şekil 4.16.</b> AP50SD50 serisinin basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	56
<b>Şekil 4.17.</b> AP75SD25 serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	57
<b>Şekil 4.18.</b> AP75SD25 serisinin basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	57
<b>Şekil 4.19.</b> Karışımların 1 saat kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn <sup>1/2</sup> ).....	60
<b>Şekil 4.20.</b> Karışımların 24 saat kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn <sup>1/2</sup> ).....	60

## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3.1. Bağlayıcıların kimyasal bileşimi XRF analizi sonucu (%).....	20
Çizelge 3.2. Süper akışkanlaştırıcının özellikleri .....	22
Çizelge 3.3. Geopolimer harçların karışım oranları hacimce .....	25
Çizelge 4.1. Karışımların taze haldeki yayılma çapı, birim hacim kütlesi ve hava miktarı değerleri .....	32
Çizelge 4.2. 28 günlük harçların kuru yığın yoğunluk değerleri .....	36
Çizelge 4.3. 28 günlük harçların suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri .....	38
Çizelge 4.4. 28 günlük harçların su emme yüzdesi değerleri .....	41
Çizelge 4.5. 28 günlük harçların görünür boşluk oranı değerleri .....	44
Çizelge 4.6. Karışımların eğilme dayanımı değerleri (MPa).....	45
Çizelge 4.7. Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa).....	50
Çizelge 4.8. Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn <sup>1/2</sup> ).....	59

## 1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün tüm dünyada hızla gelişmesi nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde yapı malzemelerine olan talep güçlü bir şekilde büyümüştür. Çimento endüstrisinin, küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %5'ini oluşturan CO<sub>2</sub>'ye en büyük katkı sağlayanlardan biri olduğu tahmin edilmektedir (Benhelal, vd. 2021). Sonuç olarak, daha düşük kirletici gaz emisyonları ve önemli miktarda enerji tasarrufu içeren süreçlerle elde edilen Portland çimentosuna alternatiflerin geliştirilmesi, günümüzde öncelikli bir araştırma alanını oluşturmaktadır.

Elektrik üretim sanayii, demir sanayii, çelik sanayii, maden sanayii gibi çeşitli sektörlerden büyük miktarlarda endüstriyel atıklar salınmaktadır. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin vb. bu atıkların kullanımlarından sonra imha etmekte çeşitli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu atık yönetimi sorunlarının üstesinden gelmek için en iyi çözüm, bu atık ürünlerini başka uygulamalar için kullanmaktır. Silis dumanı (SD), elektrik ark fırınlarında elementel silikon veya silikon içeren alaşımların üretiminin bir yan ürünüdür (Panesar, 2019). Silis dumanı rengi ya birinci sınıf beyaz ya da gridir. Silis Dumanı, 13.000 ila 30.000 m<sup>2</sup>/kg arasında bir yüzey alanına sahip çok ince camsı parçacıklardan oluşmaktadır. Parçacıkları, ortalama çimento parçacığından yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Aşırı inceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle silis dumanı oldukça etkili bir puzolanik malzemedir. Silis dumanı, özelliklerini geliştirmek için betonda kullanılmaktadır. Silis dumanının basınç dayanımını, bağ gücünü ve aşınma direncini iyileştirdiği bulunmuştur; geçirgenliği azaltmakta ve bu nedenle donatı çeliğinin korozyondan korunmasına yardımcı olmaktadır (Khan ve Siddique, 2011).

Geopolimer beton, alkali çözeltiler ve alüminosilikatlar (düşük veya yüksek kalsiyum içerikli) arasındaki kimyasal etkileşimden kaynaklanmaktadır. İkincisi, doğal malzemelerden (pomza) veya endüstriyel yan ürünlerden (silis dumanı veya uçucu kül) elde edilebilmektedir. Son yıllarda, geopolimer betonun endüstride yaygın olarak benimsenmesi, silis dumanı gibi atık malzemelerin geri dönüştürülmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması yoluyla hem endüstriyel hem de inşaat sektörlerinde çevresel sürdürülebilirliğe olumlu katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Geopolimer, erken basınç dayanımı, düşük geçirgenliği, iyi kimyasal direnci ve yangına dayanıklılık davranışı nedeniyle araştırmaların büyük ilgisini çekmiştir. Bu avantajlı özellikler nedeniyle, son yirmi yılda geopolimerler üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmüş ve bu, alkali ile aktifleştirilmiş çimentonun sıradan Portland çimentosunun yerini alma potansiyelini ortaya koymuştur. (Mohajerani vd. 2019).

Geopolimerizasyon, zeolitik benzeri ham maddelerin alümino-silikat jellere dönüştürülmesi ve daha sonra sertleşmesiyle sağlanmaktadır. Polimerik Si–O–Al bağlarından elde edilen geopolimerler, alkali bir çözeltide alümino-silikat oksitler arasındaki kimyasal reaksiyondan elde edilmektedir. Bu reaksiyon, oksijen ile dört kat koordinasyon içinde Si<sup>4+</sup> ve Al<sup>3+</sup> ile siliko-alüminatlar oluşturmaktadır. Bu nedenle,

geopolimerlerin üretimi, esasen, alüminosilikat oksitler sağlayan ham maddeler ve alüminosilikat malzemeler için bir çözücü madde olarak işlev gören bir alkalın silikat veya hidroksit sıvısı gerektirmektedir. (Mohajerani vd. 2019: 494,495).

Bu tez çalışmasında, üretimde kullanılan hacimce farklı oranlarda bağlayıcı malzeme olarak silis dumanı ve asidik pomza kullanılmıştır. Silis dumanı çeşitli oranlarda asidik pomza ile karıştırılmaktadır. Hazırlanan harçların taze ve sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır. Yayılma çapı ve taze harçlar üzerinde birim hacim ağırlığı, yığın yoğunluğu, görünen boşluk oranı, su emme, kılcallık, basınç dayanımı ve eğilme çekme dayanımı tayini sertleştirilmiş harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında, geopolimer bileşenlerinin özelliklerinin harçların özelliklerine ne ölçüde katkı sağladığı tespit edilmiş ve nedenleri mikroyapı çalışmalarının da katkısıyla tespit edilerek incelenmiştir.



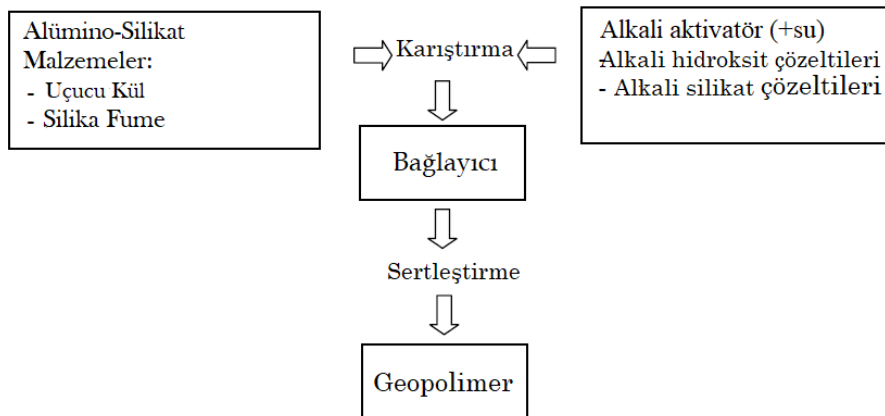
## 2. KAYNAK TARAMASI

Geleneksel yapı malzemelerinin ikamelerinin araştırılmasına yol açan enerji tasarrufu ve çevre korumaya artan ilgi olmuştur. Bu araştırmaların birkaç amacı vardır ve bunlardan biri sera gazı emisyonlarını azaltmak ve malzeme üretimi için gereken enerjiyi en aza indirmektedir. Halihazırda Portland çimentosu, dünya çapında endüstriyel beton talebi için önde gelen malzemedir ve yıllık 1.5 milyar tonun üzerinde bir talebi karşılamaktadır. Portland çimentosunun üretim enerjisi yoğundur ve atmosfere önemli miktarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salmaktadır (Sumajouw vd. 2004). Üretilen her bir ton Portland çimentosu için çevreye bir ton CO<sub>2</sub> salındığını tahmin edilmektedir. Süreç, çok yüksek sıcaklıkları (1400– 1500 °C), hammadde çıkarmak için taş ocaklarının tahrip edilmesini ve CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gibi sera gazlarının emisyonunu içermektedir. Bu enerji gereksinimleriyle ilişkili maliyetler önemlidir. Sonuç olarak, çevresel etkileri azaltılmış ve ekonomik faydaları artırılmış çimento esaslı ürünler hakkında daha fazla araştırma yapılmasının ihtiyacı ortaya çıkmıştır (Petermann vd. 2010: 1).

Geopolimerler bir yapı malzemesi olarak ilgi görmektedir. Artan çevresel kaygılar ve azalan doğal kaynaklar nedeniyle geopolimerler Portland çimentosu için değerli bir alternatif olarak tanımlanmaktadır. Geopolimerler, Portland çimentosu ile benzer çimentolama özelliklerin sahip olabilir, ancak diğer endüstrilerin yan ürünlerinden (örneğin silis dumanı) veya daha az enerji tüketen ve CO<sub>2</sub> yayan malzemelerinden (örneğin, kalsine kil, alkali aktivatörler) üretilebilmektedir (De Weerd, 2011).

### 2.1. Geopolimer

Geopolimer üretimi, zengin alümino-silikat malzemeleri ve alkali çözeltiler gerektirmekte, şekil 2.1 geopolimer üretimini göstermektedir. Silisyum (Si) ve alüminyum (Al) içeriği zengin malzeme, kaolinit, kil ve pomza gibi doğal kaynaklardan veya uçucu kül, silis dumanı, cüruf gibi yan ürünlerden gelebilmektedir. Alkali sıvılar, sodyum veya potasyum bazlı çözünür alkali metallere elde edilebilmektedir (Pham vd. 2020).



Şekil 2.1. Geopolimer üretimi

Geopolimer üretimi için yüksek silikon ve alüminyum içeriğine sahip çeşitli malzemeler kullanılabilir. Muhtemel hammaddeler arasında doğal mineraller, kalsine killer, endüstriyel atıklar uçucu kül, cüruf, kırmızı çamur veya atık cam gibi yan ürünler veya bu malzemelerin karışımı yer almaktadır. Hammaddelerin seçimi ve hazırlanması, nihai geopolimer ürünlerinin özelliklerini belirlemektedir. Bu özellikler arasında iyi mekanik özellikler, yüksek basınç dayanımı, düşük büzülme, düşük termal iletkenlik ve asit direnci sayılabilir (Mucsi ve Ambrus, 2017).

Başlangıçta, geopolimerlerin karmaşık bir malzeme sınıfı olduğunu söylemek gerekmektedir. Geopolimerleri sentezlemenin başlıca yolu, bir alkali çözeltiyi, reaktif bir alüminosilikat tozu, özellikle metakaolin (kalsine kaolinit kili) veya uçucu kül (kömür yanmasının bir yan ürünü) ile birleştirmektedir. Bu, jel bağlayıcı faz olarak bilinen düzensiz bir alkali alüminosilikat jel fazının oluşmasına neden olmaktadır. Jel bağlayıcı faz içinde, reaksiyona girmemiş katı öncü partiküller vardır ve jelin gözenek yapıları, öncülerin karıştırılmasında kullanılan suyu içermektedir (genellikle alkaline 'aktif edici çözelti' yoluyla sağlanmaktadır). Kalsiyum silikat hidrat jelinden farklı olarak su, bir geopolimer bağlayıcının kimyasal yapısının ayrılmaz bir parçasını oluşturmaz; pratik bir bakış açısından, bu hem avantajları hem de dezavantajları sunmaktadır. Jelin temel çerçevesi, her bir alüminat tetrahedrondaki bir veya daha fazla köprü oksijeninde lokalize olan ve alkali ile dengelenen dört kat koordinasyondaki  $Al^{3+}$  nedeniyle negatif yük ile yüksek oranda bağlantılı üç boyutlu bir alüminat ve silikat tetrahedra ağıdır. Aktive edici çözelti tarafından sağlanan metal katyonlardır (Provis ve van Deventer, 2009).

Literatürde farklı bağlayıcı malzeme kombinasyonlarını, kürlenme sürelerini ve farklı alkali aktivatör konsantrasyonları ile sıcaklıkları test eden birkaç çalışma bulunmaktadır. Li vd. (2014) yaptığı çalışmada geopolimer kompozitlerde bağlayıcı olarak uçucu kül ve pisha kumtaşı kullanılmıştır. Çalışmanın değişkenleri alkali dozajı, katkı içeriği, kür koşulları ve kür yaşıdır. SEM, TG-DTG ve XRD gözlemleri, sırasıyla mikro yapıyı analiz edilmiş ve alkali aktivasyon ürünlerinin kristal fazlarını belirlemek için kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin mekanik performansını değerlendirmek için basınç dayanımı test edilmiştir. Pisha kumtaşı geopolimer kompozitlerinin mekanik özelliklerinin kürlenme yaşı, alkali dozajı ve katkı içeriğinden önemli ölçüde etkileneceği gösterilmiştir. Kompozitlerin en yüksek basınç dayanımı 20.3 MPa'dır. Pisha kumtaşı geopolimer kompozitlerinin ana alkali aktivasyon ürünü, amorf bir C-S-H jelidir.

Geopolimer esaslı uçucu kül harçlarının ( $NaOH$ ,  $Na_2CO_3$  ve su camı çözeltileri ile aktive edilmiş) mineralojik ve mikroyapısal özellikleri ile mekanik özellikleri arasındaki ilişki kurulmuştur (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005). Araştırmanın sonuçları, her durumda (aktivatör ne olursa olsun) oluşan ana reaksiyon ürününün düşük sıralı kristal yapıya sahip bir alkaline alüminosilikat jel olduğunu göstermektedir. Bu ürün, aktifleştirilmiş uçucu külün mükemmel mekanik-çimentolu özelliklerinden sorumludur. Ancak sistemde kullanılan aktivatör tipine bağlı olarak alüminosilikat jelin mikro yapısı ve  $Si/Al$  ve  $Na/Al$  oranları değişmektedir. İkincil reaksiyon ürünü olarak bazı zeolitler

oluşmaktadır. Bu zeolitlerin doğası ve bileşimi ayrıca kullanılan aktivatörün tipine de bağlıdır.

Görhan ve Kürklü (2014) tarafından yapılan çalışmada, Kütahya Seyitömer termik santralinden F sınıfı uçucu kül kullanılarak geopolimer harç üretilmiştir. Geopolimer harcın özellikleri, farklı NaOH konsantrasyonlarında, farklı sıcaklıklarda ve farklı kür sürelerinde kür uygulanarak incelenmiştir. Üç farklı molariteden oluşan NaOH konsantrasyonlarından (3 M, 6 M ve 9 M) oluşan alkali çözelti, sodyum silikat (su camı) çözeltisi ile kullanılmıştır. Numuneler iki farklı sıcaklıkta (65 ve 85 °C) kürlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada kür sıcaklığının ve kür süresinin geopolimer harçların fiziksel özellikleri üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Kür sürelerindeki artışın geopolimer harçların gözeneklilik değerlerinde azalmaya neden olduğu, geopolimer harçların hazırlanmasında kullanılan NaOH çözeltilerinin konsantrasyonlarının ise hem gözeneklilik değerlerini hem de kürleme sürecini etkilediği görülmüştür. Dayanım değerleri dikkate alındığında, 6 M NaOH ile aktive edilen yedi günlük geopolimer harçların numunelerinin 85 °C'de kürlendiğinde optimum koşula ve en yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Kür sıcaklığındaki bir artışın basınç dayanımını arttırdığı ancak fiziksel özellikler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Ismail vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve bunların karışımlarına dayalı alkali ile aktive olan bağlayıcıların, sızdırmaz kürlenmenin ilk altı ayı boyunca mikroyapısal gelişimi değerlendirilmiştir. Bu harmanlardaki ana bağlayıcı jellerin doğası, bağlayıcı bileşimine göre farklı özellikler göstermiştir. Aktif cüruf bağlayıcılarda kalsiyum değil, ilave bir alümina ve silika kaynağı olarak uçucu külün dahil edilmesinin, ana bağlayıcı jellerin oluşum mekanizmasını ve hızını etkilediği açıktır. Ana bağlayıcı jel fazlarının oluşum hızı, büyük ölçüde uçucu kül içeriğine bağlıdır. Yalnızca silikatla aktive olan cürufa dayanan hamurlar, C–A–S–H tipi jelin hâkim olduğu bir yapı gösterirken, silikatla aktive olan uçucu kül, N–A–S–H 'geopolimer' jel tarafından baskındır. Harmanlanmış cüruf-uçucu kül bağlayıcılar, bağlayıcı ağırlıkça %75'ten fazla uçucu kül içermediğinde daha erken yaşlarda açıkça ayırt edilebilen, birlikte var olan C–A–S–H ve geopolimer jellerin oluşumunu gösterebilmektedir. Jelin farklı bölgeleri arasındaki kimyadaki ayırım, daha uzun yaşta daha az belirgin hale gelmektedir. Daha yavaş bir toplam reaksiyon hızıyla, 1:1 cüruf:uçucu kül sistemi, cüruf bazlı bir bağlayıcı ile uçucu kül bazlı bir bağlayıcıdan daha fazla mikroyapısal özellik paylaşmakta, bu da kalsiyumun jel kimyası üzerindeki güçlü etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, benzer veya daha düşük cüruf içeriğine sahip sistemlerde, cüruf çözünmesiyle salınan Ca'nın bir parçası N-A-S'ye dahil edildiğinden, N-(C)–A–S–H olarak tanımlanan hibrit tip bir jel de tanımlanmaktadır. – Uçucu kül aktivasyonundan kaynaklanan H tipi jel. Uçucu kül bazlı bağlayıcılar, aktifleştirilmiş cüruf hamurlarına kıyasla daha yavaş bir reaksiyon sergiler, ancak daha uzun kürlenme süreleri, daha fazla çapraz bağlı bağlayıcı ürünlerin ve daha yoğun bir mikro yapının oluşumunu destekler. Bu mekanizma, daha düşük cüruf içeriğine sahip numuneler için daha yavaştır ve iyi

yoğunlaştırılmış, dayanıklı katı bir mikro yapının desteklenmesinde doğru bağlayıcı oranlarının seçilmesini vurgulamaktadır.

Ryu vd. (2013) yaptığı çalışmada, bağlayıcı olarak %100 uçucu kül kullanılarak üretilen harcın basınç dayanımı üzerine alkali aktivatörlerin kimyasal değişimlerinin etkilerini incelemeyi ve harcın mikro yapısını SEM, EDS, XRD, FT-IR ve gözeneklilik değerlendirmeleri yoluyla analiz etmeyi amaçlamaktadır. Sonuçlar, alkali aktivatörlerin kimyasal değişimlerinin, daha yüksek molarite ile erken dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca yapının SEM ve EDS ile analizi, harcın yapısı üzerinde önemli etkiye sahip bileşenlerin Al ve Si bileşenleri olduğunu göstermiştir. XRD sonuçları, alkali aktivatörlerin kimyasal bileşenlerindeki farklılıklara göre yoğunlukta pratik farklılıklar olmadığını ortaya koymuştur. Öte yandan, FT-IR analizi, Si-O-Si ve Si-O-Al'nin kimyasal kombinasyonundaki uçucu kül ve sertleştirilmiş harca kıyasla değişiklikleri belirlemeyi mümkün kılmıştır.

Süperakışkanlaştırıcılar ve alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf hamurlarının taze ve sertleştirilmiş özelliklerini araştırmak için yürütülen deneysel bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır (Jang vd. 2014). Bağlayıcılar, cüruf ve uçucu külün 5 cüruf/bağlayıcı oranı, 0, 0.3, 0.5, 0.7 ve 1 ile kuru karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. NaOH çözeltisi ve sodyum silikat çözeltisinden bir alkali aktivatör hazırlanmıştır. Karışımlara bağlayıcı kütlelerine göre %0, %1, %2, %3 ve %4 seviyelerinde polikarboksilat esaslı ve naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcılar ilave edilmiştir. Tüm numuneler oda sıcaklığında kür koşulları altında hazırlanmıştır. Sonuçlar, yüksek cüruf içeriğinin alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf hamurlarının basınç dayanımını arttırdığını, ancak cüruf/bağlayıcı oranlarının %70 ve %100 olduğu durumlarda otojen büzülme nedeniyle hızlı priz ve çatlamaya neden olduğunu göstermiştir. Polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı, alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf hamurları üzerinde hidrasyon ısı üzerinde ihmal edilebilmekte bir etki ile geciktirici etki göstermiş ve işlenebilirliği naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcıdan daha önemli ölçüde geliştirilmiştir. SEM/EDS testlerinin sonuçlarından, daha yüksek bir cüruf içeriğinin daha yoğun bir hidrasyon ürünleri matrisi oluşumuna yol açtığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, hidrasyon ürünlerinin oluşumu, süperakışkanlaştırıcıların eklenmesinden belirgin şekilde etkilenmemiştir.

Lee ve Lee (2013) yaptığı çalışmada, oda sıcaklığında üretilen alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf betonunun prizini ve mekanik özelliklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf karışımındaki cürufün, oda sıcaklığında kütleme koşulları altında karışımın mekanik özelliklerini ne ölçüde geliştirdiğini de incelenmiştir. Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf betonunun basınç dayanımı, elastik modülü, yarmada çekme dayanımı, akış, priz süresi ve gözenekliliği ile ilgili bir dizi test gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, cüruf miktarı ve NaOH çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça priz süresinin azaldığını göstermiştir. Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf karışımındaki uygun cüruf içeriği, oda sıcaklığında kürlenerek alkali ile

aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf betonunun priz süresi ve basınç dayanımı dikkate alınarak toplam bağlayıcının ağırlıkça %15-20'si olarak belirlenmiştir. Ek olarak, alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf betonunun elastisite modülü ve yarma çekme dayanımı, ACI kodu ve Eurocode 2 tarafından tahmin edildiği gibi normal betonunkinden biraz daha düşüktür. Cüruf harcı, sıradan çimento harcına benzerken, ortalama gözenek boyutu, sıradan çimento harcından daha küçük olma eğilimindedir.

Rashad vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, alkali aktif cüruf (AAC) harcında granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) kısmi veya tam doğal silis kumu ikamesi olarak kullanılma olasılığı araştırılmıştır. Bağlayıcının ince agregaya oranı 1:2'dir. Doğal kum, ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 seviyelerinde GYFC ile değiştirilmiştir. 7 ve 28 günlük yaşlardaki basınç dayanımları ölçülmüştür. İncelenen harç karışımlarının 200, 400, 600 ve 800 °C'ye 2 saat maruz kaldıktan sonraki davranışı, artık basınç dayanımı ölçülerek nicel olarak ve görsel inceleme ile niteliksel olarak değerlendirilmiştir. Oluşan çeşitli bozunma aşamaları ve oluşan hidratların morfolojisi, X-ışını kırınımı (XRD), termogravimetrik analiz (TGA), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar, harç numunelerinin ateşleme öncesi ve sonrası basınç dayanımının artan GYFC kum içeriği ile arttığını göstermiştir.

Aktivatör dozunun taze ve sertleştirilmiş hallerde alkali ile aktifleştirilmiş cüruf/metakaolin karışımlarının özellikleri, ısı üretimi, dayanımı ve hızlandırılmış karbonatlaşma özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir ( Bernal, 2015). Yüksek aktivatör konsantrasyonları, cürufun çözünme hızını etkiler ve bu tek öncül olduğunda basınç dayanımını azaltmaktadır. Arttırılmış bir aktivatör konsantrasyonu, metakaolin reaksiyonunu destekleyerek yüksek dayanımları ve azaltılmış geçirgenliği desteklerdir. Metakaolin ilavesi ve arttırılmış aktivatör konsantrasyonları, uzun süreli CO<sub>2</sub> maruziyeti altında gözenek ağının iyileştirilmesi ile bağlantılı olarak karbonatlaşmaya duyarlılığı azaltmaktadır. Alkali ile aktifleştirilmiş bir cüruf sistemine bir alüminosilikat öncüsü eklemenin etkisi, büyük ölçüde aktivatör konsantrasyonuna bağlıdır.

Geopolimerler, daha yaygın olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali çözeltileri yerine KOH ve K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır (Tippayasam vd. 2016). KOH konsantrasyonunun, kütleme sıcaklığının ve ısıl işlemin metakaolin bazlı geopolimerlerin özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. KOH konsantrasyonları 6, 8, 10, 20, 30 ve 40 M'de değiştirilmiş, kullanılan K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranları 1 ve 1.5 olup, 24 saat boyunca 40 °C ve 60 °C kür sıcaklıkları uygulanmıştır. Sonuçlar, 10 M KOH'li, 40°C'de 24 saat kürlenmiş ve 550°C'de ısıl işleme tabi tutulan geopolimerin 28 günde en yüksek basınç dayanımını verdiğini göstermiştir. Isıl işlem, uygulanan ısı ile suyun geopolimer yapısından uzaklaştırılması nedeniyle geopolimerin gözenekliliğinin artmasına neden olmuş, dolayısıyla yoğunluğu azalırken, geopolimer numunelerin su emme ve gözenekliliği artmıştır. Isıl işlem görmüş numunelerin mikro yapısı, ısıl işlem görmemiş olanlara göre

daha olgun bir geopolimer matrisi göstermiş ve bu, eski geopolimerlerde daha yüksek basınç dayanımına ve seramik benzeri özelliklere sahip olmasına yol açmıştır.

Blash ve Vara Lakshmi (2016) tarafından yapılan çalışmada, Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ile Silis dumanı (SD) ikame edilerek üretilen Geopolimer betonun basınç dayanımını %0, 20, 40, 60, 80, ve %100 olup, çalışmaları değişen molaritede yapılmıştır. Bu çalışmada geopolimerizasyon için kullanılan alkali sıvılar sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikattır ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları 7, 14 ve 28 günlük yaşlarda iki tür kür (su kürü ve oda kürü) altında test edilmiştir. Deneysel araştırmalar, geopolimer beton karışımlarına SD eklenmesinin daha ince gözenek yapısıyla sonuçlandığını ve dolayısıyla düşük geçirgenlikli beton ürettiğini göstermiştir. SD ve GYFC'nin farklı kombinasyonları ile üretilen geopolimer betonların basınç dayanımı 45 MPa'nın üzerindedir. Geopolimerin basınç dayanımının azalan SD miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

## 2.2. Silis Dumanı

Silis dumanı, kuvarın bir indüksiyon ark fırınında 2000 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda silisyuma indirgenmesiyle silisyum veya çeşitli silikon alaşımlarının imalatının bir yan ürünüdür. Yüksek sıcaklıklarda gazlaştırılmış  $\text{SiO}_2$ , düşük sıcaklık bölgesinde kristal olmayan silikadan oluşan küçük küresel parçacıklara yoğunlaşmaktadır.

Silis dumanının kimyasal bileşimi yalnızca kullanılan ham maddelere değil, aynı zamanda elektrotların kalitesine ve silikon ürünlerinin saflığına da bağlıdır. Nihai ürünlerde silikon sayısı arttıkça yoğunlaştırılmış silis dumanındaki safsızlıklar azalmaktadır. %75 veya daha yüksek silikon içeriğine sahip alaşımlar üreten silikon metali ve ferrosilikon alaşım endüstrilerinden gelen yan ürünler, %85 ila 95 kristal olmayan silika içermekte; %50 silikonlu ferrosilikon alaşımının üretiminden elde edilen yan ürün, çok daha düşük silika içeriği içermektedir. Silis dumanındaki küçük bileşenler %0.1–0.5  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %0.1–5  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , %2–5 karbon, %0.1–0.2 S, %0.12'den az CaO, %0.1'den az  $\text{TiO}_2$ , %0.07'den az  $\text{P}_2\text{O}_5$  ve daha az %1 alkaliler (Uchikawa, 1986).

Torba filtrelerde çıkan gazların süzülmesiyle uzaklaştırılan malzeme küresel bir şekle sahiptir ve esas olarak amorf fazından oluşmaktadır. Parçacığı, 0.1 µm mertebesinde bir ortalama çapa ve 20 ila 25 m<sup>2</sup>/g aralığında yüzey alanlarına sahiptir. Silis dumanı,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile doymuş çözeltide hızla çözünür ve oldukça puzolaniktir. Betonda silis dumanı kullanımı, su azaltıcı katkıları kullanılmadıkça betonun su ihtiyacını önemli ölçüde artırmaktadır. Küçük parçacıkları ve yüksek reaktivitesi nedeniyle, silis dumanı genellikle, alkali ile aktifleştirilmiş çimento da dahil olmak üzere, yüksek dayanmalı ve düşük geçirgenliğe sahip yoğun dolgulu çimento malzemelerinin bir bileşeni olarak kullanılmaktadır (Shi, vd. 2006).

### 2.2.1. Geopolimerlerde silis dumanı kullanımı

Khater (2013) yaptığı çalışmada, alümino-silikat metakaolin ve yıkım işlerinden üretilen atık betonun alkali aktivasyonundan üretilen geopolimer malzemelerin özelliklerine silis dumanı (SD) ilavesinin etkisi, basınç dayanımının ölçümü, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi incelenmiştir. Sonuçlar, SD içeren geopolimer karışımlarının basınç dayanımlarının %7 ikameye kadar arttığını ve ardından %10'a kadar düştüğünü, ancak yine de kontrol karışımından daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, %7 SD ile sindirilmiş kalsiyum hidroksit (CH) kristalleri, CH kristallerinin oryantasyonunu azaltmış, arayüzde toplanan CH kristal boyutunu küçültmüş ve arayüzü daha etkili bir şekilde iyileştirmiştir.

Sarıdemir ve Çelikten, (2017) yaptığı çalışmada, alkali ile aktifleştirilmiş silis dumanı (SD) harçlarının dayanım özellikleri araştırılmıştır. Bağlayıcıları aktive etmek için kullanılan sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) harç karışımlarında sabit tutulmuştur. Harç numuneleri, sadece çimento ile üretilen kontrol harcına ek olarak, çimento ağırlığına göre 0, 25, 50, 75 ve %100 silis dumanı ikame oranları kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca çimento ağırlığına göre %4 titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) ikame oranı kullanılarak aynı karışım oranlarında harç numuneleri üretilmiştir. Numuneler bir gün sonra kalıptan çıkarılmış ve üretilen numunelere, numuneler eğilme ve basınç dayanımı için kullanılabildiği kadar laboratuvar koşullarında ıslak veya kuru kür uygulanmıştır. Yaş veya kuru kür uygulanan harçların eğilme ve basınç dayanım değerleri kontrol harcı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, alkali ile aktive olan 50 SD harçlarının basınç dayanımı sonuçlarının sadece portland çimentosu ile üretilen harçlardan daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Kuru koşullarda kürlenmiş alkali ile aktifleştirilmiş SD harçlarının eğilme ve basınç dayanımının, ıslak koşullarda kürlenmiş alkali ile aktifleştirilmiş SD harçlarından ortalama %4 daha düşük olduğu bulunmuştur.

Rajerajeswari vd. (2014) yaptığı çalışmada, alkali sıvısının silis dumanına oranı, silikatın hidroksite oranı gibi parametreler dikkate alınarak dayanım özelliklerini bulmak için silis dumanı esaslı geopolimer beton ve sabit silika yüzdesi ile farklı yaşlar için geopolimer beton üretilmiştir. Deneyler, yukarıda belirtilen parametreleri incelemek için yapılmıştır. Sonuçlardan.  $\text{AL}/\text{SD} = 0.25$  ile  $\text{SiO}_3/\text{OH} = 0.5$ , 56 günlük kür süresi için  $60^\circ\text{C}$  ıslak kürlenme sıcaklığı için ve silis dumanının %60 oranında değiştirilmesinin, normal kür altında geleneksel betona kıyasla daha iyi basınç dayanımı verdiği anlaşılmıştır.

Brew ve MacKenzie (2007) yaptığı çalışmada, silikat kaynağı olarak silis dumanı kullanılarak monolitik numuneler sentezlenmiştir. Tamamen kararsız bir alüminyum kaynağı sağlamak için, silika dumanının alkali çözeltisine sodyum alüminat çözeltisi ilave edilmiştir. Ürünün yapı karakterizasyonu XRD, nükleer manyetik rezonans spektroskopisi (MAS NMR) ve basınç dayanımı ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler,

ürünlerin tipik alüminosilikat geopolimerlerinin tüm özelliklerini sergilediğini gösteren iyi basınç dayanımları göstermiştir.

### 2.3. Doğal puzolan

Doğal puzolanlar, sıradan Portland çimentosu için alternatif bir bağlayıcı olarak geopolimer sentezi için gerekli olan muazzam bir reaktif silika ve alümina kaynağıdır. Nispeten düşük bir maliyetle temin edilebilirler ve basit ekstraksiyonları sayesinde düşük bir ekolojik ayak izi oluşturmaktadır. Doğal puzolan, ortam sıcaklığında kireçle reaksiyona girerek katı bir kaya oluşturabilen volkanik kül olarak da adlandırılmakta, genellikle volkanik kökenli bir alüminosilikat türüdür (Shi vd. 2006). Puzolan terimi, Romalılar tarafından ilk keşfedildiği İtalya'daki Pozzuoli şehrini ifade etmektedir. İkincisi, bu doğal puzolanların çimentolama özelliklerine sahip olduğunu gözlemlemiş ve bunları yapı taşları yapmak için kullanmaya başlamıştır (Hewlett, 1988). Çimentolu özellikler, alüminosilikatta bulunan reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarına bağlı olan puzolanik özellikler olarak bilinmektedir.

Volkanik kül yatağının kimyasal ve mineralojik bileşimi, kaynaklandığı magmanın kimyasına bağlıdır (Siddique, 2011). Pek çok yatak, ana bileşenler olarak  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{Na}_2\text{O}$  içermektedir. Diğer oksitler de küçük yüzdelerde bulunmaktadır (Lemougnat vd. 2018). Doğal puzolan, puzolanik özelliklerinden dolayı Portland çimentosu endüstrisinde ek çimento esaslı malzeme olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Firdous vd. 2018). Doğal puzolanlardan biri olan pomzanın geopolimer üretiminde kaynak malzeme olarak kullanımı son yıllarda araştırılmaktadır.

#### 2.3.1. Asidik pomza

Patlayıcı bir patlama sırasında, magmanın sıvı kısmında çözünen volkanik gazlarda bir köpük oluşturmak üzere hızla genişler; köpüğün sıvı kısmı yer üstünde hızla katılaşmaktadır. Pomza aslında bir cam türü olup mineral karışımı değildir. Beyaz veya açık gri renkte ve genel olarak kaya köpüğü görünümündedir. Lavın viskozitesi, su buharı ve gazın miktarı ve soğuma hızı birlikte kesecikli maddenin inceliğini belirlemektedir. Pomza hafif bir malzemedir, suda uzun süre yüzebilir, geçirgenliği düşük ve yalıtım özelliği yüksektir. Asidik pomza hem Türkiye'de hem de dünyada en yaygın pomza türüdür (Shi vd. 2006).

Türkiye'de geniş pomza yatakları bulunmaktadır. Dünyadaki pomza taşı rezervlerinin yedide biri Türkiye'dedir. 2018 yılında Türkiye, Asya ve Avrupa'ya pomza ihracatında lider olmuştur (Crangle, 2018). Pomzanın kimyasal bileşimi %75'e kadar silika içermektedir. Kayanın içerdiği  $\text{SiO}_2$  oranı onlara aşındırıcı özelliğini vermekte ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bileşimi onu ısıya ve ateşe dayanıklı hale getirmektedir (Özodabaş ve Yılmaz, 2013). Pomza asidik ve bazik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Asidik pomza doğada yaygındır, rengi beyaz veya istiridyeye beyazdır, oysa bazik pomza kahverengi veya siyah



renktedir. SiO<sub>2</sub> baskın oksittir, genellikle bazik pomza için ağırlıkça %40 ila %52 ve asidik pomza için %63 ila 75 arasındadır (Lemougna vd. 2018; S. Demirdag vd. 2008; Özkan ve Tuncer 2001).

Pomzanın ana kullanımı, beton bloklar ve çeşitli yapı ürünleri için hafif bir agregadır. Pomza için diğer önemli uygulamalar arasında aşındırıcı, emici, filtre yardımcısı vb. rastlanmaktadır. 2018 yılında toplam pomza tüketimi 644.000 mt, ortalama 31.52\$/ton olmuştur (Crangle, 2018).

### 2.3.2. Geopolimerlerde asidik pomza kullanımı

Karaaslan ve Yener (2021) yaptığı çalışmada, alkali aktivatörde sodyum hidroksit (SH) konsantrasyonu ve sodyum silikat (SS) içeriğinin uçucu kül katkılı pomza esaslı geopolimer harcının mekanik özelliklerini ve ıslak-kuru direnci üzerine etkisini araştırılmıştır. SH konsantrasyonu 8, 10, 12 ve 14 molar olarak kullanılırken, SS'nin SH'ye ağırlık oranı 0, 1, 2 ve 3 olarak kullanılmıştır. Tüm SH molarite değerleri için geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı SS/SH oranının artmasıyla artarken, SS/SH oranının 2'den 3'e çıkmasıyla hafif bir düşüş gözlenmiştir. Ancak SH molaritesinin artması ile numunelerin basınç dayanımı SS içeriğinden daha az etkilenmiştir. Yaş-kuru etkisi altında sadece SH ile aktive edilen harç numunelerinde büyük çatlaklar veya yarıklar meydana geldiği için basınç dayanımları ölçülemedi. SS + SH ile aktive edilen harç numunelerinin yaş-kuru performansı SH molaritesinden ve SS/SH oranından fazla etkilenmemiş ve birbirine yakın çıkmıştır. Mikroyapı çalışmalarına bakıldığında, FTIR analizleri SS içeriğinin daha iyi bir geopolimerizasyon sağladığını, SEM görüntüleri ise mikro çatlakların SS içeriği ile nispeten azaldığını göstermektedir.

Özodabaş ve Yılmaz (2013) yaptığı çalışmada, belirli oranlarda ince öğütülmüş pomza (P) ilavesi ile alkali ile aktive olan yüksek fırın cürufu (YFC) harçlarının dayanımı ve dayanıklılığı araştırılmaktadır. Çimento yerine %60 ve %80 oranında YFC kullanılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) kullanılmıştır. Birinci aşama Na<sub>2</sub>O YFC'nin ağırlıkça %6.7 ve %8'i eklenmiştir. %8 Na<sub>2</sub>O içeren numunenin dayanım değerlerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçtan dolayı ikinci aşamada YFC'nin %5'i ve %10'u yerine pomza kullanılmıştır. Ancak her iki deneysel çalışmada da silikat modülleri (MS = SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) 0.5, 0.75 ve 1.00 olarak hesaplanmıştır. YFC + P numunelerinin dayanıklılık değerleri, referans numunelere göre daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir.

Balun ve Karataş (2018) yaptığı çalışmada, alüminosilikat esaslı öğütülmüş pomza (ÖP) ve sıradan portland çimentosu (PÇ) içeren alkali ile aktifleştirilmiş hibrit bağlayıcıların basınç dayanımlarının araştırılması amaçlanmıştır. Alkali aktivatör olarak potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) solüsyonları kullanılmıştır. Bu çalışmada, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranları (1, 2, 3) ve PÇ içeriği (%0-5-10-15-20) bakımından farklılık gösteren alkali ile aktifleştirilmiş hibrit harçlar üretilmiştir. Daha sonra numunelerin basınç dayanımı, UPV, toplam su emme, gözeneklilik ve yoğunluğu

belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı ve PÇ içeriğinin artmasının basınç dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, pomza bazlı alkali ile aktifleştirilmiş hibrit çimentonun yapısal bir malzeme olarak kullanılmak için yeterli basınç dayanımına (yaklaşık 53 MPa) sahip olduğunu göstermiştir.

Çetinkaya vd. (2017) yaptığı çalışmada, çeşitli kütle oranlarında ekstra ince alüminyum tozu ve pomza taşı kullanılarak hafif bir geopolimer hazırlanmıştır. NaOH konsantrasyonunun, alüminyum kütle oranının, kütleme sıcaklığının ve karışımın kür süresinin hafif geopolimerlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda en yüksek basınç dayanımına ve en iyi işlenebilirliğine sahip hafif geopolimerler üzerinde NaOH konsantrasyonu 2 M,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  kütle oranı 17.5 olarak bulunmuştur. Hafif geopolimer, 40 C'de kütleme işleminin 28 gününde 1.6 MPa ile en iyi basınç dayanımına ulaşmıştır. Elde edilen hafif geopolimerin yoğunluğu  $0.9 \text{ g/cm}^3$  olduğundan, hafif geopolimerde kullanılan alüminyumun kütle oranı %2.5 olmuştur.

Allahverdi, vd. (2008) tarafından yapılan geopolimer çimento,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH kombinasyonlarına dayalı farklı alkali aktivatörler ile bağlayıcı olarak pomza tipi doğal bir puzolan kullanılarak üretilmiş ve incelenmiştir. Üretilen numunelerin priz süresi, işlenebilirliği ve 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, pomzanın bir alkali aktivatör kullanılarak aktive edilebileceği ve bunun sonucunda uygun işlenebilirlik ve kabul edilebilmekte 28 günlük basınç dayanımları gösteren bir geopolimer çimentonun oluşumuyla sonuçlanabileceği sonucuna varmıştır. 28 günlük basınç dayanımı 47 MPa'ya kadar çıkmıştır, sırasıyla silika modülünde,  $\text{Na}_2\text{O}$  konsantrasyonunda ve su-kuru bağlayıcı oranında sırasıyla %0.60, ağırlıkça %10 ve 0.36'da elde edilmiştir.

Aktifleştirici ajanların sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi ile pomza tozu (PT) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufundan (ÖYFC) yapılan geopolimer hamur ve harçların fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır (Kabay vd. 2021). Deneysel sonuçlar, geopolimer harçların basınç dayanımının, tek aktivatör karışımları için aktivatör tipinden ziyade esas olarak aktivatör konsantrasyonu ve PT oranından etkilendiğini göstermiştir. Bununla birlikte, KOH ve SS kombinasyonu, NaOH ve SS ile karşılaştırıldığında daha yüksek basınç dayanımı ile sonuçlandığından, SS'nin dahil edilmesi bu eğilimi değiştirmiştir. Karışım tasarımında PT oranının kademeli olarak artması, yoğunluğu ve ısıl iletkenliği azaltırken, geopolimer harçların su emme değerlerini artırmıştır. Bununla birlikte, bağlayıcıda %60, 70 ve %80 PT içeren geopolimer harçlarda fiziksel özellikler önemsiz derecede değişmiştir.

## 2.4. Alkali Aktivatör

Alkali aktivatörler, geopolimerlerin geliştirilmesi için ikinci temel bileşendir. Bu aktivatörler genellikle karışıma bir çözelti olarak dahil edilirler, ancak aynı zamanda alüminosilikat malzeme ile karıştırılmış veya entegre edilmiş bir katı halde de dahil

edilebilmektedir. Bununla birlikte, mevcut eğilim, karıştırma sıvısı olarak su ile öncü ve katı bir aktivatör içeren geopolimer hazırlamaktır. Genellikle en çok kullanılan aktivatörler alkali hidroksitler ve silikatlardır. Bununla birlikte, aktivatörlerin molaritesi, aktivasyon sürecinde çok önemli bir rol oynamaktadır (Torres-Carrasco ve Puertas, 2017).

Garcia-Lodeiro, vd. (2015) Glukhovsky tarafından tanımlanan altı farklı aktivatör kategorisini ayırt etmektedir:

1. Alkali hidroksitler: MOH.
2. Silikatsız zayıf alkali tuzlar:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF.
3. Silikatlı alkaliler:  $M_2O \cdot nSiO_2$ .
4. Alüminatlı alkaliler:  $M_2O \cdot nAl_2O_3$ .
5. Alüminosilikatlı alkaliler:  $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ .
6. Silikatlı güçlü alkali tuzlar:  $M_2SO_4$ .

Tüm bu kimyasal bileşiklerden NaOH,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2O \cdot nSiO_2$  ve  $Na_2SO_4$  en yaygın olarak bulunanlardır. Bazı potasyum bileşikleri laboratuvar çalışmalarında kullanılmış olmakla birlikte, bunların az bulunurluğu ve yüksek maliyeti, ticari uygulamalarını sınırlandırmaktadır. Ayrıca, sodyum bileşiklerine göre hiçbir avantaj sağlamazlar (Torres-Carrasco ve Puertas, 2017).

#### **2.4.1. Geopolimer betonda sodyum hidroksit bazlı alkali aktivatör**

Kostik soda olarak da bilinen sodyum hidroksit, kimya endüstrisinde en çok kullanılan kimyasallardan biridir ve bu konumu sadece soda külü ve sülfürik asit ile paylaşmaktadır. Ayrıca Sodyum Hidroksite bağımlı olmayan bir endüstriyel ürün neredeyse yoktur. Ticari sodyum hidroksit dereceleri, tuzlu suyun elektrolizi yoluyla üretilmektedir. Sıvıya ek olarak, piyasada bulunan dört tip katı sodyum hidroksit vardır: katı, pul, bileşik oluşturmalar ve boncuklardır (Shi vd. 2006).

Sodyum Hidroksit, tüm suyun buharlaştığı erimiş sodyum hidroksit'in metal varillerde soğutulmasıyla elde edilmektedir. Pul sodyum hidroksit, erimiş sodyum hidroksit'in soğutulmuş pul dökülerek homojen kalınlıkta pullar oluşturmak üzere geçirilmesiyle yapılmaktadır. Pullar öğütülür ve çeşitli kontrollü parçacık boyutları biçiminde elenmektedir. Sodyum hidroksit taneciklerinin üretimi, erimiş sıvının dikkatlice kontrol edilen çalışma koşulları altında bir prilleme kulesinde beslenmesini ve tek tip boyutta küresel bir boncuk üretilmesini içermektedir. Katı Sodyum Hidroksit, pul sodyum hidroksit ve sodyum hidroksit boncukları aynı kimyasal bileşime sahiptir ve yalnızca parçacık boyutunda farklılık göstermektedir (Shi vd. 2006).

Esas olarak, potasyum bazlı aktivatörler yerine sodyum bazlı aktivatörler seçilmiş, çünkü bunlar potasyum bazlı aktivatörlerden daha ucuzdur. Sodyum hidroksit genellikle

pul veya pelet formunda kullanılmaktadır. Çözeltinin konsantrasyonuna bağlı olarak, molarite cinsinden ifade edilen bir çözeltideki NaOH katılarının kütlesi değişmiş, sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonu, 8 M ile 16 M arasında değişebilmektedir. Geopolimer betonun basınç dayanımı ve işlenebilirliği, geopolimer betonu oluşturan bileşenlerin oranlarına ve özelliklerine bağlıdır (Sruthi ve George, 2017).

Kumar vd. (2019) yaptıkları çalışmada, alkali aktivatörlerin değişen konsantrasyonlarının etkisi altında yüksek fırın cürufunu (YFC) kullanan geopolimer betonun (GB) davranışını incelemiştir. Alkali Aktivatör oranı 1:1.5, 1:2 ve 1:2.5 olan alkali aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kullanılmıştır. Ayrıca, NaOH'nin molaritesi 8, 10 ve 12 Molar için değiştirilmiştir. Numuneler basınç, ayırık çekme ve eğilme testleri için dökülmüştür ve 7 gün ve 28 gün ortam küründen sonra test edilmiştir. Sodyum hidroksit (NaOH) molaritesinin artması ve alkali aktivatör oranının artmasıyla GB numunesinin basınç, Ayırık çekme ve eğilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Sağlamtimur vd. (2019) yapmış olduğu çalışmada, uçucu külden (UK) geopolimer malzemeler üretilmiştir. Geopolimer kompozit malzeme üretiminde ağırlıkça sırasıyla 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 oranında sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit (12 M NaOH) birlikte kullanılmıştır. Sertleşen harcın fiziksel özellikleri 28. günde kütle yoğunluğu, su emme ve gözeneklilik değerleri ile belirlenirken, geopolimerlerin dayanımı 7, 28 ve 90. günlerde yapılan basınç ve eğilme dayanımı testleri sonuçlarından elde edilmiştir. Test sonuçları, alkali çözelti oranı için optimum bir sınır olduğunu göstermiştir, öyle ki bu sınırın aşılması, geopolimer malzemenin dayanım özellikleri için ters etki vermiştir.

Dineshkumar ve Umarani (2020) tarafından yapmış olduğu çalışmada, alkali aktivatörün düşük kalsiyumlu uçucu kül (UK) ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (ÖYFC) bazlı geopolimer harçların standart kıvamı ve priz süreleri üzerindeki etkisi araştırılmaya çalışılmıştır. Alkali aktivatör çözeltileri olarak sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) kullanılarak geopolimer hamur karışımlarına farklı oranlarda UK ve ÖYFC karıştırılmıştır. SH molaritesi artarken hem kıvam hem de priz süresi azalmıştır. Tüm harmanlanmış bağlayıcı karışımı için, alkali aktivatör çözeltisindeki SS miktarındaki artışla sertleşme süresi azalmaktadır. Geopolimer karışımındaki ÖYFC içeriği miktarındaki bir artış, kıvamı artırır ve sertleşme süresini azaltmıştır. Sonuçlar, SH molaritesini artırırken hem kıvam hem de priz sürelerinin azaldığını göstermiştir. Harmanlanmış bağlayıcı karışımı için FT-IR spektrumları, geopolimerizasyon oluşumunu ve fonksiyonel grupların varlığını göstermiştir.

Geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerinde alkali çözeltinin değişimi üzerine yapılan deneyler araştırılmıştır (Sanni ve Khadiranaikar, 2013). Kullanılan alkali çözelti, değişen oranlarda sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisinin bir kombinasyonuydu ve 8 molarite için tasarlanmıştır. Sonuçlar, geopolimer betonun

işlenebilir akışının 85 ila 145 aralığında olduğunu ve kütlece sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi oranına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Taze hazırlanmış geopolimer karışımları koheziftir ve alkali çözelti oranının artması ile işlenebilirlikleri artmıştır. Geopolimer betonun dayanımı, su/bağ ve agrega/bağlayıcı oranları azaltılarak geliştirilebilmiştir. Kürlenme süresi, daha yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanan polimerizasyon sürecini iyileştirmiştir.

Prochon vd. (2020) yaptıkları çalışmada, modifiye edilmiş uçucu kül bazlı geopolimer harçların formülasyonu üzerinde aktivatör tipinin etkisini incelemektedir. Geopolimerler, termik santrallerde kömür ve biyokütle yanmasından elde edilen uçucu küllerden yapılmıştır. Portland çimentosu kullanımından kaynaklananlar dışında bağlayıcı özellikler geliştirmek için temel aktivatörler (NaOH, CaO ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) uçucu küllerle karıştırılmıştır. Sonuçlar, 5 M NaOH ve 100 g Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren harçların diğer karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı verdiğini göstermiştir. Düzenli uçucu kül içeren alkali ile aktifleştirilmiş harçların daha iyi özellikleri, daha büyük miktarda amorf silika ve alümina fazlarından etkilenmiştir.

Geopolimer harçların hazırlanmasında taze bazalt tozunun kullanım olasılığı incelenmiştir (Saraya ve El-Fadaly, 2017). Bazaltın alkali aktivasyonu için 2.5, 5, 7.5 ve 10 M'lik dört NaOH konsantrasyonu kullanılmıştır. Ayrıca ortam sıcaklığında, 45°C ve 65°C'de kürlenme sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Geopolimer harçlar FTIR, XRD ve SEM-EDS tekniklerinin yanı sıra 90 güne kadar basınç dayanımı kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, hazırlanan geopolimerin basınç dayanımının, alkali aktivatör konsantrasyonu ile 90 güne kadar arttığını göstermiştir. Öte yandan, hazırlanan geopolimer harçların basınç dayanımı, artan kürlenme sıcaklığı ile iyileştirilmiştir. Sonuçlar, sodyum hidroksitin bazaltın farklı mineralleri ile reaksiyona girmesi nedeniyle kimyasal ve mineral yapısında bir değişiklik olduğunu göstermiştir. Yüzey bazaltında meydana gelen geopolimerizasyon reaksiyonları ve reaksiyona girmemiş bazalt parçacıkları aslında geopolimer özelliklerinde destekleyici bir rol oynamaktadır.

## 2.5. Polipropilen Elyaf

Polipropilen (PP), paketlenme malzemeleri (örneğin, halatlar, sıcak giysiler ve örtüler), kırtasiye malzemeleri, plastik parçalar ve farklı türlerde yeniden kullanılabilen bölme, araştırma tesisi teçhizatı, amplifikatörler dahil olmak üzere çok çeşitli kullanımların bir parçası olarak kullanılan bir termoplastik polimerdir. Araba segmentlerinde ve polimer banknotlarda da kullanılmaktadır. Ayrıca beton üretiminde polipropilen kullanılmaktadır. Polipropilen elyafın betona katılması konusunda araştırmalar yapılmıştır (N. Sohaib vd. 2018).

Manoj ve Baboo, (2019) yapılan araştırmada, mikro polipropilen elyaflarını dahil edilmesinin geopolimer betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Sonuçlar, mikro polipropilen elyafın hidrofobik özelliklerinin, geopolimer bağlayıcı ile zayıf teması yoluyla ve dolayısıyla uçucu kül bazlı

geopolimer matrisinin mekanik performansını zayıflattığını göstermektedir. Ancak dayanıklılık özelliklerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir.

Geopolimer betonda odun külü ve uçucu külün her ikisinin de %0-100'ü değiştirilerek optimizasyonu, beton basınç dayanımı açısından test edilerek gerçekleştirilmiştir (Arunkumar K. vd. 2020). Kırılabilirliği ve enerji absorpsiyon kapasitesini geliştirmek için polipropilen elyaf hacim fraksiyonunun % 0, 0.5, 1, 1.5 ve 2'si kadar ilave edilmiştir. Ayrıca, optimize edilmiş odun külü-uçucu kül bazlı geopolimere polipropilen ilavesinin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada geopolimer betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, odun külünün %30 oranında değiştirilmesinin, geleneksel karışıma göre basınç dayanımını %12.2 artırdığını göstermiştir. Ayrıca, %1 PP elyaf ilavesi basınç dayanımını, çekme dayanımını ve eğilme dayanımını sırasıyla %3.7, %15.6 ve %5.13 oranında arttırmıştır.

Geopolimer beton, uçucu kül, iri ve ince agregalar içeren kuru bir karışım üzerinde alkali aktivasyonu ile üretilmiştir (Arumugam .V. vd. 2018). Alkali aktivatör çözeltisi, sodyum hidroksit ve sodyum silikat içermektedir. Geopolimer betonun (GB) mekanik özelliklerini iyileştirmek için GB'ye çeşitli yüzdelerde polipropilen elyaflar eklenmiştir. GB'nin işlenebilirliğini iyileştirmek için süperplastikleştirici eklenmiştir. Geopolimer betonun ısıyla kürlenmesini önlemek için uçucu külün yerine %10 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFG) kullanılmıştır. Geopolimer betonda %0.5 ile %5 arasında değişen oranlarda polipropilen elyafların etkisi test edilmiştir. Geopolimer betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi temel özellikleri incelenmiştir. Test sonuçları, diğer kombinasyonlara kıyasla %2.5 oranındaki PP elyafların basınç dayanımında %73.47, yarık çekmede %13.40 ve eğilme dayanımında %44.24 artış ile sonuçlandığını göstermiştir.

D.Kalai Arul Selvi vd. (2020) yaptığı çalışmada, çimentosuz ana bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül kullanan betonun performansını incelemek için bir deney yapılmıştır. Alkali sıvı sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi bu projede geopolimerizasyon işleminde kullanıldığı alkali aktivatör olarak kullanılmaktadır. Geopolimer betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için bu çalışmada çeşitli oranlarda polipropilen elyaf eklenmiştir, ayrıca geopolimer betonun işlenebilirliğini iyileştirmek için süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Geopolimer betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, elyaf takviyeli geopolimer betonun basınç dayanımının, geopolimer betondan %4.1 daha fazla dayanım elde ettiğini, ancak %0.2 karıştırıldıktan sonra basınç dayanımının kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Ancak geopolimer betonun yarık çekme ve eğilme dayanımı, polipropilen elyafların %0.3'e kadar artmasıyla artmaktadır.

Rani vd. (2021) yaptığı çalışmada, polipropilen elyafların ilavesi ile geopolimer bağlayıcı malzeme oluşturulmuştur. Polipropilen elyafların beton üzerindeki etkisinin yanı

sıra çeşitli dayanıklılık testleri yapılmıştır. Küplerin esnekliği, birkaç düşmanca çözeltiye daldırıldıktan sonra gözlemlenmiş ve araştırılmıştır. Ortaya çıkan beton, yüksek basınç dayanımının yanı sıra uzun bir ömre sahiptir. Geopolimer betonun kuruma büzülmesi, çimentoya polipropilen elyaf eklenerek en aza indirilebilmektedir. Polipropilen elyaf, klorür penetrasyonuna direnerek ve böylece ömrünü uzatarak geopolimer betonun performansını iyileştirmektedir. Sonuçlar ayrıca, polipropilen elyafın betona eklenmesinin yüksek sıcaklığa maruz kalmaya karşı direnci geliştirdiğini göstermiştir. Sülfat saldırı sonuçları, polipropilen elyaf ilavesinin 0.6% sınırına kadar artmasıyla basınç dayanımı kaybının azaldığını göstermektedir.

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu bölüm, kullanılan malzemelerin özellikleri, karışım oranları, karıştırma prosedürü, kütleme ve taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen fiziksel özellik testlerinin ayrıntılı bir açıklamasını içermektedir. Ayrıca, bu bölümde sertleştirilmiş harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı ve eğilme dayanımı testleri gibi mekanik özellikler gerçekleştirilmiş ve açıklanmıştır.

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. İnce Agregata

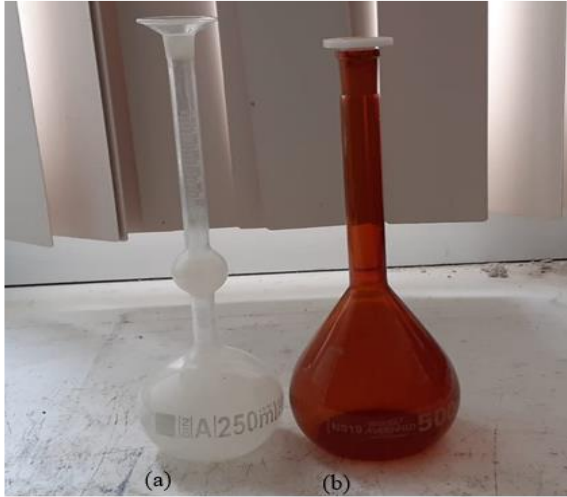
Bu çalışmada geopolimer harç numunelerinin üretiminde kullanılan ince agregata kırma kumdur.



**Şekil 3.1.** Kullanılan İnce Agregata

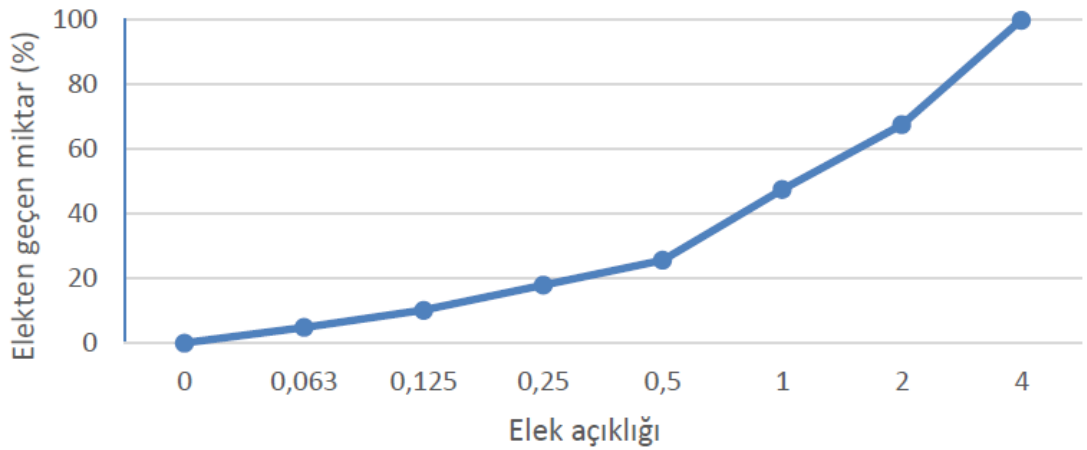
Agregatanın özgül ağırlık değerleri Le Chatelier balonu ve balon joje testi yöntemi kullanılarak bulunmuş ve her iki yöntemin ortalaması alınmıştır. Agregatanın özgül ağırlığı  $2.6 \text{ g/cm}^3$ 'tür.





Şekil 3.2. (a) Le Chatelier Balonu; (b) Balon Joje

Agreganın granülometrisini (tane boyutu dağılımını) belirlemek için elek analizi TS EN 933-1 ve ASTM C-136 standartlarına göre yapılmıştır. İnce agrega kullanıldığı için elek açıklıkları sırasıyla 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 ve 0.063 mm olarak belirlenmiştir. Deney için üst elek (4 mm) üzerine bir miktar agrega yerleştirilmiştir ve vibrasyon cihazı ile titreştirilmiştir. Elek üzerinde kalan agrega miktarları tartılarak elekte kümülatif ağırlıklar hesaplanmıştır.



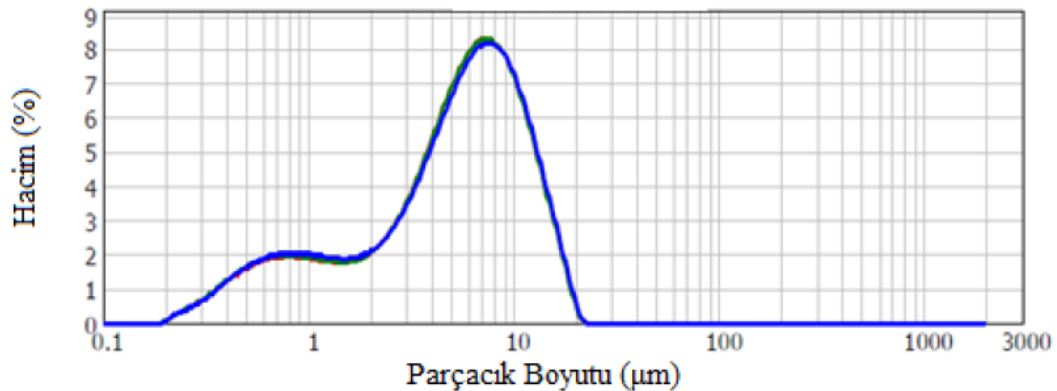
Şekil 3.3. Agreganın tane boyutu dağılımı

### 3.1.2. Bağlayıcı

Çalışmada iki farklı bağlayıcı kullanılmıştır. Pomza ve silis dumanının ağırlıkça farklı yüzdelerde yeri değiştirilerek farklı karışımlar elde edilmiştir. Pomza Başergün Boya ve Kimya A.Ş.'den elde edilmiştir. Silis dumanı ise Antalya Eti Elektrometallurji A.Ş.'den temin edilmiştir. Bağlayıcıların özgül ağırlığı TS-EN 196-6'ya göre Le Chatelier balonu ile elde edilmiştir. Silis dumanı ve ince öğütülmüş asidik pomzanın özgül ağırlıkları sırasıyla  $2.26 \text{ g/cm}^3$  ve  $2.23 \text{ g/cm}^3$ 'tür. XRF analizi sonucunda elde edilen bağlayıcıların kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.  $\text{SiO}_2$  oksit, asidik pomza gibi volkanik kül için genellikle %63-75 arasındadır. Bu çalışmada kullanılan pomza tozundaki  $\text{SiO}_2$  miktarı belirtilen aralığa girmektedir (Lemougna vd. 2018; Özkan ve Tuncer 2001). Silis dumanının parçacık boyutu dağılımı Şekil 3.5'te gösterilmektedir (Gülmez, 2018).



Şekil 3.4. Kullanılan asidik pomza (sol) ve silica füme (sağa)



Şekil 3.5. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı (Gülmez, 2018)

**Çizelge 3.1.** Bağlayıcıların kimyasal bileşimi XRF analizi sonucu (%)

Oksit	Silis Dumanı (Gülmez, 2018)	Öğütülmüş Asidik Pomza
Na <sub>2</sub> O	2.150	0.273
MgO	14.320	1.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.684	14.6
SiO <sub>2</sub>	78.020	74.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02396	-
SO <sub>3</sub>	0.2984	0.0192
Cl	0.02678	0.0083
K <sub>2</sub> O	1.097	3.25
CaO	0.1931	4.36
TiO <sub>2</sub>	-	0.123
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.405	-
MnO	0.0560	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3170	1.26
CuO	-	-
ZnO	0.1950	-
SrO	-	-
ZrO <sub>2</sub>	< 0.068	-

### 3.1.3. Alkali Aktivatör

Geopolimerizasyonda alkali çözeltiler sentezde her zaman önemli bir rol oynamaktadır. Alkali çözeltiler, sodyum bazlı doğanın bir kombinasyonuna sahip olması muhtemel çözünür alkali metallere dendir. Geopolimerizasyonda en sık kullanılan alkali çözelti sodyum hidroksittir. Bu çalışmada %99 saflıkta ticari sınıf bir sodyum hidroksit pulu kullanılmıştır. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu molarite cinsinden ifade edilmektedir. Molar kütle 40 g/mol'dür ve malzemeler yerel bir tedarikçiden temin edilmiştir. Sodyum hidroksit çözeltisi, pulların 10M konsantrasyonda su içinde çözülmesiyle hazırlanmıştır.

### 3.1.4. Polipropilen Elyaf

Çalışmada elyaf olarak kullanılan polipropilen elyaf, Lif Elyaf Kompozitsan ve TİC.LTD.ŞTİ'den temin edilmiştir. Elyafın üzerlerinde herhangi bir işlem yapılmadan kullanılmıştır. Kullanılan elyafın yoğunluğu 0.91 g/cm<sup>3</sup>'tür. Elyafın uzunluğu 6 mm'dir.



**Şekil 3.6.** Kullanılan polipropilen elyaf

### 3.1.5. Su

Çalışmada Antalya şebeke suyu üzerine herhangi bir işlem yapılmadan kullanılmıştır. Bu su, NaOH çözeltisi yapmak için sodyum hidroksiti çözmek için kullanılmaktadır.

### 3.1.6. Kimyasal katkı

Çalışmada, işlenebilirliği  $11 \pm 2$  cm değerlerinde sabit tutmak için elyafli karışımlarda %0, %0.5 ve %1 lignin sülfonat esaslı su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmıştır. Katkı ile ilgili teknik bilgiler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Süper akışkanlaştırıcının özellikleri

Kimyasal İçerik	Lignin Sülfonat Esaslı
Yoğunluk	1.05 – 1.09 Kg/L
pH	4.0 – 6.0
Renk	Kahverengi
Toplam Klor	Maksimum %0.1
Alkali	Maksimum %5

## 3.2. Metot

### 3.2.1. Geopolimer Harçların Hazırlanması ve Karışım Oranları

Harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için agrega/bağlayıcı oranını ve pomza ve silis dumanı yüzdesini değiştirerek çeşitli deneme karışımları ile deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma için şu parametreler seçilmiştir: agrega/bağlayıcı oranı 2 olarak seçilmiş ve harçlar %0, %0.5 ve %1 polipropilen elyafle güçlendirilmiş ve iki kür yöntemi seçilmiştir. Bağlayıcıların yüzdeleri, ağırlıkça %50 silis

dumanı ve ağırlıkça %50 asidik pomza ile sabitlendi. Diğer karışım, ağırlıkça %25 silis dumanı ve ağırlıkça %75 asidik pomza içermektedir.

Bu parametreler, üretilen harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için seçilmiştir. Önceki literatür çalışmasında arama yapıldıktan sonra, sertleşmiş harçlarda mikro çatlak oluşumunu önlemek için polipropilen elyaf dahil edilmiş ve karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma için iyi işlenebilirliğe sahip harç üretmek için % 0,5 ve %1 oranları seçilmiştir. Öğütülmüş asidik pomza ve silis dumanı yüzdeleri, iyi sertleşme özelliklerine sahip bir harç oluşturmak için seçilmiştir. Kür rejimleri, geopolimer harçlar üzerinde ısıyla kürlemenin rolü üzerine önceki literatür çalışmaları incelendikten sonra seçilmiş ve 60 °C ısı kürünün iyi mekanik özelliklere sahip bir harç ürettiğini tespit etmiştir. Bu çalışmada ısı kürünün etkisi araştırılmıştır.

Üretilen geopolimer kompozitlerin dayanımında doğrudan etkili olan bazı faktörlerin, bağlayıcıların, elyaf içeriğinin ve kür detaylarının incelenmesini amaçlayan bu ön çalışmada, elde edilen numuneler eğilme ve basınç dayanımı açısından test edilerek değerlendirilmiştir. Laboratuvar koşullarında ve yüksek sıcaklıklarda iki farklı kürleme rejimi test edilmiştir.

Geopolimer harçların (GH) karışım oranları hacimce Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Alkali çözelti, tüm karışımlarda (su ilave edilerek) tek sıvıya bileşenmiştir. İşlenebilirliği artırmak ve GH karışımını homojen hale getirmek için karışıma süper akışkanlaştırıcı (SA) eklenmektedir.

Geopolimer harçların üretimi 1 m<sup>3</sup> hacim olarak tasarlanmaktadır. Karışıma giren malzemelerin hacmi, her bir hacim yoğunluğu ile çarpılarak kütleye dönüştürülmüştür. Elyaf karışıma farklı yüzdelerde (%0, %0.5 ve %1) eklenmiştir.

Karıştırma aşaması şu şekilde gerçekleştirilmiştir: İlk olarak, bağlayıcılar (silis dumanı ve pomza) ve agrega ve elyaf kuru karıştırılmıştır. 2. çevrimde yaklaşık 1 dakika karıştırıldıktan sonra NaOH peletlerinin karışım suyunda çözülmesiyle 10M konsantrasyonda hazırlanan NaOH çözeltisi karışıma yavaş yavaş ilave edilerek 4. çevrimde karıştırılmıştır. 2 dakika daha karıştırıldıktan sonra karışıma süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir ve homojen bir karışım için dağılan ve yapışan partiküller bir spatula ile karıştırılmıştır. Geopolimer betonların hazırlanmasında kullanılan su alkali aktivatör çözeltisinde kullanılmış ve karışımlara ekstra su ilave edilmemiştir. Aşağıdaki özellikler tüm karışımlarda sabit tutulmuştur.

Sodyum hidroksit molaritesi: 10M.

Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı: 1 (hacimce).

İnce agrega/bağlayıcı oranı: 2 (hacimce).

Üretilen karışımlar 40x40x160 mm prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Dökümden hemen sonra, kürlenme sırasında alkali aktivatör buharlaşmasını en aza indirmek için test numuneleri plastik film ile kaplanmıştır. İlki laboratuvar koşullarında  $21\pm 2$  °C'de normal hava sıcaklığında olmak üzere iki kürlenme yöntemi kullanılmıştır. İkinci kür yönteminde ise test numuneleri dökümden hemen sonra 60 °C'de 6 saat etüvde kürlenmiştir. Kür süresinden sonra deney numuneleri laboratuvar koşullarında 24 saat kalıplarda kalıptan çıkarılarak deney gününe kadar bırakılmıştır.



**Şekil 3.7.** Geopolimer harçların dökümünde kullanılan kalıplar



**Şekil 3.8.** Harç ve dökümün hazırlanması

Karışım kodları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

**AP50SD50L0:** bağlayıcılarda ağırlıkça %50 silis dumanı, %50 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0 kullanılmıştır. Laboratuvarında kürlenmektedir.

**AP50SD50L0.5:** bağlayıcılarda ağırlıkça %50 silis dumanı, %50 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0.5 kullanılmıştır. Laboratuvarında kürlenmektedir.

**AP50SD50L1:** bağlayıcılarda ağırlıkça %50 silis dumanı, %50 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %1 kullanılmıştır. Laboratuvarında kürlenmektedir.

**AP75SD25L0:** bağlayıcılarda ağırlıkça %25 silis dumanı, %75 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0 kullanılmıştır. Laboratuvarında kürlenmektedir.

**AP75SD25L0.5:** bağlayıcılarda ağırlıkça %25 silis dumanı, %75 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0.5 kullanılmıştır. Laboratuvarında kürlenmektedir.

**AP75SD25L1:** bağlayıcılarda ağırlıkça %25 silis dumanı, %75 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %1 kullanılmıştır. Laboratuvarında kürlenmektedir.

**AP50SD50L0F:** bağlayıcılarda ağırlıkça %50 silis dumanı, %50 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0 kullanılmıştır. Etüvde kürlenmektedir.

**AP50SD50L0.5F:** bağlayıcılarda ağırlıkça %50 silis dumanı, %50 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0.5 kullanılmıştır. Etüvde kürlenmektedir.

**AP50SD50L1F:** bağlayıcılarda ağırlıkça %50 silis dumanı, %50 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %1 kullanılmıştır. Etüvde kürlenmektedir.

**AP75SD25L0F:** bağlayıcılarda ağırlıkça %25 silis dumanı, %75 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0 kullanılmıştır. Etüvde kürlenmektedir.

**AP75SD25L0.5F:** bağlayıcılarda ağırlıkça %25 silis dumanı, %75 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %0.5 kullanılmıştır. Etüvde kürlenmektedir.

**AP75SD25L1F:** bağlayıcılarda ağırlıkça %25 silis dumanı, %75 asidik pomza; PP elyaf karışımın hacimce %1 kullanılmıştır. Etüvde kürlenmektedir.

**Çizelge 3.3.** Geopolimer harçların karışım oranları hacimce

Karışım Kodu	Silis Dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	Asidik Pomza (kg/m <sup>3</sup> )	Agrega (kg/m <sup>3</sup> )	NaOH (kg/m <sup>3</sup> )	Su (kg/m <sup>3</sup> )	Elyaf (%)	SA (%)
AP50SD50L0	282.5	278.75	1320	100	250	0	1
AP50SD50L0.5	282.5	278.75	1320	100	250	0.5	1.5
AP50SD50L1	282.5	278.75	1320	100	250	1	2
AP75SD25L0	141.25	418.125	1320	100	250	0	1
AP75SD25L0.5	141.25	418.125	1320	100	250	0.5	1.5
AP75SD25L1	141.25	418.125	1320	100	250	1	2
AP50SD50L0F	282.5	278.75	1320	100	250	0	1
AP50SD50L0.5F	282.5	278.75	1320	100	250	0.5	1.5
AP50SD50L1F	282.5	278.75	1320	100	250	1	2
AP75SD25L0F	141.25	418.125	1320	100	250	0	1
AP75SD25L0.5F	141.25	418.125	1320	100	250	0.5	1.5
AP75SD25L1F	141.25	418.125	1320	100	250	1	2

### 3.2.2. Taze harçlar üzerinde uygulanan deneyler

#### 3.2.2.1. Taze harç kıvamının belirlenmesi

Bu test TS EN 1015-3 standardına göre yapılmıştır. Kesilen külâhın içine spatula yardımı ile iki eşit kat olacak şekilde taze harç doldurulmuştur. İlk kat doldurulduktan sonra 10 kez sıkıştırma çubuğu ile sıkıştırılmıştır. Kesilen huninin geri kalanı taze harçla dolduruldu ve tekrar 10 kez şişlenmiştir. Bir mala yardımı ile kesik külâhın üstü düzeltilerek harcın taşması önlenmiştir. Karışımın yayılması için kalıp kaldırılmalı ve tabla 15 kez düşürülmektedir. Üst tablaya sürülen harcın en büyük iki yayılma çapı birbirine dik olarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak yayılma çapı elde edilmiştir.

**Şekil 3.9.** Taze harç kıvam tayini



### 3.2.2.2. Taze harçlarda birim hacim kütlesi tayini

Test yöntemi, bilinen bir hacimdeki taze harcın kütlesinin hesaplanmasını içermektedir. Taze harçların birim hacim kütlesi TS 1015-6 standartları kullanılarak bulunmuştur. Bu deney, belirli bir hacme sıkıştırılan taze harcın birim hacmine karşılık gelen ağırlığı  $\text{kg/m}^3$  olarak ifade etmek ve harçta sıkışan hava miktarını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu test TS EN 1015-7 standardına göre uygulanmıştır. Test, yayılma çapı testi ile belirlenen taze harcın kıvamına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Yayılma çapı değeri 140 mm'den küçük olduğu için vibrasyon yöntemi şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Kalibre edilen pota taşana kadar harçla doldurulmakta, daha sonra titreşimli bir masanın üzerine yerleştirilmekte ve gerekirse malzeme ilave edilerek malzemenin artık oturmadığı görülünceye kadar titreşim devam edmektedir. Kap daha sonra 0.01 gram hassasiyetle tartılmaktadır.



Şekil 3.10. Taze harçlarda birim hacim kütle tayini

### 3.2.3. Sertleşmiş harçların fiziksel özelliğinin belirlenmesi

#### 3.2.3.1. Su emme, yığın yoğunluk ve görünür gözeneklilik

Numuneler 40x40x160 mm prizma kalıplarından bir günlük dökümden sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün laboratuvarında ve yüksek ısı koşullarında kürlenmiştir. Daha sonra  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki normal suda 24 saat bekletilmiştir. Numuneler sudan çıkarılmış ve numunelerin yüzeyi bir havlu ile kurutulmuş ve daha sonra kuru yüzey kütlesini belirlemek için tartılarak  $A_2$  olarak adlandırılmıştır. Numunelerin suda asılı tel kullanılarak suya daldırılmasıyla numune kütlesi ölçülmüş ve bu kütleyle  $A_3$  adı verilmiştir. Daha sonra numuneler  $60^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 48 saat etüvde kurutulmuştur. Numuneler kurutulduktan sonra fırından çıkarılarak havada  $20-25^\circ\text{C}$  sıcaklıkta soğutulmuş ve kuru kütle  $A_1$  olarak belirlenmiştir.

Yukarıda açıklanan test prosedürüne göre belirlenen kütle değerleri kullanılarak, kürlenmiş harç için su emme, kuru yığın yoğunluğu ve görünür gözeneklilik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Görünür boşluk oranı (gözeneklilik) (\%)} = \frac{A_2 - A_1}{A_2 - A_3} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{Kuru yğın yoğunluk} = \frac{A_1}{A_2 - A_3} \quad (3.4)$$

$$\text{Suya doymun kuru yüzey ağırlık} = \frac{A_2}{A_2 - A_3} \quad (3.5)$$

$A_1$ : Fırında kuru ağırlık (g)

$A_2$ : Doymuş yüzey kuru ağırlık (g)

$A_3$ : Suya batırılmış numunenin ağırlığı (g)



**Şekil 3.11.** Numunelerin suya konulması

### 3.2.4. Sertleşmiş harçların durabilite özelliğinin belirlenmesi

#### 3.2.4.1. Kılcal su emme katsayısı deneyi

Üretilen harçların kılcal su emme katsayıları 40x40x160 mm numunelerde 1 saat 24 saat emilen su miktarı ölçülerek hesaplanmış ve test TS EN 480-5 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numunenin sadece tabandan su çekmesini sağlamak için, su emilmesini önlemek için bazın yan yüzeyleri mumlanmıştır. 1 ve 24 saat sonra numunenin alt yüzeyindeki su nemli bir bezle silinmekte ve tartılmaktadır. Numunelerin kılcal su emme katsayıları aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Q}{A\sqrt{t}} \quad (3.5)$$

K: Kılcal su emme katsayısı (cm/sn<sup>1/2</sup>)

Q: Emilen su miktarı (cm<sup>3</sup>)

A: Suya temas eden yüzeyin alanı (cm<sup>2</sup>)

t: Zaman (sn)



Şekil 3.12. Kılcal su geçirimsizlik deneyi

### 3.2.5. Sertleşmiş harçların mekanik deneyleri

#### 3.2.5.1. Eğilme dayanımı testi

Üretilen harçların eğilme dayanımını bulmak için üç nokta eğme testi yapılmıştır. Deney 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her numune, yükleme masasındaki iki destek üzerine ortalanarak yerleştirilmiştir ve numunenin tam ortasına dikey olarak bir yük uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testi, 7 ve 28 günlük kür periyotlarının her birinin sonunda TS-EN 1015-11'e göre yapılmıştır. Eğilme dayanımı MPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.11 eğilme testi persedürünü göstermektedir.



**Şekil 3.13.** Eğilme dayanımı testi

### 3.2.5.2. Basınç dayanımı testi

Basınç dayanımının belirlenmesi için üç nokta eğme testi sonucunda ikiye ayrılan 40x40x160 mm ölçülerinde numuneler kullanılmıştır. Kırılan parçalar, numuneye yukarıdan ve aşağıdan temas eden 40x40 mm yükleme yüzeyli bir çerçeveye yerleştirilmektedir. Numunenin kendi kenarı 40 mm olduğundan, ölçümler 40x40x40 mm küp numunenin test edildiği varsayılarak yapılmıştır. Basınç dayanımı testi, 4 MPa/sn yükleme hızı ile 7 ve 28 günlük kür periyotlarının her birinin sonunda TS-EN 1015-11'e göre yapılmıştır. Basınç dayanımı, her test yaşında ortalama üç numuneden hesaplanmıştır.



**Şekil 3.14.** Basınç dayanımı testi

### 3.2.5.3. Gerime şekil değiştirme

Dayanım, kalıcı deformasyon veya kırılma olmaksızın strese dayanma kapasitesinin bir fonksiyonu iken, sertlik belirli bir stres seviyesi altında deformasyonla ilişkilidir. Bu tür özellikler laboratuvarında belirlenmelidir ve kullanılan genel testler, normal gerilme ve spesifik uzunlamasına deformasyon arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan eğilme ve basınç testlerini içermektedir. Eğilme ve basınç dayanımı verileri, belirli bir stres seviyesi altında deformasyonun nerede meydana geldiğini göstermekte ve stres-gerinim eğrisi olarak adlandırılan bir eğrinin oluşturulmasını sağlamaktadır. Betonun doğrusal davranışı, belirli bir gerilme seviyesine ulaşılan kadar gözlemlenmektedir (Gujel vd. 2017).

Sertleştirilmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, deplasman kontrollü UTEST presi ile belirlenmiştir. 40x40x160 prizmatik numuneler dakikada 3.9 mm deplasmanla kırılmış, 40x40x40 küp numuneler dakikada 4 mm deplasmanla kırılmış ve cihazdan elde edilen veriler UTEST MALZEME TEST programı kullanılarak elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla gerilme-gerinim eğrileri çizilmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Taze Geopolimer Harç Testlerinin Bulguları

Taze harçlar üzerinde akma tablası ve harç birim hacim kütlesi deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1-2 harç numunelerinin yayılma çapı, taze birim hacim ağırlığı ve hava miktarı değerlerini göstermektedir.

**Çizelge 4.1.** Karışımların taze haldeki yayılma çapı, birim hacim kütlesi ve hava miktarı değerleri

Karışım Kodu	Yayılma Çapı (cm)	Birim Hacim Kütlesi (g/dm <sup>3</sup> )	Taze halde içerdiği hava miktarı (%)
AP50SD50L0	11.435	2095.5725	15.69
AP50SD50L0.5	12.14	2048.16	17.31
AP50SD50L1	11.53	2018.4775	18.23
AP75SD25L0	11.5875	2005.5025	13.72
AP75SD25L0.5	11.725	1997.25	13.81
AP75SD25L1	11.275	1989.645	13.87
AP50SD50L0F	11.435	2095.5725	15.69
AP50SD50L0.5F	12.14	2048.16	17.31
AP50SD50L1F	11.53	2018.4775	18.23
AP75SD25L0F	11.5875	2005.5025	13.72
AP75SD25L0.5F	11.725	1997.25	13.81
AP75SD25L1F	11.275	1989.645	13.87

Akma tablası test sonuçları, tüm karışımlar için 11.275 ila 12.14 cm arasında değişmiştir. AP50SD50L0.5F karışımı (%50 asidik pomza, %50 silis dumanı ve %0.5 elyaf içeren) 12.14 cm ile en yüksek değere sahip olmuş ve AP75SD25L1 karışımı (%75 asidik pomza, %25 silis dumanı ve %1 elyaf içeren) 11.275 cm ile en düşük değere sahip olmuştur. Elyaf içeriğinin artmasıyla taze harcın işlenebilirliğinin azaldığı fark edilmiştir. Sonuç olarak, harçların işlenebilirliğini artırmak için karışımlara bağlayıcı ağırlığının %1, %1.5 ve %2 oranında süperakışkanlaştırıcı eklenmiştir.

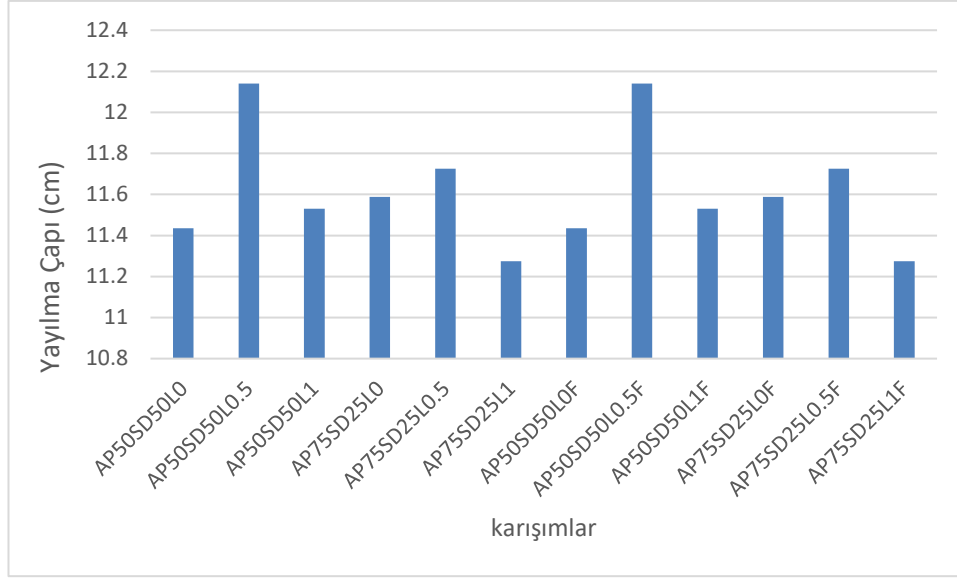
Ranjbar vd. (2016), genel olarak elyaf ilavesinin akışa karşı daha yüksek kayma

direnci sağladığını ve bunun da akışkanlığın azalmasına neden olduğunu açıklamıştır. Manoj ve Baboo (2019), polipropilen elyaflerin eklenmesinin çökme değerlerini azalttığını gözlemlemiştir. Karışımların azaltılmış çökmesinin büyük ölçüde elyafları düşük yoğunluğu ile ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer çalışmalar farklı tipte elyaflar kullanmış ve işlenebilirlik testi ile aynı sonuçları vermiştir. Meng vd. (2022), polietilen elyaf içeriğinin ve en-boy oranının artmasının işlenebilirliğin farklı derecelerde azalmasına neden olduğunu bulmuştur. İşlenebilirliğin azalması, elyaflar arasındaki etkileşimin neden olduğu iç akış direncinden kaynaklanmaktadır.

Junior vd. (2021), geopolimer harç karışımlarındaki akış, %1.5 polipropilen elyafların kullanılmasıyla %50'ye düşürülmüştür. Polipropilen elyafları tarafından büyük bir akış azalmasının nedeni, bu elyafları fazla tek tek filamentlere dağılmış olmasıdır. Demetlenmiş elyaflar filamentleştikçe, elyafları yüzey alanı önemli ölçüde artmakta ve bu da sıvı talebini artırmaktadır. Böylece, filamentli elyaflar, kısmen demetlenmiş elyaflarından daha fazla sıvı kullanmış ve demetlenmiş elyafları filamentleşmesinin artmasıyla harcın işlenebilirliği azalmıştır.

Ayrıca pomza içeriğinin artmasıyla yayılma çapının azaldığı da fark edilmiştir. Sonuç olarak, karışımların iyi işlenebilirliğini sağlamak için süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Madani vd. (2018) tarafından, pomza ve silis dumanının farklı içerikleri nedeniyle farklı dozlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Sabit bir silis dumanı seviyesinde, pomza içeriğinin artırılması, daha yüksek süperakışkanlaştırıcı içeriğine yol açmıştır. Bu, tüketilen pomzanın temelde volkanik bir malzeme olan gözenekli yapısından kaynaklanıyor gibi görünmektedir. Pomzanın çimentoya kıyasla daha düşük özgül ağırlığı da karışımlarda daha yüksek toz hacmine neden oldu ve bu da ultra ince parçacıkları ıslatmak için daha yüksek su talebine yol açmıştır.

Taze karışımlardaki hava içeriği yüzdesi sonuçları, karışımdaki elyaf içeriği arttıkça bir artış göstermektedir. AP50SD50 serisi, AP75SD25 serisinden daha yüksek bir hava içeriği yüzdesi göstermiştir. Yerleştirme, sıkıştırma ve taşıma sonucunda işlenebilirliği daha az olan harçta boşluklar oluşmaktadır. Ayrıca hava boşluklarının çoğu harcın karıştırılması sırasında oluşmaktadır. Bu boşluklar, başlangıçta kuru bileşenler arasında sıkışan havadan, karışım suyunda çözülmüş havadan ve karıştırma işleminin yoğurma ve katlama hareketi sonucunda oluşmakta ve son olarak bu hava karışımının içinde hapsolmektedir. Ancak, bu boşluklar yerleştirme ve taşıma sırasında kaybolabilmektedir (Chuah vd. 2016).

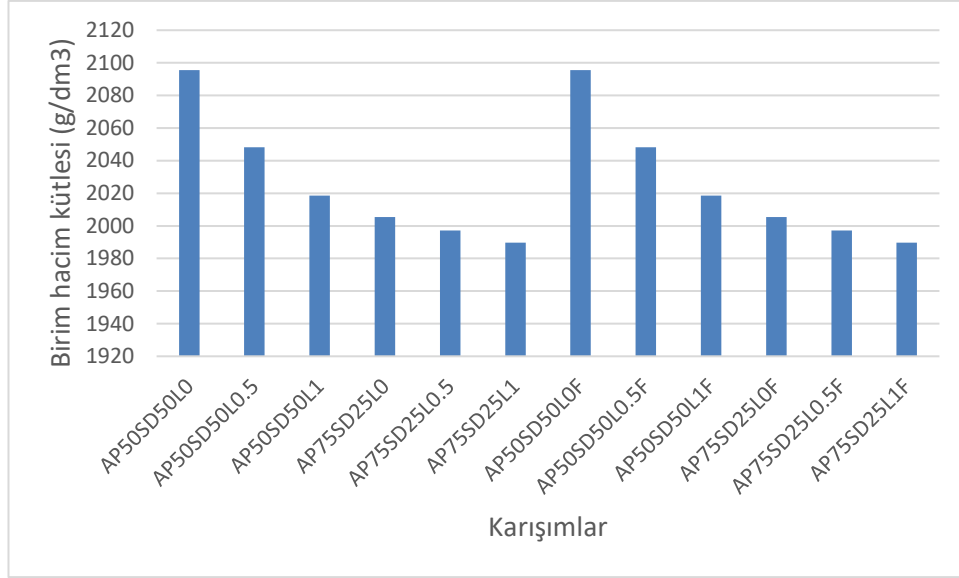


**Şekil 4.1.** Yayılma çapı değerleri

Taze harç birim hacim ağırlık deney sonuçları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Gözlemden sonra en yüksek değer olan  $2095.5725 \text{ g/dm}^3$  AP50SD50L0 karışımı için (%50 asidik pomza, %50 silis dumanı ve %0 elyaf içermektedir). AP75SD25L1 (%75 asidik pomza, %25 silis dumanı ve %1 elyaf) karışımı ise  $1989.645 \text{ g/dm}^3$  ile en düşük değere sahip olmuştur. Üretilen kontrol numunelerine göre pomza ve elyaf içeriğinin artmasıyla harç birim hacim ağırlığının azaldığı fark edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre; elyafın düşük özgül ağırlığı  $0.91 \text{ g/cm}^3$  olması nedeniyle elyaf içeriğinin artmasının taze harç hacmi birim ağırlığını azalttığı söylenebilmektedir.

Ranjbar vd. (2016), karışımın polipropilen elyaf (PP) içeriğinin artmasıyla uçucu kül bazlı geopolimerin yoğunluğunun ve polipropilenin düşük özgül ağırlığı nedeniyle teorik ağırlık kaybının azaldığını aynı sonuçları bulmuştur. PP içeriği olmayan numuneye kıyasla yoğunlukta bir azalma gözlemlenmiştir. Elyafın daha düşük özgül ağırlığı ve sıkıştırma güçlükleri nedeniyle matrisin yüksek gözenekliliğine bağlanmaktadır. Bu nedenle, taze halde elyaf kümeleri arasında sıkışan gözenekler, sertleştirilmiş matristeki yoğunluğun azalmasını yönetmektedir. Pomza içeriğinin artmasıyla birlikte AP75SD25 serisi için harçların taze birim ağırlığı azalmıştır. Silis dumanının özgül ağırlığından daha düşük olduğu için öğütülmüş asidik pomzanın özgül birim ağırlığına bağlanmaktadır.





**Şekil 4.2.** Harçların taze haldeki birim hacim kütleleri değerleri

## 4.2. Sertleştirilmiş Harçların Fiziksel Özellikleri Bulguları

### 4.2.1. Kuru yığın yoğunluk değerleri

Sertleşmiş harçların kuru yığın yoğunluk değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Kontrol numuneleri incelendiğinde en yüksek kuru yığın yoğunluk değeri AP50SD50L0 ve AP75SD25L0 numuneleri için  $1.99 \text{ g/cm}^3$ 'tür. AP75SD25L1F numunesi gösterirken, elde edilen en düşük değer  $1.87 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

AP50SD50 serisi göz önüne alındığında, laboratuvarında kürlenmiş ve yüksek sıcaklıklarda %0 elyaf içeren numuneler en yüksek kuru yığın yoğunluk değerini  $1.99 \text{ g/cm}^3$  gösterirken, en düşük değer  $1.93 \text{ g/cm}^3$  AP50SD50L1'de elde edilmiştir. AP75SD25 serisi göz önüne alındığında, %0 elyaf içeren ve laboratuvarında kürlenmiş numune en yüksek kuru kütle yoğunluk değerini  $1.99 \text{ g/cm}^3$ , AP75SD25L1 numunesi ise  $1.92 \text{ g/cm}^3$  ile en düşük değeri göstermektedir.

Genel olarak polipropilen elyaf miktarı arttıkça numunelerin kuru birim ağırlık değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak, elyafın düşük özgül ağırlığı ile karışıma giren polipropilen elyaf miktarının artmasıyla gözenek hacminin arttığı gösterilmektedir. Aynı sonuçlar başka literatürde de bulunmuştur. Yoosuk vd. (2021) yaptığı çalışmada aynı sonucu, polipropilen lifinin özgül ağırlığı kum ve uçucu külünden daha düşük olduğundan, artan polipropilen lif içeriği ile kuru birim ağırlığının azaldığını bulmuşlardır.

Ayrıca pomza içeriğinin artmasıyla kuru birim ağırlıkta bir miktar azalma olmuştur. Diğer araştırmalar da aynı sonuçları bulmuştur. Kabay vd. (2021) geopolimer harçların kuru birim ağırlığının  $1.873$  ile  $1.927$  arasında değiştiğini bulmuştur. Harçtaki pomza tozunun kademeli olarak artması yoğunluğu azaltmıştır. Jitha Mathew (2017), pomza tozu ilave edilerek harç yoğunluğunun azaldığını gösteren benzer sonuçlar bulmuştur.

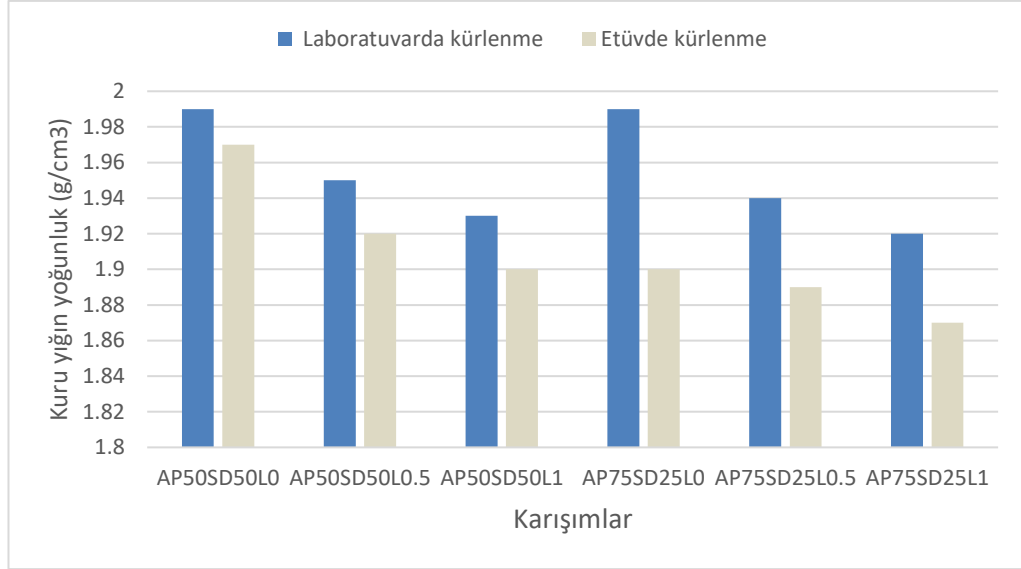
Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, AP50SD50 ve AP75SD25 serileri için iki kürlenme yöntemi arasındaki azalma oranı farklıdır. AP50SD50 serisi dikkate alındığında, laboratuvar koşullarında kürlenme ve yüksek sıcaklıkta kürlenme arasındaki kuru birim ağırlık, elyaf içeriği için sırasıyla %0, %0.5 ve %1 için %1.00, %1.54 ve %1.55 oranında azalmıştır. Elyaf içeriği %0.5 ve %1 için kuru birim ağırlıktaki azalma hızının aynı olduğu, elyafsız karışımın kuru birim ağırlığındaki değişim oranının daha düşük olduğu fark edilebilmektedir.

AP75SD25 serisi dikkate alındığında, laboratuvar koşullarında kürlenme ve yüksek sıcaklıkta kürlenme arasındaki kuru birim ağırlık sırasıyla %0, %0.5 ve %1 elyaf içeriği için %4.52, %2.58 ve %2.60 oranında azalmıştır. %0.5 ve %1 elyaf içeriği için kuru birim ağırlıktaki azalma hızının aynı olduğu, elyafsız karışımın kuru birim ağırlıktaki değişim oranının daha yüksek olduğu fark edilebilmektedir.

Bazı araştırmacılar, geopolimer harçlar üzerinde yüksek sıcaklıkta kürlenmenin aynı etkisini bulmuşlardır. Hamid vd. (2022) 60 °C'de kürlenme süresi 2 günden 6 güne çıktıkça tüm numuneler için yoğunluğun azaldığını bulmuştur. 6 günde tamamlanan bir polimerizasyon reaksiyonu nedeniyle bu normaldir ve daha fazla su buharlaşması meydana gelmektedir. Geopolimer hamurunun hazırlanmasında kullanılan pomza tozu oranının artmasıyla yoğunluk değerleri bir miktar azalmıştır. Bunun nedeni, pomza tozunun özgül ağırlığının, uçucu külün özgül ağırlığından daha az olmasıdır. Bu nedenle uçucu kül yüzdesi yüksek olduğunda yoğunluk değeri artmaktadır.

**Çizelge 4.2.** 28 günlük harçların kuru yığın yoğunluk değerleri

Karışım Kodu	Kuru yığın yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Karışım Kodu	Kuru yığın yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
AP50SD50L0	1.99	AP50SD50L0F	1.97
AP50SD50L0.5	1.95	AP50SD50L0.5F	1.92
AP50SD50L1	1.93	AP50SD50L1F	1.90
AP75SD25L0	1.99	AP75SD25L0F	1.90
AP75SD25L0.5	1.94	AP75SD25L0.5F	1.89
AP75SD25L1	1.92	AP75SD25L1F	1.87



**Şekil 4.3.** 28 günlük harçların kuru yığın yoğunluk değerleri

#### 4.2.2. Suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri

Karışımların suya doymun kuru yüzey kütle yoğunluğu değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4'te verildiği gibidir. Genel olarak, %0 elyaf içeren ve laboratuvar koşullarında kürlenmiş AP50SD50 ve AP75SD25 kontrol numuneleri,  $2.14 \text{ g/cm}^3$  su ile doymuş en yüksek kuru yüzey kütle yoğunluğuna sahipken, %1 elyaf içeren ve yüksek sıcaklık koşullarında kürlenmiş AP75SD25 numunesi ise  $2.09 \text{ g/cm}^3$  ile en düşük değerleri göstermiştir. Sonuçların elyaf içeriğindeki artışla birlikte hafif bir düşüş gösterdiği gözlemlenmektedir.

AP50SD50 serisi dikkate alındığında, AP50SD50L0 numunesi 28. gün için en yüksek kuru kütle yoğunluğu değerini  $2.14 \text{ g/cm}^3$  ile gösterirken, en düşük değerler AP50SD50L1 ve AP50SD50L1F karışımlarında elde edilen  $2.11$  ve  $2.10 \text{ g/cm}^3$  ile elde edilmiştir. AP75SD25 serisi dikkate alındığında, AP75SD25L0 karışımı için 28. gün için en yüksek kuru yığın yoğunluk değerleri  $2.14 \text{ g/cm}^3$  iken, AP75SD25L1F numunesi  $2.09 \text{ g/cm}^3$  ile en düşük değeri göstermektedir.

Polipropilen elyaf içeriğindeki artışla sonuçların hafif bir düşüş gösterdiği gözlemlenebilmekte, bu durum polipropilen elyafın pomza ve silis dumanına göre düşük özgül ağırlığına bağlanabilmektedir. Ranjbar vd. (2016), elyaf içeriğini arttırırken suya doymun kuru yüzey kütle yoğunluğu değerleri üzerinde aynı etkiyi gözlemlemiştir. Elyafı daha düşük özgül ağırlığı ile birlikte sıkıştırma güçlüklerinden dolayı matrisin yüksek gözenekliliğine atfedilen PP içeriği olmayan numuneye kıyasla %5 PP içerik matrisinde yoğunlukta yaklaşık %20 azalma gözlemlenmiştir. Shadnia vd. (2015), geopolimer harcının suya doymun kuru yüzey ağırlığının, daha fazla faz değiştiren malzeme dahil edildiğinde azaldığını bulmuştur. Geopolimer harçlardaki faz değişimi nedeniyle malzeme kumdan çok daha küçük özgül ağırlığa sahip olmasıdır. Sonuç olarak, harç bileşenlerinin yoğunluğunun azaltılması, üretilen harçların yığın yoğunluklarını da azaltacaktır (Gülmez ve Koçkal, 2021; Wazien vd. 2016).

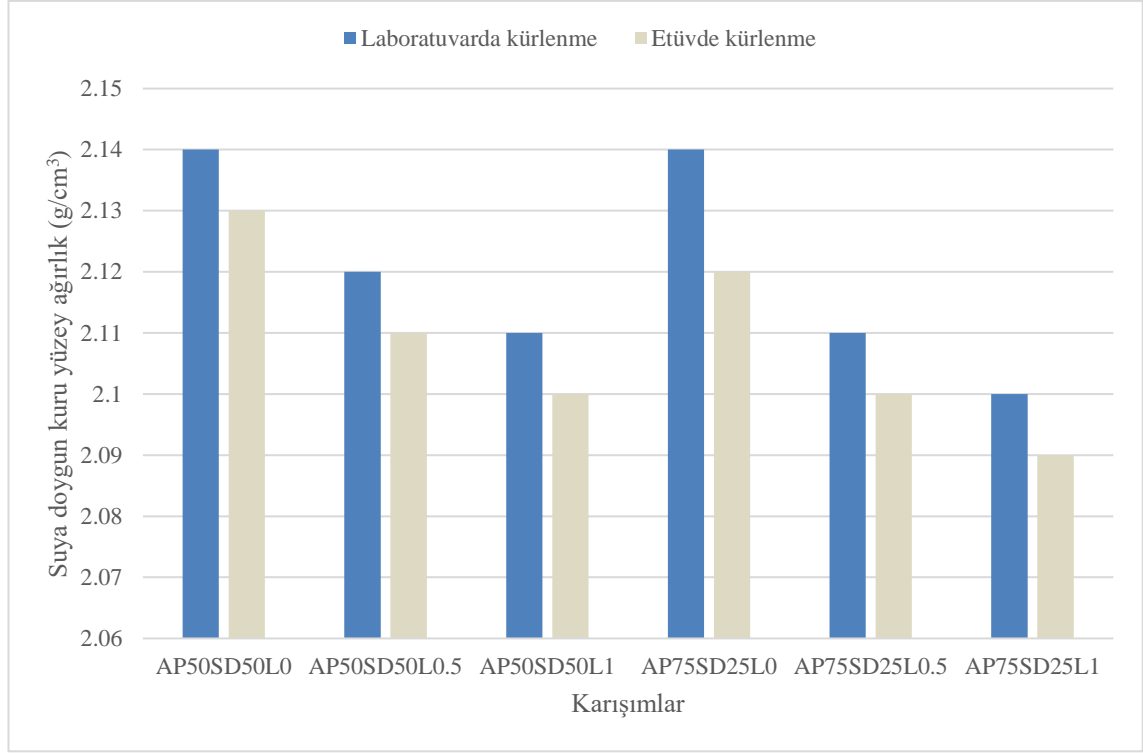
Ayrıca öğütülmüş asidik pomza içeriğinin artmasıyla suya doymun kuru yüzey kütle yoğunluğu değerleri azalmıştır. Bunun nedeni, bağlayıcı malzemelerin zayıf gradasyonu ve harç matrisi içindeki boşlukların varlığı olabilmektedir. Assi vd. (2018), kütle yoğunluğunun sonuçlarının, ortalama parçacık boyutu küçüldüğünde beton numunelerinin daha yoğun hale geldiğini gösterdiğini bulmuştur. Bu, boşlukların iyi derecelenmiş malzemedeki küçük uçucu kül parçacıkları tarafından doldurulmasına ve/veya geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumuna bağlanmaktadır.

Karışım AP75SD25L1F  $2.09 \text{ g/cm}^3$  ile en düşük yoğunluğu ve %11.88 ile en yüksek su emme değerini göstermiş, bu, sertleştirilmiş harç içinde geopolimerizasyon ürünlerinin bulunmamasına bağlanabilmektedir. Öğütülmüş asidik pomza içeriğinin yüksek olması nedeniyle silis dumanına kıyasla daha düşük reaktivite ve yüzey alanına sahiptir. Lemougnna vd. (2011) yaptığı çalışmada,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.2$  içeren numunenin, muhtemelen diğer karışımlardan daha az reaksiyon ürünü içerdiğinden, en düşük yoğunluğa ve en yüksek su absorpsiyonuna sahip olduğu benzer sonuçlar bulunmuştur.

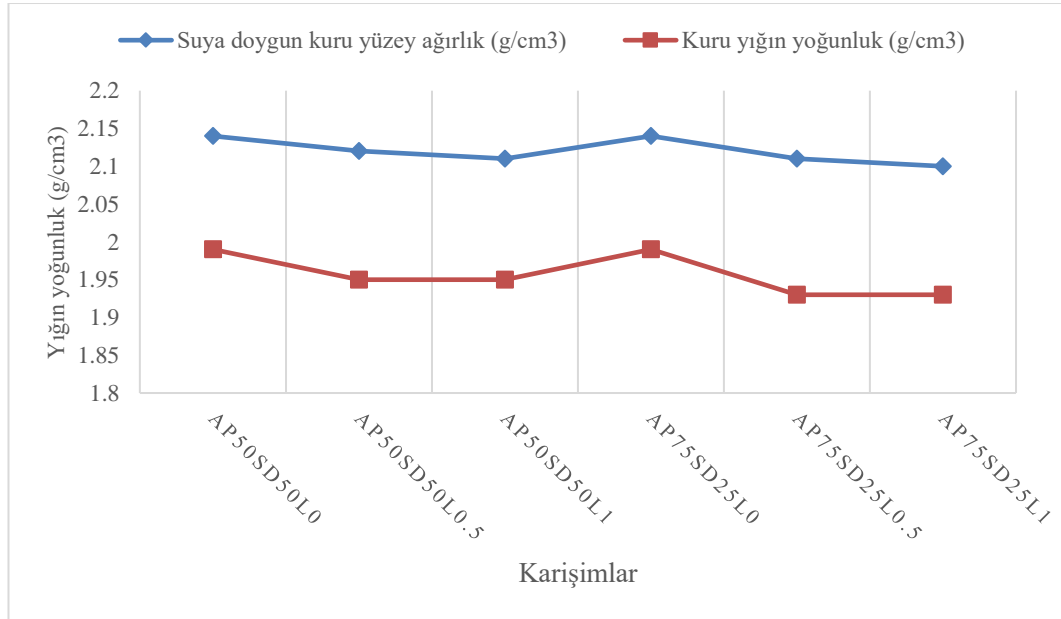
Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, iki kütleme yöntemi arasındaki azalma oranı, AP50SD50 ve AP75SD25 serileri için neredeyse benzerdir. Tüm karışımlar için laboratuvar koşullarında kür ile yüksek sıcaklıkta kür arasındaki suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri %0.47 oranında azalmıştır. Sadece AP75SD25L0 karışımı %0.94'lük farklı bir azalma oranına sahip olmuştur.

**Çizelge 4.3.** 28 günlük harçların suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri

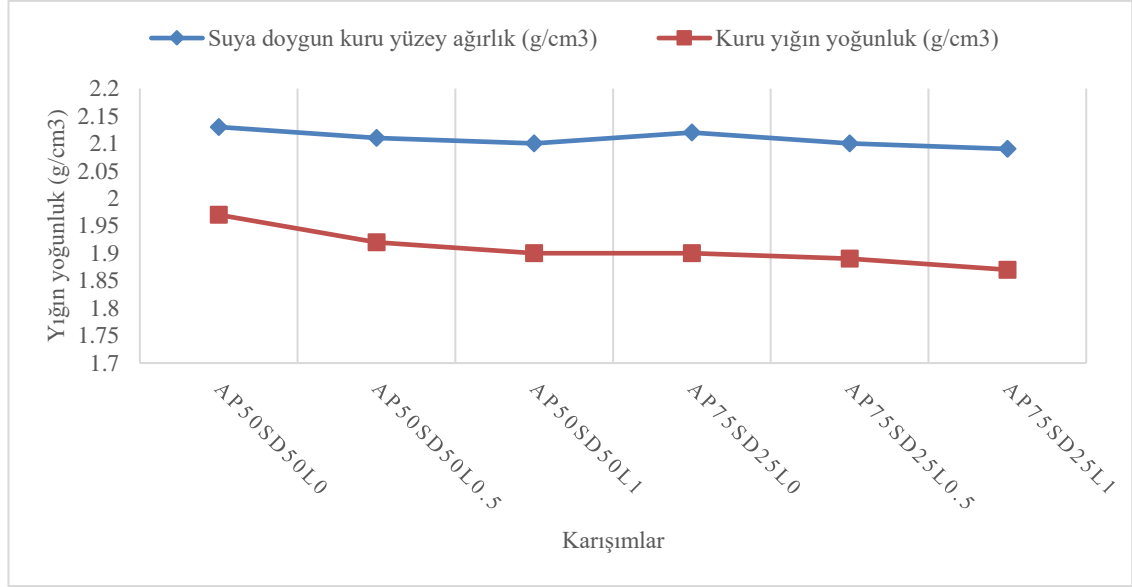
Karışım Kodu	Suya doymun kuru yüzey ağırlık ( $\text{g/cm}^3$ )	Karışım Kodu	Suya doymun kuru yüzey ağırlık ( $\text{g/cm}^3$ )
AP50SD50L0	2.14	AP50SD50L0F	2.13
AP50SD50L0.5	2.12	AP50SD50L0.5F	2.11
AP50SD50L1	2.11	AP50SD50L1F	2.10
AP75SD25L0	2.14	AP75SD25L0F	2.12
AP75SD25L0.5	2.11	AP75SD25L0.5F	2.10
AP75SD25L1	2.10	AP75SD25L1F	2.09



Şekil 4.4. 28 günlük harçların suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri



Şekil 4.5. Laboratuvarda kürleme sertleşmiş harçların kuru yığın yoğunluk, suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri



**Şekil 4.6.** Etüvde kürlenme sertleşmiş harçların kuru yığın yoğunluk, suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri

#### 4.2.3. Su emme yüzdesi değerleri

AP50SD50 serisi göz önüne alındığında, AP50SD50L1F numunesi 28. gün için %9.72 ile en yüksek su emme yüzdesi değerini gösterirken, en düşük değer AP50SD50L0 karışımı ile elde edilen %7.47 ile elde edilmiştir. Şekil 4.6 ve Çizelge 4.7, su emme yüzdesi değerlerinin sonuçlarını göstermektedir.

AP75SD25 serisi göz önüne alındığında, AP75SD25L1F karışımı için en yüksek su emme yüzdesi değeri %11.88 iken, AP75SD25L0 numunesi %7.77 ile en düşük değeri göstermektedir. AP50SD50 ve AP75SD25 serisi laboratuvar koşullarında kürlenmiş karışımlar için su emme yüzde değerleri sırasıyla %4.02, %15.63 ve %14.27 elyaf içeriği için %0, %0.5 ve %1 oranında artmıştır. Su emme yüzdesindeki artışın, sertleştirilmiş numuneler için boşluk oranındaki artıştan kaynaklandığı fark edilebilmektedir (Mermerdaş vd. 2017). Yüksek seviyedeki boşluklar, daha düşük bir sıkıştırma derecesine yol açan lif içeriğindeki artışa bağlanabilmektedir (Sathish Kumar vd. 2021).

Ek olarak, yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş ve %25 silis dumanı içeren karışımlar, %50 silis dumanı numunelerine kıyasla daha yüksek su emme yüzdesine sahip olmuştur. AP75SD25 serisi su emme yüzdesi, AP50SD50 serisine göre %0, %0.5 ve %1 elyaf içeriği için sırasıyla %48.07, %22.86 ve %22.22 artmıştır. Silis dumanı mineral katkıya aittir; yüksek reaktivitesi ve inceliği nedeniyle betonun mikroyapısal ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Ultra ince parçacıklar harçtaki boşlukları doldurmakta, bu da harcın mikro yapısını daha yoğun hale getirmektedir (Sarıdemir, 2013). Öğütülmüş asidik pomza daha düşük inceliğe sahipken, AP75SD25 serisinde pomza içeriğinin artması sonucunda boşluk oranı artmakta ve su emme yüzdesi de artmaktadır. İbrahim vd. (2020), silis dumanı değiştirme seviyesinin ağırlıkça %40'a kadar artmasıyla absorpsiyonun azaldığını ortaya koymuştur.

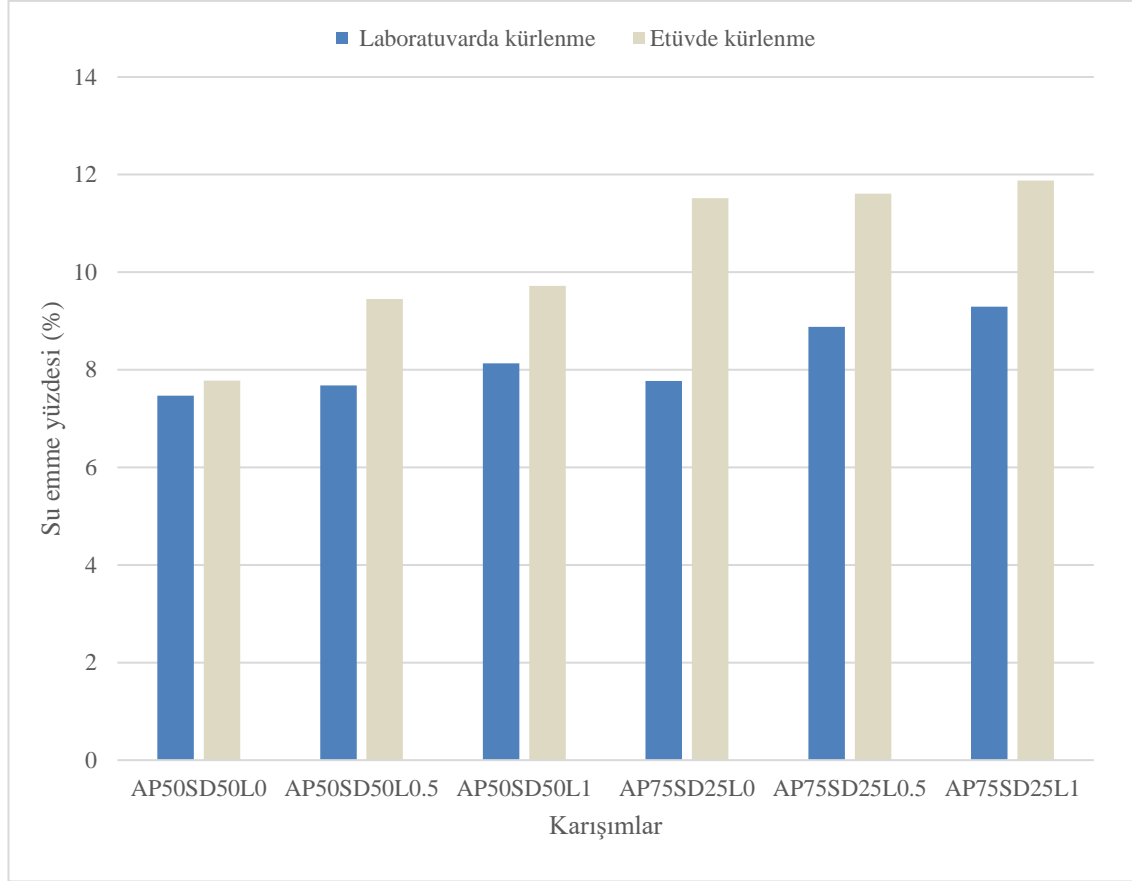
Kabay vd. (2021) tarafından, sonuçlar, pomza tozu içeriğinin %50'den %60'a çıkarılmasının su emme değerlerini ve boşluk içeriğini arttırdığını göstermektedir. Hamid vd. (2022) pomza ve uçucu külün karıştırılması, su emmesinin azalmasına neden olmuştur. Su emmesindeki azalma, optimum A/B oranı ile pomza tozu partikülleri (boyut olarak daha büyük olan) arasına müdahale eden uçucu kül partiküllerinin yüksek inceliğinden kaynaklanabilmektedir. Polimerizasyon işleminde gözenekler kapatılmakta, böylece su emmesi azalmaktadır. P100% ve P80% olan numunelerde A/B oranı düşük olduğunda alkali aktive edici çözelti polimerizasyon işlemini tamamlamak için yeterli olmadığı için su emmesi artmakta ve boşluklar oluşmaktadır.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, iki kütleme yöntemi arasındaki su emme değeri artışı hem AP50SD50 hem de AP75SD25 serileri için elyaf içeriği için %0.5 ve %1 için benzerdir. AP50SD50 serisi dikkate alındığında, laboratuvar koşullarında kütleme ve yüksek sıcaklıkta kütleme arasındaki su emme değerleri sırasıyla %0, %0,5 ve %1 elyaf içeriği için %4.15, %23.05 ve %19.56 artmıştır. AP75SD25 serisi dikkate alındığında, laboratuvar koşullarında kütleme ve yüksek sıcaklıkta kütleme arasındaki su emme değerleri sırasıyla %0, %0.5 ve %1 elyaf içeriği için %48.26, %30.74 ve %27.88 artmıştır. Su emme artış hızının %0.5 ve %1 elyaf içeriği için aynı olduğu, elyafsız karışımın ise karışım AP75SD25 için daha yüksek bir değişim hızına sahip olduğu fark edilebilmektedir.

Sonuçlardan, yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerde, oda sıcaklığında kürlenmiş numunelere göre su emme değerindeki artış, harç matrisi içindeki su parçacıklarının buharlaşmasının neden olduğu yüksek boşluk oranına atfedilebilmektedir. Tippayasam vd. (2016), ısıtılmış işlem görmüş numunelerin su emme ve görünür gözenekliliğinin, ısıtılmış işlem görmemiş numunelere göre daha yüksek olduğunu bulmuştur. Bu durumun nedeni, geopolimerden suyun kaybolması, daha sonra yapıların içinde porozitelerin oluşması ve bu nedenle önceki örneklerin yığın yoğunluğunun sonrakilere göre daha düşük olmasıdır. Geopolimerlerin su emmesi, kütle yoğunluğu ve görünür gözenekliliği, basınç dayanımını etkilemiyordu. Djobo vd. (2016) 80 °C sıcaklıkta kürlenmiş numunenin su emmesinin, 27 °C sıcaklıkta kürlenmiş numuneden daha büyük olduğunu bulmuşlardır.

**Çizelge 4.4.** 28 günlük harçların su emme yüzdesi değerleri

Karışım Kodu	Su emme yüzdesi (%)	Karışım Kodu	Su emme yüzdesi (%)
AP50SD50L0	7.47	AP50SD50L0F	7.78
AP50SD50L0.5	7.68	AP50SD50L0.5F	9.45
AP50SD50L1	8.13	AP50SD50L1F	9.72
AP75SD25L0	7.77	AP75SD25L0F	11.52
AP75SD25L0.5	8.88	AP75SD25L0.5F	11.61
AP75SD25L1	9.29	AP75SD25L1F	11.88



Şekil 4.7. 28 günlük harçların su emme yüzdesi değerleri

#### 4.2.4. Görünür boşluk oranı değerleri

Boşluk oranı sonuçları Şekil 4.6 ve Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. AP50SD50 serisi göz önüne alındığında, AP50SD50L1F numunesi 28. gün için en yüksek görünür boşluk oranı değerini %18.89 ile gösterirken, en düşük değer AP50SD50L0 karışımı ile elde edilen %14.88 ile elde edilmiştir. Polipropilen elyaf ilavesi, görünür gözenekliliği arttırmaktadır, bunun malzemenin içindeki zayıf sıkıştırma ve yüksek boşlukların sonucu olduğuna inanılmaktadır. Polipropilen elyaf oldukça esnek bir malzemedir ve yüksek hacimli bir fraksiyonda sıkıştırma oldukça zorlaşmakta ve geopolimer matrisinin gevşek ve gözenekli olmasına neden olmaktadır (Sukontasukkul vd. 2018).

Literatürde de benzer sonuçlar bulunmuştur. Toutanji vd. (1998), polipropilen elyafların eklenmesi, düz betonun (silis dumanı olmadan) gözenekliliğini arttırmıştır. Bunun nedeni, polipropilen elyafların, çimento matrisinin kohezyon eksikliği ve elyafların zayıf dağılımı nedeniyle düz betondaki boşluk içeriğini arttırdığı gerçeğine bağlanmaktadır. Silis dumanının eklenmesi, polipropilen elyaf takviyeli betonun gözenekliliğinde bir azalmaya neden olmuştur. Gözeneklilikteki azalma, matris kohezyonunun neden olduğu elyafların verimli dağılımının bir göstergesidir. %5 silis dumanının eklenmesi, gözeneklilikte önemli bir azalma ile sonuçlanmıştır.

AP75SD25 serisi dikkate alındığında, AP75SD25L1F karışımı için en yüksek görünür boşluk oranı değeri %21.69 iken, AP75SD25L0 numunesi %15.42 ile en düşük



değeri göstermektedir. Su emme yüzdeleri değerleri bu sonuçları desteklemektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş ve %25 silis dumanı içeren karışımlar, %50 silis dumanı numunelerine kıyasla daha yüksek görünür gözeneklilik yüzdesine sahip bulmuştur. AP75SD25 serisi görünür gözeneklilik yüzdesi, AP50SD50 serisine göre artmış, değerler elyaf içeriği için sırasıyla %0, %0.5 ve %1 için %42.22, %10.49 ve %19.50 artmıştır.

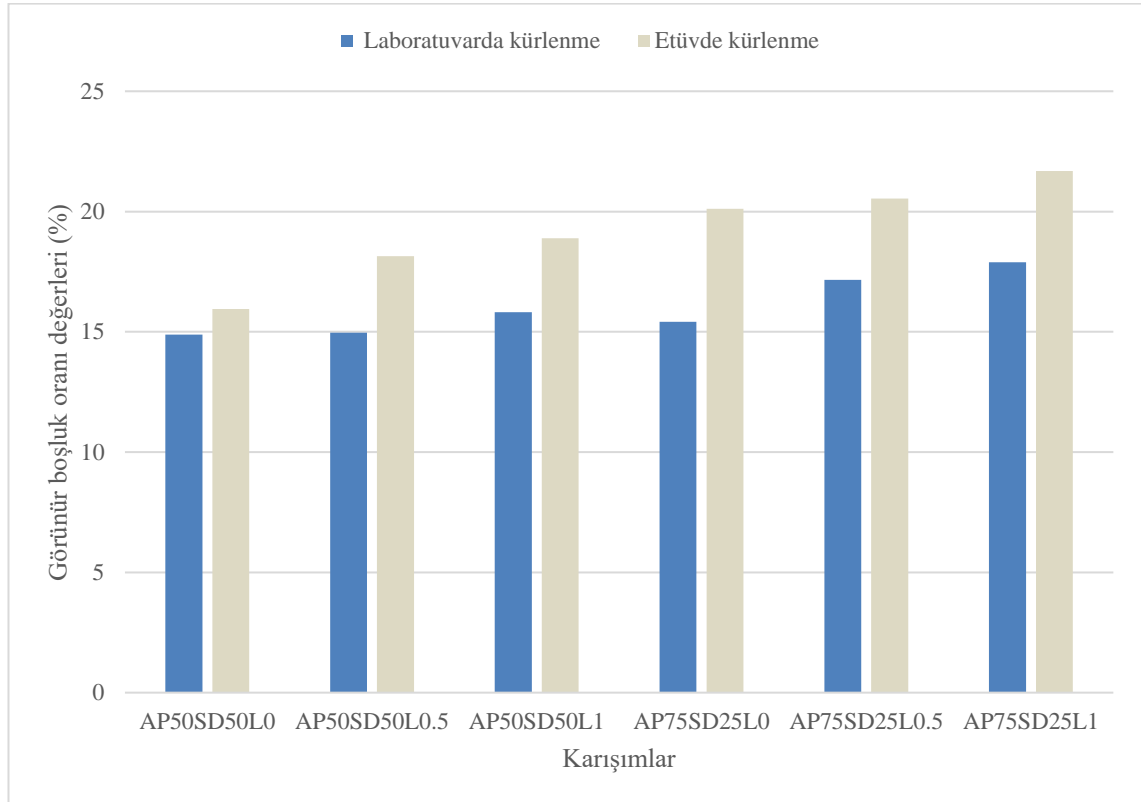
Diğer araştırmacılar, alkali aktivatörün konsantrasyonunun, geopolimerizasyon oranına atfedilebilecek olan geopolimer harçlar için görünen gözeneklilik oranını etkilediğini bulmuşlardır. Görhan ve Kürklü (2014), 65 °C'de kürlenmiş numunelerin, özellikle 6 M NaOH konsantrasyonuna sahip numunelerin daha gözenekli bir yapıya sahip olduğunu bulmuştur. Ancak kür süresinin artmasıyla bu ilişki tersine dönmüş ve 24 saat kürlenmiş harçlarda (3, 6 ve 9M) NaOH konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak gözeneklilik artmıştır.

Su, geopolimerlerin sentezinde anahtar bir rol oynamaktadır. Bir yandan su, alüminosilikat öncüllerinin çözünmesi ve türleşme için ortamdır. Ayrıca su, Al ve Si monomerik ve oligomerik türlerin çeşitli iyon transferlerine ve polikondenzasyonuna yardımcı olmaktadır. Su, geopolimerizasyonda reaktif bir ortam olmadığı için geopolimerizasyon tamamlandıktan sonra matris içinde hapsolmuş halde kalmaktadır (Chuah vd. 2016). Su emme ve görünür gözenekliliğin iki fiziksel özelliği, geopolimer numunelerinde açık ve kapalı gözeneklerin varlığı ile ilgilidir. Bu tür boşlukların mevcudiyeti genellikle geopolimerizasyon reaksiyonunda yer almayan sudan gelen suyun serbest kalmasından kaynaklanmaktadır (Djobo vd. 2016).

Ayrıca, öğütülmüş asidik pomzanın artmasıyla görünür boşluk oranı arttığı fark edilmiştir. Laboratuvar koşullarında kürlenmiş karışımlar için AP75SD25 serisi, AP50SD50 serisine kıyasla daha yüksek görünür gözeneklilik değerlerine sahiptir; bu değerler elyaf içeriği için sırasıyla %0, %0.5 ve %1 için %3.63, %13.16 ve %14.63 artmıştır. Madani vd. (2018) çalışmasında benzer sonuçlar varılmıştır. Pomzanın %40 ve %60 yer değiştirme seviyelerinde daha yüksek görünen gözeneklilik değerleri gözlemlenmiştir, Amorf pomzanın CSH üretmek için kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kimyasal olarak suyu bağlamadığı gösterilmiştir. Bu nedenle puzolanik reaksiyonlar çimento karışımlarının serbest suyunu önemli ölçüde azaltmamıştır. Öte yandan, çimentonun pomza ve silis dumanı ile ikame edilmesi, çimento içeriğinde bir azalmaya yol açmakta, bu nedenle çimento hidrasyonunda daha az su tüketilmektedir. Sonuç olarak, daha yüksek toplam gözeneklilik içeriği üretilmektedir.

**Çizelge 4.5.** 28 günlük harçların görünür boşluk oranı değerleri

Karışım Kodu	Görünür boşluk oranı değerleri (%)	Karışım Kodu	Görünür boşluk oranı değerleri (%)
<b>AP50SD50L0</b>	14.88	<b>AP50SD50L0F</b>	15.95
<b>AP50SD50L0.5</b>	14.97	<b>AP50SD50L0.5F</b>	18.15
<b>AP50SD50L1</b>	15.81	<b>AP50SD50L1F</b>	18.89
<b>AP75SD25L0</b>	15.42	<b>AP75SD25L0F</b>	20.12
<b>AP75SD25L0.5</b>	17.16	<b>AP75SD25L0.5F</b>	20.54
<b>AP75SD25L1</b>	17.89	<b>AP75SD25L1F</b>	21.69

**Şekil 4.8.** 28 günlük harçların görünür boşluk oranı değerleri

### 4.3. Sertleştirilmiş Harçların Mekanik Özelliklerine İlişkin Bulgular

#### 4.3.1. Eğilme dayanımı testi değerleri

Eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.9 ve Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Oda sıcaklığında kürlenmiş AP50SD50 serisi dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları, elyaf içeriği için sırasıyla %0, %0.5 ve %1 için 3.19, 3.75 ve 4.42 MPa'dır. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla %0 %0.5 ve %1 elyaf içeriği için 3.98, 7.67 ve 7.80 MPa çıkmıştır. Karışım AP50SD50L1, 7 ve 28 gün için en yüksek eğilme dayanımı sonucunu gösterirken, AP50SD50L0 7 ve 28 gün için en düşük sonuçları göstermiştir.

Yüksek sıcaklıkta kürlenmiş AP50SD50 serisi dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla %0, %0.5 ve %1 elyaf içeriği için 3.99, 4.29 ve 4.29 MPa olmuştur. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla %0, %0.5 ve %1 elyaf içeriği için 7.54, 7.96 ve 9.27 MPa elde edilmiştir. Karışım AP50SD50L1F, 7 ve 28 gün boyunca en yüksek eğilme dayanımı sonucunu gösterirken, AP50SD50L0F 7 ve 28 gün için en düşük sonuçları göstermiştir.

Oda sıcaklığında kürlenmiş AP75SD25 serisi dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları, elyaf içeriği için sırasıyla %0 %0,5 ve %1 için 3.34, 4.03 ve 4.78 MPa olmuştur. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla %0 %0,5 ve %1 elyaf içeriği için 5.65, 6.05 ve 7.54 MPa'dır. Karışım AP75SD25L1, 7 ve 28 gün için en yüksek eğilme dayanımı sonucunu gösterirken, AP75SD25L0 7 ve 28 gün için en düşük sonuçları göstermiştir.

Yüksek sıcaklıkta kürlenmiş AP75SD25 serisi dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla %0, %0,5 ve %1 elyaf içeriği için 2.05 , 2.29 ve 2.31 MPa olmuştur. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla %0, %0.5 ve %1 elyaf içeriği için 2.76, 4.17 ve 5.17 MPa çıkmıştır. Karışım AP75SD25L1F, 7 ve 28 gün boyunca en yüksek eğilme dayanımı sonucunu gösterirken, AP75SD25L0F 7 ve 28 gün için en düşük sonuçları göstermiştir.

Genel olarak, yüksek sıcaklıkta kürlenmiş AP75SD25 numuneleri, yüksek boşluk oranına atfedilebilecek en düşük eğilme dayanımı değerlerine sahiptir. Eğilme dayanımı, agregalar ve hamur arasındaki bağa büyük ölçüde bağlıyken, ısıyla kürlenme, agrega/jel ara yüzünü, jelin kendisinin mukavemetini arttırmakla aynı derecede geliştirebilmektedir. AP75SD25 karışımlarının eğilme dayanımındaki zayıflığı, suyun yokluğunda kürlenmenin yüksek sıcaklığı ile ilgili görünmektedir. Çünkü kapalı kürlenme koşulunda, özellikle macun ve agrega ara yüzeyinde, macun bağlama özelliklerini geliştirmek için su yeniden doldurulamaz (Bondar vd. 2011).

Huseien vd. (2016), sodyum hidroksit (NH) ve sodyum silikat (NS) çözeltisi ile aktive edilen ve 27 °C ortam sıcaklığında kürlenmiş numunelerin çekme dayanımının 60 °C gibi yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş numunelere göre daha yüksek dayanım gösterdiğini bulmuştur. 90 °C Çözüm türlerinin etkileri de araştırılmıştır. Yüksek fırın çürüfünün alkali ile aktivasyonunun Ca'yı çözebildiği, buna karşın Si ve Al'in CSH ve CASH jeli oluşturmaya katıldığı ve böylece mekanik dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.6.** Karışımların eğilme dayanımı değerleri (MPa)

Karışım Kodu	7 Gün (MPa)	28 Gün (MPa)
<b>AP50SD50L0</b>	3.19	3.98
<b>AP50SD50L0.5</b>	3.76	7.67
<b>AP50SD50L1</b>	4.42	7.80
<b>AP75SD25L0</b>	3.33	5.65
<b>AP75SD25L0.5</b>	4.03	6.05
<b>AP75SD25L1</b>	4.78	7.54
<b>AP50SD50L0F</b>	3.99	7.54
<b>AP50SD50L0.5F</b>	4.29	7.96
<b>AP50SD50L1F</b>	4.29	9.27
<b>AP75SD25L0F</b>	2.05	2.76
<b>AP75SD25L0.5F</b>	2.29	4.17
<b>AP75SD25L1F</b>	2.31	5.17

AP50SD50 numunelerini her iki kürleme rejiminde de incelerken, yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin oda sıcaklığında kürlenmiş numunelere kıyasla eğilme dayanımı değerlerinde 28 günde %89, %4 ve %19 elyaf içeriği için %0, %0.5 ve %1 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Diğer araştırmacılar, ısıyla kürlenme etkisi ile ilgili aynı sonuçları elde etmişlerdir. Kaya vd. (2018), 28 günün sonunda geopolimer harç numuneleri 2.9 MPa ile 8.51 MPa arasında eğilme dayanımı değerleri geliştirmiştir. Genel olarak, geopolimer harçlar, kontrol çimento harcı karışımına kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans sergilemiştir. Haddad ve Alshbuol (2016), sonuçlarından, geopolimer betonun eğilme dayanımının, 80 °C'ye kadar oda sıcaklığından daha yüksek kür sıcaklıkları ile arttığını ve daha sonra azaldığını göstermektedir.

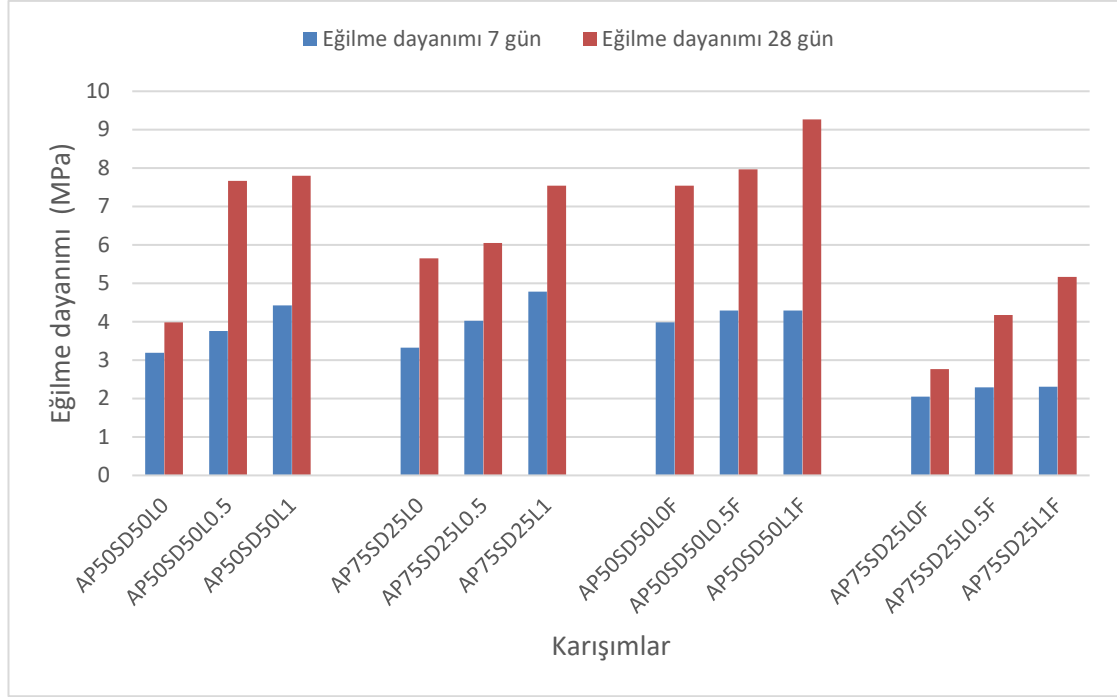
Ayrıca elyaf içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımı değerlerinin arttığı not edilebilmektedir. Bu bulgu, birçok araştırmanın bulgusu ile uyumludur. Mohammed vd. (2021), polipropilen elyaf ile takviye edilmiş metakoalin esaslı geopolimer betonun mekanik davranışının, ortam sıcaklığında ve deneysel sonuçlarla önemli ölçüde iyileştirildiği sonucuna varmışlardır. %1 polipropilen elyaf ile basınç dayanımı %14.75 artarken, yarma çekme dayanımındaki artış sırasıyla %12.3, %15.76 olmuştur. Elyaf olmayan geopolimer beton ile karşılaştırıldığında numunelerin eğilme dayanımı de iyileştirilmiştir. %1.5 elyaf hacim içeriği ile elde edilen en yüksek artış %27.3 olmuştur.

Chindaprasirt ve Rattanasak (2017), sonuçların, kompozitlere polipropilen elyafın (PP) dahil edilmesinin, gelişmiş çekme dayanımı ve çatlak kontrolüne yol açtığını gösterdiğini bulmuştur. PP elyaf /uçucu kül geopolimer kompozitlerinin çekme dayanımları, sıfır elyaf geopolimer numunelerinden biraz daha yüksektir. Yoosuk vd. (2021), polipropilen elyafın içeriğinin %2.5'e kadar artmasıyla eğilme dayanımındaki artış, çatlaklar arasında elyaf köprüleme etkisinden kaynaklandığını bulmuştur. Polipropilen elyafın içeriği optimum içeriğin üzerine çıktığında, karıştırma zorluğu ve düzgün elyaf dağılımının olmaması nedeniyle eğilme dayanımı kademeli olarak azalmış, bu da işlenebilirliğin azalmasına ve gözenekliliğin artmasına neden olmuştur.

Öte yandan asidik pomza içeriğindeki %75'e varan artışın eğilme dayanımı değerlerine olumlu bir etkisi olmamıştır. 28 günde AP75SD25 numunesinin eğilme dayanımı değerleri, %0 elyaf içeren numune için oda sıcaklığında kürlenmiş AP50SD50 numunesine göre %42 azalmıştır. Ayrıca %0.5 ve %1 elyaf içeriği için eğilme dayanımı değerleri %21 ve %3 oranında azalmıştır. Partikül boyutu dağılımı, reaksiyonun önemli bir kısmı partikül-sıvı ara yüzeyinde meydana geldiğinden, alüminosilikatların geopolimer sentezini ve sonuçta ortaya çıkan ürünleri etkileyen önemli fiziksel parametrelerden biridir (Diaz vd. 2010). Böylece, belirli bir alüminosilikat hammaddesi için, daha küçük ve daha gözenekli mikro yapı parçacıkları, daha büyük spesifik yüzey alanı ve bir alkali ortamda daha fazla aktive olmaktadır (Tchakoute vd. 2013). Pomza, silis dumanına kıyasla puzolanik bir malzeme olarak düşük bir yüzey alanına sahip olduğundan, AP75SD25 serisinde öğütülmüş asidik pomza içeriğinin artmasıyla daha düşük dayanıma katkıda bulunan düşük puzolanik reaktiviteye sahiptir.

Diğer araştırmacılar, silis dumanı içeriğini artırarak aynı sonuçları bulmuşlardır, ayrıca eğilme dayanımı da artmaktadır. Ibrahim vd. (2020), silis dumanının metakaolin bazlı geopolimer harçların özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar, silis dumanı değiştirme seviyesinin %40'a kadar artırılmasıyla eğilme dayanımının arttığını göstermiştir. Artış, oda sıcaklığında kürlenmiş silis dumanının %10, 20, 30 ve %40'luk seviyelerinde (%6.67, 20, 30 ve %43.3) olmuştur. Pomza geopolimer ile uçucu kül geopolimer arasındaki davranış farklı edilmektedir. Bunun nedeni, geopolimerlerin eğilme dayanımını etkileyen önemli faktörlerden olan incelik ve kimyasal bileşim bakımından aralarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır (Hamid vd. 2022).

Ayrıca diğer araştırmacılar, alkalin/bağlayıcı oranının üretilen harçların dayanımı üzerinde bir etkisi olduğunu bulmuştur. Haddad ve Alshbuol (2016) yaptığı çalışmada 0.45'lik bir alkali sıvı/pomza oranında karışım için optimal dayanıma ulaşıldığını bulmuştur. Bu, alkali ve pomza içeriği arasında, reaksiyona girmemiş pomza ve yaratılan iç gözeneklerin minimumda olacağı şekilde belirli bir dengenin sağlanması gerektiğini öne sürmüştür.



**Şekil 4.9.** Harçların eğilme dayanımı değerleri

#### 4.3.2. Basınç dayanımı testi değerleri

Basınç dayanımı testi sonuçları Şekil 4.10 ve Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Oda sıcaklığında kürlenmiş AP50SD50 serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 7. gün ve 28. gün için sırasıyla 12.09 ve 20.40 MPa olmak üzere AP50SD50L1 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 8.51 ve 16.59 MPa olmak üzere AP50SD50L0 numunesinde elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta kürlenmiş AP50SD50 serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 7. gün ve 28. gün için sırasıyla 15.04 ve 20.98 MPa olmak üzere AP50SD50L1F numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 10.71 ve 18.17 MPa olmak üzere AP50SD50L0F numunesinde elde edilmiştir.

Oda sıcaklığında kürlenmiş AP75SD25 serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 7. gün ve 28. gün için sırasıyla 9.59 ve 15.36 MPa olmak üzere AP75SD25L1 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 7.28 ve 12.63 MPa olmak üzere AP75SD25L0 numunesinde elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta kürlenmiş AP75SD25 serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 7. gün ve 28. gün için sırasıyla 7.19 ve 11.72 MPa olmak üzere AP75SD25L1F numune gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 6.19 ve 11.03 MPa olmak üzere AP50SD50L0F numunesinde elde edilmiştir.

Sonuçlar, elyaf içeriğinin artmasıyla birlikte, %1 elyaf içeriği için 28 günde basınç dayanımının da %23'e kadar arttığını göstermektedir, bu da elyaf takviyeli geopolimerler üzerine yapılan diğer araştırmalarla uyumludur. Mohammed vd. (2021), basınç dayanımının %1 polipropilen elyaf ile %14.75 iyileştirilmiştir. Bu, bir matriste geliştirildiğinde bu çatlakları durdurarak mikro çatlakların yayılmasını önlemede elyafın rolüne atfedilebilmektedir. Bu, mikro çatlakların kıvrımlı bir yol almasını sağlamaktadır.

Bu nedenle, nihai yükte artışa neden olan daha fazla çatlağı yaymak için daha fazla enerji gerekmektedir. Ayrıca elyaf içeriğinin %1.5'e kadar arttırılması, basınç dayanımının %8.2 oranında azalmasına neden olmuştur.

Arumugam vd. (2018) tarafından yapılan deneyi sonuçları, diğer kombinasyonlara kıyasla %2.5 oranındaki polipropilen elyafların basınç dayanımında %73.47 oranında artışa neden olduğunu göstermiştir. Arunkumar vd. (2020), polipropilenin odun külü-uçucu kül bazlı geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Her yaşta, %1 PP elyaf ilavesi nedeniyle basınç dayanımında bir artış vardır. Elyaf içeriğinin %1'e kadar arttırılması, kontrol geopolimer betona kıyasla basınç dayanımının %3.7 artmasıyla sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, elyaf içeriğinin %1'in üzerine çıkarılması, basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur.

D.Kalai Arul Selvi vd. (2020) geopolimer betonun basınç dayanımının konvansiyonel betona göre %24.79 daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Polipropilen elyafa ek olarak, elyaf takviyeli geopolimer beton, %0.2 elyaf içeriğine kadar geopolimer betondan %4.1 daha fazla dayanım elde etmektedir. Bununla birlikte, elyaf içeriğinin %0.2'nin üzerine çıkarılması, basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur.

Öte yandan asidik pomza içeriğindeki %75'lik artışın basınç dayanımı değerlerine olumlu bir etkisi olmamıştır. AP75SD25 numunesinin 28 günde basınç dayanımı değerleri, oda sıcaklığında kürlenmiş AP50SD50 numunesine göre %0, %0.5 ve %1 elyaf içeren numune için 24%, 30% ve 26% azalmıştır. Bu, öğütülmüş asidik pomza ve silis dumanının kimyasal bileşimi ve mineralojik bileşimindeki farklılıkla açıklanmaktadır. Silis dumanı mineral katkıya aittir; yüksek reaktivitesi ve inceliği nedeniyle betonun mikroyapısal ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Silis dumanı ilavesiyle fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki iyileşme şu şekilde açıklanmıştır: ultra ince partiküller harçtaki boşlukları doldurur, bu da harcın mikro yapısını daha yoğun hale getirmektedir (Sarıdemir, 2013; Madani vd. 2018). Diğer yazarlar da aynı sonuçları kendi çalışmalarında tespit etmişlerdir.

Kabay vd. (2021), harç karışımlarının basınç dayanımı sonuçları, PT içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı kademeli olarak azalmış ve geopolimer harçların basınç dayanımı 10.6 ile 24.5 MPa arasında değişmiştir. Hossain (2005) sonuçlardan, pomza içeriğindeki artışla birlikte basınç dayanımının genel olarak azaldığını bulmuştur. Çimento ikamesi olarak %10, %20, %30 ve %40 pomza içeriği için basınç dayanımı değerleri 34, 30, 28 ve 24 MPa olmuştur.

Madani vd. (2018) yaptığı çalışmadan, 28 gündeki sonuçlar benzer pomza ikame seviyesinde, silis dumanı içeriğinin arttırılmasıyla basınç dayanımlarının arttığını göstermektedir. Bunun nedeni, silis dumanının 7 gün ile 28 gün arasındaki önemli reaktivitesidir. Silis dumanının agregasyon durumuna rağmen, bu malzemenin 100-200 nm boyutlarında çok ince partiküllere sahip olduğu belirtilmelidir. Parçacık boyutunun puzolanik reaktivite hızı üzerinde baskın bir faktör olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle silis dumanı, pomza ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek puzolanik reaktiviteye sahiptir. Ayrıca, daha yüksek pomza ikame seviyelerinde daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.

Rashiddadash vd. (2014), ek çimento esaslı malzeme olarak kullanılan %0.75 çelik elyaflar ve %0.25 polipropilen elyaflar içeren pomza içeren hibrit elyaflı betonarme üzerinde çalışmıştır. Pomza içeriğindeki artışa bağlı olarak basınç dayanımında belirgin bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Düz ve pomza modifiyeli betonlar için basınç dayanım değerleri sırasıyla 18–44 MPa ve 16.7–37.6 MPa arasında değişmiştir. Özellikle pomza ile birleştirilen betonların erken ve uzun vadeli basınç dayanımının, esas olarak pomza ikame seviyesine bağlı olarak düz betonlara göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Hamid vd. (2022) hamur içeriği %100 Pomza olduğunda, karışımda gösterildiği gibi 28 günlük yaştaki basınç dayanımı (60 °C'de 6 günlük kürleme) 31.02 MPa iken, maksimum basınç dayanımı 69.90 MPa karışımında gösterildiği gibi %100 uçucu kül içeren hamur olmuştur. Bağlayıcıda UK ikame yüzdesi artarsa, basınç dayanımının arttığı bulunmuştur. Bu, iyi bir geopolimer bağlayıcı üretmek için uçucu küllü pomzanın kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Pomza geopolimeri ile UK geopolimeri arasındaki davranış farklı bulunmuştur. Bunun nedeni, geopolimerlerin basınç dayanımını etkileyen önemli faktörler arasında yer alan incelik ve kimyasal bileşim bakımından aralarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 4.7.** Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa)

Karışım Kodu	7 Gün (MPa)	28 Gün (MPa)
<b>AP50SD50L0</b>	8.51	16.59
<b>AP50SD50L0.5</b>	11.64	19.54
<b>AP50SD50L1</b>	12.09	20.40
<b>AP75SD25L0</b>	7.28	12.63
<b>AP75SD25L0.5</b>	8.86	13.64
<b>AP75SD25L1</b>	9.59	15.36
<b>AP50SD50L0F</b>	10.70	18.17
<b>AP50SD50L0.5F</b>	14.55	18.70
<b>AP50SD50L1F</b>	15.04	20.98
<b>AP75SD25L0F</b>	6.19	11.03
<b>AP75SD25L0.5F</b>	6.60	11.36
<b>AP75SD25L1F</b>	7.19	11.72



Yüksek ısı sıcaklığında kürlenme ve süre, geopolimer harçların basınç dayanımını etkilemektedir. Bu çalışmada, iki kür yöntemi arasında basınç dayanımında önemli bir değişiklik olmuştur. AP50SD50 serisi için, %0 ve %1 elyaf içeren yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numuneler için basınç dayanımı 28 günde %4 ve %3 artmıştır. Bu arada %0.5 elyaf içeren numune için basınç dayanımı 28 günde %4 azalmıştır. AP75SD25 numunelerine bakıldığında, yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı 28 günde %19, %10 ve %23 oranında %0, %0.5 ve %1 elyaf içeren numune için azalmıştır.

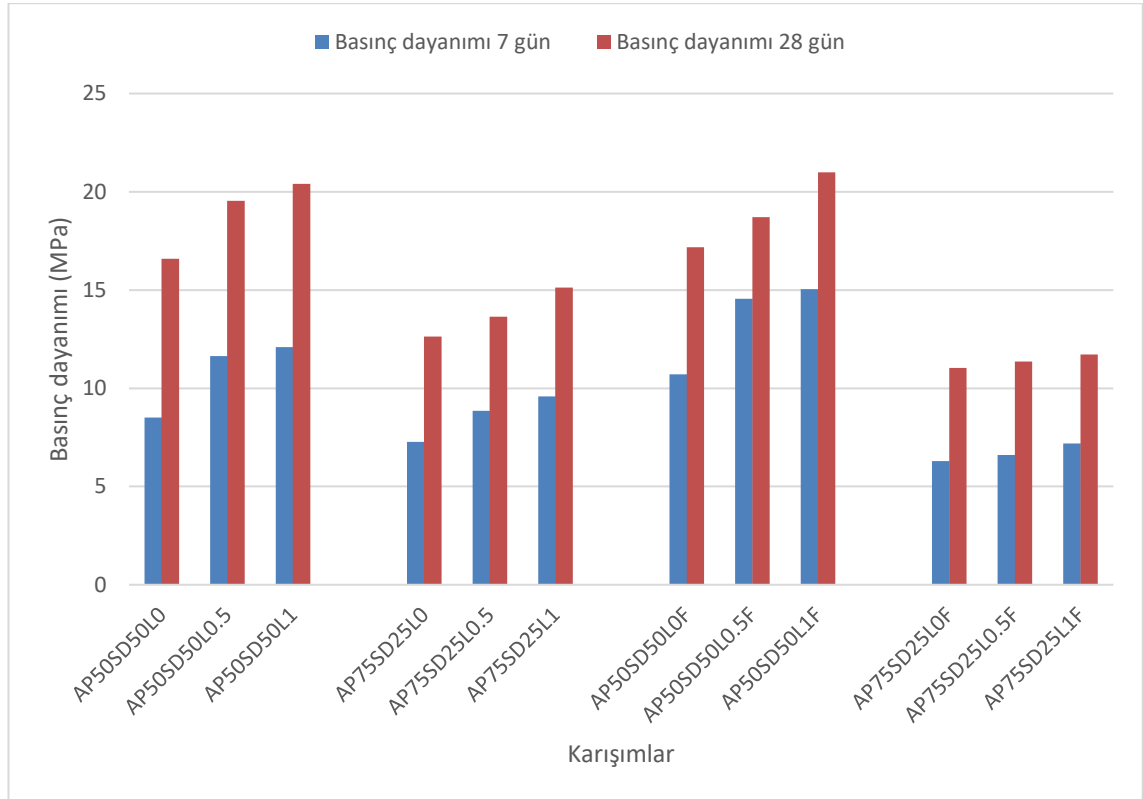
Sertleşmiş matris içindeki geopolimizasyon ürünleri üzerindeki yüksek sıcaklığın etkisine ve mikro çatlakların oluşumuna bağlanabilmektedir (İbrahim vd. 2017). AP75SD25 serisindeki yüksek öğütülmüş asidik pomza içeriği nedeniyle reaksiyon ürünleri daha zayıftır ve AP50SD50 karışımından daha azdır çünkü asidik pomza silis dumanına kıyasla daha düşük puzolanik reaksiyonlara sahiptir (Madani vd. 2018). Ayrıca, AP75SD25 serisi, daha düşük mukavemete katkıda bulunabilecek daha yüksek boşluk içeriği nedeniyle, AP50SD50 serisinden daha yüksek su emme ve görünür boşluk oranı değerlerine sahip olmaktadır. Diğer araştırmalar, kürlenme süresi, sıcaklık ve alkalın aktivatörün molaritesi ve bağlayıcı/agrega oranı gibi birçok faktörle ilişkili olduğu için, yüksek ısıyla kürlenmenin dayanım üzerindeki etkisine ilişkin farklı bulgular göstermektedir (Bondar vd. 2011).

Safari vd. (2020) sonuçları, 72 saate kadar kürlenme süresine kadar, geopolimerin dayanım kazancı kür süresinin artmasıyla orantılı olarak artarken, daha sonra kür süresi arttıkça dayanım yavaş yavaş azalmaktadır. Bu, polimerizasyonların çoğunun 60 °C'de 72 saatlik kürlenmeden sonra tamamlanmış olmasına bağlanabilmektedir.

Huseien vd. (2016), sodyum silikat çözeltisi ile hazırlanan tüm harçlar, NHNS çözeltisi ile hazırlanan harçtan daha yüksek dayanım göstermiştir. Bununla birlikte, sodyum silikat (NS) çözeltisi ile hazırlananlar 28 günlükken 60°C'de (67.8 MPa) 27 ve 90°C'de kürlenmişlere göre daha iyi dayanım sağlamıştır. Kürlenme sıcaklığının, sodyum silikat (NS) ile sodyum hidroksit (NH) ile aktive edilen numunelerin dayanım üzerindeki etkisi, kürlenme sıcaklığındaki bir artışın basınç dayanımının azalmasına yol açtığını ortaya koymuştur. Çözeltiye su ilavesi (%25) ayrıca numunelerin basınç dayanımını da azaltmıştır.

Haddad ve Alshbuol (2016) yaptığı çalışmada, geopolimer betonun (GPB) basınç dayanımının, 80 °C'ye kadar oda sıcaklığından daha yüksek kür sıcaklıkları ile arttığını ve sonrasında azaldığını bulmuştur. 40, 80 ve 120°C'lik üç kuru kürlenme sıcaklığının, SEM görüntüleri kullanılarak iki farklı GPB karışımının polimerizasyon süreci ve gözenek yapısı üzerindeki etkisi, değişen kuru kürlenme sıcaklıklarına maruz bırakılan GPB için polimerize pomzaların farklı morfolojilerini ve dağılımlarını ortaya çıkarmıştır. 80°C'de oluşan alüminosilikat jel, GPB için sürekli ancak sınırlı mikro çatlaklarla yoğun görünmüş ve bu da sertleştirilmiş basınç dayanımının önemli ölçüde artmasına katkıda bulunmuştur. Tersine, 40°C'deki GPB görüntüleri, yüksek oranda delik ve cips içeren sınırlı miktarda polimerize pomza yansıtmıştır. 120°C'de pomzanın hızlı polimerizasyonu, termal olarak indüklenen çatlaklar, delikler ve cipsler tarafından bölümlere ayrılan büyük polimerize kristallerin oluşumuyla sonuçlanmış; ilgili GPB numunelerinin olumsuz mekanik performansını etkilemektedir.

Ayrıca, basınç dayanımı değerlerini etkileyebilecek başka faktörler de vardır. Fernánde z-Jime nez ve Palomo (2003), kaynak malzemenin inceliğinin geopolimer bağlayıcıların dayanım gelişiminde önemli bir rol oynadığını bildirmiştir. Temuujin vd. (2009) ayrıca partikül boyutunun küçülmesinin ve morfolojideki değişikliğin çözünme hızını arttırdığını ve nihayetinde geopolimer bağlayıcının basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Yadollahi vd. (2015), yüksek ısıyla kürlenmiş pomza bazlı geopolimer harçların dayanımının silika modülüne, su/bağlayıcı oranına ve Na<sub>2</sub>O'ya bağlı olduğunu göstermektedir. Çünkü bu parametreler harç matrisi içerisinde puzolanik jel oluşumunu etkilemektedir.

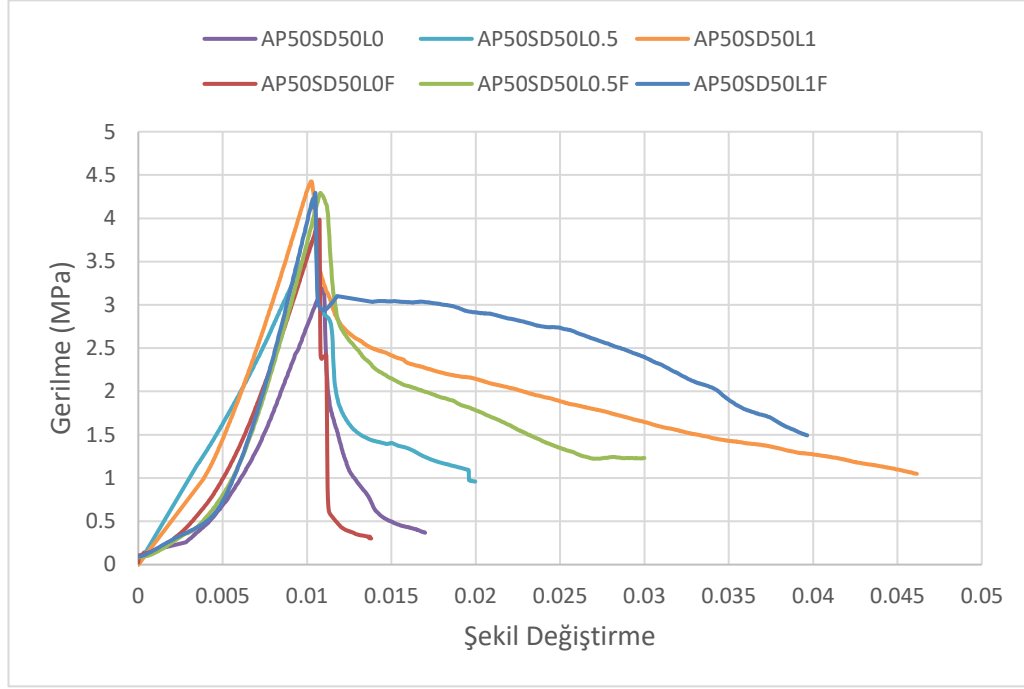


**Şekil 4.10.** Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa)

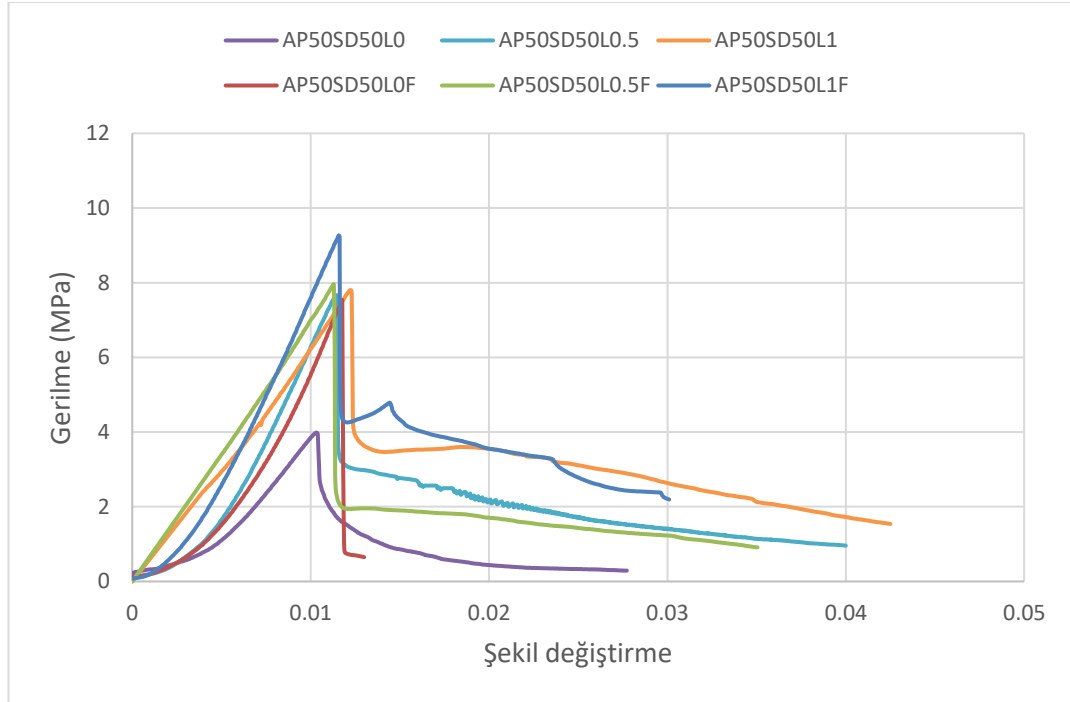
### 4.3.3. Gerilme şekil değiştirme

Sertleştirilmiş harçlar üzerinde yapılan eğilme ve basınç deneylerinden 7. ve 28. günlerde elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak karışımların gerilme-şekil değiştirmesi hem basınç hem de eğilme yükleri altında incelenmiştir. Şekil 4.11-14'te gösterildiği gibi, eğilme yükleri altında çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, düşük elyaf içeriğine sahip malzemede keskin bir gevrek çatlak yaşarken, daha fazla elyafli numunelerin kırılmalarında birden fazla çatlak maruz kaldığı incelenmekte; numunelerde bir kez çatlak oluştuğunda, eğilme dayanımı-sehim eğrisinde bir dayanım düşüşü gözlenmiş ve elyaflar eğilme gerilmesi aktarılmıştır. Elyafı köprüleme etkisi, numunelerin çatlak bölgesinde ani kırılmasını önler ve gerilmesi diğer parçalara aktarmaktadır. Polipropilenin eğilme dayanımı yüksek olduğu için genellikle köprülenmelerine karşı direnç göstermektedirler ve çekme hareketi ile serbest kalmaktadır. Diğer bir deyişle, yüksek elyaf içeriğine sahip karışımlar, elyaf içermeyenlere göre daha

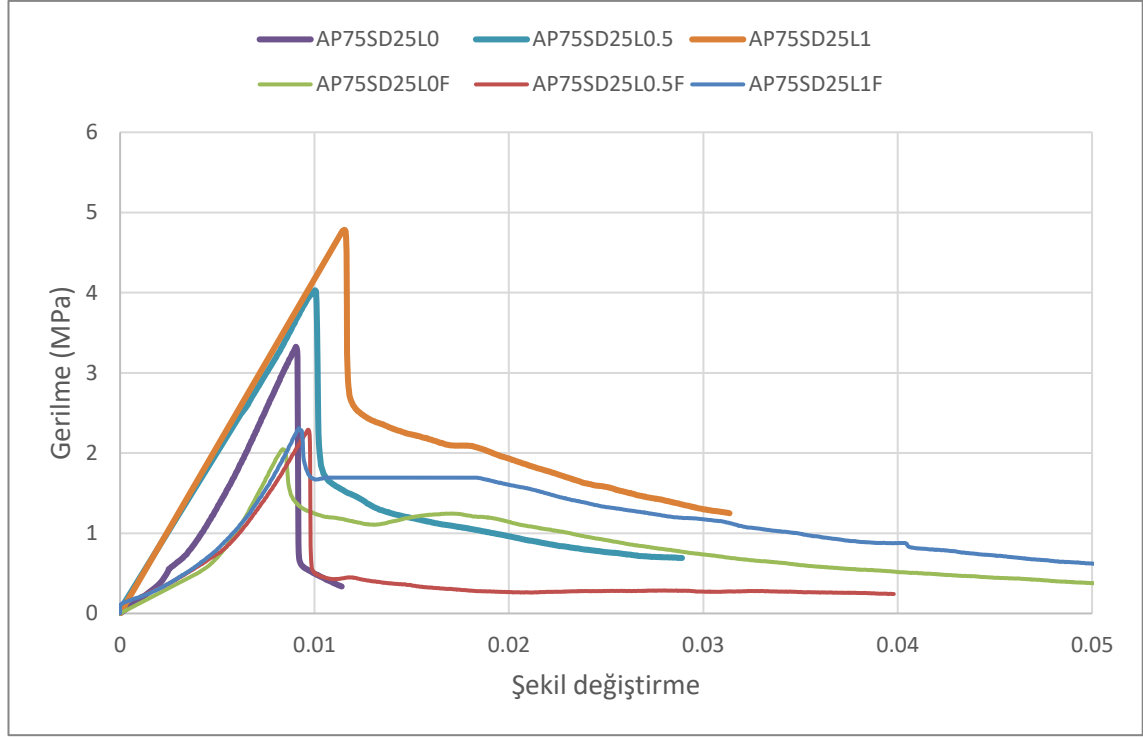
sünek davranış göstermiştir (Ranjbar vd. 2016). Kontrol harcı numuneleri (elyafsız), Şekil 4.11-4.14'te gösterildiği gibi tepe yükte ilk çatlak gösterdikten sonra aniden başarısız olmuştur.



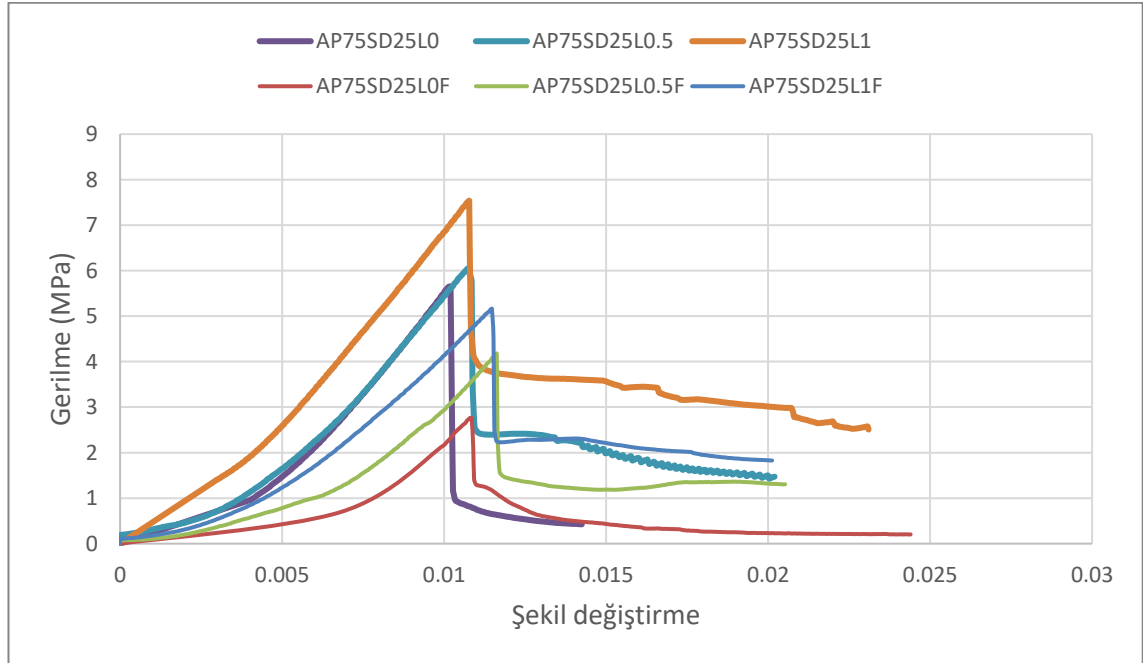
**Şekil 4.11.** AP50SD50 serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri



**Şekil 4.12.** AP50SD50 serisinin eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri



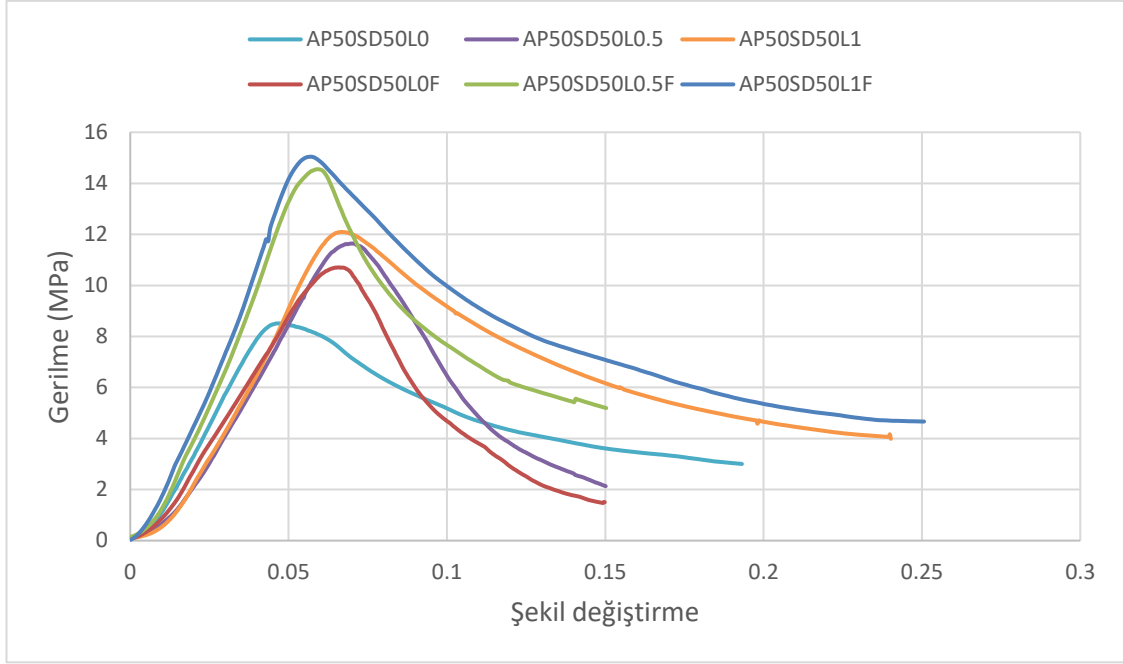
**Şekil 4.13.** AP75SD25 serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri



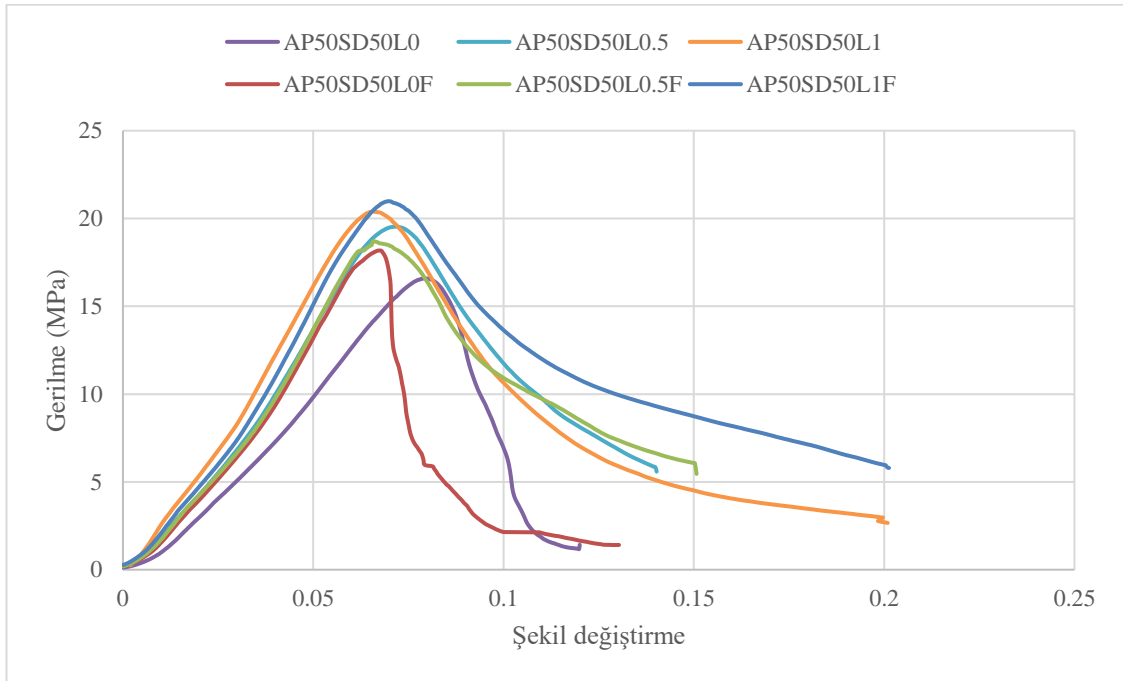
**Şekil 4.14.** AP75SD25 serisinin eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

AP50SD50'de genel olarak daha yüksek sıkıştırma dayanımına sahip karışımlar, beklendiği gibi AP75SD25'e kıyasla daha yüksek gerilmeler yaşamıştır (Şekil 4.15-18). AP50SD50 serisini zaman ile incelerken numuneler daha fazla süneklik ve daha yüksek dayanım kazanmıştır. 7 günlük kürlemedeki numune davranışı, düşük süneklik ve daha yüksek sertlik ile AP50SD50L0, AP50SD50L0.5F ve AP50SD50L1F karışımları arasındaki benzerliği göstermektedir. AP50SD50L0F, AP50SD50L0.5 ve AP50SD50L1 karışımları daha sünek davranış gösterirken ve eğrilerin tepe noktaları benzer deformasyon değerlerine karşılık gelirken, numunelerin rijitlikleri ve süneklikleri Şekil 4.15'te gösterildiği gibi birbirine çok yakındır. 28 günlük kürlemedeki numune davranışı, AP50SD50L0 karışımının en düşük sertliğe sahip diğer karışımlardan daha fazla sünek davranış gösterdiğini, diğer karışımların ise benzer süneklik gösterdiğini göstermektedir.

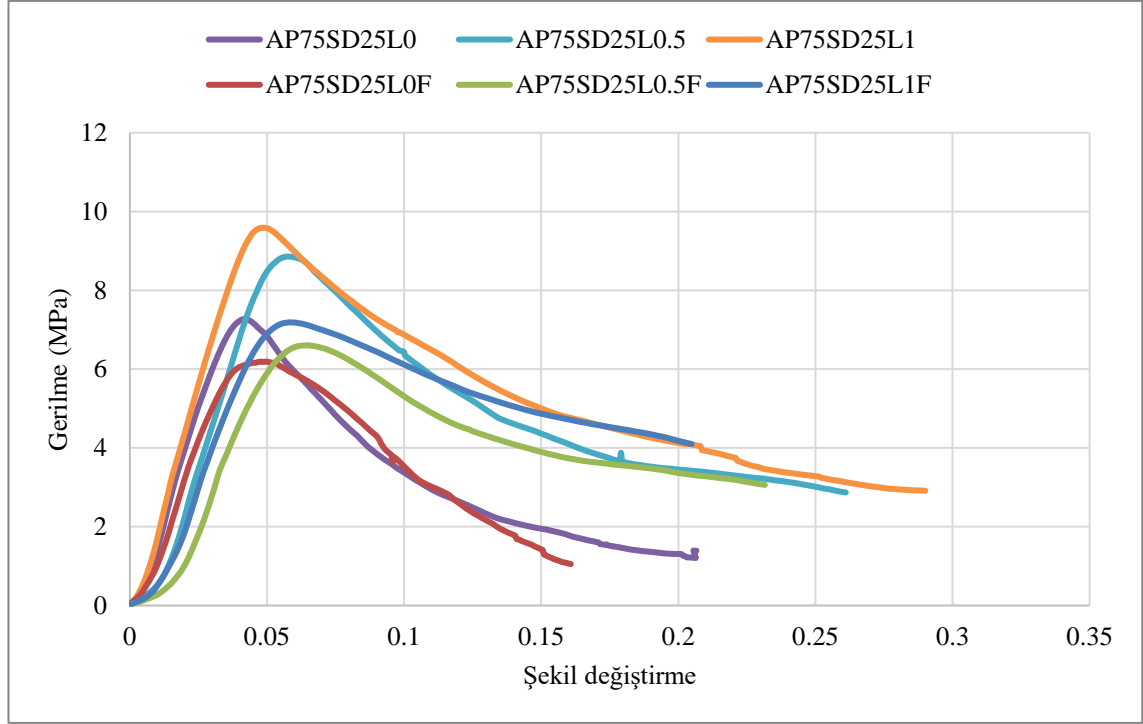
AP75SD25'teki karışımlar, AP50SD50 serisine kıyasla daha az süneklik göstermiştir. AP75SD25 serisi zaman örnekleriyle incelenirken daha fazla süneklik ve daha yüksek dayanım kazanmıştır. 7 günlük kürlemedeki numune davranışı, düşük süneklik ve daha yüksek sertlik ile AP75SD25L0, AP75SD25L0F ve AP75SD25L1 karışımları arasındaki benzerliği göstermektedir. AP75SD25L0.5F, AP75SD25L0.5 ve AP75SD25L1F karışımları daha sünek davranış sergilerken ve eğrilerin tepe noktaları benzer deformasyon değerlerine karşılık gelirken, numunelerin rijitlikleri ve süneklikleri Şekil 4.17'de gösterildiği gibi birbirine çok yakındır. 28 günlük kürlemedeki numune davranışı, AP75SD25L0.5F karışımının diğer karışımlardan daha fazla sünek davranış sergilediğini göstermektedir. AP75SD25L0F, AP75SD25L0.5, AP75SD25L1F ve AP75SD25L1 karışımları, benzer deformasyon değerlerine karşılık gelen eğri tepe noktalarına sahipti ve benzer süneklik göstermiştir. Pomza içeriğinin artmasıyla dayanım, rijitlik ve sünekliğin azaldığı fark edilebilmektedir. Ek olarak, %0 polipropilen elyaf içeren karışımlar, tepe sonrası gerilme yumuşaması sırasında gerilmeye daha hızlı bir düşüş göstermektedir. Bu, %0.5 ve %1 elyaf içeren numunelere kıyasla tokluğun azaldığını göstermektedir (Thomas ve Peethampan, 2015).



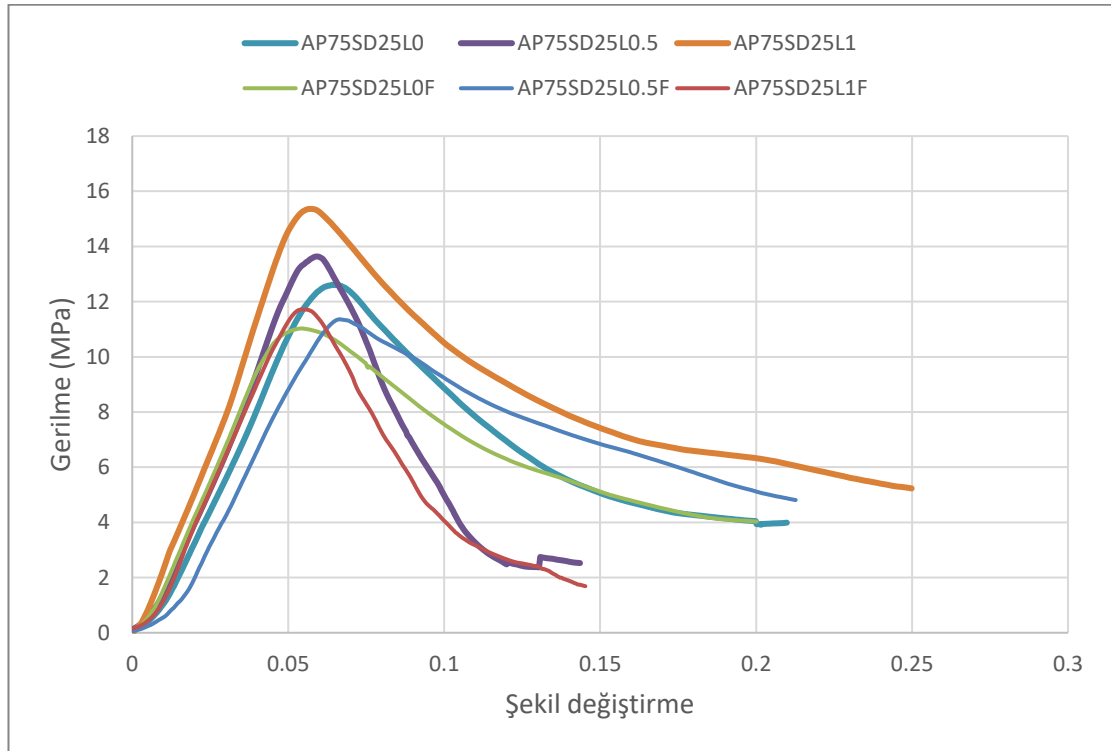
**Şekil 4.15.** AP50SD50 serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değıştirme eğrileri



**Şekil 4.16.** AP50SD50 serisinin basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değıştirme eğrileri



**Şekil 4.17.** AP75SD25 serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değıştirme eğrileri



**Şekil 4.18.** AP75SD25 serisinin basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değıştirme eğrileri

#### 4.4. Sertleştirilmiş Harçların Durabilite Özelliklerine İlişkin Bulgular

##### 4.4.1. Kılcal su geçirimsizlik deneyi

Karışımların 1. ve 24. saatte hesaplanan kılcal su emme katsayıları Çizelge 4.8'da gösterilmiştir. 1 saatlik sürenin boşluklarda yükselmesi için yeterli bir süre olmadığı düşünülebilmektedir. Bu nedenle, harçların kılcal geçirgenliğini yorumlamada 24 saat sonra elde edilen veriler daha doğru olmuştur.

AP50SD50 serisi oda sıcaklığında kürlenmiş numuneler incelendiğinde 1 saatlik verilere göre AP50SD50L0 numunesi  $1.14 \times 10^{-07} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını göstermiştir. AP50SD50L1 numunesi ise  $8.66 \times 10^{-08} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en düşük değeri elde edilmiştir. 24 saatlik verilere göre AP50SD50L0 numunesi  $3.58 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını sergilemiştir, AP50SD50L1 numunesi ise  $3.39 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en düşük değeri göstermiştir.

AP50SD50 serisi yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numuneler incelendiğinde 1 saatlik verilere göre AP50SD50L0F numunesi  $8.35 \times 10^{-08} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını göstermiştir, AP50SD50L1F numunesi ise en düşük değeri  $5.98 \times 10^{-08} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile elde edilmiştir. 24 saatlik verilere göre AP50SD50L0F numunesi  $4.28 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını göstermiştir, AP50SD50L1F numunesi ise en düşük değeri  $2.79 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile elde edilmiştir.

AP75SD25 serisi oda sıcaklığında kürlendiğinde 1 saatlik verilere göre AP75SD25L0 numunesi  $7.12 \times 10^{-08} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını göstermiştir, AP75SD25L1 numunesi ise  $6.37 \times 10^{-08} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en düşük değeri elde edilmiştir. 24 saatlik verilere göre AP75SD25L0 numunesi  $3.13 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını göstermiştir, AP75SD25L1 örnekleri ise en düşük değeri  $2.67 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile göstermiştir.

AP75SD25 serisi yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numuneler incelendiğinde 1 saatlik verilere göre AP75SD25L0F numunesi  $6.73 \times 10^{-08} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını göstermiştir, AP75SD25L1F numunesi ise en düşük değeri  $3.34 \times 10^{-08} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile elde edilmiştir. 24 saatlik verilere göre AP75SD25L0F numunesi  $3.58 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile en yüksek kılcal su emme katsayısını göstermiştir, AP75SD25L1F numunesi ise en düşük değeri  $1.55 \times 10^{-10} \text{ cm/s}^{1/2}$  ile elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan, AP75SD25 serisinin AP50SD50 serisine göre daha düşük kılcal su emme katsayısına sahip olduğu fark edilebilmektedir. Madani vd. (2018), yirmi beton karışımının dayanıklılık testlerini ve mikroyapısını ve 28 günde kılcal su emmesini araştırdığında aynı gözlemi bulmuştur. Çimento yerine silis dumanı ile birlikte %60'a varan yüksek ikame seviyelerinde pomza kullanılmıştır. Sonuçlar, betonun kılcal su emme oranının %60'a kadar yüksek pomza içeren karışımların düşük pomza içerikli karışımlardan %10 ve %20 daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Ayrıca polipropilen elyaf ilavesi kılcal su emme katsayısını azaltmıştır. Bu, elyafın harç matrisi içinde mikro çatlakların oluşumunu ve genişlemesini önlemedeki etkisine bağlanabilmektedir.



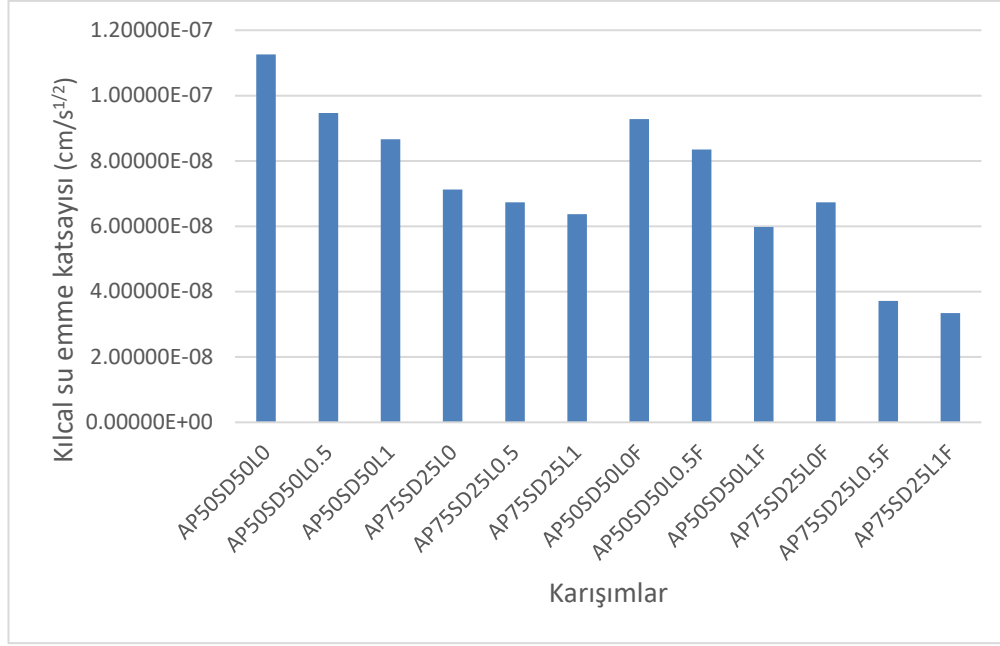
Olivia vd. (2008) yaptığı çalışmada, geopolimer beton durumunda, hızlandırılmış buhar kürü işlemi sona erdikten sonra gözeneklerin tıkanması durdurulduğu sonucuna varmışlardır. Bu nedenle, gözenek yapısını doldurma yeteneği esas olarak kürlenme işlemine bağlıdır. Dayanımın artması, nihayetinde, herhangi bir hidrasyon olmaksızın sadece geopolimerizasyonun devam eden bir etkisidir.

Isı ile kürlenmiş numunelerin, oda sıcaklığında kürlenmiş numunelere kıyasla daha düşük bir kılcal su geçirimsizlik katsayısına sahip olduğu sonuçlardan fark edilmektedir. Yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerde sürekli gözeneklerin alt seviyesine bağlanabilmektedir. Literatürde kılcal su geçirimsizlik deneyi sonuçlarının temel olarak sürekli gözeneklerin seviyesine atfedildiği belirtilmektedir. Bu nedenle, büyük gözenek çapına sahip bir numunede, kılcal damardaki bir artış, birbirine bağlı büyük gözenekler yoluyla gözeneklerin içindeki suyun hızla dolmasından kaynaklanabilir. Genel olarak, yüksek bir kılcal su emme katsayısı, gözenekli malzemelerde büyük bir gözenek hacmi ile ilişkilidir (Chuah vd. 2016; Olivia ve Nikraz, 2011).

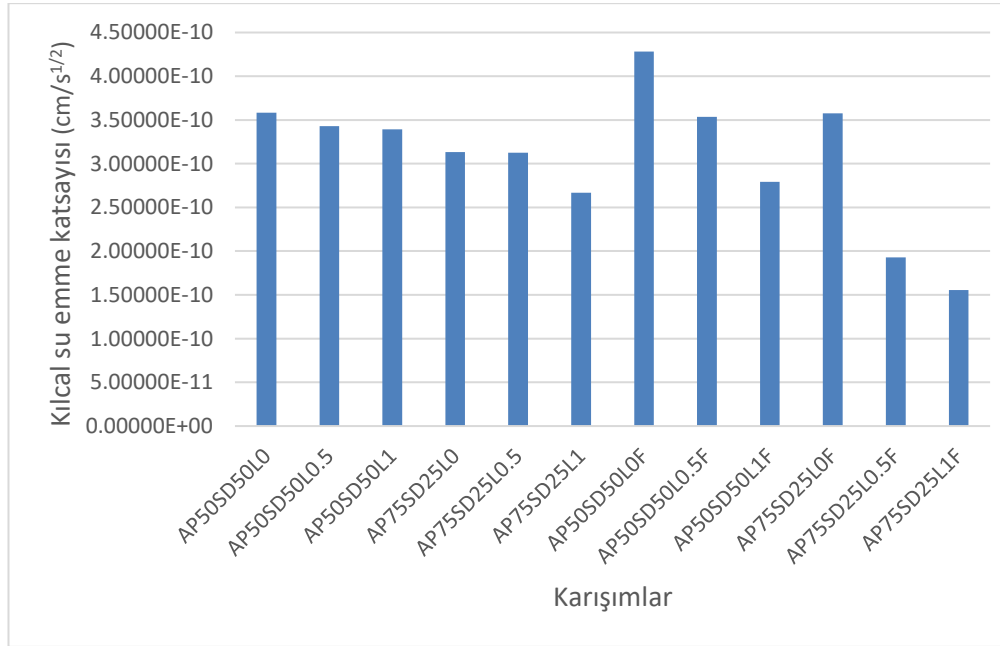
Olivia ve Nikraz (2011) kılcal su emme sonuçlarından, kılcal su emme katsayısı ile boşluk içeriği arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Gözenekliliğin bir başka yönü olan gözenek sürekliliğinin bu akış hızı ölçümünde daha etkili olduğu görülmüştür. Su geçirgenliği, beton harcındaki gözenek bağlantısından etkilenmektedir. Betonun gözenek gelişimi, su içeriği, bağlayıcı içeriği ve kür yöntemi gibi parametrelere bağlıdır.

**Çizelge 4.8.** Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn<sup>1/2</sup>)

Karışım Kodu	K <sub>1</sub> (cm/s <sup>1/2</sup> )	K <sub>24</sub> (cm/s <sup>1/2</sup> )
AP50SD50L0	1.14 x10 <sup>-7</sup>	3.58 x10 <sup>-10</sup>
AP50SD50L0.5	9.47 x10 <sup>-08</sup>	3.43 x10 <sup>-10</sup>
AP50SD50L1	8.66 x10 <sup>-08</sup>	3.39 x10 <sup>-10</sup>
AP75SD25L0	7.12 x10 <sup>-08</sup>	3.13 x10 <sup>-10</sup>
AP75SD25L0.5	6.73 x10 <sup>-08</sup>	3.13 x10 <sup>-10</sup>
AP75SD25L1	6.37 x10 <sup>-08</sup>	2.67 x10 <sup>-10</sup>
AP50SD50L0F	9.28 x10 <sup>-08</sup>	4.28 x10 <sup>-10</sup>
AP50SD50L0.5F	8.35 x10 <sup>-08</sup>	3.53 x10 <sup>-10</sup>
AP50SD50L1F	5.98 x10 <sup>-08</sup>	2.79 x10 <sup>-10</sup>
AP75SD25L0F	6.73 x10 <sup>-08</sup>	3.58 x10 <sup>-10</sup>
AP75SD25L0.5F	3.72 x10 <sup>-08</sup>	1.93 x10 <sup>-10</sup>
AP75SD25L1F	3.34 x10 <sup>-08</sup>	1.55 x10 <sup>-10</sup>



Şekil 4.19. Karışımların 1 saat kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn<sup>1/2</sup>)



Şekil 4.20. Karışımların 24 saat kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn<sup>1/2</sup>)

## 5. SONUÇLAR

Atık malzeme (silis dumanı) ve doğal puzolan asidik pomza ve polipropilen elyaf katkıları ile geleneksel çimento bağlayıcılarının yerini alabilecek geopolimer harç araştırılmıştır. Üretilen geopolimer harçların mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri incelenmiş ve bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

Elyaf içeriğinin artmasıyla taze harcın işlenebilirliğinin azaldığı fark edilmiştir. Sonuç olarak, harçların işlenebilirliğini artırmak için karışımlara süperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Polipropilen elyaf oranlarındaki artış, üretilen harçların taze birim ağırlığını ve işlenebilirliğini kontrol karışımlarına göre azaltmıştır. %75 asidik pomza ve %25 silis dumanı içeren karışımların taze birim hacim ağırlık değerleri %50 asidik pomza ve %50 silis dumanı karışımlarına göre daha düşüktür.

Kuru yığın yoğunluğu ve suya doymun kuru yüzey ağırlığı değerleri aynı trende sahip olup, elyaf yüzdesi arttıkça yığın yoğunluğu azalmıştır. En düşük değer, harçlardaki en yüksek elyaf içeriğine karşılık gelmektedir. Silis dumanı içeriğindeki azalma, yığın yoğunluk değerlerinde hafif bir düşüşe neden olmuştur. Yüksek sıcaklıkta kürlen AP75SD25 serisi en düşük kuru birim ve suya doymun kuru yüzey ağırlığını göstermiştir. AP50SD50 ve AP75SD25 serileri için iki kürlenme yöntemi arasındaki azaltma oranı farklı bulunmuştur.

Su emme yüzde değerleri ve görünen boşluk oranı birbiriyle ilişkilidir. Harçların boşluk oranının artması ile sertleşen harçtaki boşluklar nedeniyle su emme yeteneği artmaktadır. Deney bulguları, elyaf içeriğindeki artışla birlikte su emme yüzde değerlerinde ve görünen boşluk oranında bir artış olduğunu göstermektedir. Ayrıca asidik pomzanın artması, su emme yüzde değerlerinin ve görünen boşluk oranının artmasına neden olmuştur. Yüksek sıcaklıklarda kürlen numunelerde, oda sıcaklığında kürlen numunelere göre su emme ve görünen boşluk oranı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Karışımda öğütülmüş asidik pomza miktarı arttığında, kür yöntemi harcın fiziksel özelliklerinin değişim oranını etkilemektedir.

Sertleşmiş harçların eğilme ve basınç dayanımları da incelenmiştir. Sonuçlar, polipropilen elyaftaki artışla dayanımın da arttığını göstermiştir. AP50SD50L1F karışımı için en yüksek basınç dayanımı 20.98 MPa olmuştur. Dayanım, tüm karışımlar için zaman içinde önemli ölçüde gelişmiştir.

Eğilme dayanımı değerlerine bakıldığında AP50SD50L1F karışımı için en yüksek değer 9.27 MPa'dır. Deney bulguları, fırında 6 saat boyunca 60°C'de kürlen AP75SD25 numuneleri, yüksek boşluk oranına atfedilebilecek en düşük eğilme dayanımı değerlerine sahip bulunmuştur. Ayrıca karışım AP50SD50 eğilme dayanımı değerleri oda ortamında kürlenmeye kıyasla yüksek sıcaklıkta kürlenmede artış göstermiştir.

Basınç dayanımı sonuçlarına yakından bakıldığında elyaf içeriğindeki artış, en yüksek basınç dayanımına karşılık gelmiştir. Bu çalışmada, iki kür yöntemi arasında basınç dayanımında önemli bir değişiklik olmuştur. AP50SD50 serisi için, ortam kürene kıyasla yüksek sıcaklıkta kürlen numuneler için basınç dayanımı artmıştır. Yüksek sıcaklıkta kürlen AP75SD25 serisinin basınç dayanımı, ortam kürene göre azalmıştır. Mikro çatlakların oluşumuna yol açan yüksek sıcaklığın etkisine bağlanabilmektedir.

Ayrıca, üretilen harçtaki asidik pomza yüzdesinin artması, basınç ve eğilme dayanımını olumsuz etkilemiştir.

Kılcal su emme katsayısı değerleri elyafı harçlarda elyafsız harçlara göre daha düşüktür. %75 asidik pomza içeren karışımlar, %50 pomza içeren karışımlardan daha düşük değerlere sahip olmuştur.

Polipropilen elyafın harçların mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğu fark edilmiştir. Geopolimer betonda bağlayıcı olarak silis dumanı ve asidik pomza kombinasyonu yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışma, bu malzemeler ve bunların geopolimer harçlarda kullanımını hakkında gelecekte yapılacak araştırmalar için bir referans olabilecektir.

Geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini gözlemlemek için ısıyla kürlemenin etkisi farklı kür sıcaklıkları ve süreleri kullanılarak araştırılmalıdır. Ayrıca, farklı molaritelere sahip farklı alkali aktivasyonlarının geopolimer özellikleri üzerindeki etkisi konusunda daha fazla araştırma yapılmalıdır.

## 6. KAYNAKLAR

- Balun, B. & Karataş, M., 2018 . *Compressive Strength of Pumice Based Alkali-Activated Hybrid Cement*. Skopje Macedonia, 3rd International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences.
- Bernal, S. A., 2015. Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials. *Construction and Building Materials*, Cilt 98, p. 217–226.
- Blash, A. M. A. & Vara Lakshmi, T. S., 2016. Properties of Geopolymer Concrete Produced by Silica Fume and Ground-Granulated Blast-Furnace. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(10), pp. 319-323.
- Bondar, D. ve diğerleri, 2011. Engineering Properties of Alkali-Activated Natural Pozzolan Concrete. *ACI Materials Journal/January*, 108(1).
- Brew, D. R. M. & MacKenzie, K. J. D., 2007. Geopolymer synthesis using silica fume and sodium aluminate. *Journal of Materials Science*, Cilt 42, p. 3990–3993.
- Chindapasirt, P. & Rattanasak, U., 2017. Synthesis of polypropylene fiber/high-calcium fly ash geopolymer with outdoor heat exposure. *Clean Techn Environ Policy*, Cilt 19, p. 1985–1992.
- Crangle, R. D., 2018. Pumice and Pumicite. %1 içinde *2018 Minerals Yearbook*. basım yeri bilinmiyor:U.S. Geological Survey, pp. 59.1-59.5.
- Davidovits, J., 1994. *Properties of Geopolymer Cements*. Kiev, Geopolymer Institute.
- Dineshkumar, M. & Umarani, C., 2020. Effect of Alkali Activator on the Standard Consistency and Setting Times of Fly Ash and GGBS-Based Sustainable Geopolymer Pastes. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, Cilt 2020.
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K. & Kumar, S., 2016. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, Cilt 124, p. 606–614.
- Ferna'ndez-Jime'nez, A. & Palomo, A., 2003. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel* , Cilt 82, p. 2259–2265.
- Firdous, R., Stephan, D. & Djobo, J. N. Y., 2018. Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics. *Construction and Building Materials* , Cilt 190 , p. 1251–1263.

- Görhan, G. & Kürklü, G., 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites: Part B*, Cilt 58, p. 371–377.
- Gujel, D. A., Kazmierczak, C. S. & Masuero, J. R., 2017. Stress-strain curve of concretes with recycled concrete aggregates: analysis of the NBR 8522 methodology. *IBRACON Structures and Materials Journal*, 10(3), p. 547 – 567.
- Haddad, R. H. & Alshbuol, O., 2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Construction and Building Materials* , Cilt 114 , p. 699–707.
- Ibrahim, A. K., AL-Kerttani, O. & Abbas, S. R., 2020. Properties of Geopolymer Mortar Subjected to High Temperature. *Key Engineering Materials*, Cilt 858, pp. 193-198.
- Ismail, I. ve diğerleri, 2014. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement & Concrete Composites*, Cilt 45, p. 125–135.
- Karaaslan, C. & Yener, E., 2021. The Effect of Alkaline Activator Components on the Properties of Fly Ash Added Pumice Based Geopolymer. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2), pp. 1255-1269.
- Kaya, M. & Köksal, F., 2022. Physical and mechanical properties of C class fly ash based light-weight geopolymer mortar produced with expanded vermiculite aggregate. *Journal of Construction*, 21(1), pp. 21-35.
- Khan, M. I. & Siddique, R., 2011. Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, Cilt 57, p. 30–35.
- Khater, H. M., 2013. Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, , p. 5:12.
- Lee, N. & Lee, H., 2013. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials*, Cilt 47, p. 1201–1209.
- Madani, H., Norouzifar, M. N. & Rostami, J., 2018. The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical characteristics of eco-friendly concrete. *Construction and Building Materials* , Cilt 174, p. 356–368.
- Manoj, R. & Baboo, R., 2019. Effect of Micro Polypropylene Fibre on the Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 9(22)(1), pp. 97-108.

- Mohammed, Z. A., Al-Jaberi, L. A. & Shubber, A. N., 2021. EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER ON PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE BASED METAKOLIN. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 25(2), pp. 58-67.
- Mucsi, G. & Ambrus, M., 2017. *Raw Materials for Geopolymerisation*. Hungary, Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing.
- Prochon, P. ve diğerleri, 2020. Influence of Activators on Mechanical Properties of Modified Fly Ash Based Geopolymer Mortars. *Materials*, 13(5), p. 1033.
- Rajerajeswari, A., Mohamed , E. & Dhinakaran, G., 2014. Compressive Strength of Silica Fume Based Geopolymer Concrete. *Asian Journal of Applied Sciences*, Cilt 7, pp. 240-247.
- Rani, S. Y. ve diğerleri, 2021. *Durability of geopolymer concrete with addition of polypropylene fibre*. basım yeri bilinmiyor, *Materials Today: Proceedings*.
- Rashad, A. M., Sadek, D. M. & Hassan, H. A., 2016. An investigation on blast-furnace slag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, Cilt 112, pp. 1086-1096.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T. & Chung, Y. S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, Cilt 47, p. 409–418.
- Sanni, S. H. & Khadiranaikar, R. B., 2013. Performance of Alkaline Solutions on Grades of Geopolymer Concrete. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 366-371.
- Saraya, M. E.-S. I. & El-Fadaly, E., 2017. Preliminary Study of Alkali Activation of Basalt: Effect of NaOH Concentration on Geopolymerization of Basalt. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, Cilt 5, pp. 58-76.
- Sarıdemir, M. & Çelikten, S., 2017. The strength properties of alkali activated silica fume mortars. *Computers and Concrete*, 19(2), pp. 153-159.
- Temuujin, J., van Riessen, A. & MacKenzie, K., 2010. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, Cilt 24, p. 1906–1910.
- Temuujin, J., Williams, R. & van Riessen, A., 2009. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 209, p. 5276–5280.

- Tippayasam, C. ve diğerleri, 2016. Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, Cilt 104, p. 293–297.
- Top, S. ve diğerleri, 2020. Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates. *Journal of Molecular Structure* 1202, p. 127236.
- Torres-Carrasco, M. & Puertas, F., 2017. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. *Revista Ingeniería de Construcción*, Cilt 32 , pp. 5-12.
- Wazien, A. W. ve diğerleri, 2016. *Strength and Density of Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature for Use as Repair Material*. basım yeri bilinmiyor, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Yoosuk, P., Suksiripattanapong, C., Sukontasukkul, P. & Chindaprasirt, P., 2021. Properties of polypropylene fiber reinforced cellular lightweight high calcium fly ash geopolymer mortar. *Case Studies in Construction Materials*, Cilt 15, p. e00730.
- Allahverdi, A., Mehrpour, K. & Najafi Kani, E., 2008. INVESTIGATING THE POSSIBILITY OF UTILIZING PUMICE-TYPE NATURAL POZZONAL IN PRODUCTION OF GEOPOLYMER CEMENT. *Ceramics Silikatı*, 52(1), pp. 16-23.
- Arumugam .V., T.Bhagavathi Pushpa & K.M.Basanth Babu, 2018. Effect of Polypropylene Fibers in Geopolymer Concrete. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 8(6), pp. 18125- 18131.
- Arunkumar K., ve diğerleri, 2020. *Effect on addition of Polypropylene fibers in wood ash-fly ash based geopolymer concrete*. basım yeri bilinmiyor, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Assi, L. N., Deaver, E. E. & Ziehl, P., 2018. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, Cilt 167, p. 372–380.
- Benhelal, E., Shamsaei, E. & Rashid, M. I., 2021). Challenges against CO 2 abatement strategies in cement industry: A review. *journal of environmental sciences*, Cilt 104, p. 84–101.



- Çetinkaya, S., Kurt, H. & Kütük, N., 2017. *Lightweight Geopolymer Made of Pumice with Various Aluminum Powder Ratios*. basım yeri bilinmiyor, ACTA PHYSICA POLONICA A.
- Chuah, S. ve diğerleri, 2016. The properties of fly ash based geopolymermortarsmade with dune sand. *Materials and Design* , Cilt 92, p. 571–578.
- D.Kalai Arul Selvi, M.Mariyappan & P.Sowmiya Devi, 2020. Performance of Geopolymer Concrete Using Polypropylene Fiber. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(5), pp. 3572-3579.
- Da, B. ve diğerleri, 2016. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete. *Construction and Building Materials*, Cilt 122, p. 81–89.
- De Weerd, K., 2011. *Geopolymers – State of the art*, Oslo: SINTEF Building and Infrastructure.
- Degirmenci, N. & Yilmaz, A., 2011. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Cilt 18, pp. 61-68.
- Diaz, E., Allouche, E. & Eklund, S., 2010. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel* , Cilt 89, p. 992–996.
- Duxson, P. ve diğerleri, 2005. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Cilt 269, p. 47–58.
- Fernańdez-Jimeńez, A. & Palomo, A., 2005. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, Cilt 35, p. 1984 – 1992.
- Gülmez, N., 2018. Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi. *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Cilt Doktora tezi, p. 20.
- Gülmez, N. & Koçkal, N. U., 2021. Effects of iron powder on properties of geopolymers subjected to different curing regimes. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Cilt 28, pp. 393-408.
- H. Toutanji, S. M. Z. B., 1998. Chloride Permeability and Impact Resistance of Polypropylene-Fiber-Reinforced Silica Fume Concrete. *Cement and Concrete Research*, 28( 7), p. 961–968.

- Hamid, M. A., Yaltay, N. & Türkmenoğlu, M., 2022. Properties of pumice-fly ash based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, Cilt 316, p. 125665.
- Hossain, K. M. A., 2005. Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. *Cement and Concrete Research*, Cilt 35, p. 1141– 1144.
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M. & Hussin, M. W., 2016. Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, Cilt 125, p. 1229–1240.
- I. Garcia-Lodeiro, A. P. A. F.-J., 2015. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. %1 içinde J. A. L. C. L. A. P. P. C. F. Pacheco-Torgal, dü. *Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes*. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 19-43.
- Ibrahim, M., Johari, M. A., Rahman, M. K. & Maslehuddin, M., 2017. Effect of alkaline activators and binder content on the properties of natural pozzolan-based alkali activated concrete. *Construction and Building Materials* , Cilt 147 , p. 648–660.
- Jitha Mathew , V., 2017. Experimental Investigation of Mortar Cube with Pumice Powder and Ceramic Tile Powder. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology.*, 3(3), pp. 815-821.
- Junior, J., Saha, A. K., Sarker, P. K. & Pramanik, A., 2021. Workability and Flexural Properties of Fibre-Reinforced Geopolymer Using Different Mono and Hybrid Fibres. *Materials*, Cilt 14, p. 4447..
- Kabay, N., Mert, M., Miyan, N. & Omur, T., 2021. Pumice as Precursor in Geopolymer Paste and Mortar. *Journal of Civil Engineering and Construction*, 10(4), pp. 225-236.
- Kaya, M., Uysal, M., Yilmaz, K. & Atis, C. D., 2018. Behaviour of Geopolymer Mortars after Exposure to Elevated Temperatures. *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*, 24(4), pp. 425-436.
- Khoa V. A. Pham, ve diğerleri, 2019. Assessment of Performance of Fiber Reinforced Geopolymer Composites by Experiment and Simulation Analysis. *Journal of applied sciences*, Cilt 9, p. 3424.
- Koçkal, N., Beycan, O. & Gülmez, N., 2017. Physical and Mechanical Properties of Silica Fume and Calcium Hydroxide Based Geopolymers. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 131(3), pp. 530-533.

- Koçkal, N. U., Beycan, O. & Gülmez, N., 2018. Effect of binder type and content on physical and mechanical properties of geopolymers. *Sâdhanâ*, p. 43:49.
- Kumar, S., Gautam, P. D. & Kumar, B. S. C., 2019. Effect of Alkali Activator Ratio on Mechanical Properties of GGBS based Geopolymer Concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(12), pp. 947-952.
- Lemougna, P. N., MacKenzie, K. . J. & Chinje Melo, U., 2011. Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, Cilt 37, p. 3011–3018.
- Lemougna, P. N. ve diğerleri, 2018. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications. *Resources, Conservation & Recycling* , Cilt 137 , p. 177–190.
- Li, C., Zhang, T. & Wang, L., 2014. Mechanical properties and microstructure of alkali activated Pisha sandstone geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, Cilt 68, p. 233–239.
- Meng, Z. ve diğerleri, 2022. Fiber factor for fresh and hardened properties of polyethylene fiber-reinforced geopolymer mortar. *Journal of Building Engineering* , Cilt 53, p. 104556.
- Mermerdaş, K., Manguri, S., Nassani, D. & Oleiwi, S. M., 2017. Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering Science and Technology, an International Journal*.
- Mohajerani, A. ve diğerleri, 2019. Recycling waste materials in geopolymer concrete. *Clean Technologies and Environmental Policy* , Cilt 21, p. 493–515.
- N. Sohaib, Seemab, F., Sana G. & R. Mamoona, 2018. *Using Polypropylene Fibers in Concrete to achieve maximum strength*. basım yeri bilinmiyor, Institute of Research Engineers and Doctors.
- Olivia, M., Sarker, P. & Nikraz,, H., 2008. Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *ICCBT* , Cilt 46, pp. 517-530.
- Olivia, M. & Nikraz, H. R., 2011. STRENGTH AND WATER PENETRABILITY OF FLY ASH GEOPOLYMER CONCRETE. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6(7), pp. 70-78.
- Özkan, Ş. G. & Tuncer, G., 2001,. *Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış*. izmir, Türkiye, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu.

- Özodabaş, A. & Yılmaz, K., 2013. Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice. *Construction and Building Materials*, Cilt 48, p. 26–34.
- Panesar, D. K., 2019. *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. 2. dü. basım yeri bilinmiyor: Woodhead Publishing.
- Pham, T. T., Nguyen, T. T., Nguyen, L. N. & Nguyen, P. V., 2020. A Neural Network Approach for Predicting Hardened Property of Geopolymer Concrete. *International Journal of Geomate*, 19(74), p. 176–184.
- Provis, J. L. & Bernal, S. A., 2014. Binder Chemistry – Blended Systems and Intermediate Ca Content. %1 içinde J. L. Provis & J. S. J. van Deventer, düz. *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*. Dordrecht: Springer Netherlands., pp. 125-144.
- Provis, J. & van Deventer, J. S., 2009. *Geopolymers, structure, processing, properties and industrial applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Ranjbar, N. ve diğerleri, 2016. A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer. *PLoS ONE*, 11(1), p. e0147546.
- Rashiddadash, P., Ramezani pour, A. A. & Mahdikhani, M., 2014. Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Construction and Building Materials*, Cilt 51, p. 313–320.
- S. Demirdag, I. Ugur & S. Sarac, 2008. The effects of cement/fly ash ratios on the volcanic slag aggregate lightweight concrete masonry units. *Construction and Building Materials*, Cilt 22, p. 1730–1735.
- Safari, Z. ve diğerleri, 2020. Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste. *Resources, Conservation & Recycling*, Cilt 162, p. 105055.
- Sağlamtimur, N. D. ve diğerleri, 2019. *The effect of alkali activation solutions with different water glass/NaOH solution ratios on geopolymer composite materials*. basım yeri bilinmiyor, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Sarıdemir, M., 2013. Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, Cilt 49, p. 484–489.

- Sathish Kumar, V., Ganesan, N. & Indira, P., 2021. Effect of Hybrid Fibres on the Durability Characteristics of Ternary Blend Geopolymer Concrete. *J. Compos. Sci.*, Cilt 5, p. 279.
- Shadnia, R., Zhang, L. & Li, P., 2015. Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM. *Construction and Building Materials*, Cilt 84, p. 95–102.
- Shi, C., Krivenko, P. & Roy, D., 2006. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. 1. dü. Oxford: Taylor and Francis.
- Siddique, R., 2011. Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, Cilt 56, p. 66–70.
- Sruthi, V. & George, E. H., 2017. A Review on Silica Fume - an Additive in Concrete. *International Journal Of Advance Research And Innovative Ideas In Education*, 3(3), pp. 274-281.
- Steinerova, M., 2011. Mechanical properties of geopolymer mortars in relation to their porous structure. *Ceramics - Silikaty*, 55(4), pp. 362-372.
- 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*, Cilt 161, p. 37–44.
- Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., Agwa, I. S. & Amin, M., 2021). Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Cilt 15, p. e00673.
- Tchakoute, H., Elimbi, A., Yanne, E. & Djangang, C., 2013. Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature. *Cement & Concrete Composites* , Cilt 38 , p. 75–81.
- Thomas, R. J. & Peethamparam, S., 2015. Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress–strain behavior. *Construction and Building Materials* , Cilt 93, p. 49–56.
- Torres-Carrasco, M. & Puertas, F., 2017. Alkaline Activation of Aluminosilicates as an Alternative to Portland Cement : A Review. *Romanian Journal of Materials*, Cilt 47 (1), p. 3 – 15.
- Yadollahi, M. M., Benli, A. & Demirboğa, R., 2015. The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, Cilt 94, p. 767–774.

## ÖZGEÇMİŞ

**AFAF RASHID ALI FKINI**

**Afaf.fkini@gmail.com**



## ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2022	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2012-2017	University of Tripoli Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendislik Bölümü, Tripoli

## MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Saha Araştırma Müdürü 2019-2020	Jeel Alalamia for Telecommunications and Technolog Tripoli Libya
Proje Müdürü 2018-2019	AlKwaim for General Contracting Co. Tripoli Libya