

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**GEOPOLİMER HARÇLARDA ÖĞÜTÜLMÜŞ BAZİK POMZA VE SİLİS
DUMANININ BAĞLAYICI OLARAK KULLANILMASININ İNCELENMESİ**

Bauyrzhan TOREGALIYEV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2022

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**GEOPOLİMER HARÇLARDA ÖĞÜTÜLMÜŞ BAZİK POMZA VE SİLİS
DUMANININ BAĞLAYICI OLARAK KULLANILMASININ İNCELENMESİ**

Bauyrzhan TOREGALIYEV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEOPOLİMER HARÇLARDA ÖĞÜTÜLMÜŞ BAZİK POMZA VE SİLİS
DUMANININ BAĞLAYICI OLARAK KULLANILMASININ İNCELENMESİ**

Bauyrzhan TOREGALIYEV
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL (Danışman)

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

ÖZET

GEOPOLİMER HARÇLARDA ÖĞÜTÜLMÜŞ BAZİK POMZA VE SİLİS DUMANININ BAĞLAYICI OLARAK KULLANILMASININ İNCELENMESİ

Bauyrzhan TOREGALIYEV

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Haziran 2022; 89 sayfa

Bu tez çalışması, geleneksel Portland çimentosu betonunun yaşam ortamımız üzerindeki zararlı etkisini, enerji ihtiyacını azaltmak ve atık malzemelerinin beton üretiminde yeniden kullanılması için önemli çıkarımlara sahiptir. Bu çalışmanın amacı, puzolan esaslı öğütülmüş bazik pomza ve silis dumanı kullanılarak geopolimer harç numuneleri hazırlamak ve bu geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini belirlemektir.

Bu çalışmada, deneme karışımları neticesinde ne kadar öğütülmüş bazik pomza ve silis dumanının kullanılacağı belirlenerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Alkali aktivatör çözeltilisi olarak sodyum hidroksit kullanılmış ve onun molar konsantrasyonu ve oranı test sonuçları ile belirlenmiştir. Öğütülmüş bazik pomza ve silis dumanı kullanılarak üretilen çimentosuz harçların eğilme/basınç dayanımları, kılcal su geçirimsizlik, su emme miktarları, farklı bağlayıcı miktar oranları incelenmiştir. Harçların kürlenme işlemi, oda sıcaklığında laboratuvar koşullarında ve 60°C'de etüvde gerçekleştirilmiştir. Polipropilen lif oranı arttıkça taze birim hacim kütlesi düşüş göstermiştir. Aynı zamanda lif artışı ile yayılma çapında azalma gözlemlenmiştir. Karışımların kuru ve suya doymun kuru yüzey yığın yoğunluk değerleri eklenen polipropilen liflerin artmasıyla azalma eğilimi göstermiştir. Polipropilen lif katkılı harçlar üzerinde yapılan su emme deneyleri sonuçlarına göre, lif oranının artmasıyla su emme değerleri de artmıştır. Boşluk oranı yüksek olan karışımların yüksek su emme kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar görünür boşluk oranında yükselme olsa da lifler kılcal boşlukların açılmasını ve mevcut boşlukların genişlemesini engellediği sonucuna varılmıştır. Mekanik özellikleri deney sonuçları incelendiğinde, lif kullanımı olumlu etki göstermiştir. Polipropilen lif katkılı harçlar üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, lif katkısının harçlarda dayanımı yükselttiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER: Geopolimerler, Geopolimer harç, Öğütülmüş bazik pomza, Puzolanlar, Polipropilen lif, Silis dumanı.

JÜRİ: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USE OF GROUND BASIC PUMICE AND SILICA FUME AS BINDERS IN GEOPOLYMER MORTARS

Bauyrzhan TOREGALIYEV

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

June 2022; 89 pages

This thesis study has important implications for reducing the negative impact of traditional Portland cement concrete on our living environment, reducing energy requirements and reusing waste materials in concrete production. The aim of this study is to prepare geopolymer mortar samples using pozzolan based ground basic pumice and silica fume and to determine the physical, mechanical and durability properties of these geopolymer mortars.

In this study, geopolymer mortars were produced by determining how much ground basic pumice and silica fume would be used as a result of the trial mixtures. Sodium hydroxide was used as alkali activator solution and the molar concentration/ratio of it were determined by test results. Flexural/compressive strength, capillary water permeability, water absorption, and different binder ratios of cementless mortars produced by using ground basic pumice and silica fume were investigated. The curing process of the mortars was carried out under laboratory conditions at room temperature and in an oven at 60°C. As the polypropylene fiber ratio increased, the fresh unit volume mass decreased. At the same time, a decrease in the spreading diameter was observed with the increase in fiber. Even though this is seen as a negative effect on workability, it is an important feature in terms of cohesion of fresh mortar. Dry and water-saturated dry surface bulk density values of the blends tended to decrease with the increase of added polypropylene fibers. According to the results of the water absorption tests performed on the polypropylene fiber added mortars, the water absorption values increased with the increase in the fiber content. It has been observed that mixtures with high void ratio have high water absorption ability. Although there was an increase in the apparent void ratio, it was concluded that the fibers prevented the opening of capillary voids and the expansion of existing voids. When the mechanical properties of the test results were examined, the use of fiber showed a positive effect. According to the flexural and compressive strength test results on polypropylene fiber added mortars, it was observed that fiber additive increased the strength of the mortars.

KEYWORDS: Geopolymers, Geopolymer mortar, Ground basic pumice, Pozzolans, Polypropylene fiber, Silica fume.

COMMITTEE: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca engin bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan ve bana yol gösteren, tezimin her aşamasında kıymetli önerileri ve düşüncelerini esirgemeyen sayın tez danışmanım Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimi almamı sağlayan ve eğitim süresince her türlü destekte bulunan Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığına teşekkürümü borç biliyorum.

Ayrıca bu tez çalışmamı, gönlünü ilime ve bilime, ömrünü her türlü sorgulamaya ve araştırmaya adanmış bütün insanlara atfediyorum.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	4
2.1. Geopolimer.....	4
2.1.1. Geopolimerlerin tarihsel gelişimi	4
2.1.2. Geopolimerlerin oluşum mekanizması ve geopolimerizasyon.....	5
2.1.3. Geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	9
2.1.4. Portland çimentosu ve geopolimer kimyasının karşılaştırılması.....	10
2.1.5. Geopolimer beton özelliklerini etkileyen faktörler.....	11
2.2. Kaynak Malzemeler.....	12
2.2.1. Doğal ve yapay puzolanlar.....	13
2.2.2. Doğal ve yapay puzolanların geopolimerlerde kullanımı.....	14
2.2.3. Uçucu kül.....	14
2.2.4. Yüksek fırın cürufu.....	16
2.3. Silis Dumanı.....	17
2.3.1. Silis dumanının fiziksel özellikleri ve kimyasal yapısı.....	18
2.3.2. Silis dumanı içeren çimento ve betonların bileşimleri.....	21
2.3.3. Silis dumanının geopolimerlerde kullanımı.....	22
2.4. Öğütülmüş Bazik Pomza.....	23
2.4.1. Pomzanın oluşumu.....	23
2.4.2. Pomzanın mineralojik yapısı ve belirlenmesi.....	24
2.4.3. Pomzanın türleri.....	25

2.4.4. Bazik pomzanın reaktivitesi.....	26
2.4.5. Bazik pomzada camsı faz.....	27
2.4.6. Bazik pomzanın inceliği.....	27
2.4.7. Bazik pomza bazlı çimento harcı/betonunun özellikleri.....	28
2.4.8. Bazik pomzanın kullanımı.....	29
2.4.9. Bazik pomzanın geopolimerlerde kullanımı.....	30
2.5. Alkali Aktivatör.....	31
2.6. Süperakışkanlaştırıcı.....	32
2.7. Polipropilen Lif.....	33
3. MATERYAL VE METOT.....	35
3.1. Materyal.....	35
3.1.1. Bağlayıcılar.....	35
3.1.2. Agregalar.....	36
3.1.3. Alkali aktivatör.....	37
3.1.4. Karışım suyu.....	38
3.1.5. Polipropilen lif.....	38
3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı.....	39
3.2. Metot.....	39
3.2.1. Geopolimer harçların karışım tasarım yöntemi.....	39
3.2.2. Taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler.....	42
3.2.2.1. Taze harç kıvam tayini.....	42
3.2.2.2. Taze harcın birim hacim kütlesi tayini.....	43
3.2.3. Sertleşmiş harçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....	44
3.2.3.1. Yığın yoğunluk, su emme ve görünür gözeneklilik.....	44
3.2.4. Sertleşmiş harçların mekanik özelliklerinin belirlenmesi.....	45
3.2.4.1. Eğilme dayanımı tayini.....	45
3.2.4.2. Basınç dayanımı tayini.....	45
3.2.4.3. Gerilme-şekil değiştirme.....	46

3.2.5. Geopolimer harçların durabilite özelliklerinin belirlenmesi.....	46
3.2.5.1. Kılcal geçirimsizlik.....	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	48
4.1. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylerin Bulguları.....	48
4.2. Sertleşmiş Harçlarda Fiziksel Hal Deney Bulguları.....	51
4.2.1. Kuru birim ağırlık değerleri.....	51
4.2.2. Suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerleri.....	53
4.2.3. Yüzdece su emme oranları.....	54
4.2.4. Yüzdece görünür boşluk oranları.....	57
4.3. Sertleşmiş Harçlarda Mekanik Hal Deney Bulguları.....	59
4.3.1. Eğilme dayanımı deney bulguları.....	59
4.3.2. Basınç dayanımı deney bulguları.....	65
4.3.3. Gerilme-şekil değiştirme.....	71
4.4. Sertleşmiş Harçlarda Durabilite Hal Deney Bulguları.....	75
4.4.1. Kılcal su geçirimsizlik tayini.....	75
5. SONUÇLAR.....	79
6. KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Geopolimer harçlarda öğütölmüş bazık pomza ve silis dumanının bağlayıcı olarak kullanılmasıının incelenmesi” adlı tez çalışmamın, akademik kurallar ve etik değlerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu çalışmada bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

29/06/2022

Bauyrzhan TOREGALIYEV



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_1	: Kuru birim ağırlık
A_2	: Görünür birim ağırlık
A_3	: Görünür boşluk oranı (%)
A_y	: Yükleme uygulandığı kesit alanı (mm^2)
A_k	: Kılcal su emme yüzeyi alanı (cm^2)
Al	: Alüminyum
Ca	: Kalsiyum
d_1	: Numunenin genişliği (mm)
d_2	: Numunenin yüksekliği (mm)
E	: Elastisite modülü
F_1	: Maksimum yük (N)
F_2	: Deney makinesinde kırılma anındaki en büyük yük (N)
K	: Kılcal su emme katsayısı ($\text{cm}/\text{sn}^{1/2}$)
L	: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık (mm)
m_1	: Kabin ağırlığı (kg)
m_2	: Kabin ve taze harcın ağırlığı (kg)
O_2	: Oksijen
Q	: t zaman aralığında emilen su miktarı (cm^3)
Si	: Silisyum
T	: Ölçüm aralığı süresi (sn)
V	: Kabin Hacmi (m^3)
ρ_m	: Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m^3)
σ_1	: Eğilme dayanımı (MPa)
σ_2	: Basınç dayanımı (MPa)

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

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
CH	: Kalsiyum hidroksit
CO ₂	: Karbondioksit
C-S-H	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
GBA	: Görünür birim ağırlık
GBO	: Görünür boşluk oranı
SD	: Silis dumanı
BP	: Bazik pomza
VS	: Volkanik skorya
GPÇ	: Geleneksel Portland çimentosu
HR-SEM	: Yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu
KBA	: Kuru birim ağırlık
NaOH	: Sodyum hidroksit
N-A-S-H	: Sodyum alüminosilikat hidrat
OH ⁻	: Hidroksit iyonu
PÇ	: Portland çimentosu
PPL	: Polipropilen lif
SDKY	: Suyu doymuş kuru yüzey
SEM Microscope)	:Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron
SEO	: Su emme oranı
SiO ₂	: Silika
XRF	: X ışını floresans analizi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Geopolimerin analog yapısı.....	5
Şekil 2.2. Farklı Si/Al oranlarına sahip geopolimerin yapısal birim modeli.....	6
Şekil 2.3. Polikondenzasyon malzemesi şematik yapısı.....	7
Şekil 2.4. Geopolimerizasyon mekanizmasının kavramsal adımları.....	8
Şekil 2.5. Portland çimentosu ve geopolimer kimyasının karşılaştırılması.....	10
Şekil 2.6. Geopolimer sisteminin değiştirilmesi.....	12
Şekil 2.7. Kalsiyum oksit - Alüminyum oksit - Silika oksit çimentolu ürünlerin üçlü diyagramları.....	13
Şekil 2.8. Puzolanların sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.9. Silis dumanının TEM mikrografı.....	18
Şekil 2.10. Silis dumanının a) tarayan, b) geçirgen ışıklı elektron mikroskoplarla çekilmiş resimleri.....	19
Şekil 2.11. Silis dumanı tane boyu dağılımı.....	21
Şekil 2.12. Silis dumanının mineralojik yapısını gösteren X-ışın difraktogramı.....	21
Şekil 2.13. (a) Asidik pomza ve (b) Skorya'ya ait görüntüler.....	25
Şekil 2.14. 2 (a) ve 7 (b) gün kürlenmiş BP esaslı çimento harçlarının basınç dayanımına inceliğinin etkisi.....	27
Şekil 2.15. Süperakışkanlaştırıcı çalışma mekanizması.....	32
Şekil 2.16. Polipropilen mikro ve makro lifler.....	34
Şekil 3.1. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı.....	36
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan kırma kum agregası.....	36
Şekil 3.3. Le Chatelier balonu ve balon Joje.....	37
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan kırma kum agregasının granülometrisi.....	37
Şekil 3.5. Harçların kalıplara yerleştirilmesi	40
Şekil 3.6. Kalıptan çıkarıldıktan sonra bekletilen numuneler.....	40
Şekil 3.7. Taze harç kıvam deneyi.....	43
Şekil 3.8. Taze harçlarda birim hacim kütle tayini.....	44
Şekil 3.9. UTEST cihazı ile eğilme dayanımı tayini	45

Şekil 3.10. Kılcal su emme deneyinden önce suya bırakılan ve sudan çıkartılan numuneler.....	47
Şekil 3.11. Kılcal su emme tayini deneyi düzeneği.....	47
Şekil 4.1. Yayılma çapı değerleri.....	49
Şekil 4.2. Birim hacim kütlesi değerleri.....	50
Şekil 4.3. Karışımların kuru birim ağırlık değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	51
Şekil 4.4. Karışımların kuru birim ağırlık değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	51
Şekil 4.5. Karışımların suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	54
Şekil 4.6. Karışımların suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri (silis dumanı %75, öğütülmüş bazik pomza %25).....	54
Şekil 4.7. Karışımların su emme oranı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	55
Şekil 4.8. Karışımların su emme oranı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	55
Şekil 4.9. Karışımların yüzdece görünür boşluk oranları (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	57
Şekil 4.10. Karışımların yüzdece görünür boşluk oranları (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	57
Şekil 4.11. Karışımların 7 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	60
Şekil 4.12. Karışımların 7 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	61
Şekil 4.13. Karışımların 28 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	63
Şekil 4.14. Karışımların 28 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	64
Şekil 4.15. Karışımların 7 günlük basınç dayanımı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	66
Şekil 4.16. Karışımların 7 günlük basınç dayanımı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	67

Şekil 4.17. Karışımların 28 günlük basınç dayanımı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	69
Şekil 4.18. Karışımların 28 günlük basınç dayanımı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	70
Şekil 4.19. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	71
Şekil 4.20. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	72
Şekil 4.21. Karışımların basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	73
Şekil 4.22. Karışımların basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	73
Şekil 4.23. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	74
Şekil 4.24. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	74
Şekil 4.25. Karışımların eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	75
Şekil 4.26. Karışımların eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	75
Şekil 4.27. Karışımların 1 saatlik süredeki kılcı su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	77
Şekil 4.28. Karışımların 1 saatlik süredeki kılcı su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	77
Şekil 4.29. Karışımların 24 saatlik süredeki kılcı su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50).....	78
Şekil 4.30. Karışımların 24 saatlik süredeki kılcı su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75).....	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Geopolimer, Portland çimentosu, cam, seramik ve alüminyum alaşımının fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	10
Çizelge 2.2. Silis dumanının SiO_2 içeriği.....	17
Çizelge 2.3. Alaşım tipine göre silis dumanının özgül ağırlığı.....	19
Çizelge 2.4. Silis dumanının inceliğinin diğer malzemelerle karşılaştırılması.....	19
Çizelge 2.5. Silis dumanlarının kimyasal bileşimi (%).....	20
Çizelge 2.6. Asidik ve bazik pomzaların genel kimyasal özellikleri.....	26
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları.....	35
Çizelge 3.2. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı ve özgül yüzey alanları.....	36
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan lifin özellikleri.....	38
Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri.....	39
Çizelge 3.5. Karışıma giren malzeme hacimleri.....	42
Çizelge 4.1. Karışımların taze haldeki yayılma çapı, birim hacim kütlesi değerleri.....	48
Çizelge 4.2. Karışımların KBA-SDKY-GBA değerleri.....	52
Çizelge 4.3. Karışımların yüzdece GBO-SEO değerleri.....	56
Çizelge 4.4. Karışımların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları.....	59
Çizelge 4.5. Karışımların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	68
Çizelge 4.6. Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri.....	76

1. GİRİŞ

Antik çağlardan beri insanoğlu barınma, çalışma ve diğer sosyal aktivitelerin oluşturulabileceği birçok yerin yapımında ana yapı malzemesi olarak kayaları kullanmıştır. Yüksek yapıların zaman içerisinde temel üzerinde oluşturduğu statik yükler ile hafif kaya malzemelerinin kullanımı artmaktadır. Yapı ve kaplama sektöründe ana hammadde olarak değerlendirilmeye başlanan hafif kayaların bazı benzersiz özellikleri göz önüne alındığında yapı sektöründe konfor için ana malzeme olarak sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu tür kayaların genellikle doğal gözenekli ve hafif kaya oluşumları olduğu bilinmektedir.

Genel olarak, yapı malzemesi belirli bir binada kullanılacak ise özelliklerden bir veya birkaçı bazı araştırma ve gözlemlere dayalı olarak belirlenen değerler arasında olmalıdır. Yapı malzemelerinin özellikleri büyük ölçüde iç yapıya bağlıdır (Smith, 2001).

Beton; kum, çakıl (veya kırmataş, hafif agrega vb.), çimento ve su karışımından elde edilen bir yapı malzemesidir. Bahsedilen malzemeler belirli bir oranda karıştırıldığında kalıptan istenilen şekli alabilen plastik bir malzeme elde edilir. Çimento, beton karışımlarında kullanılan en önemli malzemedir. Çimento çeşitleri hidrolik bağlayıcılardır ve su ile karıştırılıp macun haline getirildikten sonra hem havada hem de suda sertleşerek dayanım kazanmaktadır (Ersoy, 1995).

Çimentoya farklı fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklere sahip katkı maddelerinin eklenmesi, çimento yapısında önemli farklılıklara neden olur. Bu nedenle farklı çimento türleri ile üretilen betonların farklı özellik ve performanslara sahip olması kaçınılmazdır. Aslında katkılı çimento türleri, modern toplumun ihtiyaçlarını karşılayan temel bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (Çelik, 2005).

Çimento alanındaki güncel bilgiler, katkılı çimento çeşitlerinin zaman performansının ileri yaşlarda katkısız çimento ile hemen hemen aynı olduğu ve bazı çimento çeşitlerinin katkısız çimentodan daha üstün olduğu yönündedir (Yanç, 2000).

Geleneksel Portland çimentosu, günümüzde binalarda kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden biridir. Çelik malzemenin fiyatının yüksek olması, korozyona ve yangına dayanıklı olmaması nedeniyle ülkede çelik yapı kullanımı yaygın değildir. Ahşap malzeme esnekliğinden dolayı deprem bölgelerinde kullanılabilecek en iyi malzemelerden biri olmasına rağmen yangına dayanıklı olmaması, üç kattan fazla inşa edilememesi ve böcek sorunları olması nedeniyle tercih edilememektedir. Bu nedenlerle birçok ülkede betonarme yapıların kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Çağımızın inşaat dünyasında geniş bir kullanım alanına sahip olan beton, üretiminden uygulamaya kadar her aşamasında son derece dikkat ve titizlik gerektiren temel bir yapı malzemesidir. Çağdaş toplumların temelini oluşturan malzemeler arasında beton önemli bir yere sahiptir. Etrafa bakıldığında binaların, yolların, köprülerin, barajların, limanların, enerji santrallerinin, istinat duvarlarının, su depolarının, havaalanlarının vb. betondan yapıldığı görülmektedir. Diğer yapı malzemelerine göre beton; estetik özellikleri, daha kolay şekillendirilmesi, ekonomik ve dayanıklı olması, üretiminde daha az enerji tüketmesi, her yerde üretilmesi ile çok kullanılan yapı malzemesidir (Özkul ve ark., 2004).

Ancak bazı durumlarda normal beton kullanımı yetersiz kalmaktadır. Örneğin endüstriyel gelişmelere bağlı olarak enerji üretimi ve tüketimi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde enerji elde edilebilecek nükleer santrallerin çevreye olumsuz etki yaratmadan inşa edilmesi canlıların sağlığı ve sürdürülebilirliği için çok önemlidir.

Beton üretiminde kullanılan çimento, üretim sırasında çevreye çok fazla CO₂ salmaktadır. Bu salınan CO₂ çevre, çimento üreticileri ve insanlar için bir sorundur. Portland çimentosu üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ miktarı, geopolimer beton üretiminden %80 daha fazladır. Bu nedenle çimento yerine alternatif betonlar üretilmelidir.

Yapı malzemelerinde aranan özellikler iyi mukavemet ve dayanıklılıktır. Portland çimentosu iyi bir dayanıma sahip olmasına rağmen, şimdiye kadar yapılan çalışmalar, asit veya sülfat saldırıları gibi yüksek sıcaklıklara ve şiddetli çevresel koşullara karşı zayıf performans gösterdiği ortaya çıkmaktadır. Portland çimentosunun çevresel ve sürdürülebilirlik sorunları nedeniyle önümüzdeki günlerde geopolimer betonun daha fazla kullanılacağı açıktır. Bu nedenle geopolimer betonların yapıların yapımında kullanımı için gerekli standartların oluşturulması amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

Beton üretiminde Portland çimentosunun yerini çevre dostu geopolimer betonun alacağı düşünülmektedir. Geopolimer betonun önemli çevresel üstünlüğü nedeniyle Portland çimentosundan daha fazla kullanılacağı düşünülmektedir. Son yıllarda binaların yapımında kullanılan geleneksel Portland çimentosu üretimi, enerji tüketiminde en büyük paya sahiptir. Dünyada yaklaşık 4,6 milyar ton üretim kapasitesine ulaşmıştır (Bhagath ve Subramaniam, 2019). Çimento üretimi sırasında toplam maliyetin en yüksek payı enerji maliyetidir (%20-40). Bu nedenle Portland çimentosu yerine daha sürdürülebilir bağlayıcı malzemelerin kullanılmasına ihtiyaç vardır.

Geleneksel Portland Çimento üretiminin, dünya çapındaki sera gazı emisyonlarının %5 ila %7'sini oluşturduğu tahmin edilmektedir (Visintin vd., 2017). Beton üretiminin çevresel etkisini azaltmak için daha az doğal kaynak gerektiren ve daha az karbondioksit (CO₂) yayan bir enerji kaynağı gerektiren SPC alternatiflerine ihtiyaç olduğu tartışılmıştır. Bu amaca yönelik bir yaklaşım, SPC'nin, yanan kömürden kaynaklanan uçucu kül ve bir dizi metal çıkarma işleminden sonra elde edilen öğütülmüş cüruf gibi yan ürün malzemeleriyle tamamen değiştirilmesidir. Sonuç olarak, uçucu kül, cüruf, silis dumanı ve diğer doğal atıkların bir araya gelmesi sonucu yeni malzeme üretilir ve geopolimer olarak adlandırılır (He vd. 2013; Mijarsh vd. 2015; Farhana vd. 2015; Wianglor vd. 2017).

Toplumsal her düzeyinde artan çevre bilinciyle, beton, çimento ve kil-tuğla endüstrileriyle ilişkili sağlık tehlikeleri ve kirlilik çevreciler ve hükümetler tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmektedir (Okoye vd. 2017). Portland çimento betonunun dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği önemli bir konu olarak düşünüldüğünde, yeşil, dayanıklı ve sürdürülebilir betonlar yapmak için geopolimer gibi alternatif bağlayıcılar araştırılmaktadır. Portland çimentosu yerine geopolimer bağlayıcının kullanılmasıyla ilişkili iki önemli çevresel fayda vardır: potansiyel olarak azaltılmış sera gazı emisyonları ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımı. Esas olarak, geopolimer ve silis dumanı gibi herhangi bir alüminosilikat malzemenin alkali aktivasyonunun bir ürünüdür (Tailby ve MacKenzie, 2010). Yüksek erken dayanım ve kimyasal saldırı direnci, geopolimer

betonun Portland çimento betonuna göre avantaj sağlayan özelliklerinden bazılarıdır (Izzat vd., 2013; Shaikh, 2016). Bu bağlamda geopolimer, üretimdeki düşük maliyeti, düşük CO₂ emisyonu ve düşük enerji kullanımı göz önüne alındığında, beton için olası alternatif yeşil malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bu tür malzemeler hala geliştirmenin ilk aşamalarındadır ve teknik ve ekonomik olarak uygun olan inşaat malzemeleri haline gelmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duymaktadır.

Araştırmanın “çevre dostu” ürün ve süreçleri bulmayı amaçladığı göz önüne alındığında, en önde gelen malzemelerden biri silis dumanıdır. Silis dumanı, ferro-silikon veya silikon metallerinin üretiminde kullanılan elektrik ark fırınlarından elde edilen bir yan üründür (Santosh vd., 2017). %90'dan fazla silika içeren ve esasen amorf olan çok ince küresel partiküllerin yüksek içeriğine sahip olan silis dumanı, fırınlardan çıkan gazların filtrelenmesiyle toplanmaktadır (Papa vd., 2016).



2. KAYNAK TARAMASI

Bu çalışmada geopolimer harçların üretiminde silis dumanı, öğütülmüş bazık pomza ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmıştır.

2.1. Geopolimer

2.1.1. Geopolimerlerin tarihsel gelişimi

Geopolimer kelimesi genellikle alkali ile aktive olan malzemelerin bir alt grubunu ifade eder. Düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül ve kalsine killer (örneğin metakaolin), geopolimer sentezinde kullanılan en yaygın öncülerdir. Geopolimer teriminin 1970'lerde Fransız bilim adamı ve mühendis Joseph Davidovits tarafından ortaya atıldığının altı çizilmelidir (Davidovits, 1991; Davidovits, 1982; Davidovits, 2008).

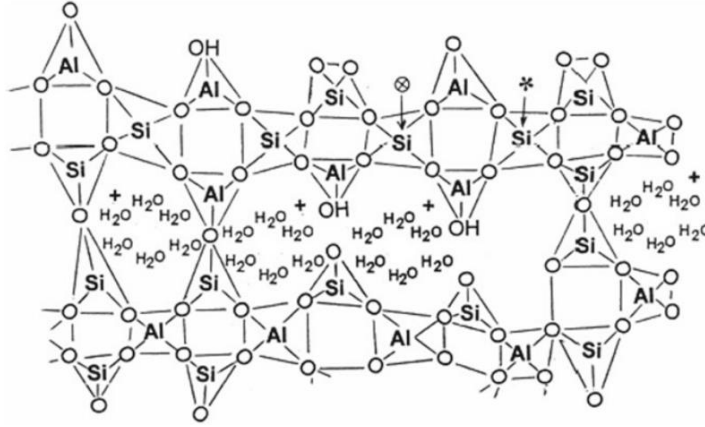
“Geopolimer” terimi 1970'lerde Fransız bilim adamı ve mühendis Prof. Joseph Davidovits tarafından icat edilmiş ve bir alüminosilikat tozunun bir alkali çözelti ile reaksiyonu ile sentezlenen bir katı malzeme sınıfına uygulanmıştır (Davidovits 1982a, 1991, 2008). Bu malzemeler orijinal olarak Avrupa'daki bir dizi yangının ardından organik ısıyla sertleşen polimerlere yangına dayanıklı bir alternatif olarak geliştirilmiş ve bu ilk çalışmaya dayanan ürünler o zamandan beri yolcu gemileri için yangından korunma kaplamaları, yüksek sıcaklıkta reçine, karbon fiber kompozitler, ahşap yapıların termal korumasında, ısıya dayanıklı yapıştırıcı, monolitik refrakter olarak uygulama bulmuştur (Provis ve Deventer, 2009).

Geopolimer tarihi, sodyum hidroksit ile yüksek fırın cürufu aktivasyonu üzerine Purdon'un çalışmalarıyla birlikte 1940'lerde başlamıştır (Pacheco-Torgal vd., 2013). Purdon, birinci adımda silis, alüminyum ve kalsiyum hidroksitlerin serbest bırakılmasını ve ikinci aşamada alkali çözeltinin yenilenmesi ile birlikte silis ve alüminyum hidratların oluşumunu içeren iki aşamalı bir mekanizma önermiştir. Bu araştırmalara önemli bir katkı da 1960'lardan 1980'lere kadar Glukhovsky (1959, 1965, 1978, 1980, 1981) tarafından yapılmıştır. Glukhovsky, kayaç ve kil minerallerinin alkali davranışında, katılaşma ürünleri olarak yeni bir sınıf zeolit benzeri hidratlar (kalsiyum ve sodyum alüminosilikat hidratlar) tanımlamıştır.

Alkali aktive edilmiş veya geopolimer çimentoların tanımı için açık bir terimlendirme sisteminin eksikliği, bu alanda önemli bir sorundur. Bunun gibi çoğu benzer malzeme için, şimdiye kadar birçok farklı isim kullanılmıştır. Zemin çimentosu, alkali çimento, mineral polimer ve geopolimerin yanı sıra, geoçimento (Krivenko, 1994), düşük sıcaklık alüminosilikat cam (Rahier vd., 1996), alkali aktive edilmiş çimento (Palomo ve Palacios, 2003), alkali-bağlı seramik (Mallicoat vd., 2005), hidroçimento (Bao vd., 2005) ve inorganik polimer betonunu (Sofi vd., 2007) kapsayan farklı terimlendirme çeşitleri, farklı araştırmacılar tarafından kullanılmıştır.

2.1.2. Geopolimerlerin oluşum mekanizması ve geopolimerizasyon

Geopolimerler, çapraz bağlı $[AlO_4]$ ve $[SiO_4]$ tetrahedral birimlerden ve alkali metal katyonlarından oluşan üç boyutlu bir ağ yapısına sahip inorganik polimerik malzemelerdir. 40 yılı aşkın bir süredir, özellikle son 20 yılda, geopolimer, üstün performans özelliklerine sahip yeni bir inorganik metalik olmayan malzeme türü olarak, malzeme bilimcilerinin ve teknisyenlerinin giderek daha fazla ilgisini çekmiştir. Alkali ile aktive olan bir tür çimentolu malzeme olan geopolimer, belirli koşullar altında kürlenir. Mukavemet, organik polimere (yani organik polimer malzemelere) çok benzeyen $-Si-O-$ ve $-Al-O-$ birimlerinin polimerizasyonundan elde edilir ve geopolimerler tipik olarak amorf veya kısmen kristalleşir. Geopolimer kavramı ilk olarak 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından önerilmiştir. Geopolimerde, $[AlO_4]$ ve $[SiO_4]$ tetrahedral birimler oksijen atomlarını paylaşarak birbirleriyle çapraz bağlanır ve Li^+ , Na^+ , K^+ ve Cs^+ gibi katyonlar, negatif yüklü birimleri ve analog yapıyı dengeleyerek geopolimer ağının gözeneklerinde dağılır (J. Davidovits, 1991; D. Jia, P. He, 2007). Geopolimerin miktarı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Geopolimerin analog yapısı aşağıdaki Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



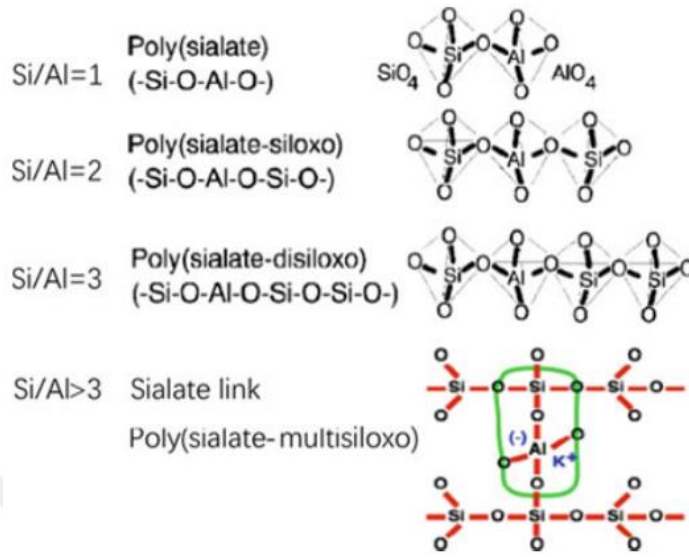
Şekil 2.1. Geopolimerin analog yapısı (J. Davidovits, 2008)

Aktivatöre göre, geopolimer, alkali ile aktive olan geopolimer sistemi ve fosfatla aktive olan geopolimer sistemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık literatür çalışmalarına göre, alkali ile aktive olan geopolimer sistemi en çok çalışılan sistemdir. Ayrıca alkali aktif geopolimer sistemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

Hammadde türüne göre; Metakaolin, illit, kuvars, uçucu kül ve cüruf gibi mineraller ve endüstriyel yan ürünlerin tümü geopolimer hazırlamak için kullanılmakta ve ortaya çıkan geopolimer, metakaolin bazlı geopolimer, kuvars bazlı geopolimer, uçucu kül bazlı olarak adlandırılmaktadır. Metakaolin tozları, endüstriyel yan ürünlerde yaygın olarak bir arada bulunan safsızlığın kirlenmesini önleyen nispeten saf bileşimi nedeniyle, geopolimerin geopolimerizasyon mekanizmaları çalışması için yaygın olarak seçilmektedir. Metakaolin bazlı geopolimer ayrıca diğerlerinden daha ince mikro yapı, daha yüksek mekanik ve termal özellikler göstermiştir.

Geopolimer monomerindeki AlO_4 ve SiO_4 birimlerinin miktarına (Si/Al oranı) göre; Şekil 2.2'de gösterildiği üzere Davidovits geopolimerleri dört kategoriye ayırmıştır: Si/Al = 1 (PS) olduğunda poli(sialate), Si/Al = 2 (PSS) olduğunda poli(sialate-

siloxo), $Si/Al = 3$ (PSDS) olduğunda poli(sialate-disiloxo) ve $Si/Al > 3$ (PSMS) olduğunda poli(sialate-multisiloxo).



Şekil 2.2. Farklı Si/Al oranlarına sahip geopolimerin yapısal birim modeli (J. Davidovits, 1989)

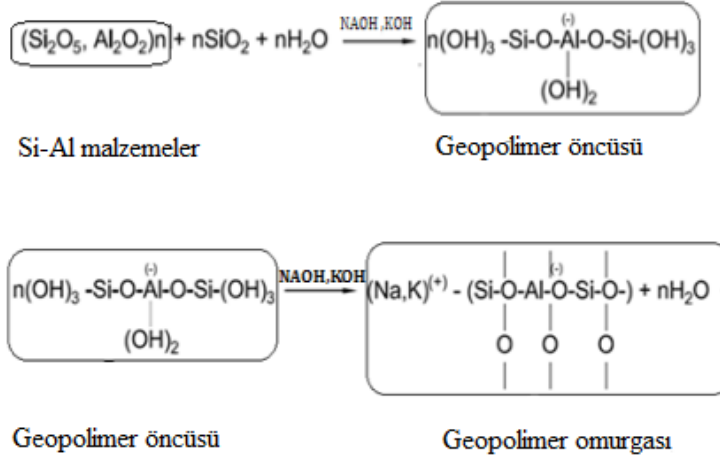
Alüminosilikatın bir alkali çözelti ile birleştirilmesi ve diğer elementler (kuru katılar), geopolimerlerin kaynağı olan polimerik sentetik malzemelerdir. Alüminyum ve silikonlu zengin hammaddeler birincil elementlerdir ve atık maddeler ise kil, cüruf, pomza, kırmızı çamur, kaolinit vb. diğer bileşenlerdir (Lloyd vd., 2010). Genellikle çözünmüş alkali metaller ve potasyum hidroksit, potasyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözücü hedeflerdir. Bazı durumlarda, jeosentez terimi, doğal olarak oluşan alüminosilikatlar da dahil olmak üzere minerallerin kimyasal olarak harmanlandığı süreç olan geopolimerizasyonu ifade etmek için kullanılır (Davidovits vd., 1994; Lloyd vd., 2010; Muduli vd., 2013).

Glukhovsky tarafından 1950'lerde, esas olarak alıcı alümina ve silikadan oluşan malzemeler için alkaliyi aktive etmek için bir mekanizma önerildi. Geopolimer yapısının kimyasal süreçlerinin gelişimi iyi bilinmemektedir, ancak onlar için daha basit teoriler mevcuttur. İşlem, Glukhovsky modeli tarafından ilk olarak yıkım-pıhtılaşma, pıhtılaşma-yoğunlaşma ve son olarak yoğunlaşma-kristalizasyon olarak sınıflandırılmıştır.

Yıkım-pıhtılaşma aşamasında, bir alüminosilikat molekülünün NaOH gibi bir alkali çözelti içinde çözülmesiyle, ilk $Al_2O_4^-$ ve $Si_2O_4^-$ tetrahedra geliştirildi ve çözücünün silikon doygunluğuna göre rastgele bir tür monomer oluşturuldu. (Si_2O_5 , Al_2O_2)n'nin üretimi, alümino-silikat hidroksitlerin kalsinasyonu ve Silikon dioksit ve Alüminyum(I) oksit buharının yoğunlaştırılması yoluyla gerçekleştirilir (Neuschäffer vd., 1986). Alkali ile poli (sialatesilokso) halinde polikondenzasyon malzemesi şematik yapısı Şekil 2.3'te formüller ile açıklanmıştır.

Olası fark (genellikle Na^+ ve/veya K^+), AlO_4^- grubundaki alkali katyonlar tarafından yük dengelenir. Aşırı doymuş alüminosilikat çözeltisi, amorf alüminosilikatların yüksek pH'da hızlı çözünmesinin bir sonucu olarak hızla oluşur. Sudaki oligomerlerden yoğunlaştırma yoluyla büyük ağlar oluşturulduğunda, sonuç

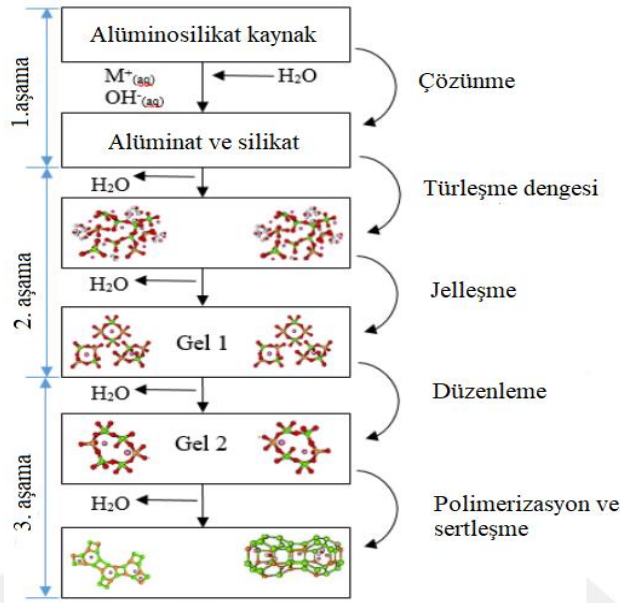
olarak jel konsantre çözeltilerde oluşur. Genellikle çözünme yoluyla tüketilen su dışarı atılır. O zaman bile su, bir reaksiyon ortamının işlevini yerine getirir ve jel kaplarının içinde kalır. Genel olarak, bu tür jel düzenlemesi, iki fazı içeren alüminosilikat bağlayıcı ve su tarafından iki fazlı olarak adlandırılır.



Şekil 2.3. Polikondenzasyon malzemesi şematik yapısı (Neuschäffer vd., 1986)

Pıhtılaşma-yoğunlaşma aşamasında, OH⁻ iyonları bu noktayı hızlandırmaya yardımcı olur. Oluşan kümeler, silika asit polimerizasyonunun bir sonucu olarak kolloidler oluşturarak tüm lokasyonlara yayılıyor gibi görünmektedir. Alüminatlar, silikon tetrahedrayı izomorfik olarak değiştirerek polimerizasyona yardımcı olur. İlk adım alkali metal tarafından katalize edildiğinden, ikinci adımda yapısal bir eleman olarak işlev görür. Jelin, çözelti bileşimi, sentez ve ham madde işleme koşulları ile sürekli olarak oluşması için aşırı doymuş alüminosilikat çözeltisinin süresi farklıdır (Aiello vd., 1991; Ivanova vd., 1994). Buna rağmen, bazı cihazlar jelleşmez. Bu tipik olarak seyreltilir ve salınım, çözünür silikon ve alüminyumun gücüyle saptanır, bu da mekanizmanın çözeltiden uzakta yavaş bir tepkimesiyle sonuçlanır (Faimon vd., 1996).

Yoğunlaşma-kristalleşme aşamasında, partiküllerin başlangıçtaki katı formu, maddeye bağlı olarak çökmeyi teşvik eder. Bu öğelerin bileşimi, ana malzemelerin kimyasal yapısına ve mineralojisine, kür koşullarına ve ayrıca kullanılan alkalin aktivatöre bağlıdır. Jel oluşturma işleminden sonra, basit jel ağı genişler ve geopolimerlerin üç boyutlu alüminosilikat çerçevesine yaygın olarak bağlanmasıyla sonuçlanırken, süreç yeniden organize olmaya ve yeniden yapılanmaya başlar. Glukhovsky'nin hipotezleri (Fernandez vd., 2005; Duxson vd., 2008) genel olarak polimerizasyon mekanizmasını açıklamak için geliştirilmiştir (Duxson vd., 2006). Bu birkaç 'jel' fazının eklenmesiyle Şekil 2.4'te görülmektedir. Davidovits'e göre, polimerizasyon için sertleştirme prosedürü genellikle geopolimerik katalizörlerin, normal olarak alüminosilikat oksitlerin, polimerik SiO-Al temasları oluşturan hafif alkali polisilikat sıcaklıkları ile polikondenzasyon prosedürünü içerir (Provis vd., 2005). Bununla birlikte, tasvir edilirler. Bu suyun öncelikle geopolimer büyümesinde meydana gelen kimyasal dönüşüm sırasında üretildiği anlamına gelmektedir. Kütleme aşaması sırasında, bu su karışımdan çıkarılır. Bu, matristeki ayrı nano delikler tarafından kaçmaya devam etmektedir.



Şekil 2.4. Geopolimerizasyon mekanizmasının kavramsal adımları (Fernandez-Jimenez vd., 2006)

Geopolimerler, genellikle alkali ile aktive edilmiş malzeme olarak bilinen bir grup malzemeye dahil edilmiştir. Alkali aktif bağlayıcılar, kullanılan malzemelere ve oluşan reaksiyon fazlarına bağlı olarak bileşim açısından iki ana bölüme ayrılabilir (Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999). Birincisi, Si ve Ca bakımından zengin malzemelerin (Portland çimentosu veya cüruf) yumuşak alkalilerle aktivasyonunu içerir. İkincisi, Si ve Al açısından zengin maddelerin (metakaolin, doğal puzolanlar, vb.) etkili alkalilerle aktivasyonunu içerir.

Bir malzemenin bozulması, özellikle agresif ortamlara maruz kaldığında, çeşitli kimyasal veya fiziksel işlemler yoluyla meydana gelebilir. Bir malzemenin dayanıklılığı, hizmet davranışı, tasarım ömrü ve güvenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bölümde, inorganik polimer çimentonun (IPC) dahil olduğu kimyasal işlemlere vurgu yapılmaktadır. Herhangi bir malzemenin dayanıklılığı, mineralojik bileşimi ve mikro yapısı ile yakından ilişkili olduğu için, her durumda oluşan reaksiyon ürünleri arasındaki önemli farklılıklar göz önüne alındığında, sıradan Portland çimentolarına (OPC) göre bulunan önemli farklılıklar beklenmedik olamaz. IPC'deki ana reaksiyon ürünü, OPC hidrasyonunda oluşturulan C-S-H jelinden belirgin şekilde farklı olan üç boyutlu bir yapıya (zeolit öncüsü olarak kabul edilir) sahip bir alkalın alüminosilikat jeldir. Ayrıca ikincil reaksiyon ürünü olarak bazı kristalli zeolitler oluşturulabilir (Davidovits 1994; Palomo vd.. 1999a, 2004; Fernández-Jiménez ve Palomo 2005a; Duxson vd., 2007).

Bu tip malzemede $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin varlığı genellikle saptanmaz. OPC'nin ortaya çıkardığı dayanıklılık problemlerinin birçoğunun şu veya bu şekilde fazlarının kalsiyum içeriği ile ilişkili olduğu göz önüne alındığında, birçok durumda bozunma işlemlerinin iki tip malzemede farklılık göstermesini beklemek normaldir (Taylor ve Gollop, 1997).

2.1.3. Geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Geopolimer terimi, yeni malzemelerin başarılı bir şekilde geliştirilmesinin anahtarıdır. Yüksek teknoloji kullanıcıları için geopolimerler polimerlerdir ve bu nedenle petrolden türetilen organik polimerlere benzer şekilde dönüştürülmekte, polikondenzasyona uğramakta ve birkaç dakika içinde hızla düşük sıcaklıkta ayarlanmaktadır. Ancak bunlar ayrıca GEO-polimerlerdir, yani inorganik, sert, 1250°C'ye kadar sıcaklıkta kararlı ve yanıcı değildir. Bu, yaratıcılığa ve yeniliğe muazzam bir destek vermiştir.

Yukarıda kullanılan terminolojiye göre yaygın silikat mineralleri, kesinlikle çok yoğunlaştırılmış siyalatlardır. Bu anlamda yerkağının çoğunluğu silokso-sialatlar ve siyalatlardan oluşmaktadır. Bu terminolojiye göre albit-anortit ortak feldspat serisinin albit için poli(sialat-disilokso) ve anortit için poli(disilat) olarak tanımlanabileceği kolaylıkla kontrol edilebilir.

Aktivasyon iyonlarına göre geopolimer, Li⁺, Na⁺, K⁺, R⁺, Cs⁺, NH₄⁺, Ca⁺, Ba⁺ veya karışık alkali iyonlarına ayrılmaktadır. Elde edilen geopolimer, Na bazlı geopolimer, K bazlı geopolimer, Cs bazlı geopolimer, Cs_xK_(1-x) bazlı geopolimer ve kısa sürede alkali iyonlarının yarıçapının artmasıyla adlandırılmakta ve ortaya çıkan geopolimer, gelişmiş mekanik ve termal özellikler göstermektedir. Örneğin, K bazlı geopolimer, Na bazlı geopolimerden çok daha yüksek bir geopolimerizasyon oranı gösterir ve lösit için (K bazlı geopolimerden türetilen) erime noktaları, nefelinden (Na bazlı geopolimerden türetilen) çok daha yüksektir ve pollucite (Cs bazlı geopolimerden türetilmiştir), tüm cam seramikler arasında 1900 °C gibi en yüksek erime noktalarına sahiptir.

Geopolimerler nispeten düşük sıcaklıklarda hazırlanabilir, ancak düşük termal iletkenlik (0,24–0,38 W/m K), düşük yoğunluk (2,2–2,7g/cm³), ısı direnci, korozyon direnci, radyasyon direnci, organik çözücülerde çözünmezlik ve sızıntı önleme ve çok çeşitli hammadde kaynakları, basit teknoloji, düşük sıcaklıkta hazırlama, daha az enerji tüketimi ve düşük çevre kirliliği gibi birçok erdeme göre Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi geleneksel seramikler, reçineler ve alüminyum alaşımları ile karşılaştırılabilir mekanik özelliklerinin yanı sıra 1000-1200 °C'ye kadar yüksek sıcaklık aralıklarında hizmet vermektedirler. Bu benzersiz özellikler, geopolimerleri inşaat, metalurji, plastik, refrakter, otomobil ve havacılık alanlarında ısıya dayanıklı yapısal malzemeler vaat etmektedir (P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, 2007). Ayrıca geopolimerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, düşük enerji tüketimi ve CO₂ emisyonuna sahip çevre dostu sentetik yöntemiyle daha da motive edilmektedir (P. Duxson, J.L. Provis, 2008).

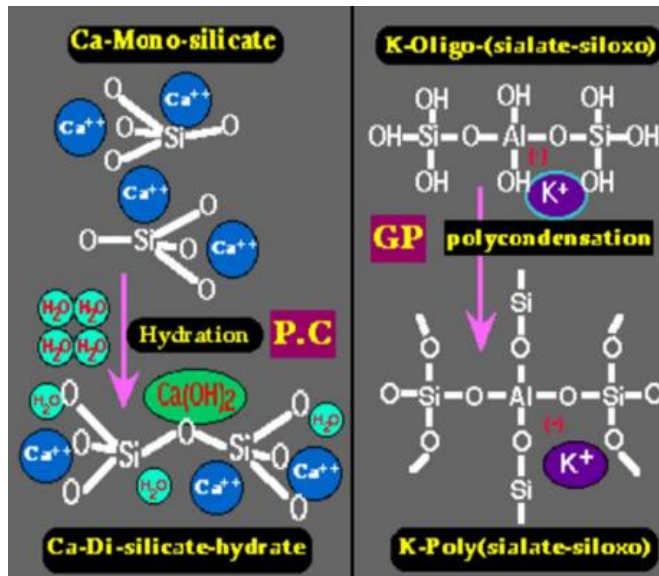
Bununla birlikte, çimento ve seramik gibi diğer kırılman malzemeler gibi, temiz geopolimer malzemeler hem düşük mekanik performans hem de yıkıcı kırılma davranışı gibi dezavantajlara sahiptir; bunlar aşılma engelleridir ve özellikle yapısal bileşenler olarak kullanıldıklarında geniş uygulamalarını sınırlamaktadır.

Çizelge 2.1. Geopolimer, Portland çimentosu, cam, seramik ve alüminyum alaşımının fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması (T. Lin, D. Liang, 2009)

Tür	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite modülü (GPa)	Gerilme direnci (MPa)	Eğilme direnci (MPa)	Kırılma işi (J cm ⁻³)
Geopolimer	2,2-2,7	50	30-190	40-210	50-1500
Portland çimentosu	2,3	20	1,6-3,3	5-10	20
Cam	2,5	20	1,6-3,3	5-10	20
Seramik	3,0	200	100	150-200	300
Alüminyum alaşımı	2,7	70	30	150-400	10000

2.1.4. Portland çimentosu ve geopolimer kimyasının karşılaştırılması

Şekil 2.5, Portland çimentosu ve Geopolimerin kimyasını göstermektedir. Şekil 2.5'in sol tarafında, kalsiyum silikat hidratasyonu yoluyla kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve portlandite, Ca(OH)₂'ye sertleşen Portland çimentosu gösterilmektedir. Şekil 2.5'in sağ tarafı geopolimer çimento ayarını (GP) gösterirken, çapraz bağlı bir potasyum poli-(sialatesiloxo) ağına potasyum oligo -(sialatesiloxo) poli-yoğunlaşması meydana gelir.



Şekil 2.5. Portland çimentosu ve geopolimer kimyasının karşılaştırılması (Davidovits, 2008)

2.1.5. Geopolimer beton özelliklerini etkileyen faktörler

Bilim adamları, özellikle geopolimer sentezi sırasında, geopolimer malzeme özelliklerini etkileyebilecek birçok faktöre dikkat çekmişlerdir. Van Jaarsveld tarafından yapılan bir araştırma, polimerik gelişimin oluşumunun, içindeki ağır metallerin varlığından çok fazla etkilenmediğini, bunun yerine oluşan geopolimer malzemeleri ve bunların fiziksel özelliklerini etkileyebileceğini belirtmiştir.

Palomo vd. (1999), geopolimer beton sentezi için hem kür süresinin hem de sıcaklığın önemli faktörler olduğuna dikkat çekmiştir. Sıcaklığın reaksiyonu hızlandırdığını, bu da reaksiyon adımlarının etkileşimine neden olduğunu, böylece sıcaklık arttıkça mekanik mukavemetin de arttığını eklemiştir. Ayrıca, sodyum silikat ve potasyum silikat alkali çözeltileri içeren alkali çözeltilerin reaksiyonunu hızlandırmak için tek başına hidroksit alkali çözeltilerinden daha iyi bir seçim olacaktır. Ayrıca 65 ila 86 °C arasındaki sıcaklıkta uzun süre tutularak yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Xu vd. (2002), alüminyum ve silikat gibi doğal olarak oluşan mineralleri kullanarak geopolimer sentezini etkileyen faktörleri araştırmak için araştırma yapmışlardır. Kullanılan mineral NaOH olduğunda daha yüksek bir çözünme derecesi elde edilirken KOH, NaOH'ninkinden daha düşük bir çözünme derecesi gerçekleştirilmiştir. Mineralde bulunan silikat ve alüminyumun molar oranı, alkali formu, CaO yüzdesi, K₂O, silikat çözünme derecesi ve molar Si-Al oranı gibi diğer faktörlerin de basınç dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

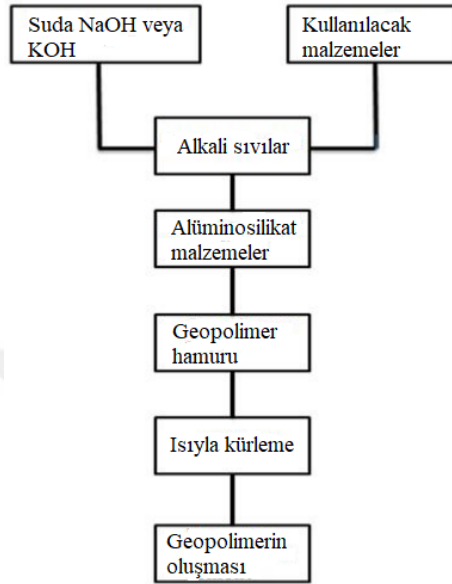
Van Jaarsveld ve ark. (2002), kompozisyon ve sıcaklığın geopolimerler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Geopolimer nihai özellikleri, su içeriği ve kaolin killerinin kalsine edilme koşulları gibi çeşitli vektörlerden etkilenmiştir. Öte yandan, kütleme fiziksel özelliklerde önemli bir rol oynar, geopolimer hafif kürlendiğinde iyileştirilmiş fiziksel özellikler gösterirken, yüksek ısıtma hızlı kürlendiğinde fiziksel özellikleri olumsuz etkileyen çatlama ile karşılaşmışlardır.

Xu vd. (2002), geopolimer betonun özelliklerini etkileyen faktörlerden birinin kaynak malzeme olduğunu vurgulamıştır. Uç özellikleri ve bunların geopolimer betonun sentezlenmesi üzerindeki etkileri karşılaştırılarak üç kaynak malzeme olan uçucu kül, kaolinit ve albit tartışılmıştır. Geopolimer için üretilen kaynak malzeme uçucu kül olduğunda priz alma ve sertleşme 7 gün sürerken, geopolimerler kaolinit ve albitten üretildiğinde uçucu külden 28 gün daha mekanik dayanım elde edilmiştir.

Hardjito vd. (2007), geopolimer betonun özelliklerini etkileyen faktörleri tartışmışlardır. Çalışmalarında, önemli bir faktörün altını çizdiler, örneğin, sodyum hidroksit konsantrasyonunun artırılması, basınç dayanımı artışına neden olmuştur. Ayrıca, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı kütlece artırıldığında, daha yüksek basınç dayanımına sebep olmuştur. 900 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklık kürlendiğinde mukavemetin de arttığını, ayrıca daha fazla suyla işlenebilirliğin arttığını ancak basınç dayanımının azalacağını belirtmişlerdir. Bu faktörlerin ve diğer birçok faktörün tartışılması, geopolimer betonun ve sıradan Portland çimento betonunun karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir.

Kaynak malzemeler ve alkali sıvılar geopolimeri oluşturmanın ana bileşenleridir. (Şekil 2.6), geopolimer sisteminin değişimini gösterir. Geopolimer bağlayıcı tipik olarak,

bir alkali ajan (aktif edici solüsyon veya aktivatör) ile reaksiyona giren reaktif alüminosilikat tozu ile oluşur. Silikat ve alüminada bol miktarda bulunan puzolanlar, alkali çözeltilerle olağanüstü sertleştirilmiş malzeme oluşturmak için yanıt verebilmektedir. Geopolimer, gelecek ürünlerle birlikte geopolimer bağlayıcının özelliklerini ayarlamak ve geliştirmek için kullanılmaktadır.

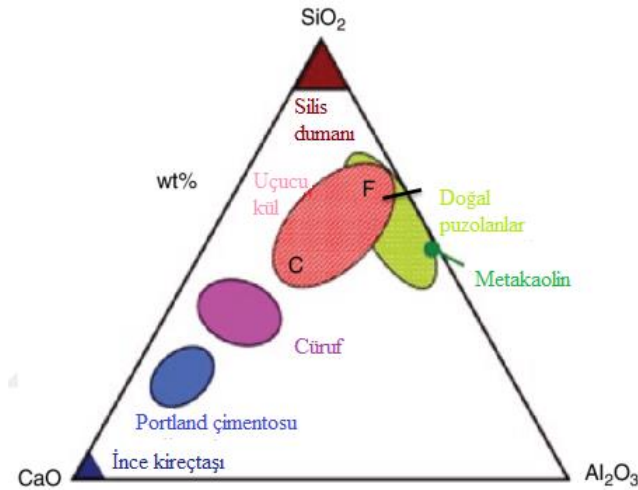


Şekil 2.6. Geopolimer sisteminin değiştirilmesi

2.2. Kaynak Malzemeler

Yapay puzolandan (yan ürün maddeler) veya doğal puzolandan (jeolojik ürünler), sentetik alümino-silikat polimeri çıkarılır. Doğal geopolimerde Portland çimentosu yoktur ve tipik bir endüstriyel atık veya minimum düzeyde işlenmiş doğal malzeme, toz bağlayıcı için alümina ve silika ile zenginleştirilmelidir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere yapay puzolanlar, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel türevleri içerir (Güneyisi vd., 2004). Geopolimerlerin geliştirme kaynaklarının seçilmesi, bulunabilirlik, kalite, ürün kategorisi ve gerçek müşteri talebine bağlıdır.

Geopolimer harç üretiminde hammadde olarak endüstrilerden yan ürünlerin kullanılması çeşitli araştırmalarda önerilmiştir. Pomzanın zamanla yaygın olduğu kanıtlanmıştır ve son yirmi yıldır Türk sanayi pazarında kullanılmaktadır (Yıldız vd., 2009). Bims, son derece yüksek silika bileşeni nedeniyle inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Türkiye güçlü pomza rezervlerine sahiptir. İncelenen alanlarda yaklaşık 3 milyar m³ vardır.



Şekil 2.7. Kalsiyum oksit - Alüminyum oksit - Silika oksit çimentolu ürünlerin üçlü diyagramları (Khatib vd., 2016)

2.2.1. Doğal ve yapay puzolanlar

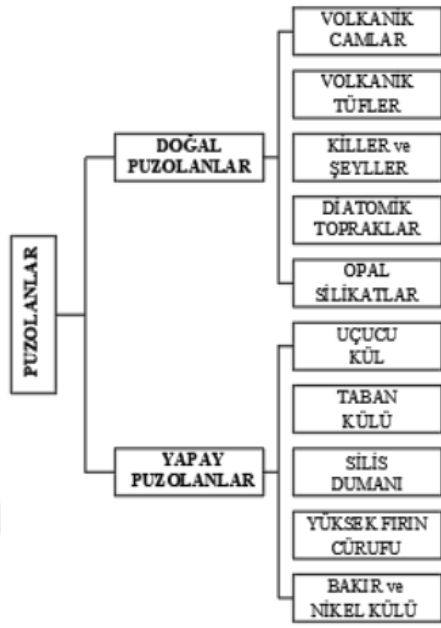
ASTM C618-94'e göre puzolanlar kendi başına bağlayıcı özelliği çok az olan veya hiç olmayan, fakat ince öğütüldüğünde ve nem varlığında, normal sıcaklık şartlarında kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girdiklerinde, bağlayıcı özelliği olan bileşiklere dönüşen silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir. Puzolanların yapılarında esas olan silis ve alümin oksitleriyle birlikte demir ve kalsiyum oksit, nispeten düşük miktarda alkali ve karbon bulunabilmektedir (Xie vd., 2001).

Puzolanlar, Şekil 2.8'de görüldüğü üzere genel manada iki temel grup şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bunlar doğal puzolanlar ve yapay puzolan gruplarıdır. Doğal olarak nitelenen birinci gruptaki puzolanlar herhangi bir kimyasal ya da işleminden geçmeyerek doğal olarak ortaya çıkan malzemeler olup, sadece kırma, öğütme ve eleme gibi yöntemlerle elde edilmektedir. Volkanik camlar, volkanik tüfler, diatomlu topraklar, traslar ve bazı killeri bu gruba giren doğal puzolanlardır. Yapay olarak nitelenen ikinci gruptaki puzolanlar ise bazı endüstri kollarında yan ürün ya da atık olarak ortaya çıkan malzemelerdir. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufuları en yaygın olarak bilinen yapay puzolanlardır (Bilim, 2006).

Doğal puzolanlar yüzyıllardır kullanılmaktadır. "Puzzolan" terimi, MS 79'da Vezüv Yanardağı'nın püskürmesinin ardından İtalya'nın Napoli yakınlarındaki bir köy olan Pozzuoli'de çıkarılan volkanik külden gelir. Bununla birlikte, volkanik kül ve kalsine kil kullanımı, diğer kültürlerde MÖ 2000 ve daha öncesine dayanmaktadır. Roma, Yunan, Hint ve Mısır puzolan beton yapılarının çoğu bugün hala görülebilmekte ve bu malzemelerin dayanıklılığını doğrulamaktadır.

Doğal puzolanlar volkanik camlar, volkanik tüfler, silisler olup bir kimyasal işleminden geçmeden oluşan ve kırma, eleme, öğütme yoluyla elde edilen malzemelerdir. TS 25 (2008)'de silisli veya alüminyum silikatlı veya bunların birleşimi sonucu oluşan sedimanter ve volkanik kayalar olarak tanımlanmaktadır. Doğal puzolanların yapısında silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) ana bileşen

olarak bulunmaktadır (Mehta, 2006).



Şekil 2.8. Pozolanların sınıflandırılması

Yapay pozolanlar endüstrinin çeşitli dallarında atık veya yan ürün olarak oluşan malzemelerdir. Bu atıklar başka bir bağlayıcı ile kullanıldığı zaman bağlayıcılık özelliği kazanmakta ve bu nedenle katkı maddesi olarak kullanılabilir. Yapay pozolanlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar uçucu kül, yüksek fırın cürufu, taban külü ve silis dumanıdır. Dış etkenlere karşı (deniz suyu, yağmur suyu, yeraltı suyu vb.) dayanıklı harç ve beton üretiminde yapay pozolanların beton içinde çözünerek boşluk üreten CH jellerini bağladığı için mineral katkı olarak kullanımı yaygındır. Kütle betonlarında hidratasyon ısısını düşürmek için çimento yerine ikame olarak bu mineral katkılar kullanılmaktadır (Hamalı, 2007).

2.2.2. Doğal ve yapay pozolanların geopolimerlerde kullanımı

2.2.2.1 Uçucu kül

Uçucu kül, kömürle çalışan enerji santrallerinde baca gazlarıyla birlikte kazandan dışarı atılan ince katı partikül kalıntısıdır. Artık çimento benzeri bir ürün gibi davranan geopolimer yapımında kullanılabilir. Geopolimer teknolojisi, çevreye biraz olumsuz etki yaparak uçucu kül kullanımına alternatif iyi bir çözüm sunar. Bu derleme, uçucu kül bazlı geopolimerin hazırlanması, özellikleri ve uygulamalarında bilimsel ilerlemeleri özetlemekte ve incelemektedir. Uçucu kül bazlı geopolimer üretimi, esas olarak, ılıman koşullar altında meydana gelebilen ve çimento üretiminden çok daha düşük CO₂ emisyonu nedeniyle daha temiz bir süreç olarak kabul edilen alkali ile aktive edilmiş geopolimerizasyona dayanmaktadır. Geopolimerizasyon, uçucu kül veya dış kaynaklardan gelen eser toksik metal elementleri yakalayabilir ve sabitleyebilir. Si/Al oranları, alkali çözeltisinin tipi ve miktarı, sıcaklık, kürleme koşulları ve katkı maddeleri bir geopolimerizasyon prosesinde kritik faktörlerdir. Uçucu kül bazlı geopolimerin basınç

dayanımı, eğilme ve yarmada çekme dayanımı ve klorür, sülfat, asit, termal, donma-çözülme ve çiçeklenme direnci gibi dayanıklılık dahil olmak üzere mekanik performansları birincil endişelerdir. Uçucu kül bazlı geopolimerin bu özellikleri, doğası gereği kimyasal bileşime ve kimyasal bağa ve gözenekliliğe bağlıdır. Mekanik özellikler ve dayanıklılık, Si/Al oranları, alkali çözeltiler, kür koşulları ince ayarlanarak ve cüruf, lif, pirinç kabuğu-kabuğu külü ve kırmızı çamur eklenerek iyileştirilebilir. Uçucu kül bazlı geopolimerin bir tür yeni yeşil çimento olarak kullanılması bekleniyor. Uçucu kül bazlı geopolimer, toksik veya radyoaktif metalleri emmek ve hareketsiz hale getirmek için bir malzeme sınıfı olarak kullanılabilir. Uçucu kül bazlı geopolimer betonun performansını etkileyen faktörler, özellikle agrega içinde tartışılmaktadır. Uçucu kül bazlı geopolimer üzerine gelecekteki çalışmalar için mekanik performansın daha da artırılması, üretimin büyütülmesi ve yeni uygulamaların keşfedilmesi önerilmektedir (Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., 2016).

J.G.S. van Jaarsveld vd., kendi çalışmalarında, faz bileşiminin çözünme davranışı, reaktivite ve son olarak uçucu kül bazlı geopolimerik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için farklı kaynaklardan elde edilen uçucu külü karakterize etmek için XRD ve FTIR tekniklerini kullanmışlardır. Mevcut çalışma, uçucu kül bazlı geopolimerlerin nihai yapısının ve fiziksel özelliklerinin, su içeriği, termal geçmiş, parçacık boyutu ve kristallik derecesi veya amorfik dahil olmak üzere çeşitli malzeme parametrelerine bağlı olduğunu göstermiştir. Yüksek alkali ortamlarda çözünme davranışını ve ayrıca her bir uçucu kül kaynağından elde edilen geopolimer macunların erken priz özelliklerini incelemek için farklı kaynaklardan farklı bileşimlerde uçucu kül elde edilmiştir. Ön çalışmalar, uçucu kül partiküllerinin zeta potansiyelinin ve kalsiyum içeriğinin, geopolimerin priz süresi ve nihai sertleşmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, kalsiyum silikatlar, kalsiyum alüminat hidratlar ve ayrıca kalsiyum-siliko-alüminatlar gibi kalsiyum içeren bileşiklerin, karışımın sertleşmesini ve işlenebilirliğini etkileyen uçucu külün geopolimerizasyonu sırasında oluştuğu öne sürülmüştür.

Nicoletta T., Aldo R. B. çalışmalarında, büyümeye devam eden, bol ve acil olarak bertaraf edilmesi gereken bu tür sorunlu atıklara odaklanarak, atıkları içeren geopolimerlerin sentezi ile ilgili temel çalışmaları özetlemiştir. Farklı atıkların uçucu kül ile kombinasyonu, mevcut literatüre göre parametreler ve özellikler açısından tanımlanmaktadır.

Biyokütle külleri, kırmızı çamur, geri dönüştürülmüş cam ve atık içeren ağır metaller kullanılarak geopolimerlerin sentezi, aksi halde geri dönüşümü pek mümkün olmayan bu tür atıkları bertaraf etmenin ve yeniden kullanmanın potansiyel bir yoludur. Bu tür atıklar kullanıldığında geopolimer üretiminde çeşitli yenilikler mümkündür. Örneğin, kırmızı çamur kullanımının ek bir faydası olabilir; bu tortunun yüksek alkalinitesi sayesinde daha az alkali aktivatör gereklidir, böylece geopolimer sentezi sırasında kullanılan en pahalı malzemeyi azaltır. Aynı zamanda, yüksek miktarda amorf silika içeren geri dönüştürülmüş cam, geopolimerizasyon işlemi için faydalı, çevre dostu bir su camı elde etmek için işlenebilir.

Dimitrios P. vd., çalışmalarında uçucu kül bazlı geopolimerlerin sentezindeki su, sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeriklerinin bunların basınç dayanımına etkisini

araştırmışlardır. Geopolimerlerin X-ışını difraktogramları, uçucu külün ana kristal fazlarının varlığının yanı sıra geopolimerik matrislerde yeni bir amorf fazın oluşumunu göstermiştir. Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi, geopolimerler içinde mekanik mukavemetlerini etkileyen temel uçucu kül faz dönüşümlerini ortaya çıkarmıştır. Üretilen geopolimerlerin basınç dayanımı, incelenen parametrelerin geopolimerizasyon sürecinde oynadığı rolle ilişkilidir. Geopolimerlerin sentezinde sodyum silikatın artmasının yanı sıra su içeriğinin azalmasıyla basınç dayanımı artar. Geopolimer sentezindeki sodyum hidroksit içeriği ile ilgili olarak, sulu fazda 6,6M'ye eşit bir sodyum hidroksit konsantrasyonu için optimize edilmiş olduğu gözlenmiştir. Genel olarak, araştırılan parametreler arasında bir uzlaşma, 40 MPa'dan daha yüksek bir basınç dayanımına sahip geopolimerik malzemelere yol açabilir.

2.2.2.2 Yüksek fırın cürufu

Aziz I.H. vd. yaptığı çalışma, yalnızca öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu geopolimerlerinin (GYFC) mukavemet gelişimini incelemektedir. Çeşitli katı/sıvı ve alkali aktivatör oranları ile GYFC'nin optimal bir kombinasyonu, bir dizi basınç dayanımı testi gerçekleştirilerek belirlenmiştir. 3.0 katı/sıvı oranı ve 2.5 alkali aktivatör oranı ile GYFC 'nin 28 günlük kürlemeden sonra 168.7 MPa'da yüksek basınç dayanımı ile sonuçlandığı bulunmuştur. SEM, FTIR ve XRD kullanılarak GYFC geopolimerlerinin mikroyapı analizi, üç boyutlu bir sistem içinde tobermorit ve kalsit (CaCO_3) fazlarının oluşumunu ortaya çıkardı. Ek olarak, sistemdeki ayrıntılı faz dağılımını ortaya çıkarmak için synchrotron micro-XRF kullanılarak gelişmiş bir tahribatsız karakterizasyon tekniği uygulanmıştır. Tobermorit ve CaCO_3 oluşumunu yüksek basınç dayanımına katkıda bulunan faktör olarak tanımlayan silika ve alümina bölgelerinde kalsiyum konsantrasyonunun daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Reddy M.S. vd. çalışması, ortam sıcaklığında kürleme koşulları altında uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) bazlı geopolimer beton üretmek için rasyonel bir karışım tasarım metodolojisi sunmaktadır. Normal betonun ACI mukavemetine karşı su/çimento oranı eğrisini, mutlak hacim yöntemini ve birleşik derecelendirme konseptini entegre ederek karışım tasarımını geliştirmek için çaba gösterilir. Önerilen karışım tasarım metodolojisi yalnızca kullanıcı dostu olmakla kalmaz, aynı zamanda istenen basınç dayanımı ve spesifik alkalin aktivatör içeriği, AAC, bağlayıcı katılar, BS, oran veya tam tersi arasında seçim yapma seçeneği sunar. Gerekli mukavemet ve özelliklerde beton üretmek için birkaç numune dökülmüş ve deneysel araştırmalara tabi tutulmuştur. Normal betonun su/çimento oranını taklit eden benzer AAC/BS oranı için geopolimer betonun elde ettiği mukavemetin, AAC/BS oranı için 66 ila 32 MPa aralığında, sırasıyla 0,4 ila 0,8 arasında önemli ölçüde yüksek olduğu bulunmuştur. Elde edilen test sonuçlarına dayalı olarak, AAC'den BS'ye oran eğrisine karşı değiştirilmiş bir mukavemet önermek için de girişimlerde bulunulmuştur. Son olarak, karışım tasarımı metodolojisi bir akış şeması şeklinde tasvir edilmiş ve kullanışlılığı bir örnek yardımıyla gösterilmiştir.

Mehta A. ve Siddique R. yaptığı çalışma, sürdürülebilir geopolimer betonun geliştirilmesi için öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve pirinç kabuğu külü (RHA) gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanımını sunmaktadır. GYFC esaslı geopolimer beton karışımı hazırlanmış ve GYFC 'nin kısmi ikamesi olarak RHA ilavesinin 90 güne

kadar basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, klorür geçirgenliği ve emicilik üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca mikroyapıyı gözlemlemek için SEM, EDS ve XRD testleri de yapılmıştır. Sonuçlar, geleneksel çimento betonunun yerini alabilecek ve böylece karbondioksit emisyonlarını azaltabilecek, yaklaşık 60 MPa'lık yüksek 3 günlük basınç dayanımına sahip GYFC ve RHA kullanılarak geopolimer betonun geliştirilmesini göstermektedir. Ayrıca her yaşta %15'e varan RHA ilavesi ile basınç ve yarı çekme mukavemetinde artış, klorür geçirgenliği ve emiciliğinde azalma gözlemlenmiştir. %15'lik bu optimum içeriğin ötesinde, RHA eklenmesi olumsuz sonuçlar göstermiştir. Ek olarak, mikroyapı analizinin sonuçları, polimerizasyon ürünlerinin ilave kalsiyum bazlı hidratasyon ürünleri ile bir arada bulunması nedeniyle, %15 RHA'lı geopolimer betonun daha kompakt ve yoğun bir mikrogramını göstermiştir.

2.3. Silis Dumanı

Son yıllarda, puzolan silis dumanının beton özellik arttırıcı malzeme olarak, portland çimentosunun kısmi ikamesi olarak veya her ikisinin birden kullanımına büyük önem verilmiştir. Silis dumanı ayrıca silis tozu, yoğunlaştırılmış silis dumanı, mikro silis ve dumanlı silis olarak da anılır (bu son terim özellikle yanlıştır - bkz. Bölüm 1.3). En uygun terim silis dumanıdır (ACI 116R).

Silis dumanının kullanımına yönelik ilk ilgi, esas olarak, malzemenin atmosfere salınmasını durdurmak için çeşitli ülkelerde hava kirliliği kontrol önlemlerinin sıkı bir şekilde uygulanmasından kaynaklanmıştır. Daha yakın zamanlarda, yüksek oranda su azaltıcı katkı maddelerinin (HRWA) mevcudiyeti, betonda çimentolama malzemesinin bir parçası olarak çok yüksek dayanımlar veya çok yüksek dayanıklılık seviyeleri veya her ikisi üretmek için silis dumanının kullanımı için yeni olanaklar açmıştır.

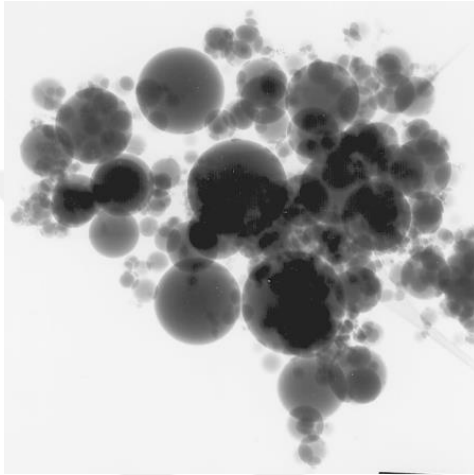
Betondaki silis dumanının performansına ilişkin araştırmalar, İskandinav ülkelerinde, özellikle İzlanda, Norveç ve İsveç'te, ilk makalenin 1952'de Bernhardt tarafından yayınlanmasıyla başlamıştır. 1976'da bir Norveç standardı, harmanlanmış çimentoda silis dumanı kullanımına ve iki yıl sonra silis dumanının betona doğrudan eklenmesine izin vermiştir (ACI Committee 234, 2000).

Silis dumanı, silikon metali veya ferrosilikon alaşımlarının üretimi sırasında bir elektrik ark-direnç ocağında yüksek saflıkta kuvarsın kömür veya kok ve odun yongaları ile indirgenmesi sonucu ortaya çıkan bir yan üründür. Fırınlardan kaçan gazlardan yoğunlaşan silis dumanı, çok yüksek oranda amorf silikon dioksit içeriğine sahiptir ve çok ince küresel parçacıklardan oluşur (Şekil 2.9). Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi silis dumanının SiO_2 içeriği, kabaca silikon alaşımlarının üretimi ile şu şekilde ilişkilidir:

Çizelge 2.2. Silis dumanının SiO_2 içeriği (Yeğinobalı, A., 1993)

Alaşım tipi	Silis dumanının SiO_2 içeriği
%50 ferrosilikon	%61-84
%75 ferrosilikon	%84-91
silikon metal (%98)	%87-98

Ferrosilikon alaşımları, nominal silikon içeriği %61 ila 98 arasında üretilir. Silikon içeriği %98'e ulaştığında, ürüne ferrosilikon yerine silikon metali denir. Alaşımdaki silisyum içeriği arttıkça silis dumanındaki SiO_2 içeriği artacaktır. Silis dumanının yayınlanmış verilerinin ve saha kullanımının çoğunluğu, %75 veya daha yüksek ferrosilikon alaşımlarının üretiminden olmuştur. %50 ferrosilikon alaşımlarının üretiminden çıkan duman kullanılarak sınırlı uygulamalar yapılmıştır. Duman diğer silikon alaşımlarının üretiminde de yan ürün olarak toplanır. Bu dumanların özellikleri hakkında az sayıda yayınlanmış veri mevcuttur. Betondaki olumlu performanslarına ilişkin veriler mevcut olmadığı sürece bu dumanların kullanımından kaçınılmalıdır (Yeğinobalı, A., 1993).



Şekil 2.9. Silis dumanının TEM mikrografı (Sellevold, E. J., and Nilsen, T., 1987)

Silis dumanı elde edilmiş, seyreltilmiş, sıkıştırılmış veya peletlenmiş olarak piyasaya sevk edilmektedir. Elde edildikten sonra çimento, uçucu kül gibi dökme olarak veya torbalarda kullanılması mümkündür. Etibank Antalya tesislerinde zaman zaman 80x80x140 cm bez torbalar kullanılmaktadır. Çok ince taneli ve düşük hacimli birim ağırlığı nedeniyle nakliye, depolama ve harmanlama sırasında özel dikkat gerektirmektedir. Ayrıca boşaltma sırasında toz şeklinde kolayca yayılmaktadır. Bu rahatsızlıktan kaçınmak için silis dumanı su ile karıştırılmakta ve bulamaç olarak satılmaktadır (Eti Elektrometalurji A.Ş., 2001; Yeğinobalı, A., 2011).

2.3.1. Silis dumanının fiziksel özellikleri ve kimyasal yapısı

Çoğu silis dumanının rengi açıktan koyu griye kadar değişir. SiO_2 renksiz olduğundan renk tipik olarak karbon ve demir oksit içeren silis olmayan bileşenler tarafından belirlenir. Genel olarak, karbon içeriği ne kadar yüksek olursa, silis dumanının rengi o kadar koyu olur. Silis dumanının karbon içeriği, talaş bileşimi, talaş kullanımına karşı kömür kullanımı, fırın sıcaklığı, fırın egzoz sıcaklığı, sıkıştırma derecesi ve üretilen ürün (metal alaşımı) türü gibi üretim süreciyle ilgili birçok faktörden etkilenir (ACI Committee 234, 2000).

Normal portland çimentosu için yaklaşık 3100 kg/m^3 ile karşılaştırıldığında, silis dumanının özgül ağırlığı yaklaşık 2,2'dir. Ancak bazı silis dumanlarının yoğunluğu 2200

kg/m³'ü aşabilir. Çizelge 2.3'te çeşitli kaynaklardan gelen silis dumanı yoğunluğu sonuçları listelenmiştir. Yoğunluktaki değişiklikler, çeşitli silis dumanlarının silis olmayan bileşenlerine atfedilir.

Gerçek silis dumanı içeriği, belirli kaynağa ve bulamaca kimyasal katkıların eklenip eklenmediğine bağlı olarak değişebilir. Kütlece yaklaşık %50 bulamaç haline getirilmiş (sulandırılmış) silis dumanı tipik olarak 1320-1440 g/m³ kütle yoğunluğuna sahiptir. Piyasaya sıkıştırılmış durumda sevkedilen silis dumanında ise birim ağırlık ortalama 550 g/m³ civarındadır (Elkem 1980; Popovic, Ukraincik, Djurekovic, 1984).

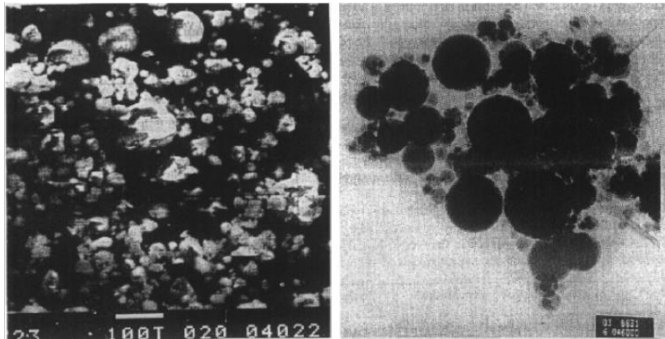
Silis dumanı, Nitrojen Adsorpsiyon yöntemiyle ölçüldüğünde, yaklaşık 20.000 m²/kg yüzey alanına sahip çok ince pürüzsüz küresel camsı parçacıklardan oluşur (Şekil 2.10). Silis dumanının aşırı inceliği, diğer ince malzemelerle Çizelge 2.4'deki karşılaştırma ile en iyi şekilde gösterilmektedir (farklı ölçüm tekniklerinden elde edilen sayısal değerlerin doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir).

Çizelge 2.3. Alaşım tipine göre silis dumanının özgül ağırlığı (Aİtcin, Pinsonneault ve Roy; Pistilli, Roy ve Cecher; Pistilli, Wintersteen ve Cechner, 1984)

Silikon alaşım tipi	Özgül ağırlık
Si	2,23
Si ve FeSi (%75)	2,26-2,27
FeSi (%75)	2,21-2,23
FeSi (%50)	2,3

Çizelge 2.4. Silis dumanının inceliğinin diğer malzemelerle karşılaştırılması (ACI Committee 234, 2000)

	Metot	Özgül yüzey (m ² /kg)
Portland çimentosu	Blaine	300-400
Uçucu kül	Blaine	400-700
Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	Blaine	350-600
Silis dumanı	Nitrojen Adsorpsiyon	13000-20000



Şekil 2.10. Silis dumanının a) tarayan, b) geçirgen ışıklı elektron mikroskoplarla çekilmiş resimleri (Tonak, Sipahi ve Atay, 1993)

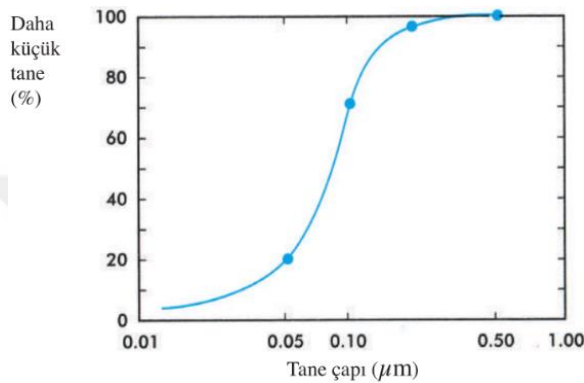
Nitrojen Adsorpsiyon yöntemi (Azot Adsorpsiyon) şu anda silis dumanı parçacıklarının yüzey alanını tayin etmek için kullanılan en yaygın testtir. Taneler arasından hava geçiş hızını esas alan Blaine yöntemi ise testi gerçekleştirmek için gerekli 0,50 gözeneklilik seviyesini elde etmedeki zorluklardan dolayı silis dumanının yüzey alanını ölçmek için uygun değildir. Çeşitli silis dumanları için nitrojen adsorpsiyon yüzey alanı sonuçları 13.000 ila 30.000 m²/kg arasında değişmektedir (Malhotra vd., 1987). Si ve FeSi (%75) alaşım tipli silis dumanları üzerine yapılan bir çalışma, 18.000 m²/kg ile 22.000 m²/kg arasında sonuçlar bildirmiştir (Elkem, 1980).

Çizelge 2.5. Silis dumanlarının kimyasal bileşimi (%)

Alaşım tipi				
	Si	Si ve FeSi (%75)	FeSi (%75)	SiFeCr
SiO ₂	93.65	93.22	94.50	70.85
Al ₂ O ₃	0.28	0.31	0.88	2-5
FeO ₃	0.58	1.12	0.70	1-2.5
CaO	0.27	0.44	0.80	1-2
MgO	0.25	1.08	1.25	4-8
Na ₂ O	0.02	0.10	-	-
K ₂ O	0.49	1.37	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	1-4
S	0.20	0.22	0.23	0.5-1.03
C	3.62	1.92	0.90	1-1.5
Kızdırma kaybı	4.36	3.10	0.75	1-3.5
45 µm elekte kalan (%)	5.4	1.8	-	-
Özgül yüzey BET (m ² /kg)	20 000	17 200	-	-
Puzolanik Aktivite - Çimento ile (%)	102	96.5	-	-
- Kireç ile (MPa)	8.9	-	-	-
Su gereksinimi (%)	138.8	139.2	-	-
Gevşek hacim ağırlığı (kg/m ³)	-	-	330	150-250

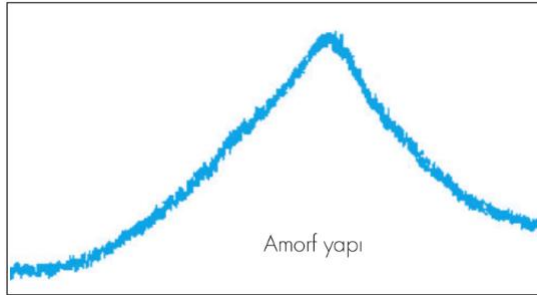
Çizelge 2.5, silikon fırınlarından çıkan bazı tipik silis dumanlarının kimyasal bileşimini vermektedir. Silis dumanları genellikle %90'dan fazla silikon dioksit içermektedir. Silis dumanlarının kimyasal bileşimi, üretilen alaşımın tipine göre değişmektedir (ACI Committee 234, 2000).

Silis dumanının parçacık boyutu dağılımının tipik bir örneği Şeki 2.11'de verilmiştir. Görüldüğü gibi tanelerin tamamına yakını 1 μm 'den küçüktür ve ortalama tane boyutu 0,1 μm civarındadır. Ortalama çimento tanesinin çapının 10 μm olduğu varsayılırsa, silis dumanının çimentodan 100 kat daha ince olduğu sonucuna varmak mümkündür.



Şekil 2.11. Silis dumanı tane boyu dağılımı (Fiskaa, Hansen ve Moum, 1971)

Silis dumanlarında asitte çözünen kloramiktari ağırlıkça %0,016 ile %0,025 arasında değişmektedir. X-ışını difraktogramları, silis dumanının tamamen amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Silis dumanının mineralojik yapısını gösteren X-ışın difraktogramı (Tonak, Sipahi ve Atay, 1993)

2.3.2. Silis dumanı içeren çimento ve beton bileşenleri

Silis dumanı ilavesi genellikle su talebini artırır. Aynı su-çimentolu malzeme oranının (kütle olarak) korunması isteniyorsa, gerekli işlenebilirliği elde etmek için su azaltıcı katkıları veya HRWRA (Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkı) veya her ikisi kullanılmalıdır. Aynı görünür işlenebilirlik derecesini korumak için, artan kohezyon nedeniyle silis-dumanlı beton için normal olarak biraz daha yüksek bir çökme gerekecektir. Sınırlı mevcudiyet ve mevcut yüksek fiyat (portland çimentosu ve diğer puzolanlar veya cürufalara göre) nedeniyle, silis dumanı özellik arttırıcı bir malzeme

olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Dolayısıyla çok yüksek basınç dayanımına veya çok yüksek dayanıklılık seviyelerine veya her ikisine sahip beton sağlamak için silis dumanı kullanılmıştır.

Yüksek dayanımlı veya performanslı betonda silis dumanı miktarı genellikle çimentonun %15'idir. Silis dumanı tip çimentolarda bulunan silis dumanının bu miktarı geçmemesi beklenmektedir. Silis dumanlı çimento üretimi ilk olarak İzlanda'da başlamış, ardından diğer ülkeler gelmiştir. Kanada'da iki büyük çimento şirketi, %6,5-8 silis dumanı içeren katkılı çimento üretilip, normal portlandden %10 daha pahalıya piyasaya sürmektedir (Khayat ve Aitcin, 1992). Avrupa ülkelerinde olduğu gibi Türkiye'de de genel çimentoda %6-10 oranında silis dumanı içeren Portland silis dumanlı çimento kullanılmaktadır (TS EN 197-1, 2001). Ayrıca silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddeler de dahil olmak üzere bazı karışımların klinker ile birlikte formüle edilip öğütüldüğü ve yüksek performanslı çimento üretildiği bilinmektedir (Sobolev vd., 2000).

Silis dumanı içeren betonların bileşimini belirlemek için gereken karışım hesapları normal betonlardan farklıdır. Bunda yüksek mukavemet ve geçirimsizlik gibi bazı özelliklerin vurgulanması ve süperakışkanlaştırıcı kullanma ihtiyacının da rolü vardır. Adım adım izlenecek genel bir karışım hesaplama yöntemi yoktur. Projede kullanılacak malzeme ile daha önce denenmiş karışımlar baz alınarak deneme karışımlarının yapılması tavsiye edilmektedir. (ACI Committee 234, 2000). Yüksek dayanımlı betonda çimento dozajı 355-565 kg/m³ civarında değişmekte, ayrıca çimento ağırlığının %5-15'i kadar silis dumanı ilave edilir ve s/b oranı 0,20'ye düşürülmektedir. Sızdırmazlık ve dayanıklılığın önemli olduğu yerler için hazırlanan betonlarda 325-390 kg/m³ arasında çimento, %3,5-10'a kadar silis dumanı kullanılmakta ve s/b oranı 0,35-0,45 arasında değişmektedir (ACI Committee 363.2R, 2000). Normal beton için kullanılan karışım hesaplarında s/b oran-dayanım ilişkileri s/b oranına göre yeniden belirlenmelidir. Kullanılacak kimyasal katkı maddelerinin çeşitliliği, priz sürelerine etkisi ve zamana bağlı çökme değerleri, suyu azaltıcı etkilerine rağmen deneme karışımlarının önemini artırmaktadır.

2.3.4. Silis dumanının geopolimerlerde kullanımı

Uçucu kül geopolimerlerine silis dumanı eklenmesinin etkisini değerlendirilmiş, yüksek sıcaklıkta kürlenmiş bu matrisi diğer araştırmalara göre test edilmiştir (Okoye, Durgaprasad ve Singh, 2016). Üretilen betonların taze özellikleri ile çekme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Silis dumanının genel olarak mukavemet sonuçlarını arttırdığı bulunmuştur.

Hem geopolimerik sistem içinde silis dumanı kullanarak birleştirilmiş hem de bu sistemi yüksek sıcaklıklara maruz kalmaya test edilmiştir (Duan, Yan ve Zhou, 2017). Beklendiği gibi, silis dumanının sonuçtaki matrisin iyileştirilmesinde faydalı olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklara maruz kalma, eklenen silis dumanına bakılmaksızın, bir güç kaybı ve fiziksel davranışta bir azalma sergilenmiştir.

Uçucu küllü geopolimer betona silis dumanının dahil edilmesini incelenmiştir ve nihai ürünün klorür ve sülfürik saldırılara karşı direncini araştırılmıştır (Okoye, Prakash

ve Singh, 2017). Mukavemet ve ağırlık kayıplarındaki bozulma oranları, fabrikasyon betonlar için test edilmiş ve sıradan bir Portland çimentosu beton karışımı ile karşılaştırılmıştır. Genel bir sonuç olarak, silis dumanının varlığı, kimyasal çözeltilere maruz kaldıktan sonra ağırlık kaybı ve mukavemet performansı açısından bir iyileşme ile sonuçlanmıştır.

2.4. Öğütülmüş Bazik Pomza

Pomza, lavın katılaşması sırasında gazların salınmasıyla üretilen volkanik kökenli doğal bir malzemedir. Pomzanın hücreli yapısı, yanardağlardan akan erimiş lavların içerdiği gazların soğuma sırasında hapsolmesiyle oluşan kabarcıklar veya hava boşlukları ile oluşturulur. Hücreler uzun ve birbirine paraleldir ve bazen birbirine bağlıdır. Volkanik pomza (VP) dünyanın birçok ülkesinde hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılmaktadır. Şimdiye kadar, pomza kullanımı bulunabilirliğe bağlıydı ve yerel olarak temin edildiği veya kolayca ithal edildiği ülkelerle sınırlıydı. Normal betondan iki ila üç kat daha hafif, iyi yalıtım özelliklerine sahip, yüksek emme ve büzülme özelliğine sahip tatmin edici beton üretilebilir (Nevile, 1995).

Pomza, volkanik olaylar sonucu oluşmuş, boşluklu, süngerimsi, fiziksel ve kimyasal etkenlere dayanıklı, gözenekli, camsı bir volkanik kayadır. Başka bir deyişle, pomza, çok gözenekli olan volkanik taş camıdır. Oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani çıkışı ve ani soğuma nedeniyle makro ölçekten mikro ölçeğe kadar çok sayıda gözenek içerir. Ara boşluklar (özellikle mikro gözenekler) bağlantısız boşluklar olduğundan geçirgenlikleri düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Pomza, benzer volkanik camsı kayalardan (perlit, obsidiyen, peks-tayn) kendine has bazı özellikleri ile ayrılmaktadır. Rengi, gözenekliliği ve kristal su içermemesi ile pratik olarak bunlardan ayırt edilmektedir. Renk benzerliği ve kimyasal bileşim açısından çoğunlukla perlit ile karıştırılmakta ve bazı durumlarda perlitten ayırt etmek zor olmaktadır. Pomzalı perlit veya perlitik pomza adı verilen geçiş kayaları, gözenek yapısı ve petrografik analizler sonucunda ayrılabilir.

TS 3234 standartlarına göre pomza; birbiriyle bağlantısız boşluklara sahip, süngerimsi silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle 1 gr/cm^3 'ten az, Mohs skalasına göre sertliği yaklaşık 6 olan, camsı doku gösteren volkanik bir madde olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca bims agregasının beton yapıda kırma ve eleme yoluyla kullanıma sunulan şekline bims agregası denmektedir.

2.4.1. Pomzanın oluşumu

Volkanik oluşumlarda asidik magma, bazik magmaya göre daha viskozdur ve yüksek miktarda silis içermektedir. Bazik magmanın sıvı olduğu sıcaklıklarda asidik magma katıdır. Bu nedenle volkanik faaliyetler durduğunda magma akışı da durmakta ve asidik kayalar ve kütleler oluşmaktadır. Bu olay, bir yanardağın genel aktivite özelliğini göstermektedir. (Gündüz vd., 1998a).

Basıncın artmasıyla birlikte magma içindeki erimiş gazlar asidik madde ile birlikte bacadan patlamalar şeklinde püskürmeye başlar. Ani basınç tahliyesi ve ani genişlemeler yaratır. Bu arada uçucu bileşenlerin vücuttan aniden kaçmasına neden olur. Uçucuları takiben geride kalan erimiş küresel parçacıklar, atmosferle temas ettikleri anda hızla

soğurlar. Böylece pomza oluşur ve volkanik aktiviteden sonra yanardağın krateri zamanla krater gölüne dönüşebilir. Burada pomza oluşumunu kontrol eden faktörler; püskürme süresi, ara süreler, magma sıcaklığı, magmadaki erimiş gaz miktarı ve püsküren malzemenin soğuma süresidir.

Bu pomza parçaları, volkanik bacaların yakınından uzak mesafelere hava akımının etkisiyle eski yüzey şekline uygun olarak depolanır. Bu durumda pomza yatakları oluşmuş ve bu birikintiler zamanla nehirler yoluyla taşınarak uygun havzalarda depolanabilmektedir. Bu şekilde oluşan çökellerde %1-3 oranında andezit, trakit-andezit, bazalt, obsidiyen gibi volkanik kayalar parçaları bulunur. Sekonder halde oluşan pomza yataklarında yabancı maddeler daha fazla olabilir (Gündüz vd., 1998a).

2.4.2. Pomzanın mineralojik yapısı ve belirlenmesi

Bilindiği gibi, pomza oluşumları ve volkanik faaliyetler sonucunda yeryüzünde oluşan magma çözeltisi, içerdiği yüksek miktardaki flor, klor ve su buharının uzaklaştırılmasıyla oluşmakta ve gözenekli bir yapıya sahip pomza oluşmaktadır. Asidik magma çözeltisinden oluşan pomzada silika miktarı %62'yi geçebilir. Bazik magma çözeltisinden oluşan pomzada silis oranı %56'nın altına düşebilmektedir.

Kayaçların çeşitli iç yapılarını ve özelliklerini tanımlamak için kullanılan mineralojik ve petrografik analizler de pomza türlerinin kullanıldığı pomza karakterizasyonu açısından önemli rol oynamaktadır. Amacına göre seçilen numuneler üzerinde yapılan mineralojik ve petrografik incelemeleri, gözle muayene, büyüteç muayenesi, binoküler muayene ve polarize mikroskop muayenesi olmak üzere dört kategoride sınıflandırmak mümkündür (Gündüz vd., 1998a).

İlk görsel muayenede görsel muayene, taş tipi, rengi, boyutu, kırık ve çatlak durumu, damar tipleri ve genel görünüm belirtilmektedir. Pomzanın üretildiği ocağın litolojisi belirlenmeye çalışılmaktadır (Anıl, 1995).

Laboratuvarda analiz edilecek numuneleri seçmek için büyüteçle inceleme de büyüteç kullanılarak yapılmaktadır. Kayanın mineral bileşimi, çatlak durumu, genel karakteristik yapısı ve özellikleri bir büyüteç ile belirlenmeye çalışılmaktadır.

Binoküler ile inceleme, kayanın cilalı yüzeyinin binoküler inceleme olarak adlandırılmaktadır. Sahadan alınan kayanın litolojik ve anizotropik yapısına göre iki yönde kesilerek parlatılmaktadır. Mineral yapıları, türleri ve boyutları dürbün altında yüksek büyütme oranlarında incelenerek detaylı olarak belirlenmektedir.

Petrografi mikroskobu kayalar yapısında bulunan şeffaf mineralleri incelemek için kullanılırken, polarize mikroskop ile incelemek için kullanılır. Kayadan alınan numuneden kesilen ince levhanın bir yüzü sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 grid zımpara tozu ile aşındırılır. Daha sonra 1000 ve 1200 grid zımpara tozu ile lamel üzerindeki cam pürüzlülüğü giderilir ve cilalı yüzey yüksek mukavemetli yapıştırıcılar ile cama yapıştırılır. Yapışmaz 9 camın diğer tarafında kalan kısmı 0,03 mm kalınlığa ulaşmaya kadar aşındırılır ve camın üzeri lamel ile kaplanır (Gündüz vd., 1998a).

2.4.3. Pomzanın türleri

Pomza bir volkanik kaya türüdür ve volkanik faaliyetler sonucunda asidik ve bazik özelliklere sahip iki tip pomza oluşur. Volkanik cam yapıya sahiptir. Yeryüzünde en yaygın bulunan ve kullanılan türü olan asidik pomza beyaz, kirli bir renktir. Temel pomza ise Türkçed bazik (bazaltik) pomza olarak bilinen ve yabancıların “Scoria” dediği siyahımsı bir pomza türüdür (Erdoğan, 2007).

Asidik pomza ile ilgili olarak, tipik skorya daha büyük ve birbirine bağlı veziküllere sahiptir, daha düşük silika içeriği ile karakterize edilir ve daha koyu, kahverengi, kırmızımsı veya siyah bir renk gösterir. (Taddeucci vd., 2015). Volkanik skorya, dolgu maddeleri, filtre malzemeleri, emiciler ve diğer mimari uygulamalar gibi diğer kullanımlara ek olarak, hafif beton üretimi de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamalarda, ısı yalıtım malzemesi olarak çimento ikamesi dışında kullanılabilir (Hossain, 2009).

Asidik pomzanın yoğunluğu bazik olanlara göre daha az olup $0,5-1 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmektedir. Bazaltik pomza koyu renkli, kahverengimsi, siyahımsı olup yoğunluğu ise daha fazla ve $1-2 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmektedir. Her iki türü de oluşum esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi ani olarak terk etmesi sonucu oldukça gözenekli bir yapı kazanmıştır. Gözenekler birbirleri ile bağlantılı olmaması pomzaların en önemli karakteristik özelliklerinden biridir. Asidik ve bazik pomzaların genel görünimleri Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. (a) Asidik pomza ve (b) Skorya'ya ait görüntüler

Pomzanın fazla gözenekli ve gözeneklerin birbirleriyle bağlantısız boşluklar oluşundan dolayı ısı ve ses geçirgenliği oldukça düşüktür. İçerdiği gözenekler gözle görülebilecek boyutlardan, mikroskopik boyutlara kadar sayısız miktarda olup, her biri diğerinden camsı bir zarla yalıtılmıştır. Bu yüzden hafif, suda uzun süre yüzebilen, izolasyonu yüksek bir kayaktır. Bünyesinde kristal suyu yoktur.

Asidik ve bazik pomzaların yapısal özelliklerindeki farklılığın haricinde kimyasal özellikleride oldukça büyük bir oranda değişim göstermektedir. Pomzalar bünyelerinde silisyum, alüminyum, potasyum, sodyum, demir ve magnezyum gibi kimyasal bileşimler ihtiva ederler. Genel olarak asidik ve bazik özellikler taşıyan pomzaların tipik kimyasal bileşimleri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6'dan de görüldüğü üzere asidik karakterli pomzalarda silis oranı daha yüksek olması asidik pomzaya aşındırıcılık özelliği katıp beyazımsı bir renk almasını sağlamaktadır. Düşük yoğunluklu asidik pomza bu özelliklerden dolayı inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulabilmektedir. Diğer taraftan, bazik karakterli pomzalarda da alüminyum, demir kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranlarda bulunması nedeniyle yoğunluğu daha ağır rengi ise daha koyu bir yapı göstermektedir. Bu pomza türü de daha yüksek mukavemet isteyen inşaat sahalarında yer döşemelerinde yapısal özelliklerinden dolayı oldukça kullanılabilir bir özellik göstermektedir (Gündüz vd, 1998a).

Çizelge 2.6. Asidik ve bazik pomzaların genel kimyasal özellikleri (Gündüz vd, 1998a)

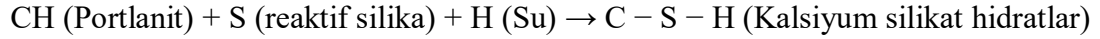
Bileşim	Asidik Pomza	Bazik Pomza
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
Na ₂ O+K ₂ O	9	8
Diğer min.	3	1

Skorya; hafif beton üretimi, Portland-puzzolan çimento katkı maddelerinin üretiminde puzzolan kaynağı olarak, ısı yalıtım malzemesi olarak, boyada düşük maliyetli dolgu maddeleri, filtre malzemeleri, emiciler, mimari uygulamalar gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda (Moufti, 2000) ve geopolimer harç üretiminde kullanılabilir (Kamseu, 2009).

Volkanik skorya gevşek, molozlu, bazaltik ila andezitik (%40-60 SiO₂) ejekta olup, Strombolian püsküren volkanik menfezler çevresinde birikir ve sonunda yüksekliği birkaç on metreden 300 m'ye kadar değişebilen bir skorya konisi olarak oluşur. Skorya klastlarının boyutları milimetreden santimetreye kadar geniş bir aralıkta değişir ve veziküllerle dolu hafif, köpüklü bir dokuya sahiptir. Skoryanın veziküler doğası, patlama sırasında volkanik gazların kaçmasından kaynaklanmaktadır. Bazen bu veziküller, sıcak su bakımından zengin sıvılardan oluşan zeolit, kalsit ve kuvars gibi minerallerle yeniden doldurulur. Skorya kırıntıları esas olarak koyu gri renktedir, ancak taze olduklarında yanardöner olabilirler, genellikle koyu kırmızımsı bir kahverengi olduğunda skorya havalandırmadan çıkan buharla reaksiyona girerek oksitlenir (Lefond, 1983; Sen, 2014). Ekonomik olarak en değerli volkanik skorya yatakları geç üçüncül veya dördüncül yaştadır. Skoryaların çoğu camsı parçalardan oluşur ve fenokristaller içerebilir (Mathers, 2000; Jackson vd., 2005).

2.4.4. Bazik pomzanın reaktivitesi

Bazik pomza (volkanik skorya), kireç veya çimento ile reaktivite için camsı/amorf bir yapıya sahip, yüksek silika (SiO₂) ve alümina (Al₂O₃) içeriğine sahip puzzolanik bir malzemedir (Swamy, 1982). Reaktif silika içeriği, çimentoda C₃S ve C₂S'nin hidratasyonundan serbest kalan portlandit (CH) ile reaksiyona girebilir. Bu reaksiyon, ek kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) oluşturur. Temel reaksiyon şudur:



C-S-H'nin bileşimi, düzenli hidrasyonda oluşandan çok farklı değildir, ancak genellikle C/S molar oranı biraz daha düşüktür. Reaktif silikaya benzer şekilde, volkanik skoriada bulunan reaktif alümina, kalsiyum alüminat hidratları (C-A-H) oluşturmak için CH ile reaksiyona girebilir (Mindess, 2003). Sıklıkla puzolanik reaksiyon olarak adlandırılan bu reaksiyon yavaştır, portlandit tüketir ve kılcal boşlukları doldurmada çok etkilidir (Mehta, 2006). Volkanik skoryadaki camsı faz içeriği ve volkanik skoryanın inceliği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

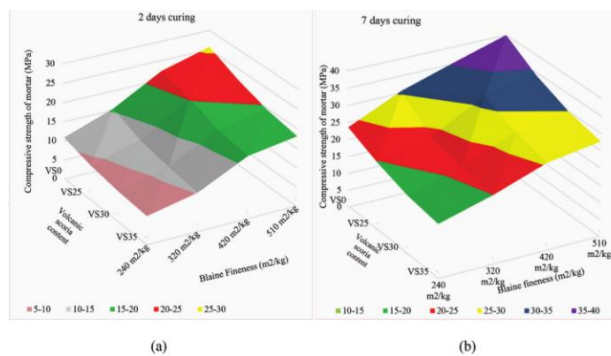
2.4.5. Bazik pomzada camsı faz

ASTM C618 (2012) tanımına göre bir malzemenin doğal puzolan olarak kabul edilebilmesi için SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamının minimum %70 değerinde olmasını ve mukavemet aktivite indeksinin kontrol harcının 7 veya 28 günde basınç değerinin %75'ini geçmesini gerektirir. Mukavemet aktivite indeksi (SAI), ağırlıkça %80 çimento ve ağırlıkça %20 volkanik cüruf ile yapılan harç küplerinin basınç mukavemetini, sadece çimento ile yapılan kontrol harç küplerinin basınç mukavemeti ile karşılaştırarak volkanik cürufların reaktivitesinin bir göstergesini verir. Ek olarak, EN 197-1(2000)'e göre volkanik skoryanın doğal bir puzolan olarak kabul edilebilmesi için %25'ten fazla reaktif silika içeriği gerektirir.

2.4.6. Bazik pomzanın inceliği

Bazik pomzanın daha fazla yüzey alanını açığa çıkaran incelikte bir artış, erken puzolanik reaktiviteyi hızlandırabilir. Birim kütle için alanı olan volkanik cürufların spesifik yüzey alanı, farklı tekniklerle ölçülebilir. En yaygın olanı, sıkıştırılmış parçacıkların bir hava akışına karşı direncini ölçen Blaine'e özgü yüzey alanı yöntemidir. Volkanik skoryanın spesifik yüzey alanının belirlenmesi için bir lazer parçacık boyutu analizörü de kullanılabilir (Ramezaniapour, 2014).

Al-Swaidani ve ark. yaptığı çalışmalara göre 2 günlük kürlenmiş volkanik skorya (VS) bazlı çimentonun Blaine inceliği, %25 ila 35 arasında değişen farklı seviyelerde 240'dan 510 m^2/kg 'a yükseldiğinde erken basınç dayanımında kütle tarafından yaklaşık %145'lik bir artış görülmüştür (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. 2 (a) ve 7 (b) gün kürlenmiş BP esaslı çimento harçlarının basınç dayanımına inceliğin etkisi

Ayrıca araştırmacılar tüm kür sürelerinde VS bazlı bağlayıcı harçlar için Blaine inceliğinde her 1000 cm²/g artış için yaklaşık 5 MPa'lık bir artışın beklenebileceği sonucuna varmışlardır. Bu reaktivite artışı, öğütmenin camsı gövdeyi kıran, parçacık boyutunu küçülten ve volkanik skoryanın çözünme hızını ve çözünürlüğünü artıran, puzolanik reaksiyon hızını ve volkanik skorya içeren harcın mukavemet gelişimini hızlandıran etkisiyle açıklanmıştır (Shi, 2001).

2.4.7. Bazik pomza bazlı çimento harcı/betonunun özellikleri

Literatürde bildirilen tüm sonuçlar, volkanik skorya esaslı çimento harçlarının/betonlarının basınç dayanımının kür yaşı ile arttığını ve volkanik skorya içeriğinin yer değiştirme seviyesi ile azaldığını göstermektedir. Basınç dayanımındaki bu azalma, esas olarak, doğal puzolan olarak volkanik cürufkların oda sıcaklığında daha yavaş puzolanik aktiviteye atfedilir (Mindess, 2003; al-Swaidani, 2017). Bu tespit, ilavenin camsı kısmında bulunan reaktif silika ile çimentonun hidratasyonu ile açığa çıkan Ca(OH)₂ arasındaki etkileşim ile açıklanmaktadır. Volkanik cürufklar içeren harçların, 90 günlük süreden itibaren kontrol harcıninkilerle karşılaştırılabilir basınç dayanımı sergiledikleri de kaydedilmiştir.

Bazik pomza bazlı harçların bağıl basınç dayanımını makul bir şekilde tayin etmek için bir denklem türetilmeye çalışılmıştır. Bu tahmin denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$RCS = (0.176 \ln t - 1.343) VS + 1.01 \quad (R^2=0.81) \quad (2.1)$$

burada RCS, bağıl basınç dayanımıdır; t, kürlenme yaşıdır (gün) ve VS ise volkanik skorya içeriğidir (%). Denklemin varyantları, kür yaşı ve volkanik skorya içeriğidir. Bu nedenle, kürlenme yaşı ve volkanik skorya içeriği ve kontrol numunesinin (yani, volkanik skorya olmadan) basınç dayanımı bilindiğinde, VS bazlı çimento ve harcın basınç dayanımı makul bir şekilde tahmin edilebilir.

2.4.8. Bazik pomzanın kullanımı

Günümüzde bazaltik pomzanın kullanım alanı çok geniş olduğu gibi ana sektörü inşaat sektörüdür. Kullanıldıkları yerlere göre bazaltik pomza 5 ayrı grupta (inşaat sektörü, tekstil sektörü, tarım sektörü, kimya sektörü ve diğer endüstri ve teknolojik sektör) değerlendirilmektedir (Yaşar ve Erdoğan, 2001).

İnşaat sektöründe kullanımı. Bazik pomza inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bazik pomza, hafif yapı malzemesi olarak, ses ve ısı yalıtımında, dona, yangına ve depreme dayanıklı beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Gözenekli ve katı bir volkanik kaya olduğu için yoğunluğu düşüktür. Düşük yoğunluğu nedeniyle inşaat işlerinde hafif yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Diğer agregalardan yapılan betona göre daha hafif olması ve tanelerin sağlam olması nedeniyle kullanılacak inşaat demirinin azalması nedeniyle zemine gelen yüklerin azalması nedeniyle zeminin taşıma kapasitesi artmaktadır. Ayrıca içi boş yapısı sayesinde ısı ve ses yalıtımı sağlamaktadır.

Tekstil sektöründe kullanımı. Tekstil ürünlerinin renklerini açmak ve yumuşatmak için tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tarım sektöründe kuraklığa karşı bazik pomza kullanılmaktadır. Aşırı buharlaşmanın olduğu yerlerde bitkinin ihtiyacı olan suyu ayarlayarak bitkiye verir. Ayrıca gübre üretiminde gübre kaybını azaltır ve yeraltı sularının kirlenmesini de engeller.

Kimya sektöründe kullanımı. Bazik pomza ayrıca ilaç, kibrit ve gübre endüstrisinde, diş macunu ve cila tozu, emici malzeme ve deterjan endüstrisinde de kullanılmaktadır.

Diğer endüstri ve teknolojik sektörlerde kullanımı. Kuyumculuk, metal ve cam sanayinde, aşındırıcıların, elektronik devrelerin ve talaşların temizlenmesinde, otomobil lastiği üretiminde katkı maddesi olarak, otoyollarda buzlanmayı önlemek, seramik malzemelerde sır tabakası yapmak için ve dekoratif hafif tavan kaplama malzemeleri üretmek için kullanılmaktadır.

2.4.9. Bazik pomzanın geopolimerlerde kullanımı

Mehrads M. vd. (2015) yaptığı çalışmada, Malzeme yeşilliğini arttırmak ve geopolimer olarak alternatif bağlayıcılar üretmek için Hasankale bazlı pomza geopolimerinin fiziksel ve mekanik özellikleri tartışılmış ve en iyi geopolimer karışım oranlarının belirlenmesi, değişen silis modülü ($M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$), su /bağlayıcı (w/b) ve Na_2O içeriği deneme yanılma yöntemiyle incelenmiştir. Böylece Na_2O içeriği (%4, %7 ve %10), silika modülü (0.52, 0.6 ve 0.68) ve s/b oranları (0.36, 0.40 ve 0.44) farklı olan dokuz seri geopolimer harç üretilmiştir. Bu çalışmada Hasankale esaslı öğütülmüş pomza kullanılmıştır. Test sonuçları, $M_s = 0.68$, $\text{Na}_2\text{O} = 0.10\%$, $w/b = 0.36$ ile karışımın yaklaşık 40 MPa daha yüksek basınç dayanımı verdiğini göstermiştir. Bu test sonuçları, üretilen geopolimerin basınç dayanımının yeterince yüksek olduğunu ve yapısal malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Türkiye, pomza kaynakları açısından dünyanın en zengin ülkelerinden biridir. Portland çimentosu üretmek için gerekli olan enerjinin azaltılması ile ilgili olarak ekonomik faydalarının da olması beklenmektedir.

Soner ve Hüseyin (2018) tarafından yapılan araştırmaya göre, hafif beton üretimi için bazik pomza agregaları ve uçucu kül (F sınıfı) karışımı kullanılarak uçucu kül bazlı betonlar üretilmiştir. Etkili kürlenme parametrelerini bulmak için ANOVA Yates test tekniği uygulanmıştır. BP agregaları 12×4 mm, 4+0.425 mm, 0.425×0 mm olmak üzere dört farklı partikül boyutunda ve Türk Standardı 802'nin boyut dağılımını içeren fraksiyonlarda öğütülmüştür. Geopolimer betonlar, daha az CO_2 salınımı, düşük enerji gereksinimi ve endüstri yan ürünlerinin geri dönüşümü gibi önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanında hafif betonların özellikle depremler açısından önemli faydaları vardır. Düşük elastisite modülü değerleri ve yüksek UCS'lere karşı hafifliği, GP betonlarını ticari ve güvenli yapı malzemesi üretim teknolojileri için daha çekici kılmaktadır. Bu çalışma, hafif geopolimer beton üretimi için uçucu kül ve temel pomza kaynaklarının ekonomik olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Betonların mukavemeti Na_2SiO_3 konsantrasyonuna, kür sıcaklığına ve bazik pomza ilavesine bağlıdır. BP agrega ilaveleri arttıkça mukavemet azalır. Ancak 0.425 mm boyutlarındaki temel bims agregalarına

eklenen betonların dayanımları, üst boyut BP agrega katkılarına göre daha yüksek olmuştur. Ayrıca Türk standardı 802 prosedürleri kullanılarak hazırlanan GP betonları da yüksek mukavemete benzerdi. Beton yoğunlukları 1670 ila 1780 kg/m³ arasında değişirken, basınç dayanımları 20 ila 55 MPa arasında değişiklikler göstermiştir.

Safari vd. (2020) yaptığı test sonuçları, basınç dayanımının sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonu ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu göstermiştir. NaOH konsantrasyonu 8 M'den 12 M'ye yükseltildikçe geopolimer macununun basınç dayanımı arttı. NaOH konsantrasyonunda 12 M'den 18 M'ye ilave bir artış, geopolimer macununun basınç dayanımının düşmesine neden oldu. Ayrıca sonuçlar, geopolimerin basınç dayanımında kürleme sıcaklığının en etkili faktörlerden biri olduğunu göstermiştir. Geopolimer macun, düşük sıcaklıkta ve uzun süreli ısıl kürleme sırasında yüksek basınç ve eğilme mukavemeti kazanır. Geopolimer harcın basınç ve eğilme mukavemeti, kür sıcaklığı 60 °C'ye kadar artırılarak artırılırken, sıcaklık 80 °C ve 100 °C'ye çıkarıldığında azalmaktadır. Kürleme sıcaklığındaki 60 °C'den 80 °C'ye bir artış, aynı konsantrasyon ve kürleme süresi ile basınç dayanımında 76,73'ten 64,28 MPa'ya bir düşüşe yol açmıştır. Bu araştırmadaki sonuçlar, yüksek basınç ve eğilme mukavemeti elde etmek için 60 °C'de optimum kürleme süresinin 120 saat olduğunu doğrulamaktadır. SEM sonuçları, bazı pomza parçacıklarının oda sıcaklığında reaksiyona girmediğini ve bunun da daha kolay kırılmalara ve daha düşük mukavemete yol açtığını ortaya koymuştur.

Pomza gibi düşük kalsiyum içeren hammaddelerle üretilen alkali aktif malzemeler agresif koşullarda sertleşir (Bilal ve Mehmet, 2021). Bu nedenle optimum kür koşullarının belirlenmesi bu malzemelerin değerlendirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Pomza bazlı alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin kürlenme koşulları, birkaç çalışma tarafından sınırlı ölçüde rapor edilmiştir. Bilal ve Mehmet (2021) tarafından yapılan çalışmada, sıradan Portland çimentosu (GPÇ) içeren pomza bazlı alkali ile aktifleştirilmiş kompozitlerin farklı kürleme koşullarını kısaca tartışmaktadır. Prekürsör hammaddesi %80 pomza ve %20 GPÇ veya %100 pomzadan oluşmaktadır. Hazırlanan 50×50×50 mm kübik macun numuneleri 24, 48, 72 ve 96 saat ve yaşlanma etkisi (3-28-90 gün) incelenmiştir. Kür işlemlerinden sonra basınç dayanımı, UPV, kuru yoğunluk, gözeneklilik ve toplam su emme testleri yapılmıştır. Ayrıca, kür koşullarının etkisini araştırmak için numunelerin SEM/EDX görüntüleri alınmıştır. Sonuçlar, GPÇ ilavesinin tüm kürleme koşullarında basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı, GPÇ katkılı numunelerin 100 °C'de 72 saat süreyle kürlenmesiyle elde edilmiştir. Bununla birlikte, ısıyla kürleme sıcaklığı arttıkça numuneler daha az kürleme süresi ile daha fazla dayanım kazanmıştır. Ortam koşullarında kürlenen ve özellikle GPÇ (63 MPa) içeren numunelerden tatmin edici basınç dayanımı sonuçları elde edilebilir. En yüksek basınç dayanımına sahip GPÇ içeren numuneler aynı zamanda yoğun polimerik yapı nedeniyle yoğunluğu en yüksek (1,89 g/cm³) numunelerdir. Aynı zamanda, basınç dayanımı arttıkça su emme ve azalan boşluklar nedeniyle gözeneklilik değerleri azalmaktadır. Sonuç olarak, deneysel bulgular, kür koşullarının, Portland çimentosu içeren pomza bazlı alkali ile aktifleştirilmiş kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilediğini ortaya koymuştur.

2.5. Alkali Aktivatör

Son yıllarda, enerji tasarrufu, düşük maliyeti ve yüksek mukavemet, düşük ısı gelişimi, düşük gözeneklilik, hidratların düşük çözünürlüğü ve kimyasal saldırılara karşı direnç gibi mükemmel performansları nedeniyle alkali ile aktive edilmiş malzemeler birçok ülkede geliştirilmiştir (Zivica, 2006). Alkali ile aktive edilmiş malzemeler tarafından sağlanan olanakların etkin kullanımı için, onların işlenmesi ve özellikleri arasındaki ilişkileri anlamak çok önemlidir. Geleneksel Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, alkali ile aktive edilmiş malzemelerin mukavemet vb. özellikleri ve işleme parametreleri arasındaki niceliksel veya niteliksel ilişkiler çok daha az anlaşılmıştır (Talling, Brandsteti; Jolicoeur, 1992).

Reaktif katı bileşenlere geopolimerizasyon reaksiyonunu manuel olarak başlatmak için bir kimyasal aktivatör gereklidir. Genel olarak, yüksek pH koşulları altında alkali hidroksitler veya silikatlar tarafından aktive edilen alüminosilikat bağlayıcı malzemeler, geopolimerler olarak sınıflandırılmaktadır (Provis, Deventer, 2009).

Geopolimer sentezinde aktivatör olarak kullanılan çeşitli farklı tipteki çözeltilerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, bunlar kullanılarak sentezlenen geopolimerlerin özelliklerinin ve değerinin belirlenmesinde rol oynar. Sodyum, potasyum silikat ve hidroksit en yaygın olarak kullanılan aktive edici solüsyonlardır, sodyum bazlı solüsyonlar daha ucuzdur, fakat potasyum bazlı solüsyonlar daha uygun faz davranışı ve reoloji gösterir. Alternatif aktive edici solüsyonlar arasında karbonatlar, alüminatlar ve hatta su bulunur, ancak bunların hiçbirisi bugüne kadar alüminosilikat geopolimerlerinin sentezinde yaygın bir kullanım görmemiştir. Gelecekteki çalışmaların, özellikle silikat aktive edici çözeltiler ve çözünmüş kalsiyum arasındaki etkileşimlere odaklanması gerekir. Bununla birlikte, henüz tam olarak anlaşılmayan ancak uçucu kül bazlı geopolimerlerin erken yaş özellikleri ve müteakip yapı gelişimi için kritik olan bir alandır (Provis, Deventer, 2009).

Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltilerinin termodinamik özellikleri, geçtiğimiz birkaç on yıl içinde ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve modellenmiştir. NaOH, geopolimer sentezinde en yaygın olarak kullanılan hidroksit aktivatörüdür ve alkali hidroksitlerin hem en ucuzu hem de en yaygın olarak bulunanıdır. Hem uçucu kül hem de metakaolin öncülerinden geopolimer sentezinde bir aktivatör olarak NaOH kullanımı, düşük maliyeti, geniş bulunabilirliği ve düşük viskozitesi nedeniyle çok yaygındır. Bununla birlikte, konsantre NaOH veya diğer herhangi bir alkali hidroksitin oldukça aşındırıcı doğası, büyük hacimlerde hidroksit ile aktive olan geopolimerler üretmek için çok özel işleme ekipmanının gerekli olacağı anlamına gelir ve bu nedenle silikat aktivasyonu sıklıkla tercih edilir (Pabalan and Pitzer, 1987; Simonson vd., 1989).

Sodyum hidroksit aktivatörlerinin geopolimerlerde kullanımının, özellikle nemli koşullar altında uzun süreli kürlemeden sonra veya hatta yüksek sıcaklıkta kısa bir süre sonra bile gözlemlenebilir zeolitik yapıların oluşumuna yol açtığı iyi bilinmektedir (Provis vd., 2005b). Bu olgunun malzeme performansındaki herhangi bir değişiklik ile bağlantılı olup olmayacağına dair araştırmalar halen devam etmektedir; bazı sistemlerde zeolit oluşumu ile azalan mukavemet arasında bir miktar korelasyon gözlemlenmiştir. Ayrıca bunun spesifik olarak nedensel bir etki mi (yani performans kaybına yol açan

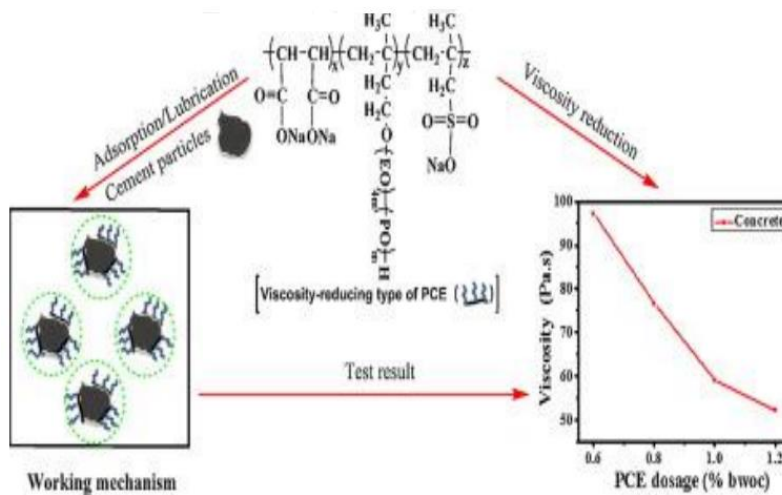
zeolit oluşumu) yoksa daha derinde yatan bir faktörün veya faktörlerin kombinasyonunun hem zeolit oluşumuna hem de mukavemet azalmasına neden olup olmadığı henüz açık değildir. Çiçeklenme (beyaz sodyum karbonat veya bikarbonat kristallerinin oluşumu), fazla alkalinin atmosferik CO₂ ile reaksiyona girdiği çok yüksek konsantrasyonda hidroksit çözeltileri ile aktive edilen geopolimerlerde de bilinen bir sorundur. Bu göze hoş gelmesede malzemenin yapısal bütünlüğüne her zaman zararlı değildir.

Alüminosilikatların alkali aktivasyonunun farklı kökenlerini açıklayan birçok neden vardır. Başlıcaları, güçlü bir çevresel etkiye ve üretim sürecinde farklı üretim kaynaklarından gelen yüksek sera gazı emisyonlarına (esas olarak CO₂) sahip olan Portland çimentosunun geleneksel üretim sürecine alternatif arayışı ile ilgilidir.

Alkali ile aktive olan malzeme, esasen bir alkali metal kaynağı (katı veya çözünür) ile bir silikat tozu arasındaki reaksiyonla elde edilen herhangi bir bağlayıcıyı kapsayan en geniş sınıflandırmadır (Dventer ve diğerleri, 2010). Bu katılar, sırasıyla yüksek fırın cürufları veya uçucu kül gibi kalsiyum bakımından zengin veya kalsiyum bakımından fakir alüminosilikatlar olabilir. Alkali kaynaklar alkali hidroksitleri, silikatları, karbonatları, sülfatları, alüminatları veya oksitleri, temel olarak alkali metal katyonları sağlayabilen, reaksiyon karışımının pH'ını yükseltebilen ve katı öncünün solüsyonunu hızlandırabilen herhangi bir çözünür maddeyi içerebilir.

2.6. Süperakışkanlaştırıcı

Süperakışkanlaştırıcılar, Şekil 2.15'te gösterildiği gibi yüksek aralıklı su azaltıcılar olarak da bilinirler, yüksek dayanımlı beton yapımında kullanılan katkı maddeleridir. Akışkanlaştırıcılar, yaklaşık %15 daha az su içeren beton üretimini sağlayan kimyasal bileşiklerdir. Süperakışkanlaştırıcılar, betonun işlenebilirliğini artırmak, böylece döküm işlemini iyileştirmek, sıkışık donatı çubuklarına kolay yerleştirmek, donatı etrafındaki birleşmeyi ve donatıya bağlanmayı iyileştirmek ve daha hızlı döküm hızı sağlamak için kullanılır, böylece toplam maliyeti düşürür (Palacios ve Puertas, 2009).



Şekil 2.15. Süperakışkanlaştırıcı çalışma mekanizması

Süperakışkanlaştırıcıların beton üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Ancak bu materyal GPB üzerinde çalışmak üzere tasarlanmamıştır. Araştırmacılar, reoloji geopolimer karışımlarını geliştirmek için bunları GPB'de benimsemeye çalıştılar. Süper akışkanlaştırıcılar, aktivatörlerin verdiği alkali ortamda bozundukları için geopolimerlerde etkisizdirler. Bununla birlikte, alkali aktivatörün saldırısına direnme kabiliyeti nedeniyle, süperakışkanlaştırıcının geopolimer harç karışımlarında bir dereceye kadar işlevsel olduğu bulunmuştur.

Wang vd. (2009), M ve N bazlı süper akışkanlaştırıcıların çekme mukavemeti, basınç mukavemeti üzerindeki etkisini ve sırasıyla 1,4, 1,2 ve 1,0 olmak üzere üç farklı $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı ile $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ ile aktive edilen cüruf-metakaolin bazlı geopolimer harçların işlenebilirliğini incelemişlerdir. Metakaolin/cüruf oranı 3:7 idi. Hem M hem de N esaslı süperakışkanlaştırıcıların harç akışkanlığını arttırdığı ve doyma noktasının sırasıyla %2.3 ve 2.0 olduğu bulunmuştur. Ayrıca, hem M hem de N esaslı süper akışkanlaştırıcıların basma ve çekme dayanımlarının önce arttığı, ardından düştüğü tespit edilmiştir. M ve N bazlı süperakışkanlaştırıcılar için optimum içerik sırasıyla %1.6 ve %0.6 idi. Ancak bu araştırmada incelenen bağlayıcının tamamen cüruf olmadığı (3:7 oranında cüruf/metakaolin) belirtilmelidir.

Palacios ve Puertas (2009), aktif taze cüruf bazlı harçların priz süresi ve işlenebilirliği üzerinde beş farklı süperakışkanlaştırıcının (bir M bazlı, iki PC bazlı, bir vinil kopolimer bazlı SP ve bir N bazlı) etkisini araştırmışlardır. Ayrıca aktifleştirilmiş taze cüruf bazlı pastaların eğilme ve basınç dayanımları üzerindeki süper akışkanlaştırıcı etkisini de incelemişlerdir. Numuneler $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de ve %99 bağıl nemde kürlenmiştir. Bu çalışmada sadece NaOH ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ olmak üzere 3.4 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranında iki farklı aktivatör kullanılmıştır. Aktivatör tipleri için cüruf kütlelerine göre %4 ve %5 Na_2O konsantrasyonları benimsenmiştir. Süperakışkanlaştırıcının alkali ile aktive edilmiş cüruf üzerindeki etkisinin, GPÇ üzerindeki etkilerinden oldukça farklı olduğu bulunmuştur.

2.7. Polipropilen Lif

Polipropilen lif (PPL), hafif, yüksek mukavemetli ve korozyon direncine sahip bir tür polimer malzemedir. Betonun çatlak direnci, PPL'ler eklenerek geliştirilebilir. PPL, betonun gözenek boyutu dağılımını optimize edebilir. Sonuç olarak, PPL, suyun veya zararlı iyonların betona girmesini engelleyebildiğinden, betonun dayanıklılığı önemli ölçüde artar. Polipropilen lifler, EN 14889-2 [48]'in ekstrüde, yönlendirilmiş ve kesilmiş polimer malzemenin düz veya deforme parçaları olarak tanımladığı polimer lif türüdür (Şekil 2.16). EN 14889-2'e göre iki tip PPL ayırt edilebilir: mikro lifler ve makro lifler. Öncelikle uzunlukları, daha da önemlisi betonda gerçekleştirdikleri işlev bakımından farklılık gösterirler. Makro lifler ayrıca yapısal lifler olarak da adlandırılırlar çünkü çelik çubuklar şeklindeki geleneksel takviyenin yerini alabilirler ve yapıya etki eden yükleri aktarabilirler. Böylece çelik donatı yapmak için gereken zamandan ve dolayısıyla yatırım maliyetlerinden tasarruf edilir. Uzunlukları genellikle 30 ila 50 mm arasındadır. Öte yandan mikrofiberler 30 mm'den daha kısadır ve yük taşıma işlevini yerine getirmezler. Ana rolleri, plastik büzülmenin üstesinden gelmek ve sınırlamaktır (Blazy, Blazy, 2021).



Şekil 2.16. Polipropilen mikro ve makro lifler

Geopolimer beton üretimlerinde, donatı olarak fiberlerin ilk kullanımı, süneklik, dayanıklılık, kırılma tokluğu ve eğilme mukavemeti gibi geopolimer harç özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Betonda donatı olarak çelik, cam ve sentetik lifler kullanılmıştır. Güçlendirilmemiş bir geleneksel beton yapı, sınırlı bir elastik tepkiye sahiptir ve bu elastik sınıra ulaşıldığında, makro çatlaklardan sonra mikro çatlaklar meydana gelir ve sonunda başarısız olur. Bununla birlikte, bu sorunun üstesinden gelmek, geleneksel betonun çekme direncini ve sünekliğini iyileştirmek için farklı tipte polimerik veya sentetik lifler ekleyerek yapılmıştır.

Polipropilen genellikle, polimerin istenen çapa ulaşana kadar bir kalıptan sıcak olarak çekildiği ve daha sonra gerektiği gibi farklı uzunluklarda dilimlendiği ekstrüzyon yoluyla oluşturulur (Owens, 2009). Polipropilen lif, hidrofobik bir polimer malzemedir ve sentetik bir hidrokarbondur. Bu, nispeten düşük bir elastisite modülü, düşük erime noktası ve bir çimento matrisi ile zayıf bağ özellikleri gibi eksikliklere yol açar. Polipropilen lifin özgül ağırlığı 0.90 ila 0.91 arasında değişir, çekme mukavemeti 138 ila 690 MPa arasında değişir ve modül elastisitesi (3-5 GPa) arasında değişir (Oh, 2005; Foti, 2011).

Polipropilen lif, betonda takviye görevi görür ve betonun mühendislik ve mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu özellikler, betonun yarma dayanımı, eğilme dayanımı, darbe direnci, kırılma enerjisi, süneklik, dayanıklılık ve yangın direncini içerir (Thirumurugan vd., 2013). Polipropilen lifler, ekonomik olmaları, asitlere ve korozyona karşı dirençleri ve mükemmel toklukları nedeniyle günümüzde araştırmacıların dikkatini çekmiştir.

Peng Zhang ve Li (2006), %6 silis dumanı külü ve %15 uçucu madde içeren beton kırış numunelerinde %0.12, %0.1, %0.08, %0.06 ve %0.04 polipropilen lif ilavesinin etkisini üç- nokta yükleme testi üzerinden yapmışlardır. Liflerin kırılma enerjisi, kritik çatlak açıklığı, maksimum orta açıklık sapma, etkili çatlak uzunluğu, kırılma tokluğu vb. gibi beton kompozit kırılma özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiği bulunmuştur. Ayrıca, kullanılan lifler stres dağılımını iyileştirmiş ve gerinim lokalizasyonunu azaltmıştır.

Murahari ve Rama Mohan Rao (2013) 500 x 100 x 100 mm boyutlarında numuneler kullanarak polipropilen lifin beton dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. ASTM C78/C78M tarafından üç noktalı bir yükleme testi benimsenmiştir. Betonun eğilme dayanımının içerikte %0,3'e kadar arttığı ve 56 güne göre 28 gün sonra betonun daha fazla dayanım kazandığı tespit edilmiştir. Genel olarak betondaki polipropilen lif varlığı, yapısal çatlamayı önler. Çünkü matristeki lifler kohezyonu destekler.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Bağlayıcılar

Bu çalışmada iki farklı bağlayıcı kullanılmıştır. Öğütülmüş bazik pomza ve silis dumanı ağırlıkça farklı yüzdelerde kendi aralarında yer değiştirerek farklı karışımlar elde edilmiştir. Öğütülmüş bazik pomza, Ekodoğa A.Ş.'den; silis dumanı ise, Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş.'den temin edilmiştir. Silis dumanı ve öğütülmüş bazik pomzanın özgül ağırlıkları ASTM C188-95'e göre tayin edilmiş olup, sırasıyla 2,26 g/cm³ ve 2,6 g/cm³'tür.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları (%)

Oksit	Silis dumanı	Bazik pomza
Na ₂ O	2,15	6,57
MgO	14,32	4,03
Al ₂ O ₃	1,68	21,2
SiO ₂	78,02	43,6
P ₂ O ₅	0,024	0,737
SO ₃	0,298	0,162
K ₂ O	1,09	3,99
CaO	0,193	8,02
TiO ₂	-	2,64
MnO	0,056	-
Fe ₂ O ₃	0,317	8,46
Cr ₂ O ₃	1,405	-
ZnO	0,195	-
ZrO ₂	<0,068	-

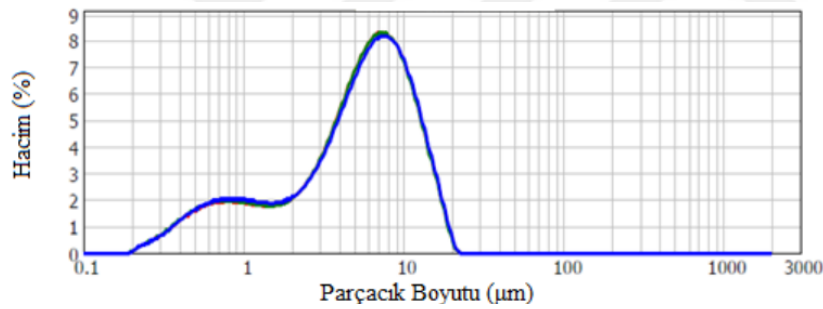
Volkanik küller yaygın olarak puzolanik aktivite göstermektedir. Onların kimyasal ve fiziksel özellikleri, "Portland Çimento Betonunda Mineral Katkı olarak Kullanım için Uçucu Kül ve Ham veya Kalsine Doğal Puzolan" için Standart Şartname olan ASTM C618 ile referans alınarak elde edilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Malzemelerin dayanımı, içindeki parçacıkların boyutuna bağlıdır. Mie teorisi, küçük parçacıkların boyutunu ölçmek için kullanılmaktadır (Eshel vd., 2004). Mie

Teorisi, ışığın, ortam içerisinde tane boyu etrafındaki hem kırılmasını hem de geçirgenliğini dikkate almaktadır. Parçacık içerisinde geçen lazer ışığının saçılma açısı parçacık boyutuna bağlıdır. Parçacık boyutu düştükçe saçılma açısı logaritmik olarak artmaktadır. Büyük parçacıkların saçılma açıları düşük, saçılan lazer ışığının şiddeti Mie Teorisi, ortamın her yerindeki ışığın hem kırılmasını hem de geçirgenliğini dikkate alır. Parçacıktan geçen lazer ışığının saçılma açısı parçacık boyutuna bağlıdır. Parçacık boyutu küçüldükçe saçılma açısı logaritmik olarak artar. Büyük parçacıkların saçılma açıları düşüktür ve saçılan lazer ışığının yoğunluğu yüksektir. Küçük parçacıklar, yüksek bir saçılma açısına ve düşük bir saçılan lazer ışığı yoğunluğuna sahiptir. Çizelge 3.2, silis dumanının $d(0,1)$, $d(0,5)$, $d(0,9)$ değerlerini ve özgül yüzey alanını göstermektedir. Ayrıca silis dumanının parçacık boyutu dağılımları Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı ve özgül yüzey alanları (Gülmez, 2018)

Malzeme	Yüzey alanı (m ² /g)	Parçacık boyut dağılımı (μm)		
		d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
Silis dumanı	2,790	0,766	5,479	12,351



Şekil 3.1. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı (Gülmez, 2018)

3.1.2. Agregat

Çalışmada agregat olarak kırma kum kullanılmıştır.



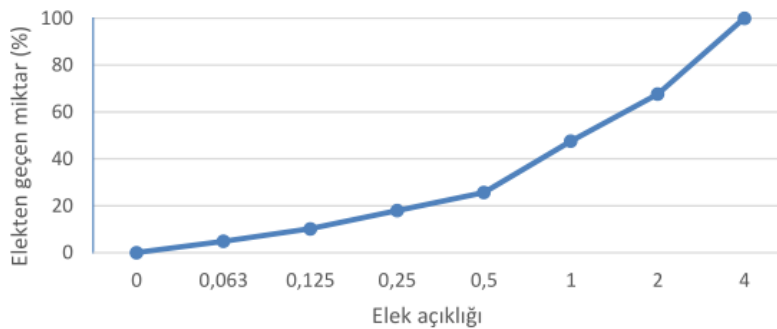
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan kırma kum agregası

Agreganın özgül ağırlığı, karışıma girecek agrega miktarını belirlemek için tayin edilmiş ve ASTM C128-01'e göre yapılmıştır. Şekil 3.3'te gösterilen Le Chatelier balonu ve balon joje deneyi yöntemleriyle özgül ağırlık değerleri bulunup, her iki yöntemin ortalaması $2,64 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır.



Şekil 3.3. Le Chatelier balonu ve balon Joje

Agreganın tane boyut dağılımını belirlemek için elek analizi TS EN 933-1 ve ASTM C-136 standartlarına göre yapılmıştır. Elek analizi deneyi sonucunda, agregaların granülometresi belirlenmiştir. Harç üretmek istenildiğinden dolayı 4 mm göz açıklıklı elek altında kalan, tane boyutuna sahip agregalar kullanılmıştır. Kullanılan elek göz açıklıkları sırasıyla 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,125 mm ve 0,063 mm olarak belirlenmiştir. Elekler, yukarıdan aşağıya doğru yerleştirilen eleklerin elek açıklıkları sırasıyla 4, 2, 1, 0,5, 0,25 ve 0,125 mm şeklinde olup sarsma cihazı ile sarsılmıştır. Her bir elek üstünde kalan agrega miktarları tartılarak, akabinde elek üstü yığılımlı ağırlıklar hesaplanmıştır. Elek üstü yüzde yığılımlı değerler hesap edilerek agregaların incelik modülleri tayin edilmiştir. Şekil 3.4'te verildiği gibi granülometri eğrileri logaritmik olarak, elekten geçen yüzde yığılımlı değerler kullanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan kırma kum agregasının granülometrisi

3.1.3. Alkali aktivatör

Aktivasyon işleminde alkali solüsyon olarak sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Sodyum hidroksit, kostik performansı çok yüksek ve beyaz renkli inorganik bir metal bazdır. Sodyum hidroksitin molar kütlesi 40 g/mol 'e eşittir. NaOH

çözeltisinin konsantrasyonu molarite cinsinden ifade edilir. Bu çalışmada kullanılan NaOH çözeltisi, NaOH peletlerinin (%99 saflık) damıtılmış su içinde 10M'lık bir konsantrasyona kadar çözülmesiyle hazırlanmıştır.

3.1.4. Karışım suyu

Harç üretiminde kullanılan su üç farklı görevi üstlenmektedir. Suyun ilk görevi, hidratasyonu başlatmak için bağlayıcı malzemesi ile birleşmektir. İkinci görev, taze harcın istenen kıvamını ve işlenebilirliğini sağlamak için harç üretiminde bağlayıcı ve agrega parçacıklarının yüzeyini ıslatmaktır. Üçüncü görevi ise üretilen ve yerine yerleştirilen harcın yüzeyini ıslak tutmak, harçtaki suyun buharlaşmasını önlemek ve kimyasal reaksiyonların gelişmesi için karışımda yeterli su bulunmasını sağlamaktır. Bu deneysel çalışmada, karıştırma ve bakım suyu olarak Antalya Büyükşehir Belediyesi şehir şebekesinden temin edilen içme suyu kullanılmıştır.

3.1.5. Polipropilen Lif

Polipropilen lif (PPL), propilen polimerizasyonundan elde edilen bir tür doğrusal polimer sentetik liftir. Hafif olması, yüksek dayanım, yüksek tokluk ve korozyon direnci gibi bazı avantajları vardır. PPL, kimya endüstrisinde, enerjide, giyimde, çevre korumada ve inşaatla yaygın olarak kullanılmaktadır. Betona PPL eklendiğinde, mikro çatlak oluşumunu ve gelişimini etkili bir şekilde engelleyen betonda üç boyutlu rastgele dağıtım ağı yapısı oluşturulabilir. Sonuç olarak, PPL su ve diğer zararlı iyonların betona girmesini önleyebilmektedir. PPL eklenerek betonun dayanıklılığı artırılabilir. Bu çalışma için, Fiber Elyaf Kompozit internet mağazası tarafından temin edilen polipropilen lifin özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan lifin özellikleri

Malzeme	Polipropilen lif
Renk	Beyaz
Özgül ağırlığı, kg/m ³	910
En boy oranı (L/d)	300
Lif uzunluğu, mm	6
Lif çapı, mm	0,04
Gerilme direnci, kg/m ³	450
Elastik güç, MPa	6000-9000
Su emme oranı	-
Uzama kopması, %	15-25
Yumuşama noktası	165 °C

3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı

Çalışmada taze beton karışımlarının kıvamını ve işlenebilirliğini sağlamak için TS EN 934-2+A1 (2013) ve ASTM C 494-99a (2002)'ye uygun süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı; ilk ve sonraki günlerde yüksek dayanıklılık ve dayanım gerektiren betonlar için tasarlanmış, suyu hızla azaltan, beton için yeni nesil polikarboksilik ester esaslı süper akışkanlaştırıcıdır. +20°C sıcaklıkta ve %50 bağıl nemde özel olarak imal edilen süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcının özelliği polikarboksilik ester sıvısıdır ve yoğunluğu 1,082-1,142 kg/L arasında değişebilmektedir. Harç karışımlarında süperakışkanlaştırıcı katkı oranı çökme değerlerini 14±2 sağlayacak şekilde %1 ile %1,5 oranları arasında kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik Ester Esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,082-1,142 kg/L
Klor içeriği, %	<0,1
Alkali içeriği, %	<3

3.2. Metot

3.2.1. Geopolimer harçların karışım tasarım yöntemi

Geopolimer harçların üretimi 1 dm³ hacimde karışım olarak tasarlanmaktadır. Karışıma giren malzemelerin hacmi, her bir hacim yoğunluğu ile çarpılarak kütleye dönüştürülmüştür. Geopolimer harcın toplam hacminin %50'sini agregalar oluştururken, kalan hacmi alkali aktivatör (%25) ve bağlayıcı (%25) oluşturmaktadır.

Karıştırma aşaması şu şekilde gerçekleştirilmiştir: 10M konsantrasyonda hazırlanan NaOH çözeltisi, NaOH peletleri distile su içinde çözülerek karıştırılmıştır. Daha sonra kırma kum agregası eklenmiştir. Mikserde yaklaşık 1 dakika karıştırıldıktan sonra polipropilen lif ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi devam ederken, karışıma bağlayıcılar (silis dumanı ve/veya öğütülmüş bazik pomza) ve süperakışkanlaştırıcı eklenmiş ve mikser toplam 6-8 dakika çalıştırılmıştır. Karışıma giren malzeme miktarı hacimsel olarak Tablo 3'te verilmiştir. Aşağıdaki özellikler karışım serilerinin her birinde sabit tutulmuştur. Üretilen karışımlar 40x40x160 mm prizmatik kalıplara yerleştirilmiş ve nem kaybını önlemek için plastik bir örtü ile kaplanmıştır. 24 saat sonra sertleşen numuneler kalıptan çıkarılarak 22±2 °C'de normal hava sıcaklığında test gününe (7 ve 28 gün) kadar bırakılmıştır.

Sodyum hidroksit konsantrasyonu: 10 M;

Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı: 1 (hacimsel olarak);

Agrega//bağlayıcı oranı: 2 (hacimsel olarak).



Şekil 3.5. Harçların kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 3.6. Kalıptan çıkarıldıktan sonra bekletilen numuneler

SPL50 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiştir. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

SP50F Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiştir. Hazırlanan numuneler 6 saat fırında kürlendikten sonra 7 ve 28 gün boyunca bekletilmiştir.

SP50L/P0,5 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %0,5 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

SP50F/P0,5 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %0,5 oranında polipropilen

lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 6 saat fırında kürlendikten sonra 7 ve 28 gün boyunca bekletilmiştir.

SP50L/P1 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %1 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

SP50F/P1 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %1 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 6 saat fırında kürlendikten sonra 7 ve 28 gün boyunca bekletilmiştir.

SPL75 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %75 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiştir. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

SPF75 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %75 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiştir. Hazırlanan numuneler 6 saat fırında kürlendikten sonra 7 ve 28 gün boyunca bekletilmiştir.

SP75L/P0,5 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %75 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %0,5 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

SP75F/P0,5 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %75 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %0,5 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 6 saat fırında kürlendikten sonra 7 ve 28 gün boyunca bekletilmiştir.

SP75L/P1 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %75 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %1 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

SP75F/P1 Karışım serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %75 öğütülmüş bazik pomza ile yer değiştirmiş ve karışıma %1 oranında polipropilen lif eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 6 saat fırında kürlendikten sonra 7 ve 28 gün boyunca bekletilmiştir.

Çizelge 3.5. Karışıma giren malzeme hacimleri (dm³)

Karışım serisi	Agrega	Silis dumanı	Bazık pomza	NaOH	Polipropilen lif	Süper akışkanlaştırıcı
SPL50	500	125	125	250	-	-
SPF50	500	125	125	250	-	-
SPL50/P0,5	500	125	125	250	%0,5	%1
SPF50/P0,5	500	125	125	250	%0,5	%1
SPL50/P1	500	125	125	250	%1	%1,5
SPF50/P1	500	125	125	250	%1	%1,5
SPL75	500	62,5	187,5	250	-	-
SPF75	500	62,5	187,5	250	-	-
SPL75/P0,5	500	62,5	187,5	250	%0,5	%1
SPF75/P0,5	500	62,5	187,5	250	%0,5	%1
SPL75/P1	500	62,5	187,5	250	%1	%1,5
SPF75/P1	500	62,5	187,5	250	%1	%1,5

3.2.2. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

3.2.2.1 Taze harç kıvamının belirlenmesi

Taze harçların kıvam tayini, taze harçlar üzerinde üretimden hemen sonra TS 1015-3'e göre yapılmıştır. Test yönteminde kesik koni şeklindeki kalıp, yayma plakasının ortasına yerleştirilmiş ve iki kat halinde harçla doldurulmuştur. Her katman farklı parçalardan en az 10 kez şişirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Fazla harç, palet bıçağı ile kalıbın üst kısmından alınmış ve kalıp tabanının etrafındaki alan, koniyi çıkarmak için bir bezle temizlenmiştir. Yayma tablasının kolu saniyede bir kez döndürülmüş ve 15 kez indirilmiştir. Yayılan harcın çapı birbirine dik açılarda ölçülmüş ve her iki sonucun ortalaması rapor edilmiştir.



Şekil 3.7. Taze harç kıvam deneyi

3.2.2.2 Taze harcın birim hacim kütlelerinin belirlenmesi

Taze harçların birim hacim kütlesi TS 1015-6'ya göre bulunmuştur. Test yöntemi, bilinen bir hacimdeki harcın kütlelerinin hesaplanmasını içermektedir. Yöntem, serpme tablası testi ile belirlenen taze harcın kıvamına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.

- Yayılma değeri 140 mm'den az ise (kuru harç) – Titreşim yöntemi. Kalibre edilen kap, taşana kadar harçla doldurulur, daha sonra titreşimli bir masanın üzerine yerleştirilir ve malzemenin artık oturmadığı görülünceye kadar titreşim devam eder, gerekirse malzeme ilave edilir. Kap daha sonra 1 gram hassasiyetle tartılır.
- Yayılma değeri 140 mm ile 200 mm arasında ise (plastik kıvamlı harç) – Şok yöntemi. Kalibre edilen kap, yüksekliğinin yaklaşık yarısına kadar harçla doldurulur, daha sonra kap karşı taraflarda yaklaşık 30 mm yatırılır ve 10 kez sağlam bir taban üzerine düşmesine izin verilir. Harç hava sürükleyici katkı maddeleri içeriyorsa, şok sayısı beşe düşürülür. Daha sonra kap taşacak şekilde doldurulur ve şok sıkıştırması tekrarlanır. Kap 1 gram hassasiyetle tartılır.
- Yayılma değeri 200 mm'den fazla ise (akışkan kıvamlı harç). Kalibre edilen kap taşana kadar doldurulur, kabın kenarları nemli bir bezle silinir ve kap 1 gram hassasiyetle tartılır. Birim hacim kütlesi (ρ_m , kg/m³) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

ρ_m : Taze harç birim hacim ağırlığı, kg/m³

m_1 : Kabın ağırlığı, kg

m_2 : Kabın ve taze harcın ağırlığı, kg

V : Kabın hacmi, m³



Şekil 3.8. Taze harçlarda birim hacim kütle tayini

3.2.3. Sertleşmiş Harçların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.3.1 Yığın yoğunluk, su emme ve görünür gözeneklilik

Yığın yoğunluğu, su emme ve görünen gözeneklilik değerleri ASTM C 642-06 standardına göre elde edilmiştir. 40x40x160 mm prizma numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 ve 28 günlük normal hava ve/veya etüv kürünün ardından 22 ± 2 °C'de normal su küründe 24 saat boyunca bekletilmiştir. Sudan alınan numunelerin yüzeyi bir havlu ile yüzey nemi alınarak kurutulmuş ve kütlesi belirlenmiştir. Kuru yüzey kütlesi W_2 olarak belirlenmiştir. Numune askıdaki tel vasıtasıyla suya daldırılarak sudaki kütlesi belirlenmiş ve bu kütleye W_3 adı verilmiştir. Numuneler daha sonra 60 saat boyunca 60°C'de bir fırında kurutulmuştur. Her numune fırından çıkarıldıktan sonra havada 20-25 °C sıcaklığa soğumaya bırakılmış ve kütlesi belirlenmiştir. Bu değer W_1 olarak adlandırılmıştır.

Yukarıda açıklanan prosedüre göre belirlenen değerler kullanılarak kürlenmiş harçta kuru yığın yoğunluğu, su emme ve görünür gözeneklilik hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$A_1 = \frac{W_1}{W_2 - W_3} \quad (3.2)$$

$$A_2 = \frac{W_1}{W_1 - W_3} \quad (3.3)$$

$$A_3 = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} * 100 \quad (3.4)$$

$$A_4 = \frac{W_2 - W_1}{W_1} * 100 \quad (3.5)$$

A_1 : Kuru birim ağırlık

A_2 : Görünür birim ağırlık

A_3 : Görünür boşluk oranı, %

A_4 : Ağırlıkça su emme oranı, %

3.2.4. Sertleşmiş Harçların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.4.1 Eğilme dayanımı tayini

Sertleşmiş harç numunelerinin eğilme çekme ve basınç dayanımları TS EN 196-1 standardına göre belirlenmiştir. 40x40x160 mm prizma numuneleri üç noktadan yüklenerek harçların eğilme dayanımları bulunmuştur. Maksimum yükün üzerine formül yerine veriler yerleştirilerek eğilme dayanımı MPa cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 = \frac{3F_k l}{2d_1 d_2^2} \quad (3.6)$$

σ_1 : Eğilme dayanımı, MPa

F: Deney makinesinde kırılma anındaki en büyük yük, N

l: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık, mm

d_1 : Numunenin genişliği, mm

d_2 : Numunenin yüksekliği, mm



Şekil 3.9. UTEST cihazı ile eğilme dayanımı tayini

3.2.4.2 Basınç dayanımı tayini

Basınç dayanımı tayini için, üç nokta eğilme deneyi sonucu ortadan ikiye bölünen 40x40x160 mm ebatlı numuneler kullanılmıştır. Kırık parçalar, numuneye alt ve üstten temas eden 40x40 mm ebatlı yükleme yüzeylerine sahip çerçeve içerisine, kalıp yüzeyi yükleme ekseninde kalmayacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Kalıp yüzeyi, diğer yüzeylere göre daha pürüzlü olduğu için yükleme ekseninde kaldığı takdirde, uygulanan yük numune üzerine üniform bir şekilde yayılmayacak ve yanlış ölçümler yapılmasına sebep olacaktır. Numunenin kendi ayrıtı da 40 mm olduğu için, ölçümler 40x40x40 mm boyutlarında bir küp numune test edilmekte kabulüyle gerçekleştirilmiştir. Kırılma

anındaki maksimum yük yardımıyla basınç dayanımı değeri MPa cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma_2 = \frac{F_y}{A_y} \quad (3.7)$$

σ_2 : Basınç dayanımı, MPa

F_y : Maksimum yük, N

A_y : Yükün uygulandığı kesit alanı, mm²

3.2.4.3 Gerilme-şekil değiştirme

Yük altında malzemenin göstereceği davranışı incelemek, malzemenin tokluk ve rezilyans değerleri öğrenmek açısından oldukça önemli bir husustur. Bir malzemenin yük altında kopana kadar sönümlediği enerji miktarı o malzemenin tokluğunu verir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altındaki alan hesaplanarak tokluk değeri bulunur. Rezilyans bir malzemenin elastik şekil değişimi sırasında depoladığı enerjidir. Rezilyans değeri gerilme şekil değiştirme eğrisinin elastik kısmının altında kalan alanla belirlenir.

Sertleşmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri deformasyon kontrollü UTEST presile belirlenmiştir. 40x40x160 prizmatik numuneler dakikada 1 mm deformasyon yapacak şekilde, 40x40x40 küp numuneler ise dakikada 3 mm deformasyon yapacak şekilde kırılmıştır ve cihazdan alınan veriler UTEST MALZEME TEST programı kullanılarak elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir.

3.2.5. Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.5.1 Kılcal geçirimsizlik

TS EN 480-5 standardına göre 60°C'de 60 saat kurutulan 40x40x160 mm prizma numuneleri, alt yüzeyleri su ile temas ettirilerek kapiler su emme testine tabi tutulmuştur. Numuneler, suya değen dip hariç diğer yüzeylerinden su emilmemesi için parafin ile kaplanmıştır. Kapiler tarafından emilen su miktarı, numuneler tartılarak 1 saat ve 24 saat sonra ölçülmüştür. Kılcal su emme katsayısı aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Q}{A_k \sqrt{t}} \quad (3.8)$$

K: Kılcal su emme katsayısı, cm/sn^{1/2}

t: Ölçüm aralığı süresi, sn

A_k : Kılcal su emme yüzeyi alanı, cm²

Q: t zaman aralığında emilen su miktarı, cm³



Şekil 3.10. Kılcal su emme deneyinden önce suya bırakılan ve sudan çıkartılan numuneler



Şekil 3.11. Kılcal su emme testi kurulumu

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Taze Harçlar Üzerinde Yapılan Deneylerin Bulguları

Taze harçların üzerinde kıvam tayini ve birim hacim ağırlık tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. PPL içeren lifli harçların işlenebilirliği arttırmak için bağlayıcı miktarının %1 ve %1,5 oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 4.1’de ve Şekil 4.1-4.2’de çalışma kapsamındaki tüm karışımlara ait yayılma değerleri gösterilmiştir. Yukarıdaki çizelge incelendiği zaman, yayılma değerlerinin 12 ile 13,5 cm ve birim hacim ağırlık değerlerinin 2040,93 ile 2208,8 arasında değiştiği gözlenmiştir. En yüksek yayılma çapı 13,5 ile SPL75 ve SPF75 (%25 silis dumanı ve %75 öğütülmüş bazık pomza) karışımında, en düşük yayılma ise 12 ile SPL50/P1 ve SPF50/P1 (%50 silis dumanı ve %50 öğütülmüş bazık pomza) karışımında olduğu görülmektedir. En yüksek birim hacim ağırlık değeri 2208,8 ile SPL50, en düşük birim hacim ağırlığı ise 2040,93 ile SPL75/P1 olduğu belirtilmiştir.

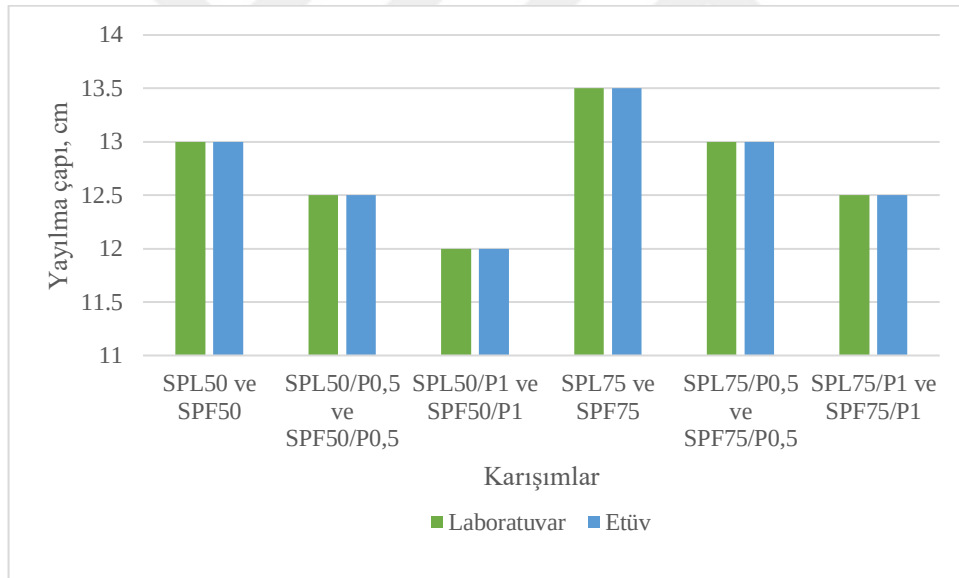
Çizelge 4.1. Karışımların taze haldeki yayılma çapı, birim hacim kütlesi değerleri

Karışım serisi	Yayılma çapı, cm	Birim hacim kütlesi, g/dm ³
SPL50	13	2208,80
SPF50	13	2189,50
SPL50/P0,5	12,5	2145,95
SPF50/P0,5	12,5	2125,96
SPL50/P1	12	2106,20
SPF50/P1	12	2098,12
SPL75	13,5	2168,18
SPF75	13,5	2116,55
SPL75/P0,5	13	2111,08
SPF75/P0,5	13	2065,75
SPL75/P1	12,5	2051,10
SPF75/P1	12,5	2040,93

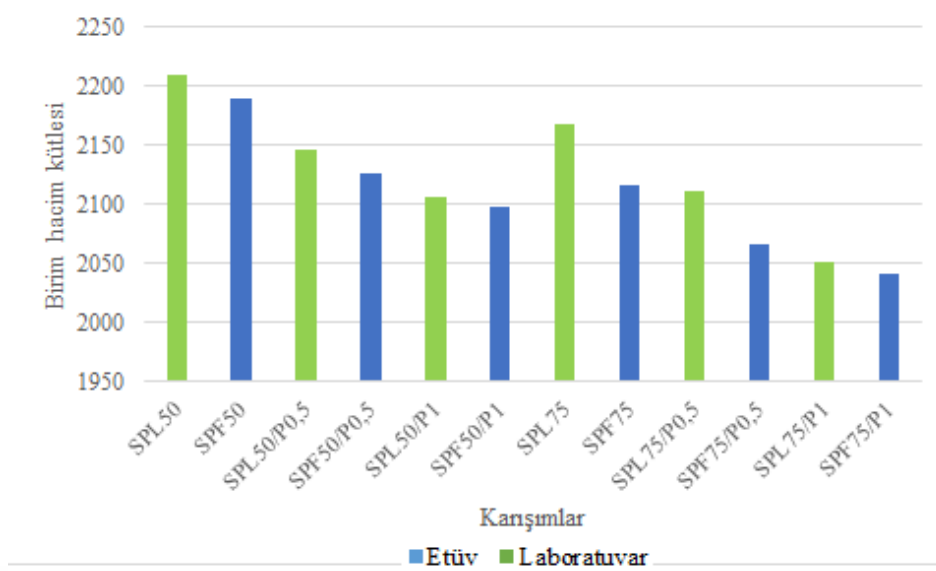
Lif oranı arttıkça yayılmanın azaldığı görülmektedir. Harç içerisine ilave edilen farklı boy veya narinlik oranlarındaki polipropilen lifler harçların birim ağırlık değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Bu durum harçların birim hacim ağırlığı için de geçerlidir. Maksimum lif (%1) içeriğine sahip olan tüm karışımların yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerleri en düşük değerler olduğu saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; lif oranının arttırılması, gözenekli bir yapı oluşumuna sebep olduğu için

harçların birim hacim ağırlıklarını ve işlenebilirliklerini azalttığı söylenmektedir. Harç veya beton içerisine ilave edilen polipropilen liflerin işlenebilirlik değerlerini azalttığı literatürden bilinmektedir (Topçu ve Demirel, 2017). İşlenebilirlikteki azalmanın en büyük nedeni, artan lif miktarıyla topaklaşmanın ortaya çıkması ve bunun sonucunda bileşenlerin hareket kabiliyetlerinin azalarak harcın kıvamını azaltmasıdır. İşlenebilirlikteki azalma harcın kalıba yerleştirilmesini de etkilemekte ve kısmen de olsa kontrol (lifsiz) harca göre daha boşluklu kalmasına neden olmaktadır. Lif miktarının artmasıyla birlikte kalıba daha boşluklu yerleşmiş olan harçların birim hacim ağırlık değerleri de kontrol harcına göre daha düşük değerler almıştır.

Elde edilen bulgular önceki çalışmalarla uyumludur. PPL geopolimer harç karışımlarında kullanılmasıyla ilgili yapılan çalışmalarda, işlenebilirliğin kullanılan lifin türü ve oranına bağımsız olarak düştüğü belirtilmiştir. Yazarlar, liflerin birbirlerine dolanarak kümeler oluşturmaları betonun yayılmasını engellediğini ve yayılma çapındaki düşüşün sebebi olduğunu açıklamışlardır. Karahan ve Atış (2011) yaptıkları çalışmada, polipropilen liflerin betonun yayılma ve taze haldeki birim hacim ağırlık değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca artan lif miktarının işlenebilirliği azalttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca Bhutta ve Banthia (2019) kendi çalışmalarında aynı sonucu rapor etmişlerdir. Kabay vd. (2021) yaptığı çalışmada aynı şekilde PPL oranı arttıkça taze birim hacim ağırlık değerlerinin kademeli olarak düştüğünü belirtmişlerdir.



Şekil 4.1. Yayılma çapı değerleri



Şekil 4.2. Birim hacim kütlesi değerleri

Lifsiz karışım serilerine dikkat edildiğinde, en yüksek yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerlerini sırasıyla 13,5 cm ve 2208,8 g/dm³, en düşük değerler sırasıyla 13 cm ve 2116,55 g/dm³'tür.

Polipropilen lif katkılı karışım serilerine dikkat edildiğinde, en yüksek yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerlerini sırasıyla 13 cm ve 2145,95 g/dm³, en düşük değerler sırasıyla 12 cm ve 2040,93 g/dm³'tür.

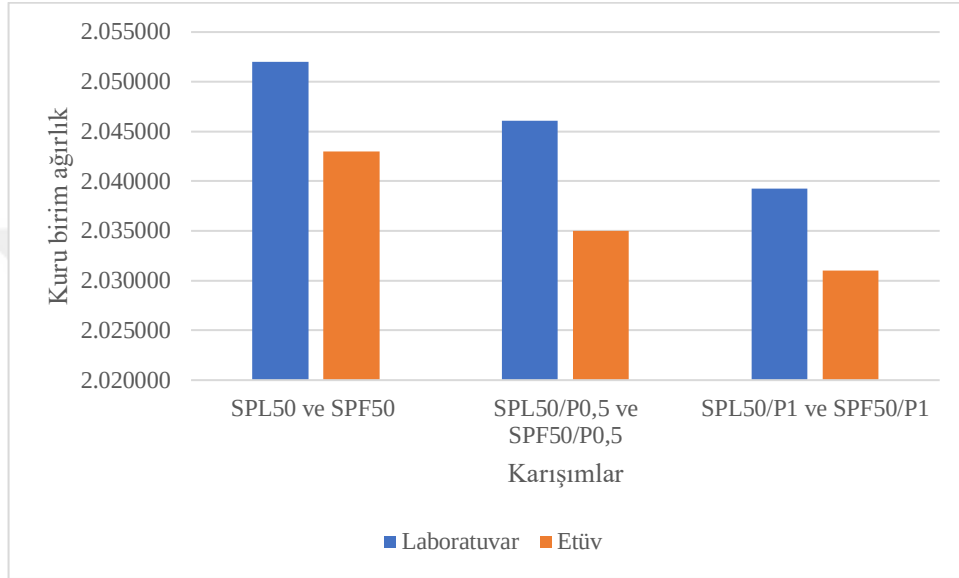
Üretilen seriler karşılaştırıldığı zaman yüksek oranda silis dumanı içeren harçların birim hacim ağırlığı daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, üretilen tüm karışımlarda polipropilen lif oranının artmasıyla yayılma çapının düştüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; polipropilen lif ilave edilmiş harçlarda, lif harcın işlenebilirliğini azaltmıştır. Bu etkisi lifin kökeni ve inceliğine bağlıdır. Polipropilen lif türlerindeki farklılık, lif karıştırılmış harçlarında normal kıvamların farklılaşmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, harç içerisindeki polipropilen lifin varlığı su ihtiyacını artırır, ancak harç ve betonda oluşabilecek agrega ayrışması riskini artırmaz. Polipropilen lifin varlığı su ihtiyacına sebep olduğu için harçların işlenebilirliklerini azalttığı söylenebilir.

Sonuçlardan görüldüğü üzere fazla silis dumanı içeren karışımların işlenebilirliğini düşüktür. Dolayısıyla bu karışımlar daha fazla suya veya süperakışkanlaştırıcıya ihtiyaç duymaktadır. Aynı sonucu, Mazloom vd. (2004) yaptıkları çalışmada, fazla silis dumanı içeren karışımların SD içermeyen karışımlara göre işlenebilirliği düşük olduğunu bildirmişlerdir. Yüksek oranda silis dumanı içeriğine sahip karışımların daha fazla akışkanlaştırıcı dozajına gereksinim duyduğu görülmüştür (Faraj vd., 2019). Silis dumanı içeren betonun süper akışkanlaştırıcıya olan yüksek talebi, süper akışkanlaştırıcının bir kısmının yüzeyinde adsorbe olmasına neden olan çok ince silis dumanı partikül boyutuna atfedilmiştir (Mazloom vd., 2004; Faraj vd., 2019).

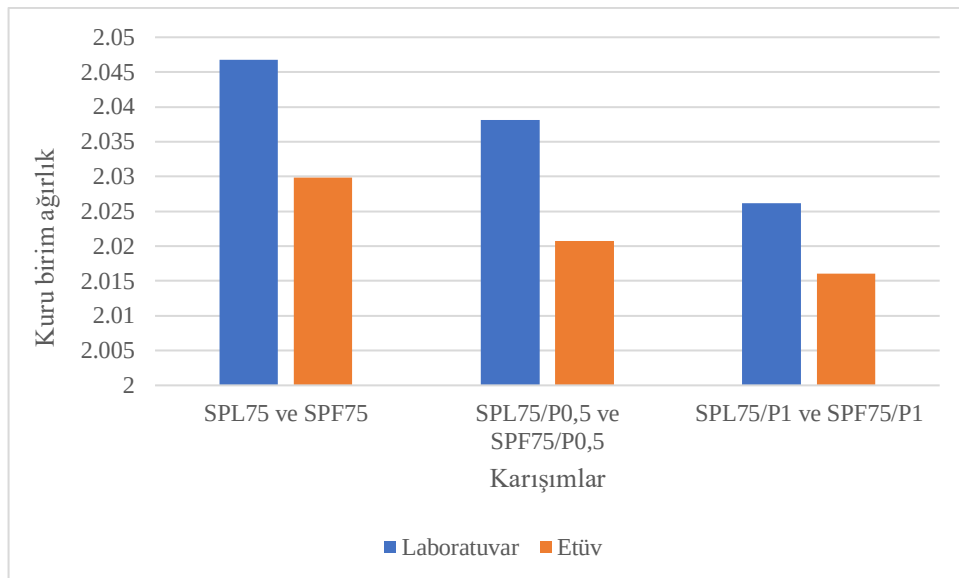
4.2. Sertleşmiş Harçlarda Fiziksel Hal Deney Bulguları

4.2.1. Kuru birim ağırlık değerleri

Sertleşmiş harçlarda fiziksel hal deneyler 28 günde test edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş harçların kuru birim ağırlık değerleri Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.3-4.4’te verilmektedir. Tüm seriler incelendiği zaman, en yüksek kuru birim ağırlık değerini 2,052 g/cm³ ile SPL50 gösterirken, en düşük değeri ise 2,016 g/cm³ ile SPF75/P1 göstermektedir.



Şekil 4.3. 28 günlük karışımların kuru birim ağırlık değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)



Şekil 4.4. 28 günlük karışımların kuru birim ağırlık değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

Lifsiz karışım serileri dikkate alındığında, en yüksek kuru birim ağırlık değerini 2,052 g/cm³ ile SPL50 gösterirken, en düşük değeri ise 2,029 g/cm³ ile SPF75 elde etmiştir. Polipropilen lif katkılı karışım serileri dikkate alındığında, en yüksek kuru birim ağırlık değeri 2,046 g/cm³ ile SPL50/P0,5 gösterirken, en düşük değeri ise 2,016 g/cm³ ile SPF75/P1 elde etmiştir. Silis dumanının daha yüksek olduğu karışımlar serileri ile öğütülmüş bazik pomzanın yüksek olduğu karışımları ele aldığımızda en yüksek değerlerin 2,047 ile 2,052 arasında değiştiği ve en düşük değerlerin 2,016'dan 2,031'e çıktığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2. Karışımların KBA-SDKY değerleri

Karışım serisi	Kuru birim ağırlık	Suya doymun kuru yüzey
SPL50	2,052	2,118
SPF50	2,043	2,108
SPL50/P0,5	2,046	2,097
SPF50/P0,5	2,035	2,085
SPL50/P1	2,039	2,073
SPF50/P1	2,031	2,064
SPL75	2,047	2,097
SPF75	2,029	2,089
SPL75/P0,5	2,038	2,091
SPF75/P0,5	2,020	2,078
SPL75/P1	2,026	2,074
SPF75/P1	2,016	2,063

Tüm karışımlarda, polimer lifin oranı artması, kuru yığın yoğunluk değerlerinin kademeli bir şekilde düşmesine sebep olmuştur. Elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla uyumludur. Su emme ve gözeneklilik artarken kuru birim ağırlık değerleri azalmıştır. Aynı sonuç Kockal vd. (2018) yaptığı çalışmada görülmektedir. Ayrıca kalsiyum hidroksit, silis dumanı ve pomza içeren numunelerin düşük kütle yoğunluğuna ve yüksek gözenekliliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Ramezaniapour vd. (2013), polipropilen liflerin geopolimer betonun üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Polipropilen lifler 0 – 4 kg/m³ gibi farklı oranlarda betona eklenmiştir. Eklenen liflerin betonun yoğunluğunu kademeli bir şekilde düşürmüştür. Lifsiz olan karışımın yoğunluğu 2,42 kg/m³ iken, bu değer 4 kg/m³ lif içeriğine sahip karışım için 2,34 kg/m³ olmuştur. Ranjbar vd. (2016), uçucu kül bazlı geopolimerin yoğunluğu, karışımın PPL içeriğinin artması ve polipropilenin daha düşük özgül ağırlığı nedeniyle teorik ağırlık kaybının artmasıyla azaldığı sonucuna varmışlardır. Liflerin daha düşük özgül ağırlığı ile birlikte sıkıştırma zorlukları nedeniyle

matrisin yüksek gözenekliliğine atfedilen PPL içeriği olmayan numuneye kıyasla %5 PPL içerik matrisinde yoğunlukta yaklaşık %20 azalma gözlemlenmiştir.

Harcın yoğunluğu, lif içeriğinden ve liflerin özgül ağırlığından doğrudan etkilenmektedir. Fiberin özgül ağırlığı jeopolimer matrisinden daha düşük olduğunda, karşılık gelen jeopolimer kompozitlerin yığın yoğunluğu azalmaktadır (Zhang ve Ranjbar, 2020).

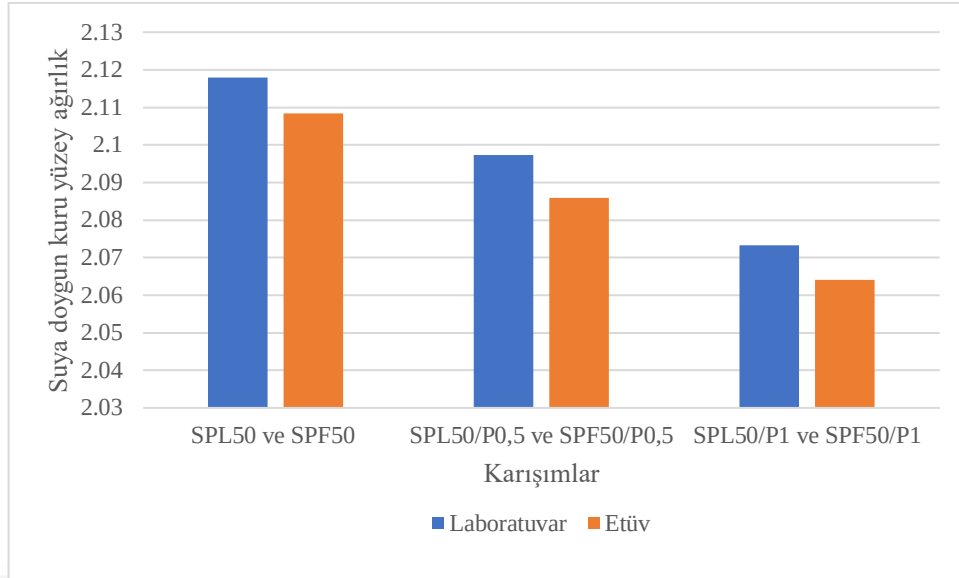
Ayrıca pomza içeriğinin arttıkça kuru birim ağırlık değerlerinde bir miktar azalma olmuştur. Diğer yazarlar da aynı sonuçları kendi çalışmalarında tespit etmişlerdir. Miyan vd. (2021), pomza artışı ile jeopolimer harçların kuru birim ağırlığının 1,927 ile 1,873 arasında değiştiğini bulmuştur. Harçtaki pomza tozunun kademeli olarak artması yoğunluğu düşürmüştür.

4.2.2. Suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerleri

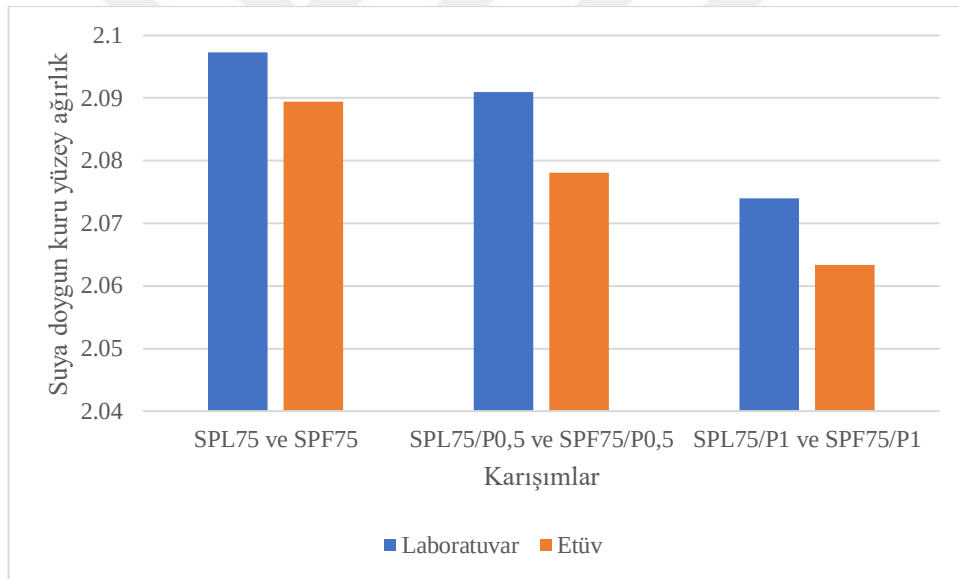
Sertleşmiş harçların suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerleri Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.5-4.6’da verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek suya doymuş kuru yüzey ağırlık değerini 2,118 g/cm³ ile SPL50 gösterirken, en düşük değeri ise 2,063 g/cm³ ile SPF75/P1 göstermektedir.

Lifsiz karışım serileri dikkate alındığında, en yüksek suya doymuş yüzey ağırlık değerini 2,118 g/cm³ ile SPL50 gösterirken, en düşük değeri ise 2,089 g/cm³ ile SPF75 elde etmiştir. Polipropilen lif katkılı karışım serileri dikkate alındığında, en düşük suya doymuş yüzey ağırlık değeri 2,063 g/cm³ ile SPF75/P1 gösterirken, en yüksek değeri ise 2,097 g/cm³ ile SPF50/P0,5 elde etmiştir. Silis dumanının daha yüksek olduğu karışımlar serileri ile öğütülmüş bazik pomzanın yüksek olduğu karışımları ele aldığımızda en yüksek değerlerin 2,097 ile 2,118 arasında değiştiği ve en düşük değerlerin 2,063’ten 2,064’e çıktığı gözlemlenmiştir.

Kockal ve Camurlu (2020), agrega olarak kalkerli kumun kullanıldığı harç numunelerde polipropilen lif oranının artması sonucunda SDKY yığın yoğunluk değerlerinde düşüşün meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu düşüşün sebebini gözenekliliğe neden olabilecek polipropilen liflerin hidrofobik davranışına ve liflerin düşük yoğunluğuna bağlamışlardır. Koksall ve Gencel (2022), silis dumanı miktarının daha fazla olduğu karışım serilerinde ağırlık değerlerinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ranjbar vd. (2016), uçucu kül bazlı jeopolimerin yoğunluğu, karışımın PPL içeriğinin artması ve polipropilenin daha düşük özgül ağırlığı nedeniyle teorik ağırlık kaybının artmasıyla azaldığı sonucuna varmışlardır.



Şekil 4.5. 28 günlük karışımların suya doygun kuru yüzey ağırlık değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)



Şekil 4.6. 28 günlük karışımların suya doygun kuru yüzey ağırlık değerleri (silis dumanı %75, öğütülmüş bazik pomza %25)

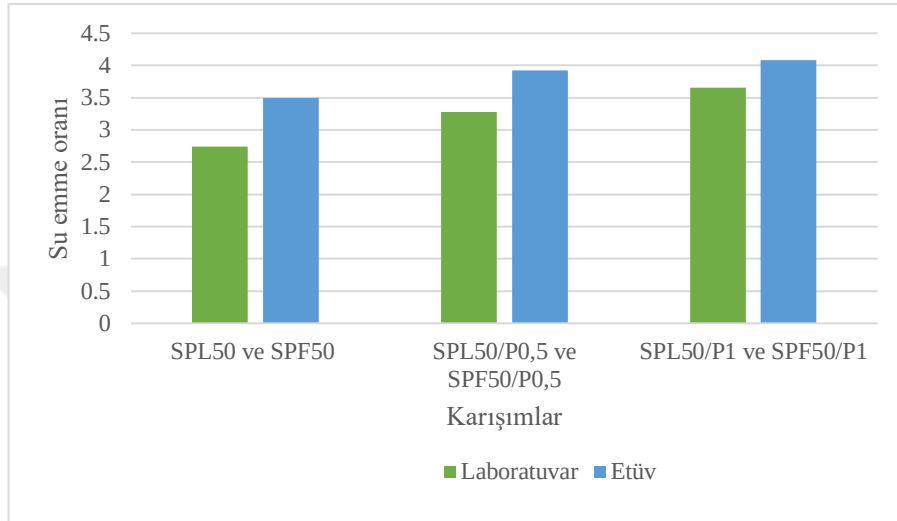
4.2.3. Yüzdece su emme oranları

Sertleşmiş harçların su emme yüzdeleri Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.7-4.8'de verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek su emme oranı %4,976 ile SPF75/P1 gösterirken, en düşük su emme oranını ise %2,745 ile SPL50 göstermektedir.

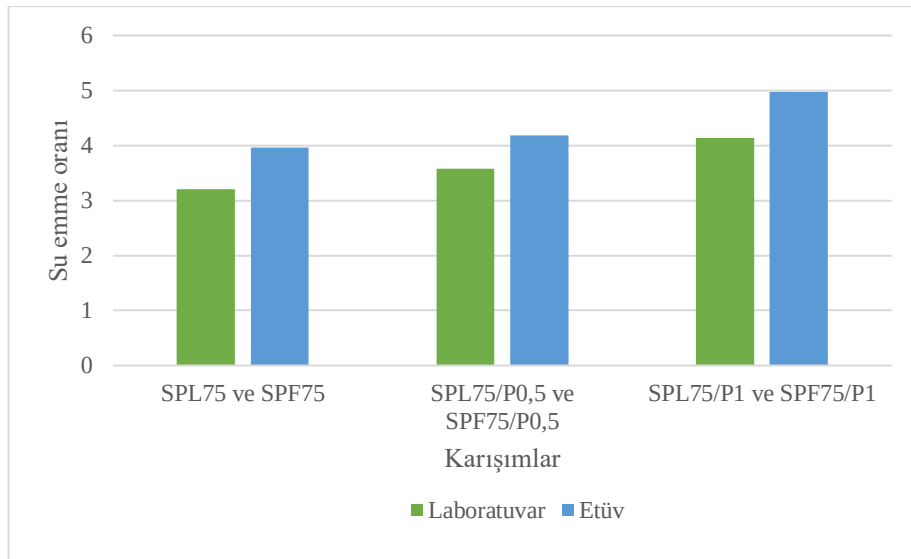
Lifsiz karışım serileri dikkate alındığında, en yüksek su emme oranı %3,963 ile SPF75 gösterirken, en düşük su emme oranı ise %2,745 ile SPL50 elde etmiştir. Polipropilen lif katkılı karışım serileri dikkate alındığında, en yüksek su emme oranı %4,976 ile SPF75/P1 gösterirken, en düşük su emme oranı ise %3,278 ile SPF50/P0,5 elde etmiştir. Silis dumanının daha yüksek olduğu karışımlar serileri ile

öğütülmüş bazik pomzanın yüksek olduğu karışımları ele aldığımızda en yüksek değerlerin 4,079 ile 4,976 arasında değiştiği ve en düşük değerlerin 2,745'ten 3,209'a çıktığı gözlemlenmiştir.

Su emme oranıyla harçların kuru yığın yoğunlukları arasında ters bir ilişki tespit edilmiştir. Kuru yığın yoğunluğu düşük olan harçların su emme değerleri yüksek çıkmıştır. Harçların su emme değerleriyle görünür boşluk oranları arasında ise doğru orantılı bir ilişki vardır.



Şekil 4.7. 28 günlük karışımların su emme oranı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)



Şekil 4.8. 28 günlük karışımların su emme oranı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

Çizelge 4.3. Karışımların yüzde GBO-SEO değerleri

Karışım serisi	Görünür boşluk oranı	Su emme oranı
SPL50	5,602	2,745
SPF50	7,052	3,498
SPL50/P0,5	6,590	3,278
SPF50/P0,5	8,038	3,926
SPL50/P1	7,311	3,653
SPF50/P1	8,983	4,079
SPL75	6,068	3,209
SPF75	8,163	3,963
SPL75/P0,5	7,174	3,574
SPF75/P0,5	9,368	4,180
SPL75/P1	8,266	4,130
SPF75/P1	10,458	4,976

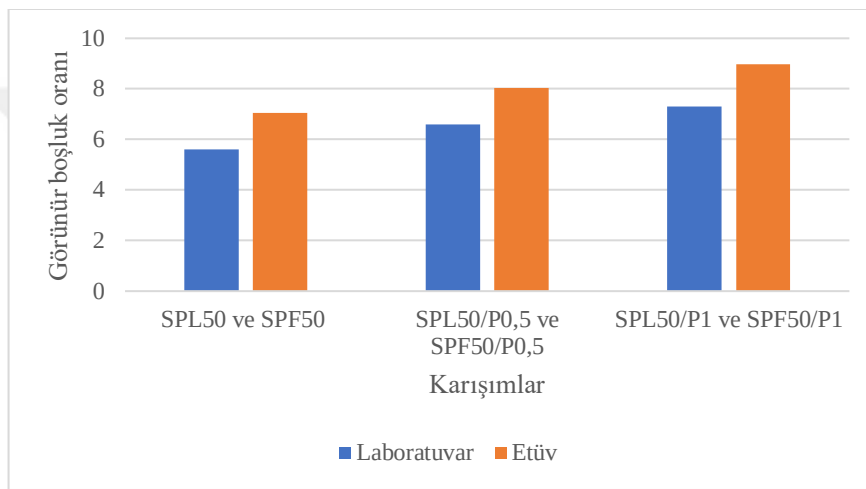
Bu çalışmada elde edilen bulgular ile benzer sonuçlar diğer araştırmacıların çalışmalarında da görülmektedir. Danishyar (2021) yaptığı çalışmada, lif ilaveli geopolimer harç örneklerinde bünyeye ilave edilen polipropilen lif katkılarının görünen porozite değerleri üzerinde değişken sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Lif içeriğinin %0,5 olduğu örneklerde görünen porozite oranları %13,5-27,9 arasında değişkenlik gösterirken, %1 lifli örneklerin porozite değerleri %12,5-27,5 aralığında olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte lif miktarı %1,5 olduğunda elde edilen porozite oranları %12,7-28,3 arasında değiştiği gözlenmiştir. Su emme testi, boşluk içeriğinin artmasıyla, artan geopolimer kompozit geçirgenliğini belirleyen bir diğer önemli testtir (Jindal vd., 2020). Referans örneklerde su emme oranları %7,1 ile %21,9 arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca referans harçlarda, en yüksek su emme oranı %100 ucuğu kül esaslı geopolimer kompozitlerde elde edilmiştir. Akbar vd. (2021) yaptığı çalışma sonuçları, karşılık gelen herhangi bir yaşta su emmenin PPL içeriğindeki artışla birlikte artma eğiliminde olduğunu göstermiştir. PPL dahil edilmesi, geopolimer harcın su emilimini artıran çevrede artan gözenek hacmi ile sonuçlanmıştır. 28 günlük oda sıcaklığında kürlemeden sonra su emmenin, %3 PPL eklendiğinde %1,76'dan %2,01'e yükseldiği bulunmuştur. Aynı sonuçlar Mohseni (2018) çalışmasında da gözlemlenmiştir.

Topçu (2017) yaptığı çalışmaya göre, farklı tipte polipropilen lif içeren harçların ağırlıkça su emme değerleri de belirlenmiştir. Kontrol numunesinin su emme değeri %3,43'tür. En yüksek su emme değeri yaklaşık %4 oranıyla 19 mm uzunluğundaki lifli harçlarda görülürken, en düşük su emme değeri ise yaklaşık %2,7 değeriyle 3 mm

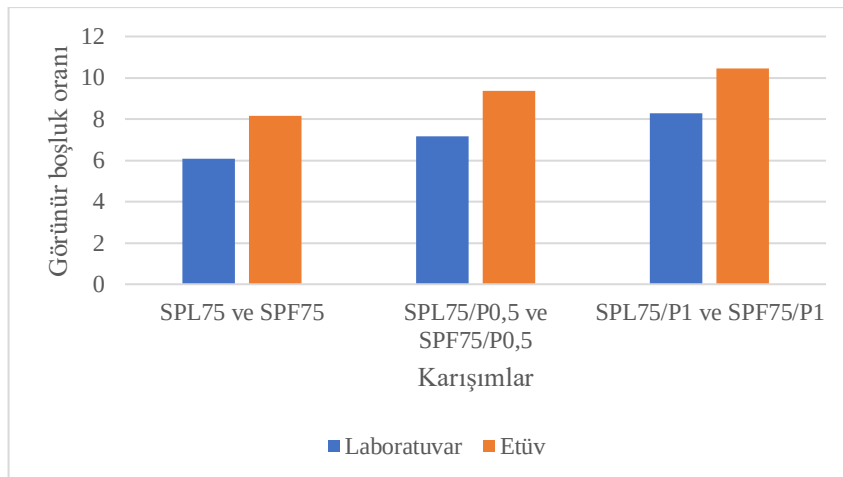
uzunluğundaki lifleri içeren harçlarda elde edilmiştir. Kullanılan lif uzunluğunun artmasıyla harçtaki boşlukların arttığı sonucuna varılmıştır. Lif içeriğinin artmasıyla birlikte 3 mm lif içeren harçların su emmesi dışında serilerde artış gözlenmiştir. Ancak genel olarak incelendiğinde, polipropilen liflerin su emmemesi nedeniyle harçlardaki su emme oranlarındaki artış oldukça düşüktür. Su emme oranlarındaki artışın nedeni, betonda aglomerasyon nedeniyle oluşan boşluklardan kaynaklanmaktadır.

4.2.4. Yüzdece görünür boşluk oranları

Sertleşmiş harçların yüzdece görünür boşluk oranları Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.9-4.10'da verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek görünür boşluk oranı %10,458 ile SPF75/P1 gösterirken, en düşük görünür boşluk oranı ise %5,602 ile SPL50 göstermektedir.



Şekil 4.9. 28 günlük karışımların yüzdece görünür boşluk oranları (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)



Şekil 4.10. 28 günlük karışımların yüzdece görünür boşluk oranları (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

Lifsiz karışım serileri dikkate alındığında, en yüksek görünür boşluk oranı %8,163 ile SPF75gösterirken, en düşük görünür boşluk oranı ise %5,602 ile SPL50 elde etmiştir.

Polipropilen lif katkılı karışım serileri dikkate alındığında, en yüksek görünür boşluk oranı %10,458 ile SPF75/P1 gösterirken, en düşük görünür boşluk oranı ise %5,602 ile SPL50/P0,5 elde etmiştir. Silis dumanının daha yüksek olduğu karışımlar serileri ile öğütülmüş bazik pomzanın yüksek olduğu karışımları ele aldığımızda en yüksek değerlerin 8,983 ile 10,458 arasında değiştiği ve en düşük değerlerin 5,602'den 6,068'e çıktığı gözlemlenmiştir. Yüzdece su emme oranı değerleri ile yüzdece görünür boşluk değerlerinin doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Lif içeriğinin görünür boşluk oranı üzerindeki etkisi incelendiğinde, lif yüzdesinin artması, karışımlarda boşluk oranının artmasına neden olduğu görülmüştür. Liflerin harç matrisi içinde homojen bir dağılım göstermemesi boşluk oranının artmasına yol açmıştır, dolayısıyla gözenekli bir yapının oluşmasına ve harçların boşluk oranlarının artmasına neden olmuştur. Liflerin yüksek oranlarda eklenmesi, liflerin topaklanmasına ve betonun içerisinde boşluk oluşturmaya neden olarak boşluk oranını arttırmıştır.

Sonuçlara bakıldığında etüvde kürlen numunelerde, oda sıcaklığında kürlen numunelere göre su emme değerindeki artış görülmektedir. Bu harç matrisi içindeki su parçacıklarının buharlaşmasının neden olduğu yüksek boşluk oranına atfedilebilmektedir. Balyore vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada sonuçlar benzer şekilde çıkmıştır. Yüksek sıcaklıkta kürlen numunelerin su emme ve görünür gözenekliliğinin, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre daha yüksek olduğunu rapor etmiştir. Bu sebebi ise, geopolimerden suyun kaybolması, daha sonra harçlarda boşlukların oluşmasıdır. Elimbi vd. (2016) tarafından yapılmış araştırmada da aynı tespitler görülmektedir. Çalışmada volkanik pomza bazlı geopolimer harçların su emme değerleri bulunmuş olup yüksek sıcaklıkta (80 °C) kürlen numunelerin daha az sıcaklıkta tabii tutulan numunelere göre daha fazla değerler gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Karahan ve Atış (2011) yaptıkları çalışmada, polipropilen liflerin betonun boşluk değerlerini arttırdığını bildirmişlerdir. Kontrol karışımla kıyaslandığında, %0,05, %0,1 ve %0,2 lif içeriğine sahip karışımların boşluk değerlerinde sırasıyla %6, %18 ve %28 artış meydana gelmiştir. Benzer bir şekilde aynı lif içeriğine sahip %15 oranında uçucu kül içeren karışımın boşluğu yaklaşık olarak %11, %14 ve %18 oranında arttırdığı rapor edilmiştir. Bhutta (2019) yaptığı çalışmada PPL artması ile gözenekliliğin de arttığını tespit etmiştir. Lif tipi ile gözenekliliğin artması, PPL ve karbon lifler gibi liflerin su emmesi gerçeğiyle de açıklanmaktadır. Ancak yüksek gözenekliliğe neden olabilecek PPL tarafından karışımlarda ihmal edilebilir su emmesi olabilmektedir. Liflerin, karıştırma sırasında bir araya toplanma eğiliminde olması ve daha sonra boşluklara dönüşen suyla dolu gözenekleri tutması mümkündür. PPL eklenmesi ayrıca işlenebilirliği azaltmış ve gözenekliliği arttırmıştır, bu da harcın sıkıştırılmasını potansiyel olarak etkilemiştir ve bükülmede düşük bir tepe yükü ile sonuçlanmıştır.

4.3. Sertleşmiş Harçlarda Mekanik Hal Deney Bulguları

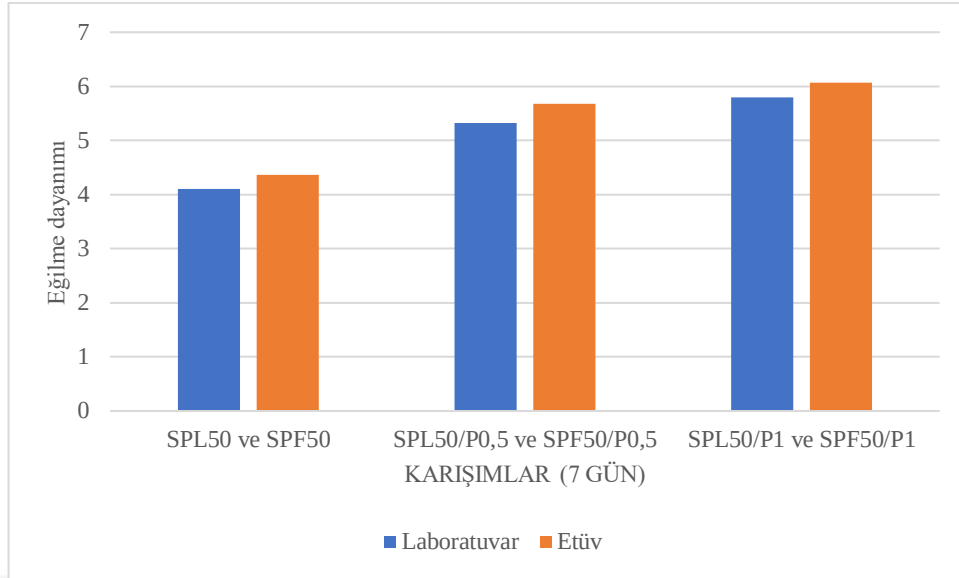
4.3.1. Eğilme dayanımı deney bulguları

Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.11-4.14'te verilen eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında polipropilen lif katlı karışımların daha iyi sonuçlar gösterdiği kanıtına varılmıştır. Ayrıca silis dumanının fazla oranda kullanıldığı numunelerin silis dumanının az miktarda kullanıldığı numunelere göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Kürleme şartlarının da oldukça etkili olduğu görülmektedir. En iyi 6,193 MPa (7 gün) 8,932 MPa (28 gün) ile sonuç gösteren numune SPF75/P1'dir. Etüv sıcaklığına tabii tutulmuş numunelerin dayanımlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kürleme zamanının numunelerin dayanımına etkisi olmuştur.

Çizelge 4.4. Karışımların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları

Karışım serisi	7 günlük eğilme dayanımı sonuçları (MPa)	28 günlük eğilme dayanımı sonuçları (MPa)
SPL50	4,099	6,009
SPF50	4,362	6,804
SPL50/P0,5	5,323	7,059
SPF50/P0,5	5,675	8,144
SPL50/P1	5,790	7,743
SPF50/P1	6,066	8,859
SPL75	3,032	6,248
SPF75	4,908	8,100
SPL75/P0,5	3,231	7,258
SPF75/P0,5	5,616	8,548
SPL75/P1	3,491	7,812
SPF75/P1	6,193	8,932

Oda sıcaklığında kürlenmiş silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katlı numunelerde sırasıyla 4,099; 5,323 ve 5,790 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 7 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %29,86; %41,25 artırmıştır.



Şekil 4.11. Karışımların 7 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)

Sonuçlara bakıldığında, eklenen lifler dayanımın artmasına olanak sağlamıştır. Bu bulgu, birçok araştırmanın bulgusu ile uyumludur. Kurt (2006) yaptığı çalışmada lifli betonların en önemli özelliğinin yüksek eğilme dayanımına sahip olduğunun ve betona lif katıldığı zaman eğilme dayanımını artırdığını, bunları liflerin mekanik özelliklerini, lifin narinliği ve lifin oranı önemli derecede etkilediğini belirtmiştir. Caf (2012) yaptığı çalışmada polipropilen lifin eğilme dayanımında fazla bir etkisinin olmadığı ve düzenli bir artma veya azalma eğiliminde olmadığını, genellikle lif yönelimine bağlı olarak farklı sonuçlar elde etmiştir.

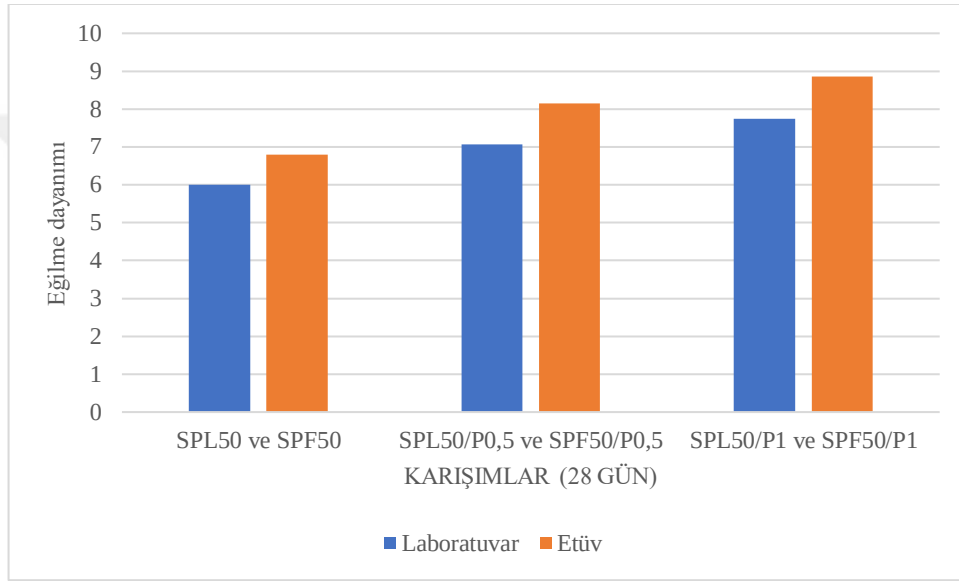
Kockal ve Camurlu (2020) tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sözü edilen çalışmada %1 polipropilen liflerin eklenmesiyle harçların eğilmede çekme dayanımında artış gözlemlenirken, lif içeriğinin %2'ye çıkarılmasıyla dayanımda düşüş gözlemlenmiştir. SEM görüntülerine dayanarak yapılan gözlemlerde, polipropilen liflerin çimento matrisinden çıktığı görülmüştür. Bu davranış harçların eğilme dayanımdaki artıştan sorumlu olan mekanizmaya bağlanabilir. Dayanımdaki düşüşün nedeni ise %1'den fazla lifin kullanımıyla oluşan gözeneklere bağlanılmıştır. Numune yaşının artmasıyla dayanımın da belirgin bir şekilde arttığı tüm karışımlarda görülmüştür.

Etüvde kürlen (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 4,362; 5,675 ve 6,066 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etüvde bekletilen 7 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %21,81; %25,3 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etüvde kürlen numunelerin eğilme dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %6,41; %6,61; %4,76 olarak artış göstermiştir.

Patankar vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, etüv kürü sıcaklığı, 24 saatlik bir ısıtma periyodu için her biri 40, 60, 90 ve 120°C'de tutulmuş ve belirtilen ısıtma derecesinden sonra test süresi olarak 7 günlük yaşta basınç dayanımı test edilmiştir. Test

sonuçları, tüm çözelti-uçucu kül oranları eğilme ve basınç dayanımının arttığını göstermektedir. Geopolimer betonun dayanımının, ısıtma süresinin kısaltılmasıyla sıcaklığın artırılmasıyla artırılabilceği anlamına gelmektedir. Sonuçlara göre, 120°C ısıtma sıcaklığında beton yüzeyinde çatlaklar oluşmuştur, bu nedenle geopolimer beton yapmak için uygun sıcaklık 60 ile 90°C arasındadır.

Oda sıcaklığında kürlenmiş silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 6,009; 7,059 ve 7,743 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 28 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %17,47; %28,85 artırmıştır.



Şekil 4.12. Karışımların 28 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)

Al-mashhadani vd. (2018) tarafından üç farklı lif türü ile takviye edilmiş uçucu kül esaslı geopolimer harçların bazı mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, eğilme dayanımı ile ilgili önemli bir büyüme oranı elde edilmiştir; polipropilen, çelik ve polivinil alkol liflerinin 28 günlük eğilme dayanımı, kontrol lifli olmayan geopolimer numunesine kıyasla sırasıyla %14,6, %31,45 ve %39,84 daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, lif ilavesi üretilen kompozitlerin basınç dayanımı performansını biraz iyileştirmiş, çelik ve polivinil alkol fiberli 28 günlük basınç dayanımı kompozitleri sırasıyla %3,37 ve %4,26'lık bir artış sağlamıştır.

Yoosuk (2021) yaptığı çalışmada, polipropilen lif takviyeli hücrel hafif yüksek kalsiyumlu uçucu kül geopolimer harcı geliştirmek için bir başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. Uçucu külün ağırlıkça %0, %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5 ve %3'lük polipropilen lif içerikleri, 2, 4, 6 ve 8 molar konsantrasyonlarda NaOH ve köpük içeriği olarak toplam ağırlığın %0, %1 ve %2'si test edilmiştir. Polipropilen lif takviyeli hücrel hafif yüksek kalsiyumlu uçucu kül geopolimer harç numunelerinin maksimum eğilme dayanımı, tüm NaOH konsantrasyonları ve köpük içerikleri için %2,5 lif içeriğinde

gözlenmiştir. Polipropilen lif içeriği %0'dan %2,5'e yükseldiğinde eğilme dayanımı artmıştır. Optimum içeriğin ötesinde, karıştırma zorluğu nedeniyle eğilme dayanımı azalmış ve bu da yüksek gözeneklilik ile sonuçlanmıştır. %2,5 polipropilen lif ve köpüksüz 8M NaOH içeren karışımda maksimum eğilme dayanımı 3,85 MPa ve birim ağırlığı 1279 kg/m³ bulunmuştur.

Etüvde kürlenene (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 6,804; 8,144 ve 8,859 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etüvde bekletilen 28 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %19,69; %30,2 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etüvde kürlenene numunelerin eğilme dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %13,23; %15,37; %14,41 olarak artış göstermiştir. Kürlenme süresi de incelendiğinde 28 günlük numunelerin 7 günlük numunelere göre eğilme dayanımında şu şekilde artış gösterdiği görülmektedir: %46,6; %32,61; %33,73 (oda sıcaklığı); %55,98; %43,51; %46,04 (etüv).

Benzer sonuçlar, Yaltay vd. (2022) yaptığı çalışmada gözlemlenmiştir. Farklı pomza ve uçucu kül yüzdeleri, birkaç alkali aktive edici çözelti-bağlayıcı (A/B) oranı ve 60 °C'de fırında üç kürlenme süresi dahil olmak üzere pomza/uçucu kül geopolimer hamurunun 2, 4 ve 6 gün boyunca mekanik ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, 6,14 ila 9,40 MPa optimum eğilme dayanımları ve 31,02 ila 69,90 MPa optimum basınç dayanımları ile iyi geopolimerik bağlayıcılar oluşturmak için uçucu küllü pomza tozunun kullanılabileceğini doğrulamışlardır. En yüksek dayanımlar 6 günlük kür süresi boyunca elde edilmiştir. Adak vd. (2014) yaptığı çalışmada, çeşitli oranlarda uçucu kül ve nanosilika ilaveli geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarının (ısı kürlü) ortam sıcaklığında kürlenene numunelere göre, ayrıca geleneksel beton sonuçlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

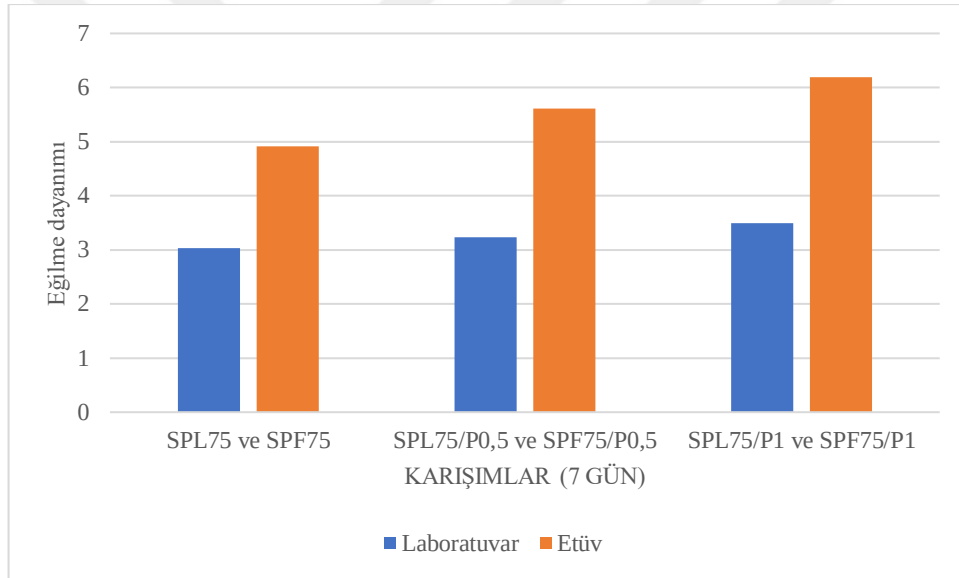
Oda sıcaklığında kürlenene silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 3,032; 3,231 ve 3,491 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 7 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %6,56; %15,14 artırmıştır.

Topçu (2017) yaptığı çalışmada, dört farklı görünüm oranındaki polimer esaslı polipropilen lifin harç özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Öncelikle lif katkısız kontrol numunesi üretilmiştir. Lifler harç içine hacimce %0,6, %0,8, %0,9, %1,1 oranlarında katılmıştır. Harç içerisine ilave edilen liflerin eğilme dayanımları üzerindeki etkileri incelendiğinde, lif miktarının artmasıyla eğilme dayanımının da belirgin bir biçimde arttığı görülmektedir. Lifsiz harcın eğilme dayanımı 5,24 MPa civarında iken, lifli harçların eğilme dayanımı değerleri 5,94-6,91 MPa arasında ölçülmüştür. Polipropilen liflerin %1,1 oranında ilave edilmesiyle harçların eğilme dayanımlarında yaklaşık %13,3-31,9 oranında artış sağlanabilmektedir. Betona ilave edilen lif miktarıyla doğrudan ilişkilili olan eğilme dayanımının, lif tipiyle de doğrudan ilişkili olduğu belirtilebilir. Boyu 6 mm olan liflerin harç içerisinde daha homojen dağılarak eğilme testi sırasında harcın alt bölgelerinde çekme gerilmelerinden dolayı oluşan mikro çatlakları

durdurmada daha etkili olduğu ve buna bağlı olarak da lif miktarının da arttırılmasıyla birlikte eğilme dayanımının da arttığı görülmüştür.

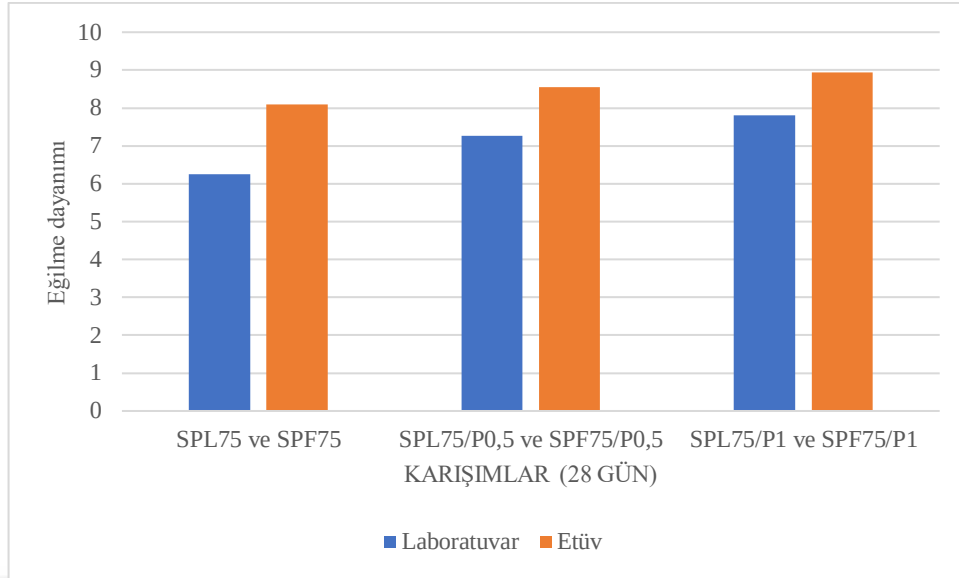
Etüvde kürlenene (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 4,908; 5,616 ve 6,193 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etüvde bekletilen 7 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %14,43; %26,18 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etüvde kürlenene numunelerin eğilme dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %61,87; %73,82; %77,4 olarak artış göstermiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular ile benzer sonuçlar İlkentapar vd. (2017) çalışmasında görülmektedir. Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harcının ısıyla kürlenme süresi uzarken basınç ve eğilme dayanımı genel olarak önemli ölçüde artmıştır. 28 günlük numunelerin sonuçları 7 günlük numunelerle kıyaslandığında %65 oranında artış göstermiştir. Ancak ısı kürlenme süresine bağlı olarak dayanım kazanım oranındaki artış yavaşlamıştır.



Şekil 4.13. Karışımların 7 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

Oda sıcaklığında kürlenene silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 6,248; 7,258 ve 7,812 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 7 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %16,16; %25,03 artırmıştır.



Şekil 4.14. Karışımların 28 günlük eğilme dayanımı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazık pomza %75)

Bellum (2022) yaptığı çalışmada, %0,5-2,5 oranlarında polipropilen ve çelik lif takviyeli geopolimer harcın mekanik ve mikroyapısal özelliklerini tahmin etmek için deneysel araştırmalar yapılmıştır. Geopolimer kompozitleri üretmek için bağlayıcı olarak endüstriyel yan ürün olarak bilinen uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Lif içeriği oranındaki artışla birlikte, polipropilen ve çelik lif esaslı geopolimer kompozitin eğilme dayanımı (28 gün), lifsiz geopolimer karışımına göre sırasıyla %26,36 ve %57,79 oranında önemli ölçüde artmıştır. Öte yandan, liflerin dahil edilmesi, geopolimer kompozitlerin 28 günlük basınç dayanımında %13.26'lık bir artış sağlamıştır.

Bhutta ve Farooq (2019) yaptığı çalışmada, mikro lif tipi ve lif hacim fraksiyonunun uçucu kül esaslı geopolimer harçların fiziksel özellikler ve eğilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca farklı ısıtma sürelerinin mikro fiber takviyeli geopolimer harçların özelliklerine etkisi de incelenmiştir. Genel olarak, tüm lif türleri ve lif içeriği için, daha yüksek kütleme sıcaklığı, daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı ile sonuçlanmıştır, ancak ısıyla kütleme periyodunda 4 saatten fazla bir artış, basınç dayanımını önemli ölçüde artırmamıştır.

Mohseni (2018), %0,3, 0,5 ve %1 oranlarında polipropilen lif içeren metakaolin bazlı geopolimer betonun eğilme ve basınç dayanımı, su emme, Si/Al oranı gibi özellikleri araştırmıştır. Görüldüğü gibi polipropilen lifler, geopolimerlerin eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Polipropilen liflerden monomer oranları %2, 2,5 ve 3 ve %0,3 olan numunelerin eğilme dayanımı sırasıyla 7,03, 7,51 ve 7,69 MPa'dır. %1 polipropilen lifli numunelerde bu sayı 9,02, 9,36 ve 9,87'ye ulaşırken, bu durum eğilme dayanımında %28, 25 ve %28'lik bir artışa işaret etmektedir. Sonuçlar, polipropilen lif kullanılarak eğilme dayanımının %28 arttığını göstermiştir. Ayrıca sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 3 olarak kabul edildiği ve polipropilen %1 olarak kullanıldığı takdirde yapısal, çevresel ve ekonomik açıdan en ideal karışımın elde edildiğini göstermiştir.

Etüvde kürlenene (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 8,100; 8,548 ve 8,932 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etüvde bekletilen 28 günlük numunelerin eğilme dayanımını sırasıyla %5,53; %10,27 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etüvde kürlenene numunelerin eğilme dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %29,64; %17,77; %14,34 olarak artış göstermiştir. Kütleme süresi de incelendiğinde 28 günlük numunelerin 7 günlük numunelere göre eğilme dayanımında şu şekilde artış gösterdiği görülmektedir: %106,07; %124,63; %123,7 (oda sıcaklığı); %65,04; %52,21; %44,23 (etüv).

Yan Zhang vd. (2016) yaptığı çalışmaya göre, metakaolin bazlı geopolimer harcın eğilme ve basınç dayanımı 100°C'de artış, 300-700°C aralığında ise azalma göstermiştir. Geopolimer harcı, eğilme dayanımında daha yüksek sıcaklığa bağlı bozunma göstermiş, ancak basınç dayanımında geleneksel Portland çimento harcı ve polimer modifiye tamir harcından daha düşük bozunma göstermiştir. Geopolimer harcın bağlanma gücü, ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra polimer modifiye tamir harcıninkine yakın veya ondan daha yüksektir. Pan vd. (2009) tarafından yapılan araştırmada, uçucu kül esaslı geopolimer harçlar 80°C sıcaklığa maruz bırakıldığında, dayanımın bazen azaldığı, diğer zamanlarda 16 MPa'ya kadar arttığı tespit edilmiştir.

Hardjito, 60 °C'de daha uzun kütleme süresinin van Deventer'in iddia ettiği gibi daha zayıf malzeme üretmediğini tartışmıştır, ancak 24 saatten sonraki kürlenme süreleri için dayanım artışı bu çalışmada önemli değildir. Bu mekanizma henüz net değil ve bu konuda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

4.3.2. Basınç dayanımı deney bulguları

Çizelge 4.5'te ve Şekil 4.15-4.18'de verilen basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında polipropilen lif katlı karışımların daha iyi sonuçlar gösterdiği kanıtına varılmıştır. Ayrıca silis dumanının fazla oranda kullanıldığı numunelerin silis dumanının az miktarda kullanıldığı numunelere göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Kütleme şartlarının da oldukça etkili olduğu görülmektedir. En iyi 7,793 MPa (7 gün) 11,679 MPa (28 gün) ile sonuç gösteren numune SPF75/P1'dir. Etüv sıcaklığına tabii tutulmuş numunelerin dayanımlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kütleme zamanının numunelerin dayanımına etkisi olmuştur.

Oda sıcaklığında kürlenene silis dumanı %50, öğütölmüş bazik pomza %50 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 6,171; 7,676 ve 8,596 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 7 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %24,39; %39,3 artırmıştır.

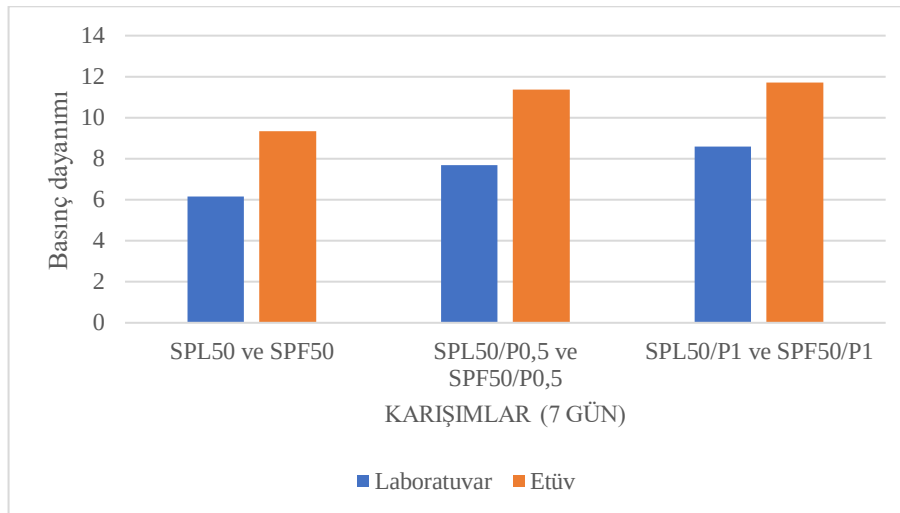
Sonuçlara bakıldığında, eklenen lifler dayanımın artmasına olanak sağlamıştır. Bu bulgu, birçok araştırmanın bulgusu ile uyumludur. Bhanja ve Sengupta (2003), silis dumanını %0-%30 arasında değişen oranlarda çimentoyla yer değiştirerek kullanmışlardır. Sonuçlar, silis dumanının artmasıyla basınç dayanımının da arttığı ve uygun değer silis dumanı değiştirme yüzdesinin tüm su bağlayıcı oranlarında sabit olmadığını, ancak karışımın su içeriğine bağlı olduğunu göstermiştir. Jalal vd. (2015)

tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar bulunmuştur. Silis dumanı içeriğinin artırılması, özellikle daha ileri yaşlarda basınç dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır. Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, % 10 silis dumanı ile değiştirme, 400 ve 500'lük bağlayıcı içeriği için basınç dayanımını sırasıyla 7 ve 28 günlerde %34, %9 ve % 9, % 9, %21 oranında artırmıştır.

Etüvde kürlen (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 9,341; 11,378 ve 11,706 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etüvde bekletilen 7 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %21,81; %25,32 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etüvde kürlen numunelerin basınç dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %51,37; %48,23; %36,18 olarak artış göstermiştir.

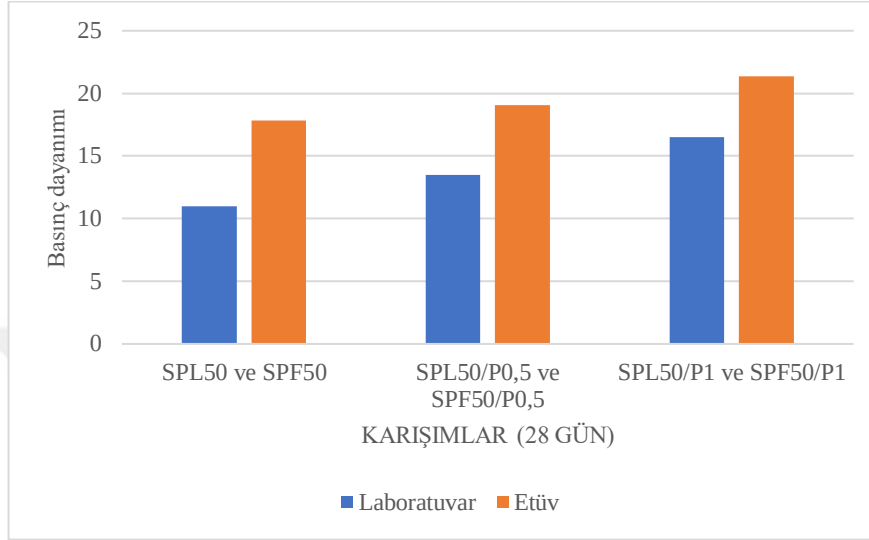
Atiş vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, %4 ila %20 arasında değişen Na içeriği ile yapılan ve 45 ila 115°C arasında değişen 24, 48 ve 72 saat süreyle kürlen uçu küllü geopolimer harcının basınç dayanımları test edilmiştir. Geopolimer harç karışımı ısı kürlenme işlemine tabi tutulduğunda, ısı kürlenme sıcaklığı optimal bir noktaya kadar (24 saat) yükseldikçe basınç dayanımı artmıştır. En yüksek basınç dayanımı, 115°C ısı kürlenmede ve 24 saat süreyle %14 Na içerikli geopolimer harçtan 120 MPa olarak elde edilmiştir. Karışım için ısıyla kürlenme süresi uzadıkça kısa bir kürlenme süresine kıyasla basınç dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır.

Al-Majidi vd. (2016) yaptığı araştırmada, karışımdaki yüksek fırın cürufu içeriği arttıkça, erken kürlenme yaşlarında bile basınç dayanımı iyileşmiştir. Üç günlük ortalama basınç dayanımları sırasıyla 2,9 MPa, 10,4 MPa, 13,7 MPa, 18,6 MPa ve 25,9 MPa olarak çıkmıştır. 28 günlük sonuçlar, 3 günlük karışımların basınç dayanımına kıyasla sırasıyla 65, 133, 140 ve %162 daha yüksek dayanım göstermiştir. Sertleştirilmiş geopolimer oda sıcaklığında kürlen numunelerin 28 günlük basınç dayanımı (3 MPa), ısı işlem altında kürlen numunelerin dayanımından (6 MPa) %100 düşüktür.



Şekil 4.15. Karışımların 7 günlük basınç dayanımı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)

Oda sıcaklığında kürlenene silis dumanı %50, öğütölmüş bazık pomza %50 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 11,004; 13,489 ve 16,516 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 28 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %22,58; %50,09 artırmıştır.



Şekil 4.16. Karışımların 28 günlük basınç dayanımı değeri (silis dumanı %50, öğütölmüş bazık pomza %50)

Sonuçlara bakıldığında, eklenen lifler harçların basınç dayanımını etilemiştir. Topçu (2017) yaptığı çalışmada, harç içerisine ilave edilen liflerin basınç dayanımı değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde, lif miktarının basınç dayanımına hem olumlu hem de olumsuz yönde etkisi olmuştur. Bunun sebebi, harca ilave edilen liflerin harcın işlenebilmesini azalttığından veya harç içerisindeki dağılımının ve yöneliminin etkisi sonucu oluşmuş olabileceği belirtilebilir. Yapılan çalışmalarda da lif içeriğinin betonun basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ve hatta ± 25 oranında olumlu veya olumsuz yönde etkileyebileceği belirtilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; kontrol numunesi basınç dayanımı değeri 55,72 MPa iken, polipropilen lifli karışımların basınç dayanımı değeri 46,31 MPa ile 53,87 MPa arasında değişerek %3,3-17 oranında azaldığı görölmüştür. Buna göre; basınç dayanımı değeri lif katkısı ile birlikte tüm karışımlarda düştüğü görölmüştür.

Etövde kürlenene (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 17,837; 19,039 ve 21,381 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etövde bekletilen 28 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %6,74; %19,87 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etövde kürlenene numunelerin basınç dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %62,1; %41,14; %29,46 olarak artış göstermiştir. Kütleme süresi de incelendiğinde 28 günlük numunelerin 7 günlük numunelere göre basınç dayanımında şu şekilde artış gösterdiği görölmektedir: %78,32; %75,73; %92,14 (oda sıcaklığı); %90,9; %67,33; %82,65 (etöv).

Budh vd. (2014) yaptığı çalışmada, alkali çözeltinin uçucu küle oranı 0,5 olarak alınmış ve kürleme sıcaklığı sıcak hava fırınında 48 saat 85°C'de tutulmuştur. Her numunenin basınç dayanımı tahribatsız test sonuçları ile elde edilmiş ve doğrulanmıştır. Molarite ve uçucu kül oranı arttıkça küplerin basınç dayanımının arttığı bulunmuştur.

Çizelge 4.5. Karışımların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

Karışım serisi	7 günlük basınç dayanımı sonuçları (MPa)	28 günlük basınç dayanımı sonuçları (MPa)
SPL50	6,171	11,004
SPF50	9,341	17,837
SPL50/P0,5	7,676	13,489
SPF50/P0,5	11,378	19,039
SPL50/P1	8,596	16,516
SPF50/P1	11,706	21,381
SPL75	4,076	8,362
SPF75	7,034	10,383
SPL75/P0,5	4,219	9,682
SPF75/P0,5	7,492	10,848
SPL75/P1	5,084	10,072
SPF75/P1	7,793	11,679

Oda sıcaklığında kürlenmiş silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 4,076; 4,219 ve 5,084 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 7 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %3,51; %24,73 artırmıştır.

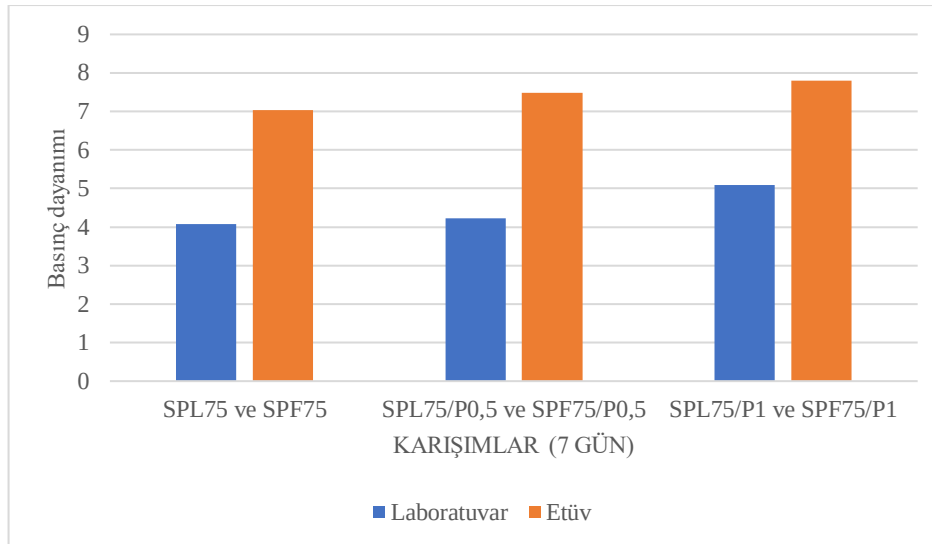
Uysal vd. (2018) yaptığı çalışmada, metakaolin kısmen yüksek fırın cürufu ve silis dumanı malzemeleri ile değiştirilmiş ve bu malzemelerin ilave edilmesinin ortaya çıkan geopolimer kompozitlerin davranışı üzerindeki etkisi fiziksel özellikler açısından araştırılmıştır. Daha sonra SEM ve XRD analizleri ile birlikte eğilme ve basınç dayanımı testleri açısından lifsiz numuneler ile polipropilen lif takviyeli numuneler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Genel olarak sonuçlar, ikame malzemelerin faydalı olduğu gerçeğini ortaya koymuştur. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, kolemanit ve silis dumanı numuneleri eğilme dayanımında %14,61 ve %29,44, basınç dayanımında %2,02 ve %11,48 oranında iyileşme sağlamıştır. Polipropilen liflerin eklenmesi genel olarak numunelerin eğilme dayanımını ve aşınma direncini iyileştirmeye yardımcı

olmuştur. Mikroyapısal analiz, elde edilen matrisin iyi derecede geopolimerizasyonunu göstermiştir.

Baykara (2020), fiber-matris arayüzünün incelenmesi, polipropilen liflerle güçlendirilmiş geopolimer bazlı malzemelerin mekanik performansını belirlemek için çok önemli bir konuyu bilim dünyasına sunmuştur. Polipropilen lifler, geopolimer bazlı harç matrisine ağırlıkça %0, 0,5 ve %1 gibi farklı oranlarda dahil edilmiştir. Harçlar 60°C'de 24 saat kürlenmiş ve ardından oda sıcaklığında altı gün daha bekletilmiştir. Sonuçlara göre, polipropilen lif, yedi gün boyunca kürlenmiş numunelerin basınç dayanımını iyileştirmiştir.

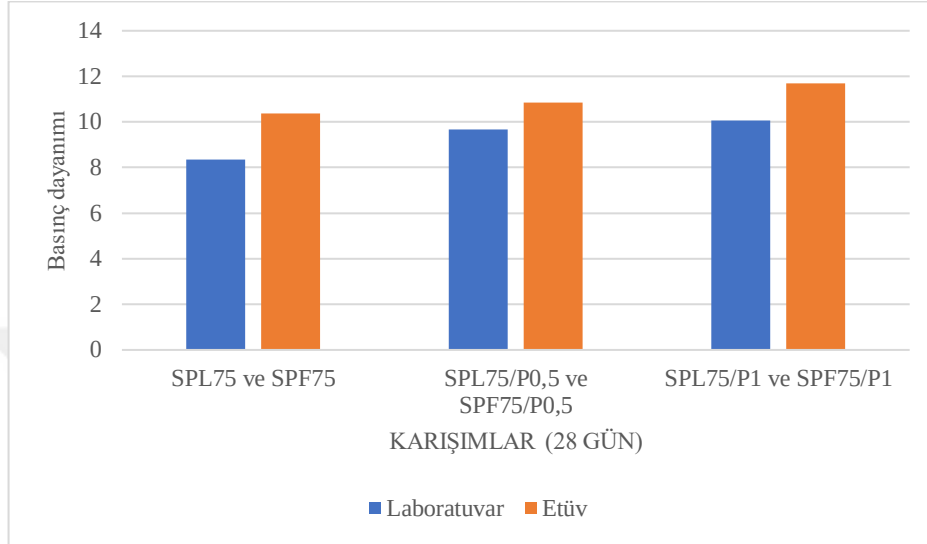
Etüvde kürlen (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 7 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 4,908; 5,616 ve 7,793 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etüvde bekletilen 7 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %14,42; %57,78 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etüvde kürlen numunelerin basınç dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %20,41; %33,11; %53,28 olarak artış göstermiştir.

Wongsa vd. (2018) yaptığı çalışmada, her karışımın 7 ve 28 günlük basınç dayanımı tespit edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, kürlenme yaşının artmasıyla kırıntı kauçuk içeren uçucu kül bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı artmıştır. Kırıntı kauçuk geopolimer harcının 28 günlük basınç dayanımı 7 günlük harçlardan sırasıyla %74 ve %93 daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, kırıntı kauçuk geopolimer harcının (2.07e3.29 MPa) 28 günlük basınç dayanımı, hafif orta dayanımlı betonun (2.0e14.0 MPa) dayanım gereksinimini karşılamakta ve tuğla/blok üretimi için uygun görülmektedir.



Şekil 4.17. Karışımların 7 günlük basınç dayanımı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

Oda sıcaklığında kürlenene silis dumanı %25, öğütölmüş bazık pomza %75 oranlarındaki karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 8,362; 9,682 ve 10,072 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi laboratuvar ortamında bekletilen 28 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %15,79; %20,45 artırmıştır.



Şekil 4.18. Karışımaların 28 günlük basınç dayanımı değeri (silis dumanı %25, öğütölmüş bazık pomza %75)

Aydın ve Baradan (2013) tarafından yapılan çalışmada, cüruf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların basınç dayanımı lif hacmi ve uzunluğu ile önemli derecede artmıştır. Hacimsel olarak %0,5 lif oranında basınç dayanımındaki artış %30, %2 lif içeriğinde ise %48'dir. Basınç dayanımının lif takviyesi ile artmasının, liflerin nispeten küçük boyutlarına bağlanabileceğini ve bu durumun liflere mikroçatlak oluşumunu geciktirme ve sonradan belirli bir seviyeye kadar olan yayılımlarını durdurma ve önleme yeteneğini belirttiştir.

Rashiddadash ve Ramezaniapour (2014) yaptığı çalışmanın sonuçlarına göre, pomza içeriğindeki artış nedeniyle basınç dayanımında belirgin bir azalma vardır. Özellikle bims ile birleştirilen betonların erken ve uzun dönem basınç dayanımının ağırlıklı olarak bims ikame seviyesine bağlı olarak düz betonlara göre daha düşük olduğu görölmüştür. Bununla birlikte, metakaolin ilavesi sadece erken yaşta dayanımı arttırmakla kalmamış, aynı zamanda ileri yaşlarda daha yüksek dayanım sağlamıştır. Bu nedenle %15 metakaolin yerine çimento ikamesi basınç dayanımında maksimum artışa neden olmuştur.

Etövde kürlenene (60 °C) karışım serileri dikkate alındığında, 28 günlük basınç dayanımı sonuçları %0, %0,5 ve %1 oranlarında PPL katkılı numunelerde sırasıyla 10,383; 10,848 ve 11,679 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol numunelerle kıyaslandığında, liflerin eklenmesi etövde bekletilen 28 günlük numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %4,48; %12,48 artırmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde, etövde kürlenene numunelerin basınç dayanımı, oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre sırasıyla %24,17; %12,04; %15,95 olarak artış göstermiştir.

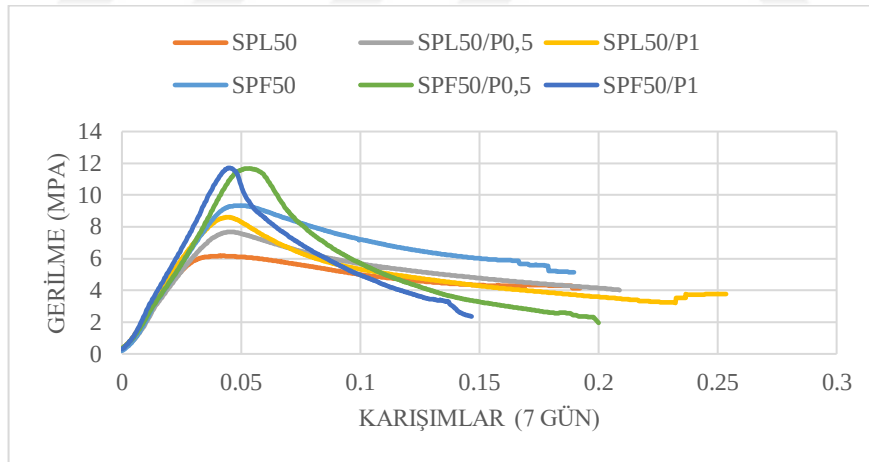
Kürleme süresi de incelendiğinde 28 günlük numunelerin 7 günlük numunelere göre basınç dayanımında şu şekilde artış gösterdiği görülmektedir: %105,1; %129,48; %98,11 (oda sıcaklığı); %111,5; %93,16; %49,86 (etüv).

Djobo vd. (2016) yaptığı çalışmada, 27 °C ve 80 °C'de kürlenlen volkanik kül esaslı geopolimer harçların mekanik özellikleri ve dayanıklılıkları değerlendirilmiştir. 27 °C'de kürlenlen geopolimer numuneler için 28 günde 20,5 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir ve zamanla önemli ölçüde değişmemiştir. 80 °C'de kürlenlen numunelerde 90 günde zamanla artarak 37,9 MPa'ya ulaşmış ve hemen hemen sabit hale gelmiştir. Volkanik kül bazlı geopolimer harçlar, 25 döngüden sonra görsel bozulma olmaksızın ıslanma ve kuruma döngüleri altında iyi performans göstermiş ve 27 °C ve 80 °C'de kürlenlen numuneler için sırasıyla %14 ve %24 basınç dayanımı artışı sağlamıştır.

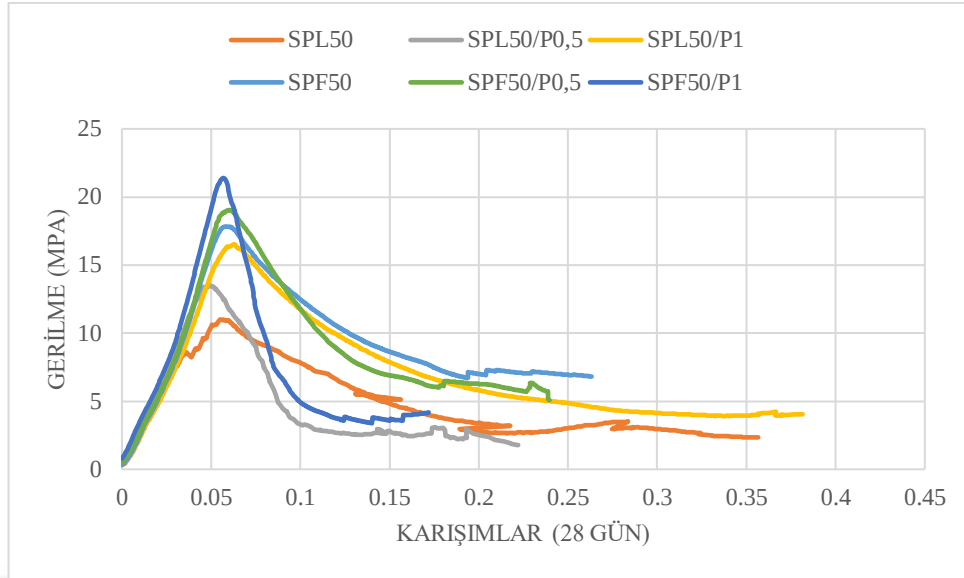
Lunga ve Atis (2018) tarafından yapılan araştırma sonuçlarına göre, maksimum dayanım değerleri, maksimum sıcaklık (100°C), NaOH oranı ve minimum su içeriğinde elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta kürlenlen uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı sonuçları, oda sıcaklığında kürlenlen numunelerin sonuçlarına göre ortalama %70 daha fazla çıkmıştır.

4.3.3. Gerilme-şekil değiştirme

Sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve basınç deneylerden 7 ve 28. günde alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak karışımların gerilme-şekil değiştirme davranışları hem basınç hem de eğilme yükleri altında incelenmiştir. Basınç yükleri altındaki 7 ve 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.19-4.22'de gösterilmiştir.



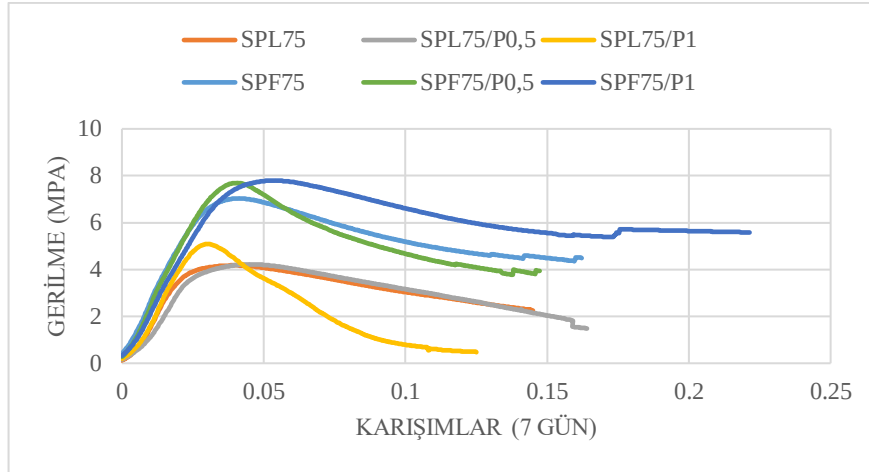
Şekil 4.19. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)



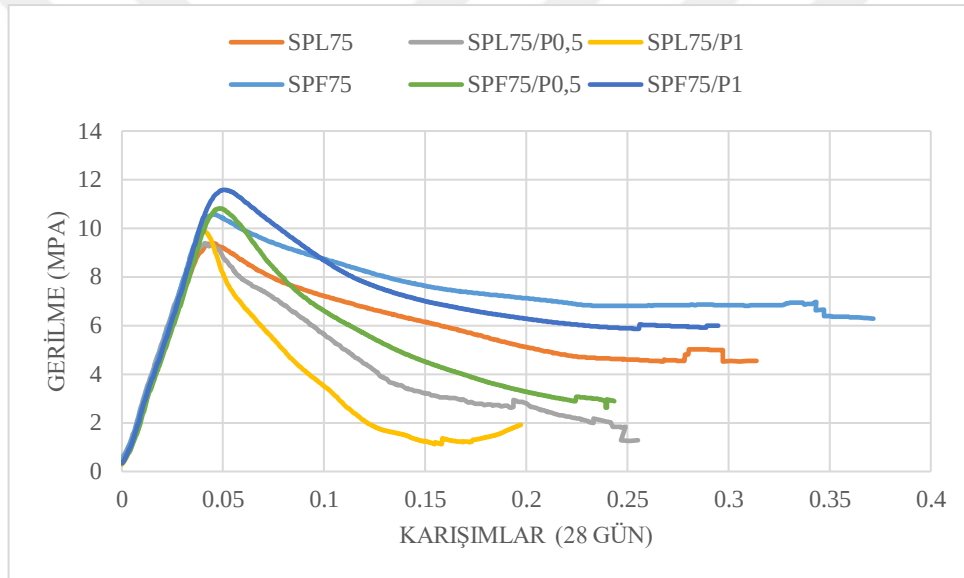
Şekil 4.20. Karışımların basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazık pomza %50)

Basınç yükleri altında çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, karışımlarda lif oranının artmasıyla dayanım kademeli olarak artmış, karışımlar daha fazla şekil değiştirme göstermiş daha fazla yük taşıyarak nihai dayanıma ulaşmışlardır. Bir başka deyişle, lifsiz olan karışımlar lif içeriği fazla olanlara göre daha sünek bir davranış göstermiştir. Bununla birlikte etüvde kürlenmiş karışım numuneleri laboratuvar ortamında bekletilen numunelere daha iyi bir performans göstermiştir. Ayrıca eklenen liflerin harçların kırılma sonrası davranışını geliştirdiğini, çatlakların oluşmasını ve yayılmasını engellediğini söylenebilir. Silis dumanının fazla olduğu karışım serileri dikkate alındığında, 0,05 şekil değiştirmede %0, %0,5 ve %1 lif oranı için basınç dayanımı 6,71-11,706 MPa aralığında değerler almıştır. Silis dumanının daha az olduğu karışım serileri dikkate alındığında, 0,05 şekil değiştirmede %0, %0,5 ve %1 lif oranı için basınç dayanımı 4,076-7,793 MPa aralığında değerler almıştır.

Ghernouti vd. (2015), atık plastik poşetlerden üretilen plastik lif ve polipropilen lif olmak üzere iki tip plastik lifin geopolimer betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca farklı lif uzunluklarının ve içeriğinin etkisini de araştırmışlardır. 2 cm uzunluğunda 5 kg/m³ plastik poşet lif içeren betonun, polipropilen lif içeren ve referans karışımına kıyasla üstün gerilme-şekil değiştirme davranışına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.21. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

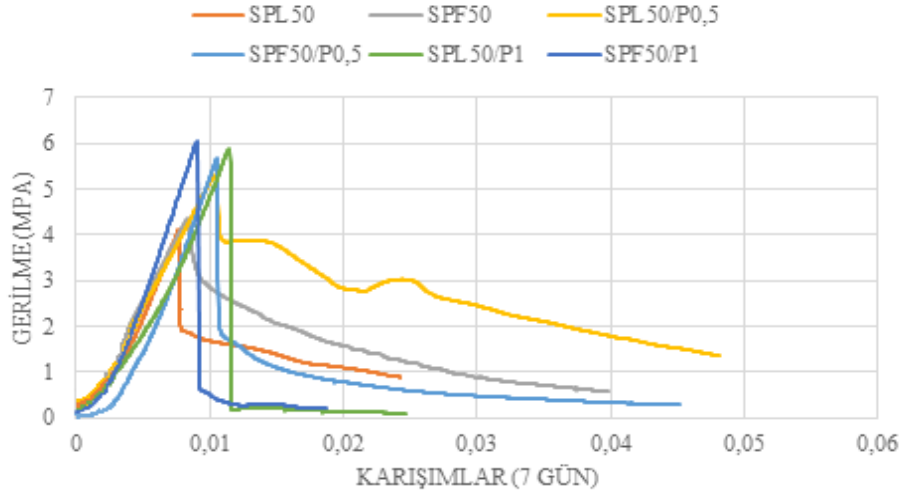


Şekil 4.22. Karışımların basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

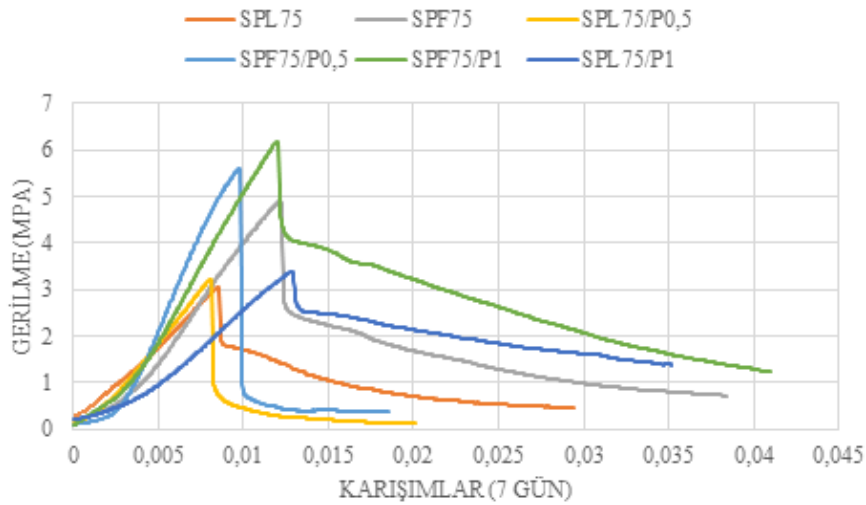
Eğilme yükleri altındaki 7 ve 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.23-4.26'da gösterilmiştir. Eğilme yükleri altında çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, lifsiz karışımlarda maksimum dayanıma ulaştıktan sonra çok sert bir düşüş yaşanırken, lif içeriğinin artmasıyla daha yumuşak bir düşüşün meydana geldiği ve maksimum dayanıma ulaştıktan sonra karışımların yük altında ezilmediği ve hala yük taşımaya devam ettiği görülmüştür. Eklenen liflerin karışımların çatlama sonrası davranışını geliştirdiğini gözlemlenmiştir. Kontrol karışımlarla karşılaştırıldığında, silis dumanı içeren lifli karışımların dayanımları daha yüksek değerler almıştır.

Aslani vd. (2019) yaptığı çalışmada polipropilen liflerin lif takviyeli geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yük taşıma kapasitesini ve sehimini belirlemek için 100*100*400 mm boyutlarındaki prizmatik numuneleri kullanılmıştır. Polipropilen lif oranı kontrol karışımı olan % 0'dan % 0,25'e artmasıyla,

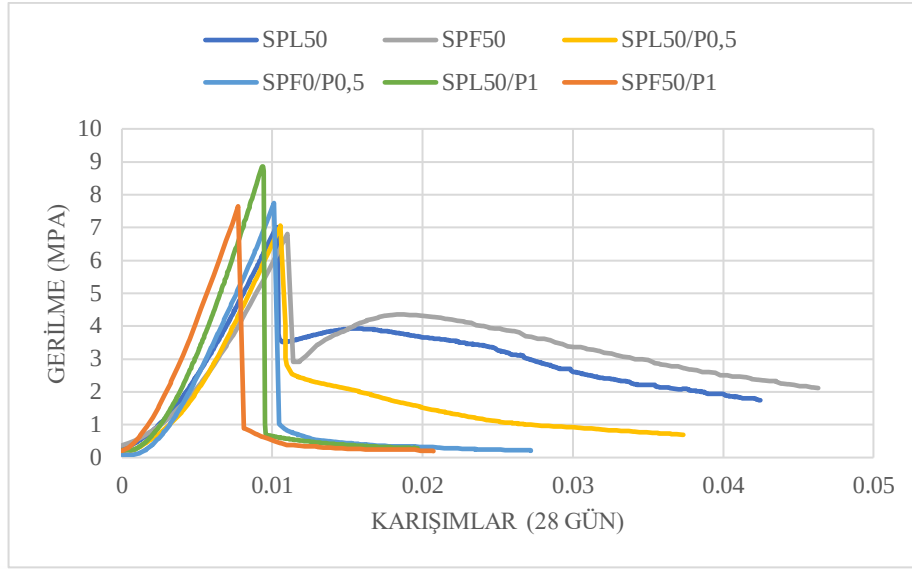
nihai yükün 22,5 KN'den 28 KN'e yükseldiğini, kritik sehimin 0,99 mm'den 0,9 mm'e azaldığını bildirmişlerdir. Sonuçlar, eklenen polipropilen liflerin yük taşıma kapasitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, ancak kritik sehim üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğunu göstermiştir.



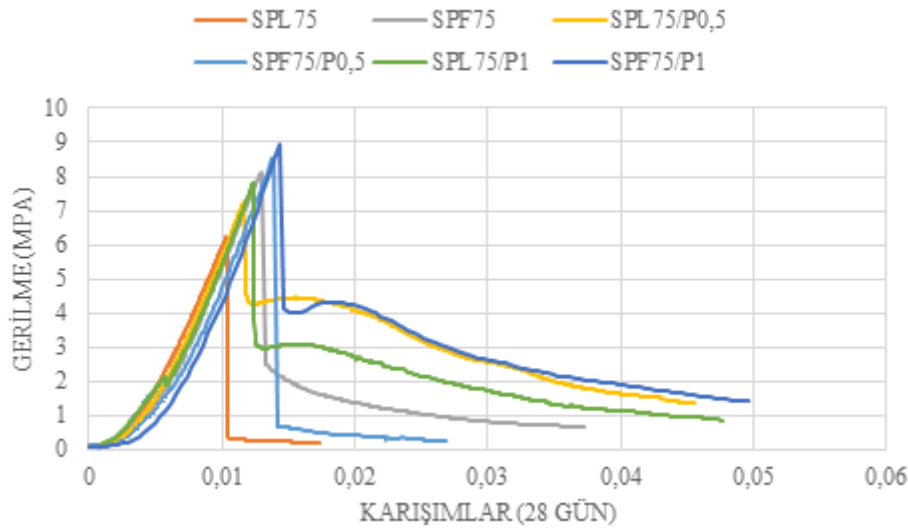
Şekil 4.23. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazık pomza %50)



Şekil 4.24. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazık pomza %75)



Şekil 4.25. Karışımların eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazık pomza %50)



Şekil 4.26. Karışımların eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazık pomza %75)

4.4. Sertleşmiş Harçlarda Durabilite Hal Deney Bulguları

4.4.1. Kılcal su geçirgenlik tayini

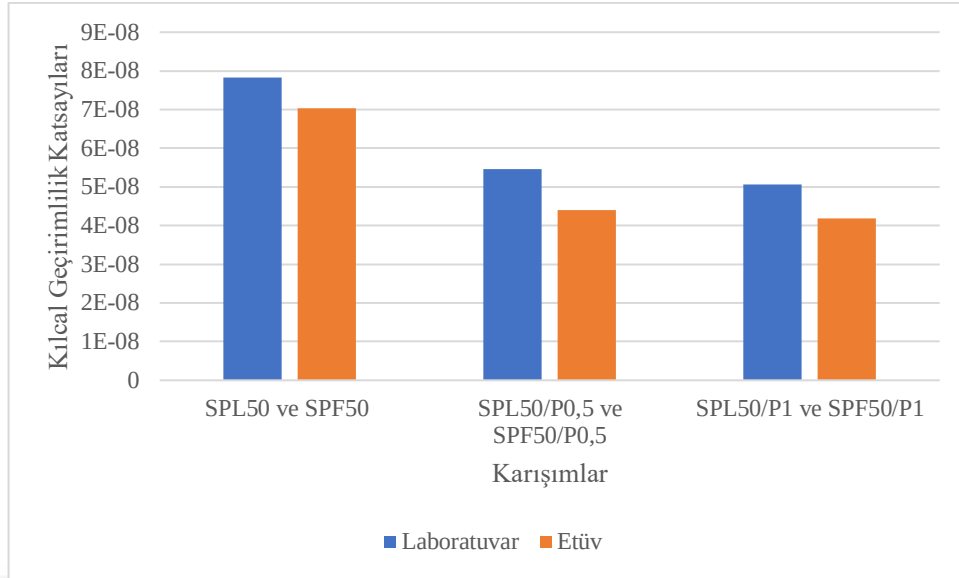
Çizelge 4.6'da ve Şekil 4.27-4.30'da karışımlara ait, belirli saatlerde hesaplanmış kılcal su emme katsayıları gösterilmiştir. 1 saatlik sürenin, boşluklar içerisinde yükselmesi için yeterli bir süre olmadığını düşünülebilir. Dolayısıyla 24 saat sonucunda elde edilen veriler, harçların kılcal geçirimsizliği üzerine yorumlanmasında daha isabetli olmuştur.

Çizelge 4.6. Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn^{1/2})

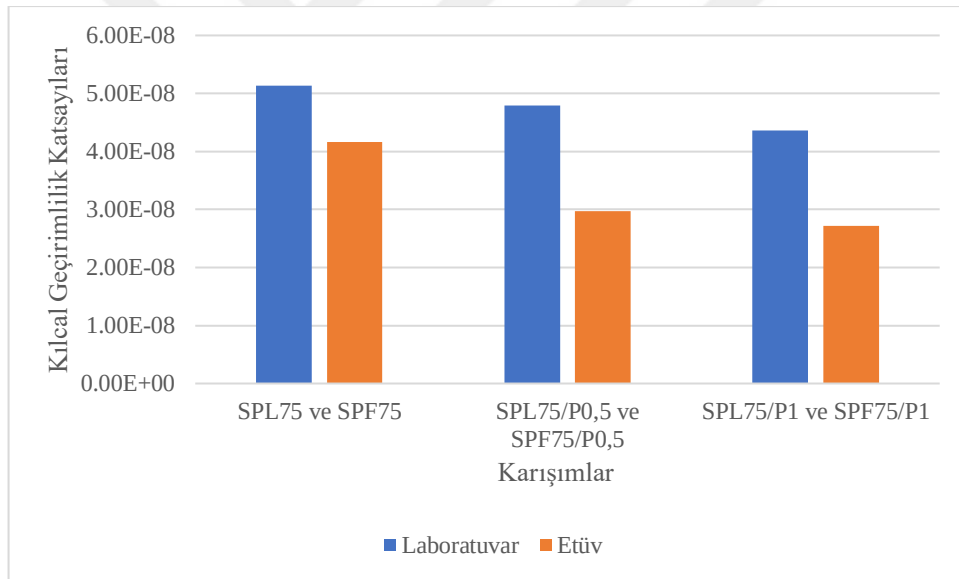
Karışım serisi	K ₁ (E10 ⁻⁸)	K ₂₄ (E10 ⁻¹⁰)
SPL50	7,83	3,18
SPF50	7,04	2,81
SPL50/P0,5	5,47	2,22
SPF50/P0,5	4,40	1,73
SPL50/P1	5,06	2,03
SPF50/P1	4,19	1,69
SPL75	5,13	2,04
SPF75	4,16	1,54
SPL75/P0,5	4,79	1,58
SPF75/P0,5	2,97	1,03
SPL75/P1	4,36	1,51
SPF75/P1	2,72	0,96

Lifsiz karışım serileri incelendiğinde, 1 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını 7,83*10⁻⁸ ile SPL50 gösterirken, en düşük değeri ise 4,16*10⁻⁸ ile SPF75 numunesi göstermiştir. 24 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını 3,18*10⁻¹⁰ ile SPL50 gösterirken, en düşük değeri ise 1,54*10⁻¹⁰ ile SPF75 numunesi göstermiştir. Polipropilen lif katkılı karışım serileri dikkate alındığında, 1 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını 5,47*10⁻⁸ ile SPL50/P0,5 gösterirken, en düşük değeri ise 2,72*10⁻⁸ ile SPF75/P1 numunesi göstermiştir. 24 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını 2,22*10⁻¹⁰ ile SPL50/P0,5 gösterirken, en düşük değeri ise 0,96*10⁻¹⁰ ile SPF75/P1 numunesi göstermiştir.

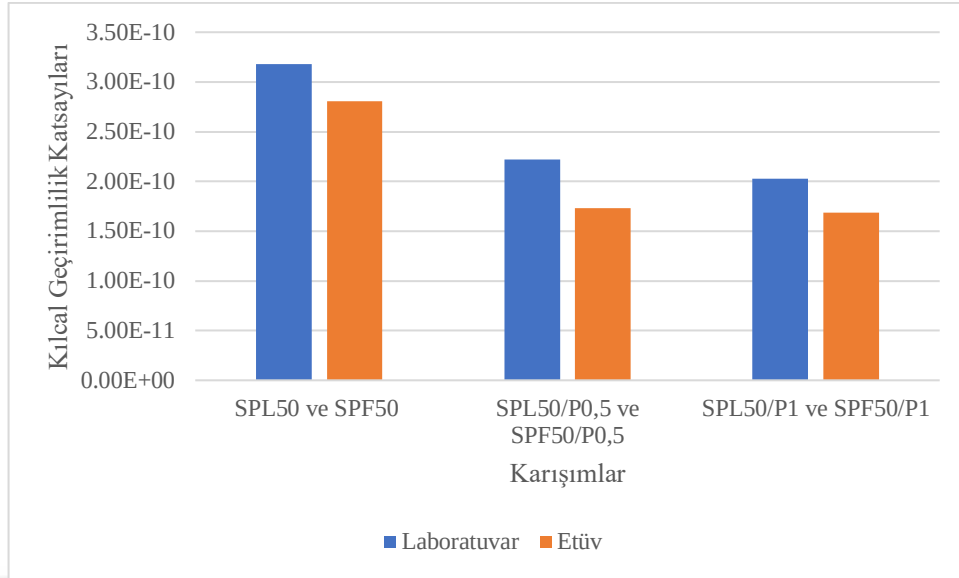
Topçu (2017) yaptığı çalışmaya göre, PPL oranı arttıkça kapiler su emme katsayısının küçüldüğü görülmektedir. Ancak grafiklerin 10⁻⁸ mertebesinde olduğu göz önünde bulundurulursa bu azalma miktarının oldukça küçük olduğu görülmektedir. Aynı tespit Ban vd. (2017) çalışmasında dile getirilmiştir. Bhutta vd. (2019) yaptığı çalışmada, PPL takviyeli harçlarda görünür boşluk oranlarının arttığı ve kılcal su geçirgenlik katsayısının lif oranı arttıkça azaldığı rapor edilmiştir. Mohseni (2018) tarafından yapılan araştırmada ise lif oranının artmasına rağmen kılcal su geçirgenlik katsayısında belirli bir artış olmamıştır. Wang vd. (2020) tarafından sunulan çalışmada lif oranı ve uzunluğu arttıkça kılcal su geçirgenlik katsayısının kademeli olarak düştüğü sonucuna varılmıştır.



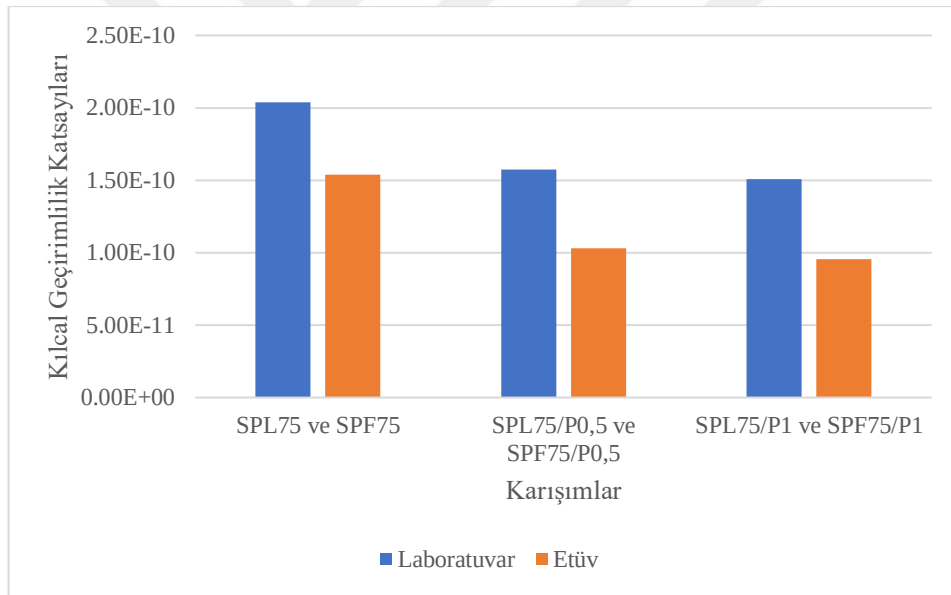
Şekil 4.27. Karışımların 1 saatlik süredeki kılcal su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)



Şekil 4.28. Karışımların 1 saatlik süredeki kılcal su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)



Şekil 4.29. Karışımların 24 saatlik süredeki kılcal su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %50, öğütülmüş bazik pomza %50)



Şekil 4.30. Karışımların 24 saatlik süredeki kılcal su emme katsayısı değerleri (silis dumanı %25, öğütülmüş bazik pomza %75)

5. SONUÇLAR

Daha önce silis dumanı ve öğütülmüş bazik pomza bazlı geopolimer harçlar neredeyse literatürde rastlanılamamış. Bu sebeple bu çalışmada silis dumanı ve öğütülmüş bazik pomzanın geopolimer harçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca polipropilen lif geopolimer harçlarda takviye amaçlı kullanılmıştır. Üretilen harç numuneleri üzerinde liflerin etkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bazı sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Polipropilen lif oranı arttıkça taze birim hacim kütlesi düşüş göstermiştir. Aynı zamanda lif artışı ile yayılma çapında azalma gözlemlenmiştir. Bu durum işlenebilirliğe olumsuz bir etki gibi görülse de taze harcın kohezyonu açısından önemli bir özelliktir. Karışımların kuru ve suya doymuş kuru yüzey yığın yoğunluk değerleri eklenen polipropilen liflerin artmasıyla azalma eğilimi göstermiştir. Polipropilen lif katkılı harçlar üzerinde yapılan su emme deneyleri sonuçlarına göre, lif oranının artmasıyla su emme değerleri de artmıştır. En düşük değerler en yüksek lif oranına sahip karışımlarda elde edilmiştir. Silis dumanı içeren karışımların yığın yoğunluk değerleri hem kontrol karışımlardan hem de öğütülmüş bazik pomza içeren karışımlardan daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. Karışımların görünür boşluk oranı ve su emme değerleri birbirine paralel değerler almıştır. Boşluk oranı yüksek olan karışımların yüksek su emme kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar görünür boşluk oranında yükselme olsa da lifler kılcal boşlukların açılmasını ve mevcut boşlukların genişlemesini engellediği sonucuna varılmıştır. Silis dumanı içeriğinin artması karışımların su emme ve boşluk oranı değerlerini düşürmüştür.

Mekanik özellikleri deney sonuçları incelendiğinde, lif kullanımı olumlu etki göstermiştir. Polipropilen lif katkılı harçlar üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyi yapıldığında, lif katkısının harçlarda dayanımı yükselttiği görülmüştür. Kütleme şartlarının da oldukça etkili olduğu görülmektedir. Etüv sıcaklığına tabii tutulmuş numunelerin dayanımlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kütleme zamanının numunelerin dayanımına etkisi olmuştur.

Çimento endüstrisinin her yıl atmosfere milyarlarca ton sera gazı saldırdığı verileri göz önüne alındığında, bu çalışma çimento yerine silis dumanı ve öğütülmüş bazik pomza kullanarak daha yeşil, daha ekonomik ve sürdürülebilir beton üretmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda atık değerlendirmesine ağırlık verilerek literatüre katkı sağlanmıştır. Alkali ile aktive edilmiş veya geopolimer betonun binalarda sürdürülebilir yapı malzemesi olarak kullanılması, yaşadığımız çevreye salınan karbondioksitin azaltılması ve yüksek enerji ihtiyacının azaltılması açısından inşaat sektörü için fayda sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- A Neville A. M. et al. Properties of concrete. – London : Longman, 1995. – T. 4. – C. 1995.
- Adak D., Sarkar M., Mandal S. Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar //Construction and Building Materials. – 2014. – T. 70. – C. 453-459.
- Aiello, R., Crea, F., Nastro, A., Suboti, B. and Testa, F. 1991. Influence of cations on the physicochemical and structural properties of aluminosilicate gel precursors. Part 1. Chemical and thermal properties." Zeolites 11(8): 767-775.
- Aïtcin P. C., Mindess S. Sustainability of concrete. – CRC Press, 2011.
- Akbar, Arslan, et al. "Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers." *Journal of Building Engineering* 33 (2021): 101492.
- Allaby M. (ed.). Dictionary of Earth Sciences. – Oxford University Press, 2008.
- Al-Majidi M. H. et al. Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications //Construction and Building Materials. – 2016. – T. 120. – C. 198-211.
- Al-Mashhadani, Mukhallad M., et al. "Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites." *Construction and building materials* 167 (2018): 505-513.
- Al-Swaidani A. M. et al. International Journal of Concrete Structures and Materials //International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2015. – T. 9. – №. 1.
- Al-Swaidani A. M. Production of more durable and sustainable concretes using volcanic scoria as cement replacement //Materiales de Construcción. – 2017. – T. 67. – №. 326. – C. e118-e118.
- Al-Swaidani A. M., Aliyan S. D., Adarnaly N. Mechanical strength development of mortars containing volcanic scoria-based binders with different fineness //Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2016. – T. 19. – №. 2. – C. 970-979.
- Anıl M., 1995. Mersin-Adana-Gaziantep ve Hatay Bölgelerindeki Mermerlerin Petrografik Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi (Münferit), Ç.Ü. Arş. Fonu . MMF-95-1. Adana.
- Anwar Hossain K. M. Resistance of scoria-based blended cement concrete against deterioration and corrosion in mixed sulfate environment //Journal of Materials in Civil Engineering. – 2009. – T. 21. – №. 7. – C. 299-308.
- Aslani, F., Liu, Y., & Wang, Y. (2019). The effect of NiTi shape memory alloy, polypropylene and steel fibres on the fresh and mechanical properties of

- selfcompacting concrete. *Construction and Building Materials*, 215, 644-659. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.207.
- Atiş C. D. et al. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration //Construction and building materials. – 2015. – T. 96. – C. 673-678.
- Aydın, S., Baradan, B. 2012. Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars. *Mater. Des.* 35: 374–383.
- Aziz I. H. et al. Strength development of solely ground granulated blast furnace slag geopolymers //Construction and Building Materials. – 2020. – T. 250. – C. 118720.
- Balun B., Karataş M. Influence of curing conditions on pumice-based alkali activated composites incorporating Portland cement //Journal of Building Engineering. – 2021. – T. 43. – C. 102605.
- Ban, Cheah Chee, Part Wei Ken, and Mahyuddin Ramli. "Mechanical and durability performance of novel self-activating geopolymer mortars." *Procedia engineering* 171 (2017): 564-571.
- Baykara, Hacı, et al. "Preparation, characterization, and evaluation of compressive strength of polypropylene fiber reinforced geopolymer mortars." *Heliyon* 6.4 (2020): e03755.
- Bellum, Ramamohana Reddy. "Influence of steel and PP fibers on mechanical and microstructural properties of fly ash-GGBFS based geopolymer composites." *Ceramics International* 48.5 (2022): 6808-6818.
- Bhanja, S., & Sengupta, B. (2003). Modified water–cement ratio law for silica fume concretes. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 447-450.
- Bhutta, Aamer, et al. "Pull-out behavior of different fibers in geopolymer mortars: effects of alkaline solution concentration and curing." *Materials and Structures* 50.1 (2017): 1-13.
- Bhutta, Aamer, Mohammed Farooq, and Nemkumar Banthia. "Performance characteristics of micro fiber-reinforced geopolymer mortars for repair." *Construction and Building Materials* 215 (2019): 605-612.
- Bilim C. 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana 2006.
- Blazy J., Blazy R. Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces //Case Studies in Construction Materials. – 2021. – T. 14. – C. e00549. Brandt AM. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. 2nd ed. London, UK: Taylor & Francis; 2009.

- Budh C. D., Warhade N. R. Effect of molarity on compressive strength of geopolymer mortar //International journal of civil engineering research. – 2014. – T. 5. – №. 1. – C. 83-86.
- Carette G. G., Malhotra V. M., Aitcin P. C. Preliminary data on long-term strength development of condensed silica fume concrete //CANMET Int. Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Mont-real. – 1987.
- Danishyar, Fazlullah. *Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer kompozit malzeme özelliklerine polipropilen lif katkısının etkisi*. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021. Balyore
- Davidovits J. (1982), Mineral polymers and methods of making them.
- Davidovits J. (ed.). Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: proceedings of the world congress geopolymer 2008. – Geopolymer Institute, 2008.
- Davidovits J. G. Chemistry and applications //Saint-Quentin: Institute Geopolymer. – 2008.
- Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials //Journal of thermal analysis. – 1989. – T. 35. – №. 2. – C. 429-441.
- Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials //Journal of Thermal Analysis and calorimetry. – 1991. – T. 37. – №. 8. – C. 1633-1656.
- Davidovits J., Davidovics M. Geopolymer: ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites //How Concept Becomes Reality. – 1991. – T. 36. – C. 1939-1949.
- Dedeloudis C. et al. Natural pozzolans //Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. – Springer, Cham, 2018. – C. 181-231.
- Deventer, J.S.J., Nicolas, R.S., Ismail, I., Bernal, S.A., Brice, D.G., Provis, J.L. 2014. Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardisation. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4(2): 116-128.
- Djobo J. N. Y. et al. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars //Construction and Building Materials. – 2016. – T. 124. – C. 606-614.
- Duxson P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art //Journal of materials science. – 2007. – T. 42. – №. 9. – C. 2917-2933.
- Duxson P., Provis J. L. Designing precursors for geopolymer cements //Journal of the american ceramic society. – 2008. – T. 91. – №. 12. – C. 3864-3869.
- Elkem B., Bjørseth O., Bjørseth A., Fjeldstad P. E. Kartlegging av PAH ved massefabrikken, Elkem-Spigerverket A/S, Fiskaa Verk. – 1978.

- Engels H. W., Neuschaeffer K. H., Spielau P. Waste gas catalyst support from inorganic molded material. Abgaskatalysator-Traeger aus anorganischen Formmassen. – 1986.
- Erdoğan, Y., 2007. Asidik ve Bazik Pomzadan Üretilen Yapı Malzemelerinin Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması (doktora tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Eti Elektrometalurji A.Ş. İşletmesi yetkililerinden alınan bilgiler, Antalya, 1993, 2001.
- Faimon J. Oscillatory silicon and aluminum aqueous concentrations during experimental aluminosilicate weathering //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1996. – T. 60. – №. 15. – C. 2901-2907.
- Faraj, R. H., Sherwani, A. F. H., & Daraei, A. (2019). Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *Journal Of Building Engineering*, 25, 100808.
- Fiskaa O., Hansen H., Moum J. Concrete in alum shale-with english summary/in norwegian //Norwegian Geotechnical Institute Publ. – 1971. – №. 88.
- Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers //Construction and building materials. – 2011. – T. 25. – №. 4. – C. 1906-1915.
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H., & Makhloufi, A. (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). *Construction and Building Materials*, 82, 89-100. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.059
- Gill Owens (2009), Fulton's concrete technology, Midrand, South Africa Cement Concrete Instituted.
- Glukhovsky V., 1989. Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products on the Durability of Concrete. Proceedings of the 2 nd International Seminar, pp. 53-62, June 26-27, Gothenburg, Sweden.
- Gündüz L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, D., Çankıran, O. Pomza teknolojisi //Cilt. – 1998. – T. 1. – C. 285.
- Güneyisi E., Özturan T., Gesoglu M. Effect of initial curing on chloride ingress and corrosion resistance characteristics of concretes made with plain and blended cements //Building and environment. – 2007. – T. 42. – №. 7. – C. 2676-2685.
- Hammond A. A. Pozzolana cements for low cost housing //Japan: Building and road research institute. – 1983.
- Hardjito D., Rangan B. V. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. – 2005.
- Hamalı, Y.(2007). Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Jaarsveld, J.G.S., Deventer, J.S.J. 1999. Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38: 3932-3941.
- Jackson J. A., Mehl J., Neuendorf K. Glossary of Geology American Geological Institute //Alexandria, Virginia. – 2005. – T. 800.
- Jahren P., Sui T. Concrete and sustainability. – CRC press, 2013.
- Jia D. et al. Development of geopolymer and geopolymer-based composites //Kuei Suan Jen Hsueh Pao. – 2017. – T. 45. – C. 1721-1737.
- Jolicoeur C. et al. Chemical activation of blast-furnace slag, An overview and systematic experimental investigation //Advances in Concrete Technology, Ministry of Supply and Services, Canada. – 1992. – C. 471-502.
- Juárez C. et al. The diagonal tension behavior of fiber reinforced concrete beams //Cement and Concrete Composites. – 2007. – T. 29. – №. 5. – C. 402-408.
- İlkentapar S. et al. Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class
- Kamseu E. et al. Investigation of volcanic ash based geopolymers as potential building materials. – 2009.
- Karahan O., Atış C. D. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete //Materials & Design. – 2011. – T. 32. – №. 2. – C. 1044-1049.
- Kockal N. U., Camurlu H. E. Lightweight Pumice Mortars with Polypropylene Fiber Reinforcement //Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – T. 45. – №. 10. – C. 8087-8097.
- Koksal, Fuat, Osman Gencil, and Mehmet Kaya. "Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures." *Construction and Building Materials* 88 (2015): 175-187. Topçu
- Krivenko P. V. Alkaline cements //Proceedings of the 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1994. – VIPOL Stock Company, 1994. – T. 1. – C. 11-129.
- Laoufi L. et al. Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique (Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack) //Journal of Material Environmental Science. – 2016. – T. 7. – №. 5. – C. 1835-1845.
- Lefond S. J. Industrial minerals and rocks: Society of Mining Engineers //Denver, Colorado. – 1983.
- Lin T. et al. Effects of fibre content on mechanical properties and fracture behaviour of short carbon fibre reinforced geopolymer matrix composites //Bulletin of Materials Science. – 2009. – T. 32. – №. 1. – C. 77-81.

- Lloyd N., Rangan V. Geopolymer concrete with fly ash //Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies. – UWM Center for By-Products Utilization, 2010. – C. 1493-1504.
- Luga E., Atis C. D. Optimization of heat cured fly ash/slag blend geopolymer mortars designed by “Combined Design” method: Part 1 //Construction and Building Materials. – 2018. – T. 178. – C. 393-404.
- Mallicoat S., Sarin P., Kriven W. M. Novel, alkali-bonded, ceramic filtration membranes //Developments in Advanced Ceramics and Composites: A Collection of Papers Presented at the 29th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, January 23-28, 2005, Cocoa Beach, Florida, Ceramic Engineering and Science Proceedings. – Wiley-American Ceramic Society, 2009. – T. 298. – C. 37.
- Mathers S. J. et al. Exploration, evaluation & testing of volcanic raw materials for use in construction (VOLCON). – British Geological Survey, 2000.
- Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347-357. doi:10.1016/s0958-9465(03)00017-9
- Mehrzad M.Y., Yadollahi M. M., Benli A., Demirboğa R. The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites //Construction and Building Materials. – 2015. – T. 94. – C. 767-774. Mehta PK, Monteiro PJM. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd ed: New York, USA: McGraw-Hill; 2006
- Mehta A., Siddique R. Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties //Journal of cleaner production. – 2018. – T. 205. – C. 49-57.
- Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. – McGraw-Hill Education, 2014.
- Mindess S., Young J. F., Darwin D. Concrete. – Prentice Hall, 2002.
- Mohseni, Ehsan. "Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites." *Construction and Building Materials* 186 (2018): 904-911.
- Murahari K., Rao R. Effects of Polypropylene fibres on the strength properties Of fly ash based concrete //International Journal of Engineering Science Invention. – 2013. – T. 2. – №. 5. – C. 13-19.
- Oh B. H. et al. Experimental and theoretical investigation on the postcracking inelastic behavior of synthetic fiber reinforced concrete beams //Cement and Concrete Research. – 2005. – T. 35. – №. 2. – C. 384-392.
- Pabalan R. T., Pitzer K. S. Thermodynamics of NaOH (aq) in hydrothermal solutions //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1987. – T. 51. – №. 4. – C. 829-837.

- Pacheco-Torgal F., Ding Y. (ed.). Handbook of recycled concrete and demolition waste. – Elsevier, 2013.
- Palacios M. et al. Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes //Cement and Concrete Research. – 2009. – T. 39. – №. 8. – C. 670-677.
- Palomo A., Grutzeck M. W., Blanco M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future //Cement and concrete research. – 1999. – T. 29. – №. 8. – C. 1323-1329.
- Palomo A., Palacios M. Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: Part II. Stabilisation of chromium and lead //Cement and concrete research. – 2003. – T. 33. – №. 2. – C. 289-295.
- Pan Z., Sanjayan J. G., Rangan B. V. An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature //Journal of Materials Science. – 2009. – T. 44. – №. 7. – C. 1873-1880.
- Patankar S. V., Ghugal Y. M., Jamkar S. S. Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar //Indian Journal of Materials Science. – 2014. – T. 2014.
- Panias D., Giannopoulou I. P., Perraki T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers //Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2007. – T. 301. – №. 1-3. – C. 246-254.
- Peng G. F. et al. Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures //Cement and Concrete Research. – 2006. – T. 36. – №. 4. – C. 723-727.
- Popovic K., Ukraincik V., Djurekovic A. Improvement of mortar and concrete durability by the use of condensed silica fume //Durability of building materials. – 1984. – T. 2. – №. 2. – C. 171-187.
- Provis J. L., Lukey G. C., van Deventer J. S. J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results //Chemistry of materials. – 2005. – T. 17. – №. 12. – C. 3075-3085.
- Provis J. L., Van Deventer J. S. J. (ed.). Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. – Elsevier, 2009.
- Rahier H. et al. Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses //Journal of materials science. – 1996. – T. 31. – №. 1. – C. 71-79.
- Ramezaniapour A.A. Cement replacement materials. Properties, durability, sustainability. – 2014.
- Ranjbar, Navid, and Mingzhong Zhang. "Fiber-reinforced geopolymer composites: A review." *Cement and Concrete Composites* 107 (2020): 103498.
- Ranjbar, Navid, et al. "A comprehensive study of the polypropylene fiber reinforced fly ash based geopolymer." *PloS one* 11.1 (2016): e0147546.

- Ranjbar, Navid, et al. "Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites." *Composites Science and Technology* 122 (2016): 73-81.
- Rashiddadash, Pantea, Ali Akbar Ramezani pour, and Mahdi Mahdikhani. "Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice." *Construction and Building Materials* 51 (2014): 313-320.
- Reddy M. S., Dinakar P., Rao B. H. Mix design development of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete // *Journal of Building Engineering*. – 2018. – T. 20. – C. 712-722.
- Safari Z. et al. Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2020. – T. 162. – C. 105055.
- Sayed, M., Zeedan, S.R. 2012. Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume. *HBRC Journal*, 8: 177–184.
- Sen G. Petrology: Principles and practice. – Springer Science & Business Media, 2013.
- Senhadji Y. et al. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar // *Powder technology*. – 2014. – T. 254. – C. 314-323.
- Shi C. An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans // *Canadian journal of civil engineering*. – 2001. – T. 28. – №. 5. – C. 778-786.
- Simonson J. M., Mesmer R. E., Rogers P. S. Z. The enthalpy of dilution and apparent molar heat capacity of NaOH (aq) to 523 K and 40 MPa // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. – 1989. – T. 21. – №. 6. – C. 561-584.
- Sofi M. et al. Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC) // *Journal of Materials Science*. – 2007. – T. 42. – №. 9. – C. 3107-3116.
- Song, P. S., Sungmoon Hwang, and B. C. Sheu. "Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes." *cement and concrete research* 35.8 (2005): 1546-1550.
- Swamy R. N. Design for durability and strength through the use of fly ash and slag in concrete // *Special Publication*. – 1997. – T. 171. – C. 1-72.
- Taddeucci J. et al. Hawaiian and Strombolian eruptions // *The encyclopedia of volcanoes*. – Academic Press, 2015. – C. 485-503.
- Talling B., Brandstetr J. Present state and future of alkali-activated slag concretes // *Special Publication*. – 1989. – T. 114. – C. 1519-1546.
- Taylor H. F. W., Gollop R. S. 21 SOME CHEMICAL AND MICROSTRUCTURAL ASPECTS OF CONCRETE DURABILITY // *Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems*. – 1997. – C. 177.

- Thirumurugan S., Sivakumar A. Compressive strength index of crimped polypropylene fibres in high strength cementitious matrix //World Appl. Sci. J. – 2013. – T. 24. – №. 6. – C. 698-702.
- Tonak T., Sipahi F., Atay Y. Elektrometalurji Sanayii Atık Ürünü Silis Dumanı'nın Çimento Üretiminde Kullanılması //TMMOB İnşaat Müh. Odası, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu. – 1997. – C. 169-183.
- Toniolo N., Boccaccini A. R. Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review //Ceramics International. – 2017. – T. 43. – №. 17. – C. 14545-14551.
- Top S., Vapur H. Effect of basaltic pumice aggregate addition on the material properties of fly ash based lightweight geopolymer concrete //Journal of Molecular Structure. – 2018. – T. 1163. – C. 10-17.
- Topçu İ.B., Demirel O.E., Uygunoğlu T., Polipropilen lif katkılı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri //Politeknik Dergisi. – 2017. – T. 20. – №. 1. – C. 91-96.
- Uysal, Mucteba, et al. "Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars." *Construction and Building Materials* 176 (2018): 271-282.
- Van Deventer J. S. J. et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials //Waste and Biomass Valorization. – 2010. – T. 1. – №. 1. – C. 145-155.
- Van Jaarsveld J. G. S., Van Deventer J. S. J., Lukey G. C. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers //Materials Letters. – 2003. – T. 57. – №. 7. – C. 1272-1280.
- Van Jaarsveld J. G. S., Van Deventer J. S. J., Lukey G. C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers //Chemical Engineering Journal. – 2002. – T. 89. – №. 1-3. – C. 63-73.
- Van Jaarsveld J. G. S., Van Deventer J. S. J., Schwartzman A. The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics //Minerals Engineering. – 1999. – T. 12. – №. 1. – C. 75-91.
- Wang Q. et al. Research on adaptability of slag-based geopolymer with superplasticizer //Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2009. – T. 405. – C. 129-134.
- Wang, Yijiang, et al. "Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers." *Construction and Building Materials* 251 (2020): 118960.
- Wongsa A. et al. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber //Journal of cleaner production. – 2018. – T. 195. – C. 1069-1080.
- Xie Zh. ve Xi Y. 2001. Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash, Cement and Concrete Research, 31. (9): 1245-1249.

- Xu H., Van Deventer J. S. J. Geopolymerisation of multiple minerals //Minerals engineering. – 2002. – T. 15. – №. 12. – C. 1131-1139.
- Yaltay N., Hamid M. A., Türkmenoğlu M. Properties of pumice-fly ash based geopolymer paste //Construction and Building Materials. – 2022. – T. 316. – C. 125665.
- Yaşar E., Erdoğan Y. Toprakkale bazaltının doğal taş endüstrisindeki yeri, 4 //Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. – 2001. – T. 118.
- Yeğinobalı M. A. Silis dumanının betonda katkı maddesi olarak değerlendirilmesi //Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı. – 1993. – C. 18-19.
- Yildiz, K., Ugur L. O. et al. The effect of mineral admixture type on the modulus of elasticity of high strength concrete //Scientific Research and Essays. – 2009. – T. 4. – №. 8. – C. 791-798. Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- Yoosuk, Piyathida, et al. "Properties of polypropylene fiber reinforced cellular lightweight high calcium fly ash geopolymer mortar." *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021): e00730.
- Zhang H. Y. et al. Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures //Construction and Building Materials. – 2016. – T. 109. – C. 17-24. F fly ash geopolymer mortar //Construction and Building Materials. – 2017. – T. 151. – C. 363-369.
- Živica V. Effectiveness of new silica fume alkali activator //Cement and Concrete Composites. – 2006. – T. 28. – №. 1. – C. 21-25.

ÖZGEÇMİŞ

Bauyrzhan TOREGALIYEV

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2022	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya/Türkiye
Lisans	Avrasya Milli Üniversitesi
2015-2019	Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Nur-Sultan/Kazakistan

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Üretim ve Teknik Departman Mühendisi	BI Group: BI Construction & Engineering, Nur-Sultan/Kazakistan
2019-2020	
Maliye Mühendisi	BAZİS-A Construction, Nur-Sultan/Kazakistan
2018-2019	