



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



LİF DONATILI YÜKSEK PERFORMANSLI
GEOPOLİMER HARÇLARIN DAYANIM VE
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ

Mustafa YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa YILMAZ tarafından hazırlanan “Lif Donatılı Yüksek Performanslı Geopolimer Harçların Dayanım ve Dayanıklılık Özellikleri” adlı tez çalışması 14/09/23 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

.....

Danışman

Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN

.....

Üye

Doç. Dr. Arife AKIN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 221004005 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mustafa YILMAZ

Tarih:14/09/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİF DONATILI YÜKSEK PERFORMANSLI GEOPOLİMER HARÇLARIN DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ

Mustafa YILMAZ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
İkinci Danışman: Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK**

2023, 55 Sayfa

**Jüri
Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN
Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
Doç. Dr. Arife AKIN**

Tüm dünyada salgılanan mevcut CO₂ salınımının yaklaşık %7-8’lik kısmının sahibi olan ve çok yüksek sıcaklıklarda üretilen (1400-1500°C) Portland Çimentosu (PÇ) bu kadar CO₂ salınımı meydana gelmesi çok ciddi riskler içermektedir. Son verilere göre ülkemizde yıllık yaklaşık 105 milyon m³ çimento üretimi yapılmıştır. Bu durumun engellenmesi için Portland Çimentosuna (PÇ) kıyasla karbon ayak izi daha düşük bir malzeme olan geopolimer harçlar ön plana çıkmaktadır. Geopolimer harçların taban malzemesi olarak fabrika yan ürünlerini kullanması, basınç dayanımlarının ve durabilite özelliklerinin normal betonla yarışabilecek özelliklerde olduğu yadsınamaz olmakla beraber süneklik ve çekme dayanımı konusunda sorunlar teşkil etmektedir. Bu tez çalışmasında “%80 C Sınıfı Uçucu Kül + %20 Portland Çimentosu (PÇ)” karışımı ile geopolimer harç hazırlanmış ve sünekliğini artırmak için karışıma poliamid lifi (PL) ve PVA Lifi takviyesi yapılmıştır. Lif ilavesi ile karışımın şekil değiştirme kapasitesi artırılarak çoklu çatlak etkisi yaratılmak istenmiş yani malzemenin rijit yapıdan uzaklaşıp süneklik kazanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda hazırlanan karışımın basınç dayanımı, üç noktalı eğilme dayanımı, dört noktalı eğilme dayanımı ve durabilite özellikleri (donma-çözülme, sülfat direnci ve SEM) incelenmiştir. Sonuç olarak, hazırlanan karışımın nihai basınç dayanımı 35,2 MPa olduğu, karışıma ilave edilen liflerin süneklik kapasitesini artırdığı gözlemlenmiştir. Lifsiz karışımda eğilme dayanımı 3,67 MPa iken lif ikamesi ile bu değer 5,6 MPa seviyesine yükselmiştir. Yapılan durabilite deneyleri ile donma-çözünmenin 90 çevrime kadar dayanım artışın olumsuz etkisi olmadığı, 90 çevrimde ise dayanımı azalttığı görülmüştür. %5 MgSO₄’e maruz bırakılan numunelerin dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer harç, PVA lifi, Poliamid lifi (PL), Süneklik kapasitesi, Uçucu kül

ABSTRACT

MS THESIS

STRENGTH AND DURABILITY PROPERTIES OF FIBER REINFORCED HIGH PERFORMANCE GEOPOLYMER MORTARS

Mustafa YILMAZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Co-Advisor: Doç. Oğuzhan ÖZTÜRK
2023, 55 Pages**

**Jury
Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN
Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
Doç. Dr. Arife AKIN**

The occurrence of this much CO₂ emission in Portland cement (PC), which is the owner of approximately 7-8% of the current CO₂ emission released all over the world and produced at very high temperatures (1400-1500°C), involves very serious risks. According to the latest data, approximately 105 million m³ of cement has been produced annually in our country. In order to prevent this situation, geopolymer mortars, which have a lower carbon footprint compared to Portland Cement, come to the fore. It is undeniable that geopolymer mortars use factory by-products as a base material and their compressive strength and durability properties can compete with normal concrete, but poses problems in terms of ductility and tensile strength. In this thesis, a geopolymer mortar was prepared with a mixture of “80% Class C Fly Ash + 20% Portland Cement” and polyamide fiber and pva fiber reinforcement were added to the mixture to improve its ductility. By increasing the deformation capacity of the mixture with the addition of fiber, it is aimed to create a multi-crack effect, that is, it is aimed that the material moves away from the rigid structure and gains ductility. In this context, the compressive strength, three-point bending strength, four-point bending strength and durability properties (freeze-thaw, sulfate resistance and SEM) of the prepared mixture were investigated. As a result, it was observed that the final compressive strength of the prepared mixture was 35.2 MPa, and the fibers added to the mixture increased the ductility capacity. While the flexural strength of the fiberless mixture was 3.67 MPa, this value increased to 5.6 MPa with fiber replacement. With the durability tests carried out, it was observed that freeze-thaw did not have a negative effect on the increase in strength up to 90 cycles, but decreased the strength in 90 cycles. It was observed that the strength of the samples exposed to 5% MgSO₄ decreased.

Keywords: Geopolymer mortar, PVA Fiber, Poliamid Fiber, Ductility capacity, fly ash

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu çalışma ve sosyal hayatımda bana yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e, yüksek lisansa başladığım andan itibaren bana güvendiği ve desteğini benden asla esirgemediği için sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Yüksek lisansa başlamam için beni teşvik eden, her ihtiyaç duyduğum durumda yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Yapmış olduğum bu çalışmada ihtiyacım olan her durumda bana yardım eden değerli Arş. Gör. Furkan TÜRK hocama çok teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatıma başladığım ilk günden bugüne kadar, desteklerini bir an olsun eksik hissettirmeyen, her durumda yanımda olan aileme sevgimi ve saygımı sunarım.

Mustafa YILMAZ
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Geopolimer Tanımı ve Tarihçesi	4
2.2. Geopolimer Harç ve Türleri.....	4
2.3. Geopolimer Kimyası ve Üretimi.....	6
2.4. Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri	9
2.4.1. Geopolimer harçlarda basınç dayanımı	9
2.4.2. Geopolimer harçlarda eğilme dayanımı.....	10
2.4.3. Geopolimer harçlarda yüksek sıcaklık direnci.....	10
2.4.4. Geopolimer betonda durabilite özellikleri	10
2.5. Geopolimer Harçların Avantajları	10
2.6. Geopolimer Harçların Kullanım Alanları	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Materyal	14
3.1.1. Uçucu Kül	14
3.1.2. Portland Çimentosu (PÇ)	15
3.1.3. Silis Kumu	15
3.1.4. Aktivatörler.....	16
3.1.5. Poliamid Lifi (PL).....	18
3.1.6. Polivinilalkol (PVA) Lifi	18
3.2. Yöntem.....	19
3.2.1. Karışımların hazırlanması ve ideal oranların belirlenmesi	19
3.2.2. Karışım esasları, kalıplama ve kür işlemleri.....	21
3.2.3. Sertleşmiş harç numuneler üzerinde yapılan mekanik deneyler.....	23
3.2.4. Sertleşmiş harç numuneler üzerinde yapılan durabilite deneyleri	25
3.2.4.1. Donma çözülme direnci tayini	25
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	28
4.1. Harçların Eğilme Dayanımı	28
4.1.1. Üç noktalı eğilme dayanımı	28
4.1.2. Dört noktalı eğilme dayanımı	30
4.2. Harçların Basınç Dayanımı.....	31
4.3. Harçların Donma-Çözünme Direnci	34

4.3.1. Geopolimer harçların donma çözülme etkisinde ağırlık kayıplarının değerlendirilmesi	34
4.3.2. Geopolimer harçların donma çözülme etkisinde dayanım kaybının değerlendirilmesi.....	35
4.4. Harçların Sülfat Direnci.....	37
4.5. SEM Deneyleri	38
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	42
5.1 Sonuçlar	42
5.2 Öneriler	43
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

KOH: Potasyum Hidroksit

K₂SiO₃: Potasyum Silikat

NaOH: Sodyum Hidroksit

Na₂SiO₃: Sodyum Silikat

Kısaltmalar

PÇ: Portland Çimentosu

PVA: Polivinil Alkol

PL: Poliamid Lifi



1. GİRİŞ

Her geçen gün ilerleyen teknolojinin hayatımızı kolaylaştırdığı herkesçe açık olarak bilinen bir gerçektir. Bu gelişen teknoloji ile daha fazla üretim yapıp daha fazla enerji sarfiyatı ortaya çıkmaktadır. Teknolojinin gelişmesi olumlu taraflarının yanında olumsuz birçok sonuç da doğurmuştur. Gelişen teknoloji ile küresel rekabet artmış, bütün ülkeler ellerindeki tüm kaynakları kullanarak maksimum üretim yapma gayesi gütmeye başlamışlardır.

Tarih boyunca gelişen her medeniyette olduğu gibi, günümüz medeniyet anlayışında da ülkede var olan ya da yeni yapılacak olan yapılar o ülkenin gelişmişlik seviyesini gösterir. İnşaat sektörünün bu denli gelişmesi, ana malzeme olarak kullanılan betonun daha fazla önem kazanmasını sağlamıştır. Ülkemiz beton üretimi konusunda Avrupa ülkeleri arasında ilk sırada yer almaktadır. Ülkemiz, ikinci sırada yer alan Almanya'dan 2 kat daha fazla beton üretmekte, dünyada ise Çin Halk Cumhuriyeti ve Amerika Birleşik Devletleri'nin ardından üçüncü sırada gelmektedir (THBB, 2019).

Yapılan araştırmalara göre dünya üzerindeki CO₂ salınımının %7-8'inin sadece çimento üretimi kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında çimentonun 1500°C gibi yüksek sıcaklıklarda üretiliyor olması aşırı enerji sarfiyatına neden olup, bu da çimento maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Hem ekonomik sebepler hem de doğaya verdiği zarar düşünüldüğünde çimentoya alternatif olarak kullanılabilecek bağlayıcı malzeme ihtiyacı doğmuştur (THBB, 2022).

Çimentoya alternatif olarak kullanılacak malzeme çevreye yararlı olmalı, bunun yanında da ekonomik kazanç sağlamalıdır. Bu durum bilim insanlarını var olan doğal kaynaklardan ya da başka endüstriyel üretimlerin sonucunda atık olarak ortaya çıkan malzemelere götürmüştür. Bu kapsamda tek başlarına bağlayıcılık özellikleri olmayan ancak, bir aktivatör yardımıyla bağlayıcılık özelliği kazanan puzolanik malzemeler ortaya fikir olarak atılmıştır. Volkanik tüf gibi doğal yapıya sahip puzolanlar ya da ferrokrom cürufu gibi yapay puzolanlar, NaOH, Na₂SiO₃, Al₂O₃ gibi aktivatörler ile aktivasyona girip, çeşitli kür şartlarında, yani oda sıcaklığı veya fırınlarda kürünü alarak bağlayıcı madde özelliği kazanabilmektedir.

Bu fikirlerden sonra 1978 yılında Davidovits tarafından ortaya atılan "Geopolimer Malzeme" tanımı kimya ve mühendislik alanlarının ilgisini çekmiştir. Öncülü olan Portland Çimentosu (PÇ) ile kıyaslandığı zaman Portland Çimentosu (PÇ) ile rekabet edebilecek mühendislik özellikleri olan bu malzemeler, Portland

Çimentosuyla (PÇ) kıyaslandığı zaman %80 daha az CO₂ salınımı yapmakta ve %60 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Geopolimer bağlayıcılarda, hidrasyon sonucunda C₃A ve Ca(OH)₂ gibi kimyasallar ortaya çıkmadığı için bu malzemelerin durabilite özellikleri Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla daha iyi durumda olduğu görülmüştür (Durak, 2019; Kantarcı, 2018; Palomo vd., 2007).

Uçucu Kül tabanlı geopolimer harçların çimento yerine kullanılması fikri, iyi derecede basınç dayanımı vermesi ve yeşil bir beton çeşidi üretilmesi açısından çok umut verici bir kavram oluşturmıştır. Küçük ölekte güzel sonuçlar alınmış olsa da büyük ölekte kullanım açısından üretilen betonun doğal kırılgeçirgenlik sorunu çözülüp daha sünek bir malzeme elde edilmesi ve malzemenin gerildikçe dayanımının artması gerekmektedir. Bu noktada betona lif takviye edilmesi bu amaca hizmet edecektir (Ohno ve Li, 2014; Yonar, 2014).

Bu noktada liflerin etkisinden biraz bahsetmek gerekirse, malzemelerin lif halleri, onların en gelişmiş halleridir. Aynı malzemenin büyük hacimli örneğine göre, çekme dayanımları ve elastisite modülleri genelde çok daha büyüktür (Shilang ve Qianghua, 2007; Yonar, 2014). Liflerin betona etkisi; yüksek taşıma kapasitesine sahip, sünek bir beton elde edilmesi, donatı korozyonunun önleildiği düzgün yüzeyli beton üretimi, etkin çatlak kontrolü, dayanıklılık, donatı işçiliğindeki önemli azalma gibi sıralanabilir.

Bu çalışmada elde edilecek uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarını sünek bir hale getirmek amacıyla PVA lifi kullanılacaktır. PVA liflerin diğer liflerden en önemli farkları PVA liflerin hidrofil özelliği göstermesidir. Bu durum hidrasyon ve kür sırasında matrisle arasında moleküler bağ kurulmasını sağlar. Bağ direnci, eğilme dayanımı ve yüksek elastisite modülü PVA lif katkılı betonların normal betonlara göre eğilme ve çekme dayanımı açısından yüksek performans göstermesini sağlar. İsviçre’de yapılan deneyler sonucunda PVA liflerin 20 yıl sonrasında dahi herhangi bir bozulmaya uğramadıkları gözlemlenmiştir. PVA lifler sudan daha yüksek yoğunluğa sahip olduklarından dolayı karıştırma, pompalama ve yüzey sonlama işlemleri gerçekleştirilirken karışım içerisinde stabil kalarak yüzeye çıkmazlar. Yüzey sonlama işlemleri gerçekleşirken yatay kaldıkları için pürüzsüz bir yüzey elde edilmesini sağlarlar. PVA liflerin ana maddesi, PVA reçinesi Amerikan Gıda ve İlaç Kurulu tarafından da onaylanmıştır. PVA’nın kimyasal yapısının ana temelleri karbon, hidrojen ve oksijenden meydana geldiği için, yanma sırasında dioksin ve amonyak gibi zararlı maddeler ortaya çıkmaz. PVA lifler diğer organik liflere göre daha yüksek dayanıklılık

ve elastisite modülü değerine sahiptirler. PVA liflerin yüksek eğilme dayanımına ve yüksek elastisite modülüne sahip olmaları nedeniyle çatlak ilerlemesine karşı çok iyi performans gösterirler. PVA lifler yüksek derecede lif-matris aderansına sahiptirler ve üretim sırasında liflerin yüzeylerinde yapılabilecek deformasyonlar ile lif-matris aderansının daha da güçlü kılınması mümkün olmaktadır (Yonar, 2014). Bu açıdan geleneksel liflerden ayrılmaktadırlar.

Geopolimer harçların basınç dayanımlarının ve durabilite özelliklerinin geleneksel betonlarla rekabet edecek özelliklerde olduğu bilinmekle birlikte, çimento esaslı malzemelerde olduğu gibi geopolimerler de gevrek özelliklere sahiptir. Bu durum özellikle süneklik ve çekme dayanımı alanlarda halihazırda geliştirilmesi gereken konular olarak öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında “%80 C sınıfı Uçucu Kül + %20 Portland Çimentosu (PÇ)” karışımı kullanılarak geri dönüşüm esaslı dayanıklı bir geopolimer elde etmek hedeflenmiştir. PVA ve Poliamid lifi (PL) takviyesi ile geliştirilecek geopolimer harçların çekme yükleri altındaki davranışı değiştirilecektir. Lif içermeyen veya geleneksel lifli geopolimerlerin sırasıyla gevrek kırılma ve şekil değiştirme yumuşaması davranışına karşılık, bu tez çalışmasında geliştirilecek geopolimer harçlar şekil değiştirme sertleşmesine sahip olması hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

1970'lerin sonlarında, geopolimerizasyon kavramının mucidi ve geliştiricisi olan Joseph Davidovits, birçok endüstriyel uygulama için kullanılan inorganik polimerik malzeme için "geopolimer" terimini kullanmıştır.

2.1. Geopolimer Tanımı ve Tarihçesi

Geopolimer kavramı, 1978 yılında Joseph Davidovits tarafından alüminosilikat inorganik polimerlerin tanımı olarak söylenmiştir. Aynı araştırmacının 1991 yılındaki araştırmasında “Geopolimerler, puzolonik veya alüminosilikat hammaddesinin, yüksek alkali çözeltisi ile sentezlenmesi sonucu oluşan malzemedir” tanımı yapılmıştır.

Aslında tanım 1978 yılında yapılmış gibi gözüke de, geopolimer betonun varlığı daha eski tarihlere dayanmaktadır. Antik harçların ve beton ürünlerinin üzerine tamir amaçlı yapılan Portland Çimentosu (PÇ) bazlı tamir harçlarının hızlı bir şekilde bozulması ve Portland Çimentosuna (PÇ) göre daha asidik, donma-çözölmeye karşı daha dirençli bir yapıda olduğu görölmüştür. (Davidovits, 2008; Demortier, 2004; Pacheco-Torgal, 2008).

Geopolimer kavramı kısaca, silisyum ve alüminyum bakımından zengin, yapay ya da doğal puzolan maddelerin alkali ile olan aktivasyonu neticesinde meydana gelen, üç boyutlu polimer zinciri yapısında olan malzemelerdir (Balun, 2019). Diğer adları “Alkali Aktive Edilmiş Çimento” ve “Alüminosilikat İnorganik Polimerler” olan bu malzemeler, alkali içerisinde çözönen silikon ve alüminyum tabanlıdırlar. Geopolimerlerin diğer malzemelerden ayıran özellikleri, geopolimer sentezin sırasındaki diğer değişkenler dışında, silisyum/alüminyum oranı, alkali metalin katyon tipi ile konsantrasyonu, kür rejimi ve su içeriği gibi etmenlere de bağlıdır (Aygörmez, 2018).

2.2. Geopolimer Harç ve Türleri

Geopolimer harçlar çok çeşitli malzemelerin alkali tuzlarla aktive edilmesi ile elde edilebilmektedir. Silisyum ve alüminyum içeriği yüksek olan her malzeme alkalilerle aktivasyona sokulabilmektedir (Pacheco-Torgal, 2008). Genel olarak üzerinde yoğunlaşılan madde grupları şu şekilde belirtilebilir:

- Kaolinitik kil
- Metakaolin malzemesi
- Uçucu kül
- Yüksek fırın cürufu
- Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün karışımı
- Metakaolin ve uçucu külün karışımı
- Metakaolin ve cüruf karışımı
- Kırmızı çamura cüruf karıştırılması

Literatürde sık sık kullanılan alkali tuzları ise şu şekildedir ("M" herhangi bir alkali madde, örneğin K, Na gibi),

- Kostik alkaliler, MOH
- Zayıf asitli tuzlar, M_2CO_3 , M_3PO_4 , M_2SO_3
- Silikat: $M_2O_nSiO_2$
- Alüminat: $M_2O_nAl_2O_3$
- Alüminosilikat: $M_2O_nAl_2O_3 \cdot (2-6) \cdot SiO_2$
- Güçlü asit tuzları: M_2SO_4

Davidovits (2008), yaptığı çalışmada sertleşme aşamasındaki geopolimerin pH değerindeki azalmanın da önemli olduğunu belirtmiştir. Geopolimerin ısıtma işlem sıcaklığı arttığı zaman, geopolimer hamurunun pH değerinin düştüğünü, 85°C'de pH 10,5 dolaylarında iken 700°C'ye yükseldiği zaman pH değeri 7,5 seviyesine düşmekte olduğunu söylemiştir. Bu ısıtma kür sıcaklığı, yüksek olduğu durumlarda pH seviyesini dengelemek için K_2O/SiO_2 molar oranının artırılması gerektiğini bildirmiş, geopolimer hamurunun ideal pH seviyesinin 10-12 arasında olduğunu belirtmiştir. pH seviyesi daha düşük olan geopolimerler geliştirmenin daha yaygın bir kullanım sağlayacağını söylemiş ve bazı geopolimer çeşitlerini aşağıdaki gibi sıralamıştır:

- Polisilikat, Polisiloksonat ve silikatlar (Si:Al=1:0)
- Kaolinit/hidrosodalit bazlı geopolimerler (Si:Al=1:1)
- Metakaolin bazlı geopolimer (Si:Al=2:1)

- Kalsiyum esaslı geopolimer (Si:Al=1, 2, 3)
- Kayaç bazlı geopolimer ($1 < \text{Si:Al} < 5$)
- Silis bazlı geopolimer ($\text{Si:Al} > 5$)
- Uçucu kül bazlı geopolimer
- Fosfat bazlı geopolimer
- Organik maden bazlı geopolimer

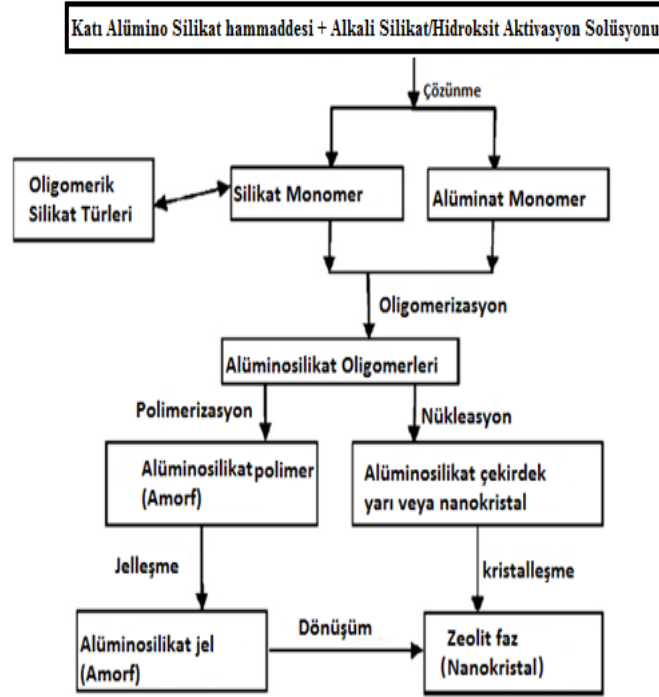
2.3. Geopolimer Kimyası ve Üretimi

Alkali yardımı ile aktive edilmiş bağlayıcıların oluşum reaksiyonu ve bu bağlayıcıların katılaşma olayının mekanizması tam olarak çözülememiş fakat hammadde ve alkali aktivatörün çeşidine bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir (Durak, 2019).

Geopolimerler, temelde iki ana bileşenden yani, alkali sıvılardan ve ince kuru tozlardan oluşurlar. Buradaki malzemelerden optimum oranlarda karışımlar hazırlanarak incelenir. Alkali bazlı sıvı olarak NaOH, KOH, Na_2SiO_2 gibi aktivatörler kullanılarak alümino silikat reaksiyonları neticesinde geopolimer malzemeler elde edilir. Ayrıca geopolimer malzemelerin fiziksel özellikleri incelendiği zaman, en mühim özelliği, fiziksel özellik olarak ayrıştırılmış ve çamura kıvamındaki katı atıkları çok az bir sürede yumuşatması özelliğidir. Fiziksel özelliklerine ek olarak, geopolimer malzemeler kimyasal etkilere karşı da oldukça dayanıklıdır. Bu malzemeler kimyasal etkilere karşı çok iyi bir asit direnci göstermektedir (Comrie vd., 1988; Kantarcı, 2013; Pacheco-Torgal vd., 2008).

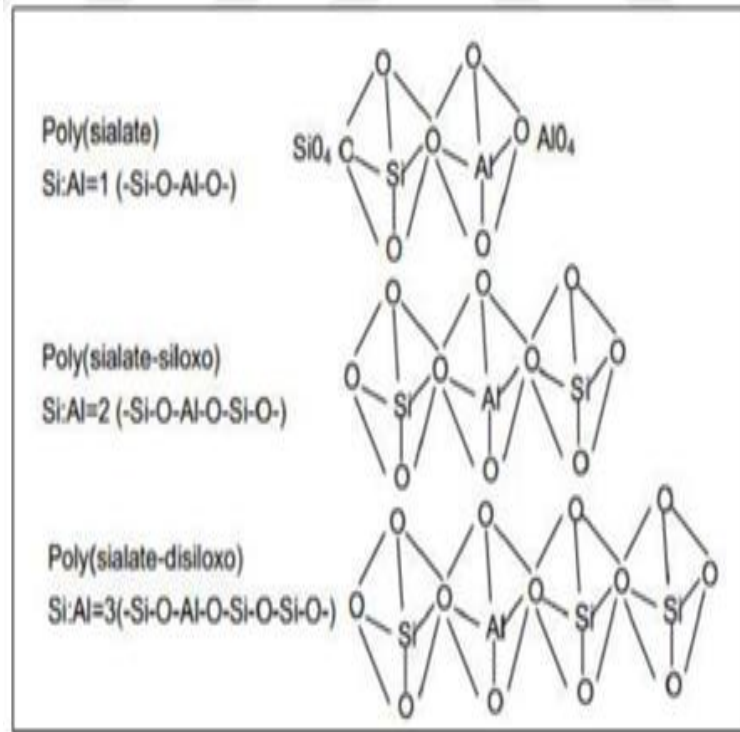
Karışımın içinde bulunan alkali tuzların da etkisiyle geopolimerizasyon, ekzotermik bir reaksiyon olmaktadır. Hammadde mineral kompozisyonu, incelik modülü, geopolimer malzemelerin gerek fiziksel gerekse kimyasal özelliklerini belirler. Bazı karışımların basınç dayanımının beklenenden daha düşük olurken, bazı karışımlarda uygun oranda Al/Si karışımı bulunduran ve serbest haldeki kalsiyum oranının düşük olduğu karışımlarda yüksek basınç dayanımlı ve dayanıklı malzemeler elde edilebilmektedir (Zeybek, 2009).

Geopolimerizasyon basamak şeması Şekil 2.1.'deki gibi gösterilebilir (Kantarcı, 2013; Pacheco-Torgal vd., 2008):



Şekil 2.1. Geopolimerizasyon reaksiyon basamakları (Kantarıcı, 2013; Pacheco-Torgal vd., 2008)

Geopolimer bağlarının görünümleri Şekil 2.2.’de verilmiştir (Davidovits, 1999):



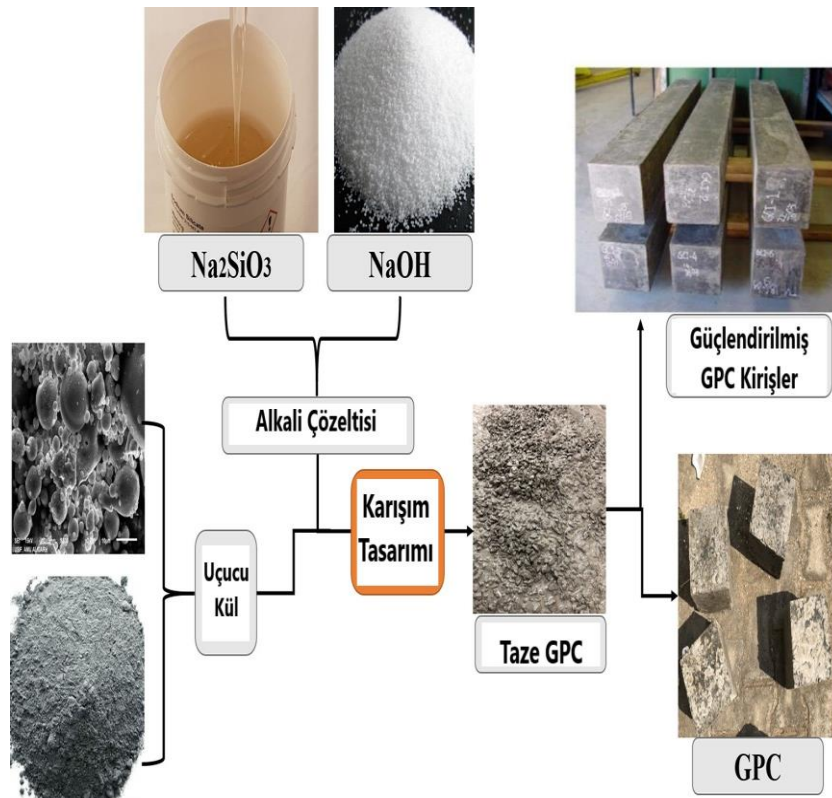
Şekil 2.2. Si/Al oranlarına göre bağların görünümü (Davidovits, 1999)

Bu çalışmada uygulanan geopolimerizasyon reaksiyonunu basitçe bir mekanizma ile şematize ederse, bu mekanizma Şekil 2.3.’te görülebilir:



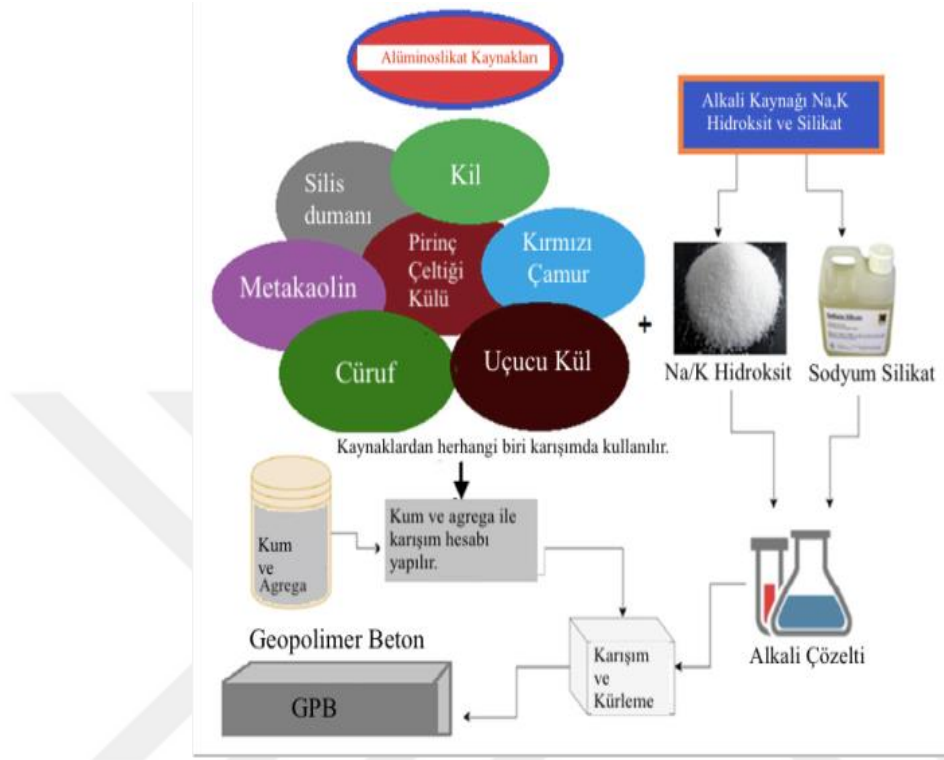
Şekil 2.3. Geopolimerizasyon şeması

Hassan ve ark. (2020), uçucu kül bazlı geopolimerleri incelediği çalışmasında uçucu küle elde edilen geopolimerlerin üretim şemasını Şekil 2.4.'teki gibi vermiştir:



Şekil 2.4. Hassan ve ark.(2020)'nın geopolimerizasyon şeması

Kuranlı (2020), farklı türdeki bağlayıcı ve lifler içeren geopolimer betonların mekanik özellikleri ve durabilite özelliklerini incelediği çalışmada, Sing ve Middendorf (2020)'a atıf yaparak geopolimer prosesini Şekil 2.5.'deki gibi vermiştir:



Şekil 2.5. Geopolimer prosesi (Kuranlı, 2020; Sing ve Middendorf, 2020)

2.4. Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri

2.4.1. Geopolimer harçlarda basınç dayanımı

Geopolimer karışımlar, prizinin ilk 4 saatlik bölümünde nihai basınç dayanımının yaklaşık olarak %70'ini kazanabilirler (Gümüş, 2016). Geopolimer betonlarda basınç dayanımındaki artış artan reaksiyon ürün miktarı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Reaksiyon sıcaklığı hızlandırıcı etki yapmış hammaddenin çözünmesini artırmıştır. Hammaddenin öğütülmesi sonucunda elde edilen ince tane çapı ve yüzey alanının artması geopolimerizasyonu hızlandırır ve daha güçlü geopolimer malzeme elde edilmesini sağlar. Kullanılan alkali aktivatör çeşidi fark etmeksizin, aktivatör yoğunluğundaki artış daha fazla silisyum ve alüminyum bağının çözünmesine neden olacak ve basınç dayanımını artıracaktır. Ancak bu belirli bir raddeye kadar devam etmekte daha sonrasında azalmaya başlayacaktır. Bu durumun sebebi ise alüminosilikat

jelinin çökmesine sebep olan fazla hidroksit iyonlarındandır (Bakharev, T., 2005; Cho vd., 2017; He vd., 2013; Ken vd., 2015; Somna vd., 2011).

2.4.2. Geopolimer harçlarda eğilme dayanımı

Bu dayanım türü, geopolimer harçlar adına en sıkıntılı sonuçları veren dayanım türüdür. Geopolimer harçların yoğun bir yapıya sahip olması basınç dayanımı açısından ne kadar güzel sonuçlar versede, gevrek yapı oluşturması sebebiyle eğilme dayanımında sorun teşkil etmektedir.

2.4.3. Geopolimer harçlarda yüksek sıcaklık direnci

Geopolimer malzemeler Portland Çimentolarına (PÇ) kıyasla, yüksek sıcaklıklara çok daha dayanıklı malzemelerdir. Çeşitlerin, kür koşullarına, içeriğinde bulunan katkılara göre değişmekle birlikte geopolimer malzemeler genel olarak 600°C gibi sıcaklıklara kadar çok kolay dayanabiliyor, oysa bu dayanım Portland çimentolarında (PÇ) ortalama olarak 200°C mertebesine ancak dayanabiliyor (Durak, 2019; Erdoğan, 2011; Görür, 2015).

2.4.4. Geopolimer betonda durabilite özellikleri

Kantarcı (2018) yaptığı çalışmada, Fernandez-Jimenez vd. (2007) ve Comrie vd. (1988)'e atıfta bulunarak, geopolimer betonların, sülfat, deniz suyu, asidik ortamlar ve alkali silika etkilerine karşı oldukça iyi dayanıma sahip olduklarını belirtmiştir.

2.5. Geopolimer Harçların Avantajları

Geopolimer betonun Portland çimentosuna (PÇ) göre daha iyi olduğu yönler aşağıda verilmiştir:

1. Hammadde kaynakları oldukça fazladır. Doğal puzolanlar doğada bolca olup, yapay kaynaklarda endüstriyel atıklardan kolayca elde edilebilir.
2. Enerji sarfiyatının azalmasını sağlar. Yüksek enerji tüketmeden üretilir.
3. Kolay bir şekilde hazırlanabilirler. Geopolimer malzemeler, alümino silikat reaktif materyalleri, güçlü alkali çözeltileri karıştırılıp oda

sıcaklığında sertleştirilerek üretilebilir. Üretimi Portland çimentosuna (PÇ) benzemektedir.

4. Hacim sabitliği iyi düzeydedir. Geopolimerler, Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla ortalama %80 oranında daha az rötre çatlağı yapar.
5. Yüksek dayanımları kısa sürede kazanırlar. Nihai basınç dayanımlarının %70'lik kısmını yaklaşık ilk 4 saatte kazanırlar.
6. Dayanıklılıkları yüksektir.
7. Yüksek sıcaklıklara dayanımları yüksek, ısı iletkenlikleri düşüktür.

2.6. Geopolimer Harçların Kullanım Alanları

Geopolimer karışımların çabuk dayanım kazanması, Portland çimentosu (PÇ) ile üretilen betonlara göre daha az maliyetli ve çevreye daha az zarar veriyor olması, yangın, ısı iletkenliği ve büzülme gibi şartlara karşı çok daha dayanıklı olmasından dolayı birden fazla alanda kullanılabilmesi mümkündür. Geopolimer bağlayıcılar genel olarak:

- Yapısal betonlar
- Duvar blok elemanları
- Elektrik direkleri ve gaz beton uygulamaları
- Beton kaldırım ve boru imalatı
- Petrol kuyuları
- Yüksek ısıya dayanıklı betonlar
- Sulama sistemi betonları ve dalga kıran betonları
- Tehlikeli radyoaktif alanlarda
- Döşeme betonları
- Temel betonlarında
- Prefabrike yapıların imalatı gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Geopolimer betonların, yıllar geçtikçe dünyanın birçok yerinde uygulaması arttığı söylenebilir. Avustralya'da 2013 yılında yapılmış olan yapılarda 40.000 m³ geopolimer beton kullanıldığı bildirilmiştir. Kullanım alanı olarak; hazır beton, normal

beton, hafif beton, beton borular, betonarme, harç gibi uygulamalarla geniş bir yelpazeye sahiptir ve geopolimer bağlayıcılarla giderek artmaktadır. (Provis, 2017).

Avustralya’da 28 Eylül 2014 tarihinde tamamlanan Brisbane West Wellcamp Havaalanı, dünyanın en yeşil havaalanı olma özelliğine sahiptir. Bu proje, dünyanın en büyük geopolimer beton projesi olup, mühendislikte çok önemli bir kilometre taşı konumundadır. Bu havaalanı yaklaşık 40.000 m³ ile inşa edilmiştir. (100.000 ton) geopolimer beton, bu sayı dünyadaki en büyük uygulaması konumundadır. Geopolimer betonun, yüksek bükülme gerilme mukavemeti, düşük büzülme ve işlenebilirlik özellikleri nedeniyle bu inşaat yöntemine çok uygun olduğu tespit edilmiştir. Dönüş düğümü, apron ve taksi yolu uçak kaldırımları için kullanılan 435 mm kalınlığındaki ağır hizmet tipi geopolimer beton, Toowoomba-Wellcamp BWWA havaalanı ile Hong Kong arasındaki düzenli hava trafiğine yeterli gelmektedir.

Davidovits (1994) çalışmasında sürekli kullanıma açık olan yerlerin yani örnek vermek gerekirse havaalanı gibi, onarılmasında geopolimer betonlar sık sık kullanılmaktadır. Aynı yazarın 2008’deki çalışmasında geopolimerlerin, süsleme, heykeltçilik, taşıyıcı prekast yapı endüstrisi ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, nükleer atıkların depolanması, yol kaplamaları, zemin iyileştirme, ağır hava koşullarına ve yangına dayanıklı haldeki duvar kaplaması üretimlerinde, güçlendirme çalışmalarında, tarihi yapılarda taşıyıcı sistemlerin yenilenmesi çalışmalarında, nükleer santraller, uçak endüstrisinde kullanılabildiğini belirtmiştir. Ek olarak da bu teknolojinin Mısır piramitlerinin araştırılan gizemini, Roma ve Horasan harçlarının kimyasal analizini aydınlatılabilir olduğunu vurgulamıştır.

Davidovits (1999) yaptığı çalışmada, Si/Al oranlarına göre geopolimer malzemelerin kullanılabileceği uygulama alanlarını Çizelge 2.1’de vermiştir.

Çizelge 2.1. Geopolimerlerin Si/Al oranına göre kullanım alanları

Si/Al oranı	Uygulama alanı
1	Seramik, tuğla ve yangından korunma ürünlerinde
2	Düşük CO ₂ içeren çimentolar, beton, radyoaktif ve toksik atıkların depolanmasında
3	Isıya dayanıklı kompozitler, döküm ekipmanları, cam elyafi kompozitler
>3	Endüstri için sızdırmaz malzemeler
20 < Si/Al < 35	Yangına dayanıklı ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

Geopolimer beton kullanılarak yapılan büyük çaplı çalışmalardan biri de Ukrayna’da bulunan toplu konut yapılarıdır. Bu konutlar, demir-çelikten elde edilen atığın alkali aktivasyonu sonucu elde edilen geopolimer bağlayıcı harç ile 1960 yılında

7,5 MPa tasarım dayanımına göre inşa edilmiş, 2012’de alınan karot örneklerine uygulanan basınç deneyi sonucu, dayanımının 14 MPa olduğu görülmüştür (Hlavacek, 2014).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Uçucu Kül

Bu çalışmada, Konya Çumra ilçesinden temin edilmiş olan C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılmış olan uçucu küle ait kimyasal bileşim oranları ve miktarları ile fiziksel özellikler ise Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Kullanılan Uçucu Külün görseli ise Şekil 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bileşik Adı	Miktar (%)	Bileşik Adı	Miktar (%)
SiO ₂	35.5	MgO	2.33
Al ₂ O ₃	12.95	Na ₂ O	0.15
Fe ₂ O ₃	11.78	K ₂ O	1.44
S+A+F	60.23	SO ₃	13.73
CaO	17.76	Organik Karbon	1.37



Şekil 3.1. Uçucu kül

3.1.2. Portland Çimentosu (PÇ)

Harç karışımlarının hazırlanmasında, Konya Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimentoya ait bileşen özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir. Harç karışımında kullanılan çimentonun görseli Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan çimentonun kimyasal içeriği

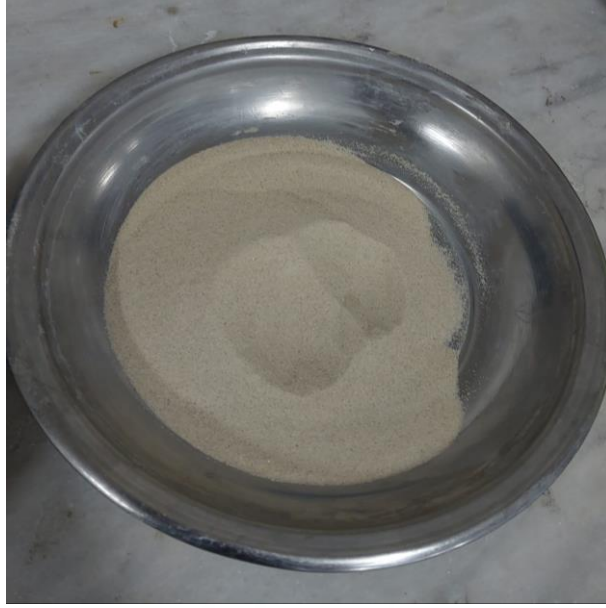
Madde	Miktar (%)	Madde	Miktar (%)
SiO ₂	18,08	K ₂ O	0,75
Al ₂ O ₃	4,27	Na ₂ O	0,29
Fe ₂ O ₃	3,59	C ₃ S	42
CaO	62,67	C ₂ S	40
MgO	1,06	C ₄ AF	11
SO ₃	3,42	C ₃ A	7



Şekil 3.2. Portland çimentosu (PÇ)

3.1.3. Silis Kumu

Bu çalışmada, agrega olarak silika kumu kullanılmıştır. Maksimum tane çapı 1mm olan kumun su emme kapasitesi %0.3'tür. Harç içinde kullanılan Silis Kumunun fotoğrafı Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Silis kumu

3.1.4. Aktivatörler

Bu tez çalışmasında alkali aktivatör olarak katı halde bulunan sodyum hidroksit ve sıvı halde bulunan sodyum silikat kullanılmıştır. Bu aktivatörlerin özellikleri sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.1.4.1. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Bu çalışmada, alkaliyi aktive etmek için katı haldeki sodyum hidroksit kullanılmıştır. Katı sodyum hidroksitin özellikleri Çizelge 3.3.'te verilmiştir. Sodyum Hidroksitin görüntüsü ise Şekil 3.4.'te eklenmiştir.

Çizelge 3.3. Sodyum hidroksitin özellikleri

Bileşik Adı	Değer
Yoğunluk	2.13 g/cm ³
Kaynaması	1388°C
Erimesi	318°C
Moleküler Ağırlığı	39.977 g/mol
Rengi	Beyaz ve katı



Şekil 3.4. Katı NaOH'ın su ile aktive edilmiş şekli

3.1.4.2. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)

Bu tez çalışmasında, alkali aktivatör madde olarak sıvı halde sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum silikata ait özellikler Çizelge 3.4.'te verilmiştir. Sodyum Silikatın görseli Şekil 3.5.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sodyum silikatın özellikleri

Bileşik Adı	Değer
Görünüş	Renksiz, Berrak Sıvı
Sodyum Oksit (Na_2O)	%13,40
Silis (SiO_2)	%26,52
Bome (20°C)	44.50 (Be)
Modül	2,03
Dansite (°C)	1,443 (g/vm^3)



Şekil 3.5. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)

3.1.5. Poliamid Lifi (PL)

Bu çalışmada, üretilen harçlara süneklik kazandırmak amacıyla 2 çeşit lif kullanılmıştır. Bunların ilki olan Poliamid Lif (PL), Kordsa Kratos'tan temin edilmiş olup özellikleri Çizelge 3.5.'te verilmiştir. Bu lifin görseli ise paketten çıkmış hali ve liflerine ayrılmış hali olmak üzere Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Poliamid özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	gr/cm ²	1,14
Uzunluk	Mm	6
Filament Yarıçapı	Mikron	27
Çekme Gerilmesi	Mpa	900
Kopma Anındaki Uzama	%	17,55
Erime Noktası	°C	260
Alkali Direnci	Çok İyi	
Korozyon Direnci	Çok İyi	
Lif Türü	Monofilament (Tek Lif)	



Şekil 3.6. Paketten çıkmış halde poliamid lif (PL)



Şekil 3.7. Lifleri açılmış poliamid lifi (PL)

3.1.6. Polivinilalkol (PVA) Lifi

Bu tez çalışması kapsamında, geleneksel liflere karşılık yeni gelişen liflerin harçlara olan etkisi araştırılmak istenmiştir. Bu kapsamda PVA lifi kullanılması en

önemli nedeni, bu liflerin yüzey alanlarının ağırlıkça %1,2'si su itici bir yağ tabakası ile kaplı olması ve bu nedenle harç karışımı ile lif arasındaki ara yüzeyden ideal özellikler elde etmektir. Bu kapsamda çalışmada kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. PVA lifi özellikleri

Nominal Dayanım (Mpa)	Görünen Dayanım (Mpa)	Çap (mm)	Boy (mm)	Elastisite Modülü (Gpa)	Kopma-Uzama Oranı (%)	Özgül Ağırlık
1620	1092	39	8	42.8	6	1.3

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışımların hazırlanması ve ideal oranların belirlenmesi

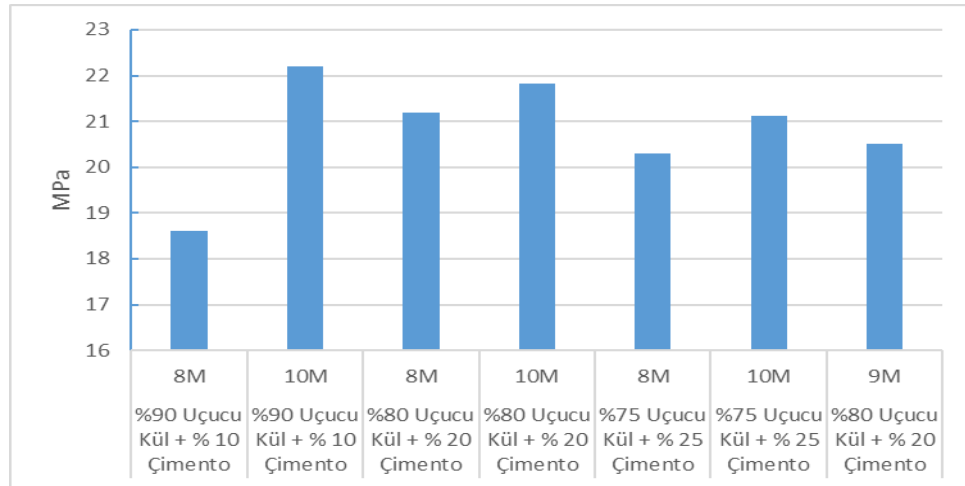
Tez çalışması kapsamında, işlenebilirlik ve mekanik özellikler bakımından ideal olan oranları belirlemek için ön deneyler yapılmıştır. Literatür araştırmaları sonucunda alkali aktivatör molaritesinin, karışımın daha ekonomik ve sürdürülebilir olması açısından en ideal miktarının 8-10 M olduğu görülmüştür. Bu bilgi ışığında yapılan ön deneylerde molarite bu standartta kabul edilmiştir. Daha sonrasında, bağlayıcı malzemeler olan Uçucu Kül ve Portland Çimentosu (PÇ) ön deneyler kapsamında farklı oranlarda karıştırılarak en ideal olan oran bulunmaya çalışılmıştır. Bu iki durum değerlendirilerek, “İdeal Molarite Oranı + İdeal Bağlayıcı Karışımı” bulunmaya çalışılmıştır.

Ön Deneyler kapsamında hazırlanan karışımlar, 40x40x160 mm ebatlarında numuneler halinde dökülmüş, Üç Noktalı Eğilme Dayanımı Deneyi ve Basınç Dayanımı Deneyi yapılmıştır. Bahsedildiği üzere geopolimer harçlar yüksek basınç dayanımları vermesine rağmen hızlı reaksiyona girmeleri gevrek yapıya sahip olmalarına neden olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada bu gevrek özellikleri gidermek için karışıma lif takviyesi yapılması öngörülmüştür. Bu kapsamda hazırlanan karışımlarda matris içerisinde bulunan liflerin artan yükü matrise transfer etmesi ve çoklu çatlaklar oluşturarak betonun şekil değiştirme kapasitesini artırmak amaçlanmıştır. Yapılan ön deneylerde, harçlar lif takviyesiz olarak hazırlanmış olup nihai basınç dayanımları ve

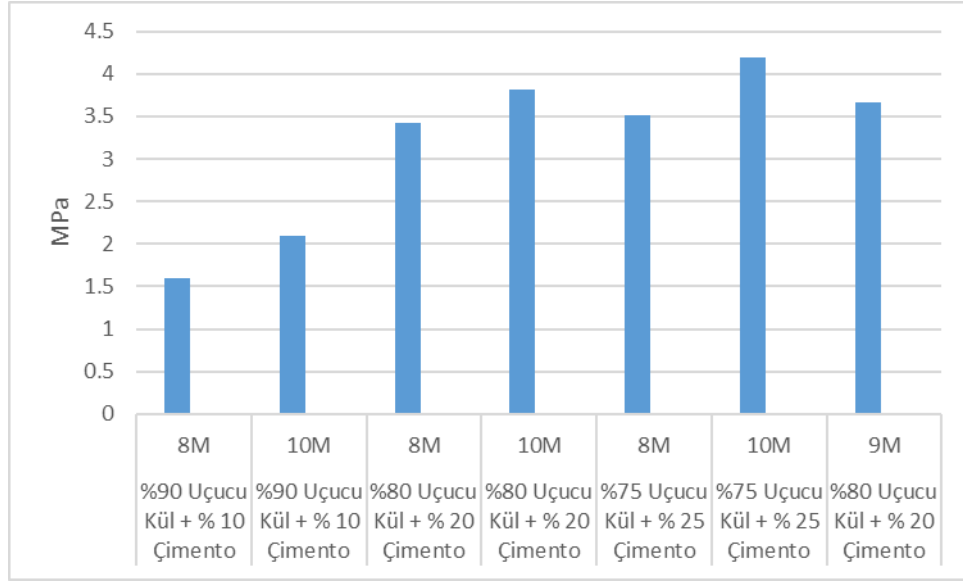
eğilme dayanımları Çizelge 3.7.'de gösterilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda mekanik deneyler açısından hemen hemen tüm karışımlar denk sonuçlar vermiş, basınç ve eğilme dayanım değerleri belirli bir standart seviyesinde kalmıştır. Bu nedenle tezin geri kalan kısmında kullanılacak olan ideal karışım oranını belirlerken, karışımın işlenebilirliği yani karışım hazırlanırken kolay karışması, kalıba yerleştirirken rahatlıkla yerleştirilmesi ve ardından gerçekleştirilen sıkıştırma işleminin yapılabilmesi sonucunda da minimum boşluklu malzeme elde edilmesi gibi şartlar göz önüne alındığında, ön deneylerdeki en ideal olan oranın deneme yanılma yöntemiyle “9 Molarite + (%80 Uçucu Kül + %20 Portland Çimentosu (PÇ))” karışımı olduğu bulunmuştur. “%90 Uçucu Kül + %10 Portland Çimentosu (PÇ)” karışımında eğilme dayanımının düşük olması sebebiyle, “%75 Uçucu Kül + % 25 Portland Çimentosu (PÇ)” karışımından da uçucu kül seviyesinin düşüklüğü nedeniyle tercih edilmemiştir. Çalışmanın ön deney aşaması tamamlanıp, lif takviyeleri bu orandaki karışıma uygulanmış ve etkisi incelenmiştir. Ön deneylerin sonucu elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 3.7.'de, eğilme dayanımları ise Şekil 3.8.'de verilmektedir.

Çizelge 3.7. Ön deney çalışmaları

Karışım		Basınç Dayanımı (Mpa)	Eğilme Dayanımı (Mpa)
Bağlayıcı Malzeme	Molarite		
%90 Uçucu Kül + %10 Çimento	8M	18,6	1,6
%90 Uçucu Kül + %10 Çimento	10M	22,19	2,1
%80 Uçucu Kül + %20 Çimento	8M	21,2	3,4
%80 Uçucu Kül + %20 Çimento	10M	21,82	3,8
%75 Uçucu Kül + %25 Çimento	8M	20,3	3,5
%75 Uçucu Kül + %25 Çimento	10M	21,12	4,2
%80 Uçucu Kül + %20 Çimento	9M	20,5	3,7



Şekil 3.7. Ön deney basınç dayanımı değerleri



Şekil 3.8. Ön deney eğilme dayanımı değerleri

3.2.2. Karışım esasları, kalıplama ve kür işlemleri

Bu tez çalışmasında, bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi “%80 Uçucu Kül + %20 Çimento” karışımlı bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Karışımında ilk olarak 600 gr Uçucu Kül ve 200 gr Portland Çimentosu (PÇ) öncelikle karıştırıcıya eklenmiş ve 2 dakika süre ile birlikte karıştırılarak kuru karışım elde edilmiştir. Daha sonra, önceden hazırlanmış kimyasal aktivatörler olan NaOH ve Na₂SiO₃’ten 9M olarak hazırlanan karışım geopolimer hamuru oluşturmak amacıyla karışıma eklenmiş ve karıştırılmıştır. Burada şunu belirtmek gerekir ki, katı halde buluna NaOH bir gün önce su ile karıştırılarak işleme alınmak için soğumaya bırakılmış, ertesi gün üzerine Na₂SiO₃ ilave edilen karışım bu şekilde yine 1 saat dinlenmeye bırakılmış ve sonrasında kuru karışıma eklenip 2 dakika süre ile karıştırılarak geopolimer hamur elde edilmiştir. Elde edilen geopolimer hamura geopolimer harç elde etmek amacıyla 190 gr Silika Kumu eklenmiş ve lifsiz harç hazır hale gelmiştir. Hazırlanan karışıma daha önce iyice ayrıştırılarak tamamen lif haline getirilen poliamid lif (PL) (Şekil 3.9.) ve polivinil alkol lifi (Şekil 3.10.) hacimce %2 olacak şekilde ilave edilmiş ve harçlar tamamen hazır hale getirilmiştir. Karışım prosedürü tamamlandıktan sonra, kalıplar hazırlanmış ve numunelerin kolayca kalıplarından çıkarılması için kalıplar iyice yağlanmıştır. Hazırlanmış olan harç kalıplara yerleştirilmiş (Şekil 3.11.) ve sonrasında karıştırma işlemi sırasında oluşan boşlukları gidermek ve kalıba tam yerleşimi sağlamak için sarsma tablası kullanılmıştır. Bu çalışmada, 4 noktalı eğilme deneyi hariç geride kalan tüm deneyler için

40x40x160 mm boyutlarındaki prizmalar kullanılmış olup, 4 noktalı eğilme deneyi için 50x75x360 mm ebatlarındaki numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere daha gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla oda sıcaklığında kürleme işlemine tabii tutulmuştur. Numuneler, oda sıcaklığını korumak ve fazla su kaybını engellemek amacıyla poşetlere konularak muhafaza edilmiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.9. Hazırlanmış PL



Şekil 3.10. Paketlenmiş pva lifi



Şekil 3.11. Kalıba yerleştirilmiş karışım



Şekil 3.12. Karışımları oda sıcaklığında kürlenmesi

3.2.3. Sertleşmiş harç numuneler üzerinde yapılan mekanik deneyler

Sertleşmiş harçların mekanik özelliklerini belirlemek için, TS EN 196-1'e göre 40x40x160 mm ve 50x75x360 mm boyutlarında harç numuneler üretilmiştir. Hazırlanan karışımlar yağlanmış kalıplara alınmış ve 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılan numuneler oda sıcaklığında normal şartlar altında kür edilmeye bırakılmıştır.

3.2.3.1. Eğilme dayanımı tayini

Bu çalışma için hazırlanan geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı belirlenmesi için TS EN 1015-11 2020'ye uygun olarak eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Üretilmiş olan geopolimer harçların eğilme dayanımlarının tespit edilebilmesi için 2 farklı eğilme deneyi yapılmıştır. 40x40x160 mm boyutlarında numuneler kullanılarak 3 noktalı eğilme deneyi (Şekil 3.13.) ve 50x75x360 mm boyutlarındaki numuneler kullanılarak ise 4 noktalı eğilme deneyi (Şekil 3.14.) yapılmıştır. Her bir deney türü için üçer tane numune hazırlanmıştır. Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulacak her numune mesnetlere uygun olarak yerleştirilmiştir. Yükleme esnasında, cihazın yükleme başlığı numunenin tam orta noktasına etki etmiş, mesnetler arası mesafe 3 noktalı eğilme için 10 cm ve yükleme hızı 0.50 kN/s sabit tutulmuş olup (Şekil 3.15.), 4 noktalı eğilme deneyinde de yine mesnetler arası mesafe 10 cm ve yükleme hızı 0,50 kN/s olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.13. 40x40x160mm³ prizma numune



Şekil 3.14. 50x75x360mm³ prizma numune



Şekil 3.15. Üç noktalı eğilme deneyi

3.2.3.2. Basınç dayanımı tayini

Geopolimer harçların basınç mukavemetinin belirlenmesi işlemi yine TS EN 1015-11'e uygun olarak yapılmıştır. Basınç dayanımı için ekstra numune üretilmemiş olup 3

noktalı eğilme deneyi için üretilmiş olan 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler ile eğilme dayanımı belirlendikten sonra numuneler iki parçaya bölünmüştür. Kalan 40x40 mm prizmalar basınç dayanımı cihazında yükleme hızı 1.50 kN/s olacak şekilde basınç dayanım testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.16.). Harç numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına bakılmıştır.



Şekil 3.16. Basınç Dayanımı deneyi

3.2.4. Sertleşmiş harç numuneler üzerinde yapılan durabilite deneyleri

Bu çalışmada numunelerin mekanik özelliklerine bakıldıktan sonra durabilite özellikleri incelenmiştir. Burada uygulanan testler aşağıdaki bölümlerde mevcuttur.

3.2.4.1. Donma çözülme direnci tayini

Bu deneyde bilindiği üzere temel amaç, mevcut üretilen harçların donma çözülme etkisine karşı direncini tayin etmektir. 40x40x160 mm boyutlarında hazırlanan numuneler, 28 Gün boyunca diğer numuneler gibi oda sıcaklığında kürde bekletilmiştir. ASTM C666 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde numuneler 30, 60 ve 90 çevrime maruz bırakılmıştır. Her bir çevrimde 4 saat donma ve ardından 4 saat çözülme olacak şekilde hazırlanan deneyde numuneler -20 °C'de buzlukta donma etkisine bırakılmış olup (Şekil 3.17.) +20 °C'de ise ortamda çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Çevrimler başlamadan önce tartılan numuneler, çevrimler bittikten sonra tekrar tartılmış ve

ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Çevrimler sonrası numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarına bakılarak donma çözülme etkisinin mekanik özelliklere olan etkisi tayin edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.17. Donma çözülme deneyi numuneleri

3.2.4.2. Sülfat etkisi deneyi

Sülfat direnci tayini için hazırlanmış olan 40x40x160 mm numuneler magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi ile kür edilmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisi hazırlanırken labaratuvarında bulunan şebeke suyu kullanılmış olup, %5 magnezyum sülfat için 1 litre suya 50 gr magnezyum sülfat tuzu karıştırılarak çözelti hazırlanmıştır. Oda sıcaklığında kür edilen numuneler daha sonra 28 gün boyunca hazırlanmış olan magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiştir. 28 gün sonunda numunelere eğilme ve basınç dayanımı tayini için deneyler yapılmış ve referans numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.18.'de magnezyum sülfata maruz kalan numuneler görülmektedir.



Şekil 3.18. Sülfat etkisine maruz kalan numuneler

3.2.4.3. SEM analizi

%80 Uçucu Kül + %20 Portland Çimentosu (PÇ) bazlı karışımın mikroyapı analizi yapılması için mevcut numuneler kullanılmıştır. Mevcutta bulunan Poliamid lif (PL) karışımli numuneler SEM görüntüleri alınarak deney gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmaları Hitachi-SU 1510 SEM cihazı ile Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde önceki bölümlerde anlatıldığı gibi hazırlanmış olan geopolimer harç üzerinde yapılan mekanik deneyler (3 noktalı eğilme, 4 noktalı eğilme ve basınç deneyleri) ve durabilite deneylerinin (donma-çözülme, sülfat direnci ve sem-eds deneyleri) sonuçları verilmiştir.

4.1. Harçların Eğilme Dayanımı

Geopolimer harçlar yüksek basınç dayanımları vermelerine rağmen hızlı reaksiyona girmeleri, çabuk dayanım kazanmaları gibi sebeplerle gevrek yapıya sahiplerdir. Bu çalışmadaki ana amaçlardan biri de bu sorunun üzerine giderek, hazırlanan geopolimer harca süneklik kazandırmak olmuştur. Bu kapsamda hazırlanan karışımlarda matris içerisinde bulunan liflerin artan yükü matrise transfer etmesi ve çoklu çatlaklar oluşturarak betonun şekil değiştirme kapasitesini artırmak amaçlanmıştır. Karışımlarda 2 tür lif kullanılmıştır. Geleneksel lifler ile nasıl bir sonuç alındığını görmek amacıyla, Poliamid lif (PL) ile bir karışım yapılmış ve bu karışımların 3 noktalı eğilme dayanımlarına bakılmış bu kapsamda 40x40x160 mm numuneler hazırlanmış ve oda sıcaklığında kürlenmiş olup 3, 7, 28, ve 90. günlerde eğilme testine tabii tutulmuştur. Tezin asıl amacı olan yeni nesil liflerden olan polivinil alkol karışumlu lifler ise, maliyetinin fazlalığı nedeniyle sadece 4 noktalı eğilme deneylerinde kullanılmış ve sünekliği incelenmiştir. Bu deney için ise, 50x75x360 mm ebatlarında numuneler hazırlanmış ve yine oda sıcaklığında kürlenmiştir.

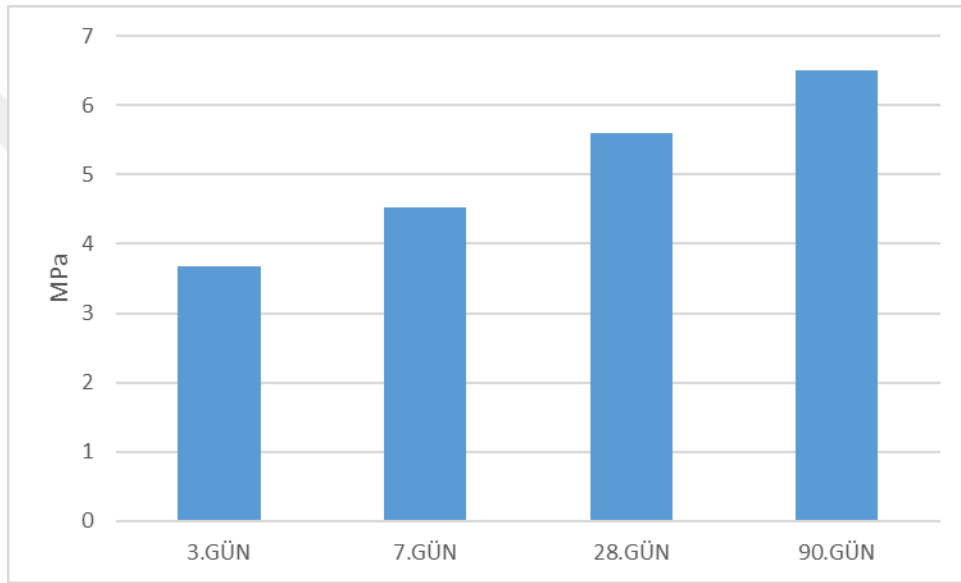
4.1.1. Üç noktalı eğilme dayanımı

Bu deney kapsamında, daha önce belirtildiği üzere geleneksel liflerin bu karışımda nasıl sonuçlar vereceği araştırılmak ve yeni nesil lifler ile karşılaştırılmasını yapmak amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucu eğilme dayanımının geopolimerizasyon süresi arttıkça arttığı, bununla beraber lifleri karışım içerisinde stabil ve eş dağılımlı olarak dağıtmanın eğilme dayanımını artırdığı görülmüştür. Eğilme dayanımına ilişkin veriler Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Bu çizelgenin grafik hali ise Şekil 4.1.'de sunulmuştur. Bununla beraber poliamid lif (PL) katkılı betonun nihai dayanım olan 28. Gündeki eğilme dayanımı ile lifsiz karışımın nihai eğilme

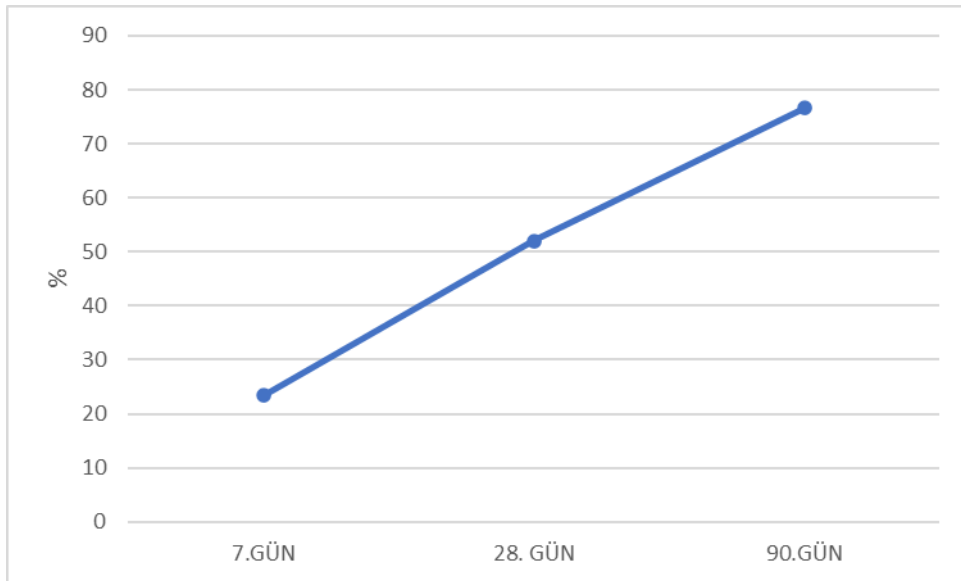
dayanımıyla yani 3,67 MPa ile karşılaştırılması ve yüzdesel artış oranı Şekil 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Eğilme deneyi sonuçları

EĞİLME DAYANIMI	
NUMUNE	Mpa
3.GÜN	3.67
7.GÜN	4.53
28.GÜN	5.6
90.GÜN	6.5



Şekil 4.1. Poliamid lif (PL)katkılı betonun günlere göre eğilme dayanımları



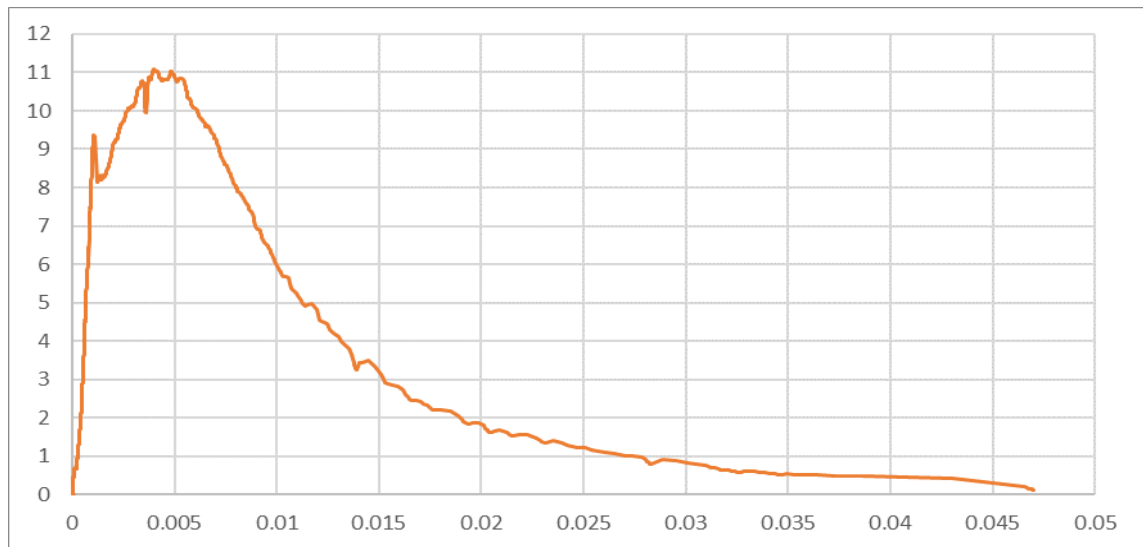
Şekil 4.2. Poliamid lif (PL) katkılı betonun lifsiz karışıma göre dayanım artış yüzdesi

Grafikte de görüldüğü üzere lif katkısı 3. Günde yüzdesel bazda çok az bir artış gözlemlenmişken, 7. Günden itibaren eğilme dayanımını gözle görülür biçimde artırmaya başlamıştır. Bu oran 7. Günde %23.43 iken, 28. Günde %52.05 oranında artışa ulaşmış olup en yüksek artış ise % 76,6 ile 90. Günde gerçekleşen eğilme dayanımında görülmüştür. Lif katkısının eğilme dayanımına olan pozitif katkısı bu deney kapsamında bir kere daha görülmüştür.

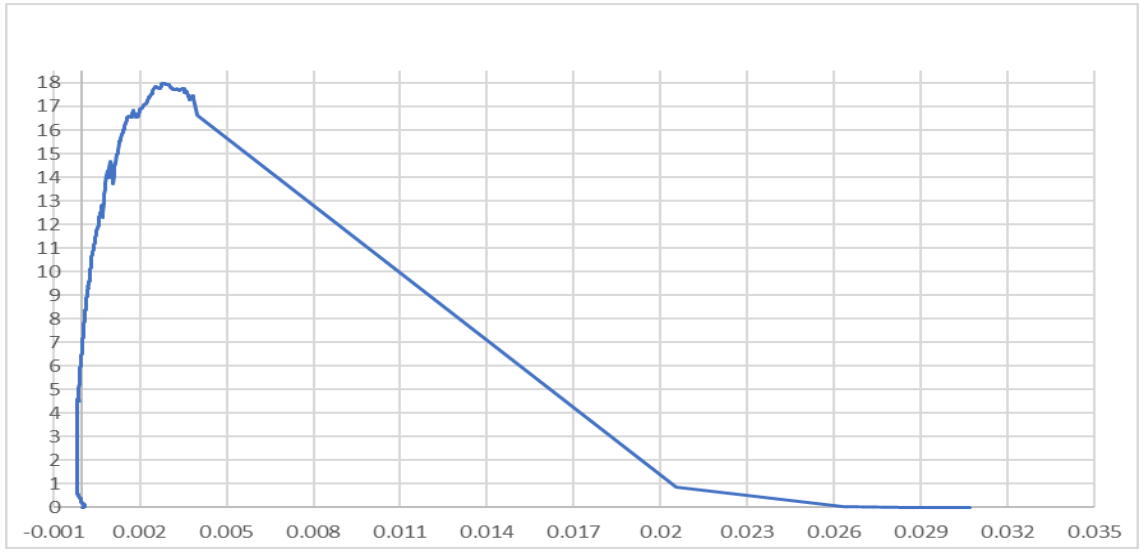
4.1.2. Dört noktalı eğilme dayanımı

Tez çalışması kapsamında yapılan bu deney, lifsiz karışım için yapılmamış olup poliamid lifli (PL) karışım ve PVA lifli katkılı karışım için ayrı ayrı yapılmıştır. Buradaki temel amaç daha önce de belirtildiği gibi geleneksel liflerin harca kattığı süneklik ile su itici yağ ile kaplı liflerin harca kattığı sünekliği karşılaştırmak ve bu katkıların eğilme dayanımına olan katkısını incelemektir. Hazırlanan 50x75x360 mm ölçülerindeki numuneler Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi 4 noktalı eğilme cihazına yerleştirilmiştir. Her mesnet arasında 10 cm olacak şekilde hazırlanan düzenekte numunelerde yük-deplasman ilişkisi incelenmiş olup buradan alınan verilerle malzemelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri çıkarılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda poliamid lif (PL) içeren karışımda meydana gelen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.4.'te verilmiş olup PVA lif katkılı karışımın gerilme şekil değiştirme grafiği ise Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Poliamid lif (PL) katkılı harcın gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.5. PVA katkılı harcın gerilme şekil değiştirme grafiği

Burada Portland Çimentosunun (PÇ) gerilme şekil değiştirme grafiği ile kıyaslandığı zaman, her iki lif için de hazırlanan harcın sünekliğini artırdığı söylenebilir. Hazırlanan harçlar akma sınırına ulaştıktan sonra yük taşımaya devam etmiş, kopma gerçekleşikten sonra ise yani taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra taşıdığı yük azalmasına rağmen numuneler deplasman yapmaya devam etmiştir. Buradan numunelerin hedeflendiği gibi süneklik sınırını aştıkları, geopolimer malzemelerin genel sorunu olan gevrek davranıştan lif katkıları sayesinde uzaklaştığı, daha sünek bir davranış sergilediği görülmektedir. Burada iki lif türü karşılaştırıldığında, PVA lif katkılı karışım poliamid lif (PL) katkılı karışıma kıyasla daha yüksek bir gerime kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Her iki malzemede belirtildiği gibi kopma davranışından sonra kırılmamış sünek davranmıştır. Kopma olayı sonrası davranışta ise, poliamid lif (PL) katkılı karışımın birim yer değiştirme kapasitesinin, poliamid lif (PL) katkılı karışıma kıyasla daha yüksek olduğu, daha sünek bir davranış gösterdiği görülmektedir.

4.2. Harçların Basınç Dayanımı

Bu dayanım testi için, daha önce 3 noktalı eğilme deneyi için hazırlanmış olan 40x40x160 mm ebatlarındaki numunelerin eğilme deneyi sonucu ikiye bölünmesi ile elde edilmiş olan 40x40 mm kesit alanlı numunelerin basınç yükleri altındaki davranışını incelemek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin 3, 7, 28

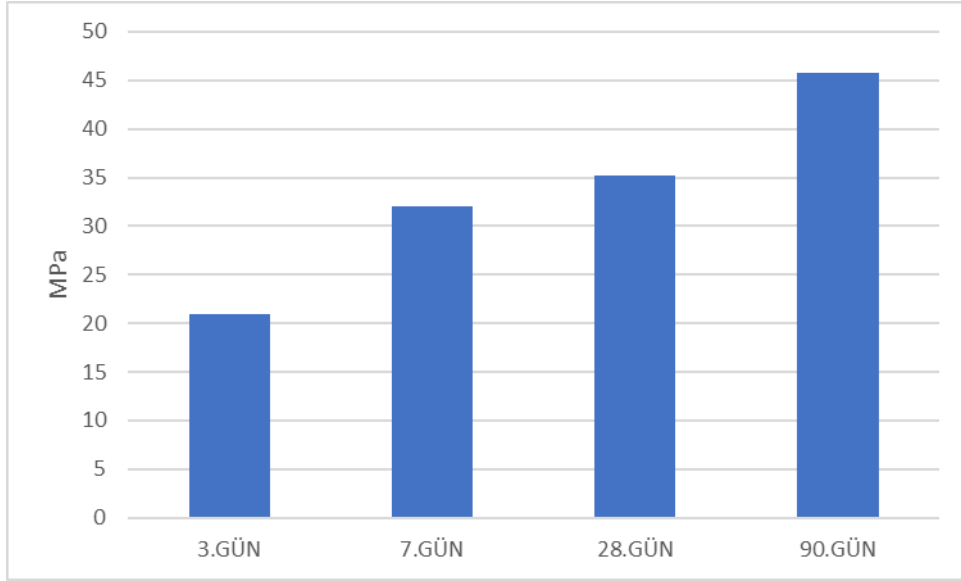
ve 90 günlük yaşlarında bu deney gerçekleştirilip dayanımlarına bakılmıştır (Şekil 4.6.). Her bir yaş dayanımı için 6 adet küp numunenin basınç dayanımının ortalaması alınarak veriler hesaplanmıştır. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.2.'de ve Şekil 4.7.'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre hazırlanan karışımın nihai dayanımının TS500 ve TBDY-2018'de belirtilen minimum basınç dayanımı şartlarını sağladığı görülmektedir. Hazırlanmış olan bu geopolimer karışımın ön deneyde yapılmış olan aynı karışım prensibine sahip fakat lif içermeyen karışıma göre karşılaştırılması ve yüzdesel değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir.



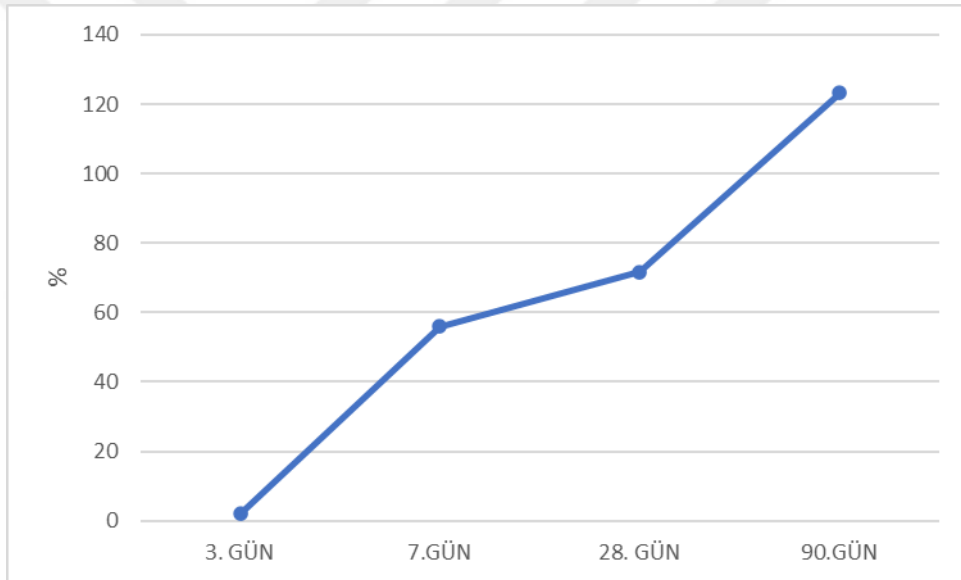
Şekil 4.6. 28. Gün basınç dayanımı deneyi

Çizelge 4.2. Basınç deneyi sonuçları

BASINÇ DAYANIMI	
NUMUNE	MPa
3.GÜN	20,91
7.GÜN	31,98
28.GÜN	35,2
90.GÜN	45,77



Şekil 4.7. Basınç deneyi sonuçları grafiği



Şekil 4.8. Poliamid lif (PL) katkılı betonlar ile lifsiz betonların karşılaştırılması

Hazırlanan harç numunelerine lifin etkisi Şekil 4.8.'de görülmektedir. 3. Günde lifsiz üretilmiş olan karışımın nihai dayanımına ulaşan beton karışımı, 7 günde lifsiz karışımın %56 daha fazlasına ulaşmıştır. Poliamid lif (PL) katkılı betonun nihai dayanımı lifsiz üretilen betonun nihai dayanımından ise %71,7 daha yüksek bir dayanım vermiştir. En yüksek oran ise geopolimerizasyon reaksiyonunun uzun süre devam ettiğini kanıtlar nitelikte olarak 90. Günde görülmüştür. Poliamid lif (PL) katkılı betonun uzun periyot dayanımı olan 90. Gün dayanımı, lifsiz karışıma kıyasla %123,3 artmış yani iki katından daha fazla bir değere ulaşmıştır.

4.3. Harçların Donma-Çözünme Direnci

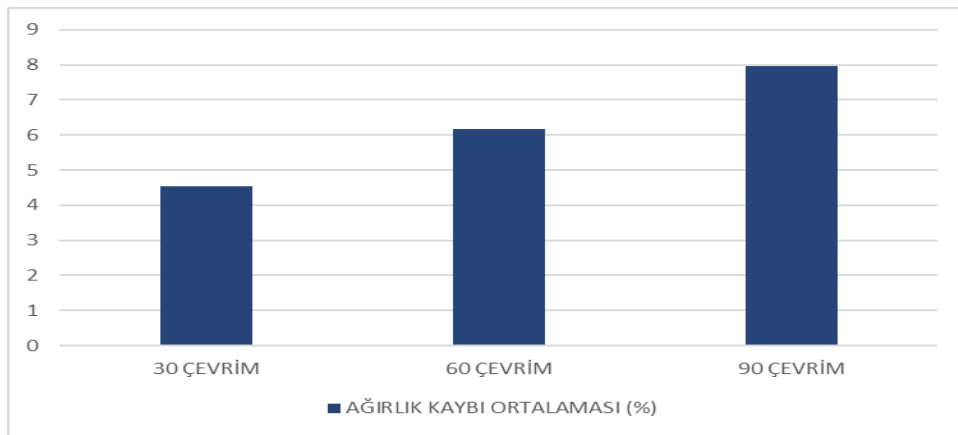
Hazırlanan harç numuneleri 28 gün sonunda 30, 60 ve 90 döngü donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Her karışımdan üçer adet 40x40x160 mm prizma numune donma-çözülme test kabinine yerleştirilmiştir. Geopolimer numuneler önce -20 °C’de dondurulmuş ardından +20 °C sıcaklıkta çözülmüştür. Donma-çözülme deneyinden sonra numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sonuçları incelenmiş ve donma-çözülme deneyinden önce elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Geopolimer harçların donma çözülme etkisinde ağırlık kayıplarının değerlendirilmesi

Donma-çözülme çevrimleri sonrasında ağırlık kayıpları hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 4.4’te verilmiştir. Maksimum ağırlık kaybı %7,95 ile 90 çevrim sonunda oluşmuştur. Değişim sonucu oluşan değerler grafik Şekil 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.4. Donma-çözülme deneyi ağırlık değişimleri

DONMA ÇÖZÜNME									
NUMUNE	30 ÇEVİRİM			60 ÇEVİRİM			90 ÇEVİRİM		
İSİM	30-1	30-2	30-3	60-1	60-2	60-3	90-1	90-2	90-3
ÖNCEKİ AĞIRLIK (GR)	490.7	464.2	489.4	505.1	472.6	489.3	494.1	485.6	480.4
ÇEVİRİM SONU AĞIRLIK (GR)	466	443.5	469.3	474.9	443	458.7	454.6	447.4	442
AĞIRLIK FARKI (GR)	24.7	20.7	20.1	30.2	29.6	30.6	39.5	38.2	38.4
AĞIRLIK KAYBI (%)	5.04	4.46	4.2	5.98	6.27	6.26	8	7.87	8
AĞIRLIK KAYBI ORTALAMASI (%)	4.56			6.17			7.96		

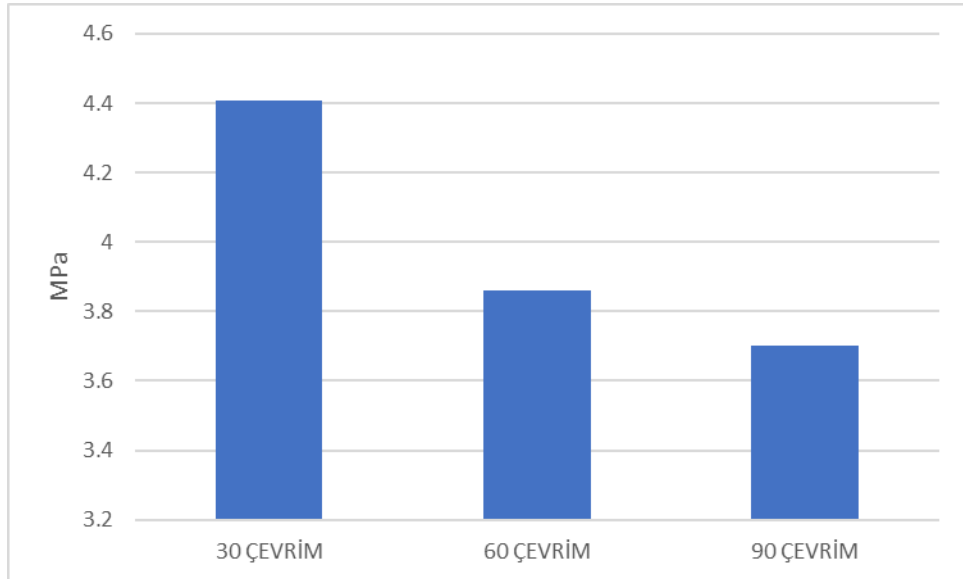


Şekil 4.9. Donma-çözülme etkisiyle ağırlık kaybı yüzdesi grafiği

Donma-çözülme çevrimleri sonucunda meydana gelen ağırlık kayıplarına baktığımız takdirde, bu oranların 30 Çevrimde %4.53, 60 çevrimde %6,16 ve 90 çevrimde %7.95 olduğu görülmüştür. Donma-çözülme çevrimi arttıkça numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları artmıştır.

4.3.2. Geopolimer harçların donma çözülme etkisinde dayanım kaybının değerlendirilmesi

Donma-çözülme çevrimleri sonrasındaki eğilme dayanımları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.10.'da verilmiştir. Burada çevrim sayısı arttıkça eğilme dayanımındaki kaybında arttığı görülmektedir. Donma-çözülme çevrimleri sonrası oluşan eğilme dayanımlarının 28. Günde oluşan nihai eğilme dayanımı ile karşılaştırılması sonucunda her çevrim sonucu oluşan eğilme dayanımı kaybının yüzdesi ise Şekil 4.11.'de verilmiştir. 30 çevrimde %21.3 oranında dayanım kaybı oluşurken, 60 çevrimde bu oran %31.1'e yükselmiştir. Donma-çözülme etkisinin en yüksek olduğu 90 çevrimde ise bu kayıp %33,9 seviyesine yükselmiştir. Donma-çözülme etkisi arttıkça bu durumun eğilme dayanımını olumsuz etkilediğini, doğal sonucu olarak da malzemenin hedefi olan sünek davranıştan uzaklaşmaya başladığı görülmektedir.

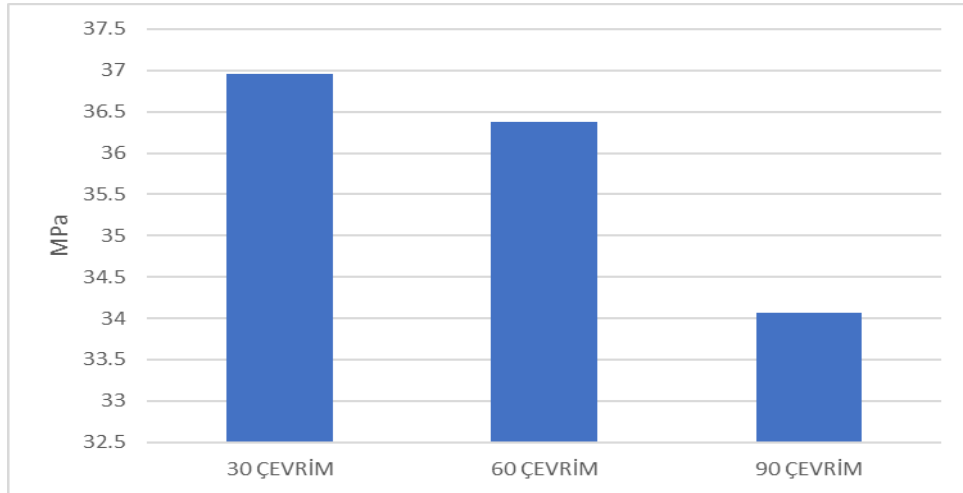


Şekil 4.10. Donma-çözülme etkisiyle eğilme dayanımı sonuçları

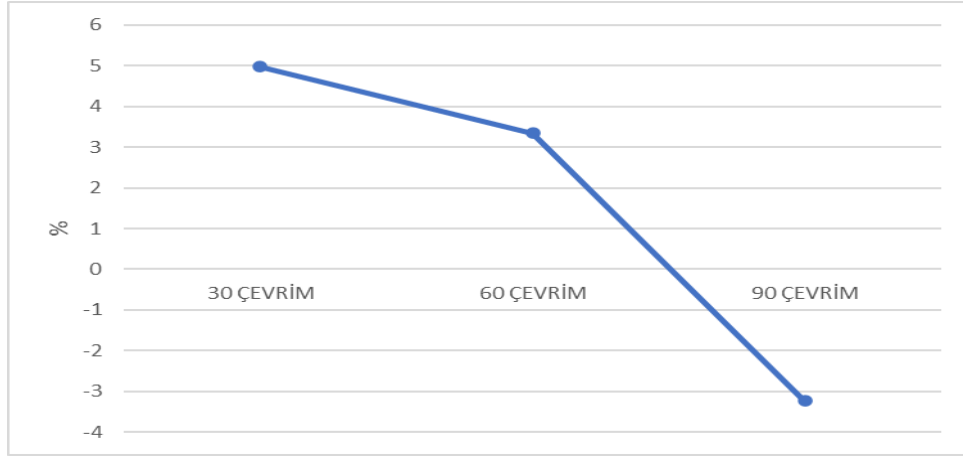


Şekil 4.11. Donma-çözülme etkisiyle eğilme dayanımının azalış yüzdesi

Benzer şekilde donma-çözülme çevrimleri sonrasında oluşan basınç dayanımları da hesaplanmış ve bunlar da Şekil 4.12.'de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere 30 çevrim ile 60 çevrim arasında çok aşırı bir basınç dayanımı değişimi görülmemiş, 90. Günde ise yaklaşık 2 MPa'lık bir basınç dayanımı kaybı gerçekleşmiştir. Bu çevrimler sonucunda oluşan basınç dayanımlarının 28. Gündeki nihai basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında yüzdesel değeri Şekil 4.13.'te verilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere nihai basınç dayanımı olan 35,2 MPa ile kıyaslandığı zaman 30 çevrim ve 60 çevrim esnasında basınç dayanımında sırasıyla %4,98 ve %3,35'lik artış gözükürken, 90 çevrim yapılan numunelerde basınç dayanımında %3,24 oranında bir azalma görülmüştür. 60 çevrime kadar numuneler donma-çözülme etkisinden olumsuz olarak etkilenmediğini geopolimerizasyon reaksiyonunu devam ettirdiğini ancak donma-çözülme etkisi uzun olduğunda olumsuz yöne çevrilip dayanımı düşürmeye başladığı görülmektedir.



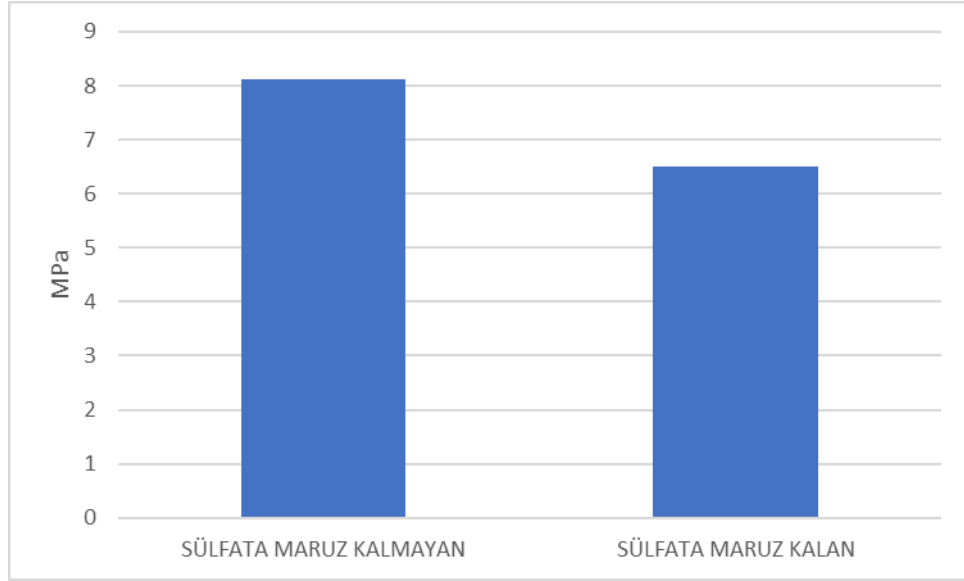
Şekil 4.12. Donma-çözülme etkisiyle basınç dayanımı değerleri



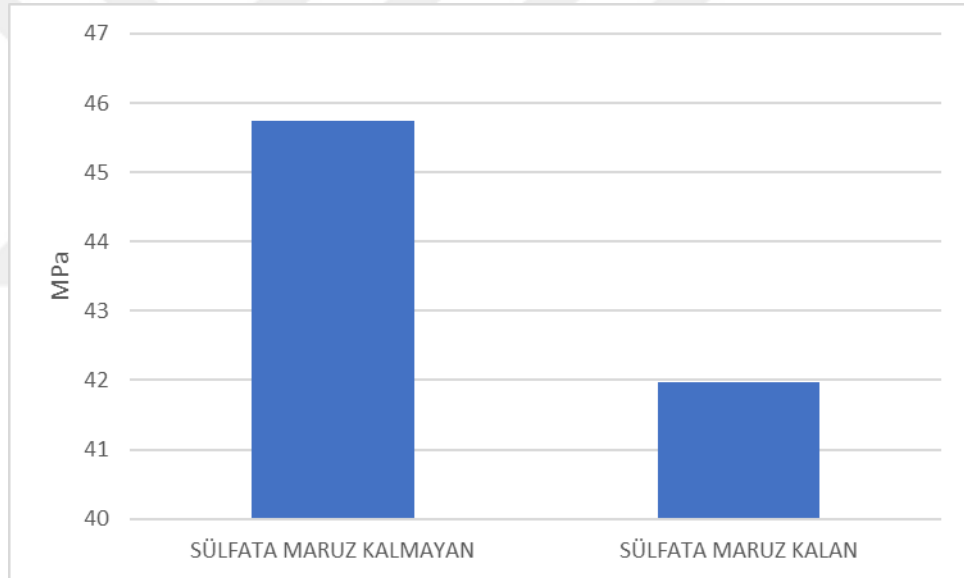
Şekil 4.13. Donma-çözülme etkisiyle basınç dayanımı yüzdesel değişimi

4.4. Harçların Sülfat Direnci

Hazırlanmış olan geopolimer harç numuneler %5 magnezyum sülfat ($MgSO_4$) içerisinde 28 gün süre ile bekletilerek, sülfata maruz kalmayan numunelerin nihai dayanımı ile karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. 28 günün sonunda sülfat etkisinden çıkarılan numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarına bakılmıştır. Referans Numuneleri ile olan karşılaştırması eğilme dayanımı için Şekil 4.14.'te basınç dayanımı içinse Şekil 4.15'te verilmiştir. Geopolimerlerde dayanım kayıpları literatürde bahsedildiği gibi geopolimerlerin yapısının sülfat etkisi ile bozulması sebebiyle oluşmaktadır (Bakharev, 2005). 4.14'teki grafikte görüldüğü gibi sülfata maruz kalmadan önce 8,125 MPa olan eğilme dayanımı 6,48MPa değerine düşmüştür. Yine 4.15.'te görüldüğü gibi basınç dayanımı sülfata maruz kalmadan evvel 45.756 MPa değerindeyken, sülfata maruz kaldıktan sonra 41.98 MPa değerine düşmüştür. Grafikteki değerler incelendiğinde sülfat etkisi 28 gün süre sonunda betonun basınç dayanımında %8,23'lük bir dayanım kaybına neden olmuştur. Aynı şekilde eğilme dayanımına bakıldığında ise %20,2 oranında bir eğilme dayanımı azalışı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14. Sülfat etkisi sonucu eğilme dayanımının karşılaştırılması



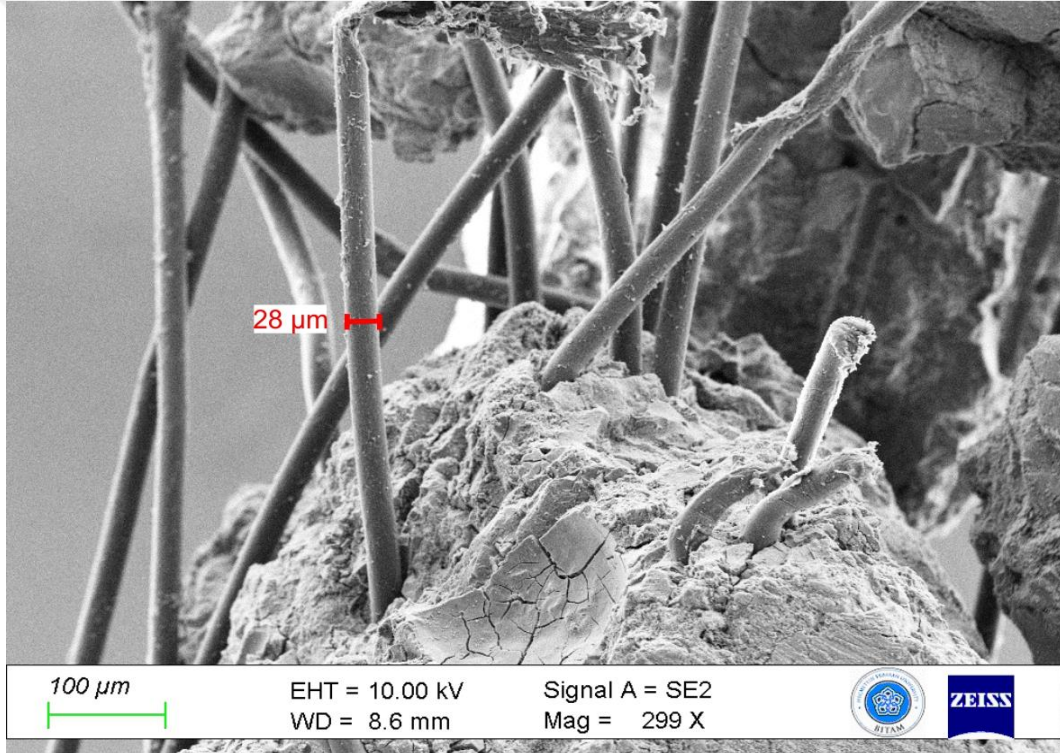
Şekil 4.15. Sülfat etkisi sonucu basınç dayanımının karşılaştırılması

4.5. SEM Deneyleri

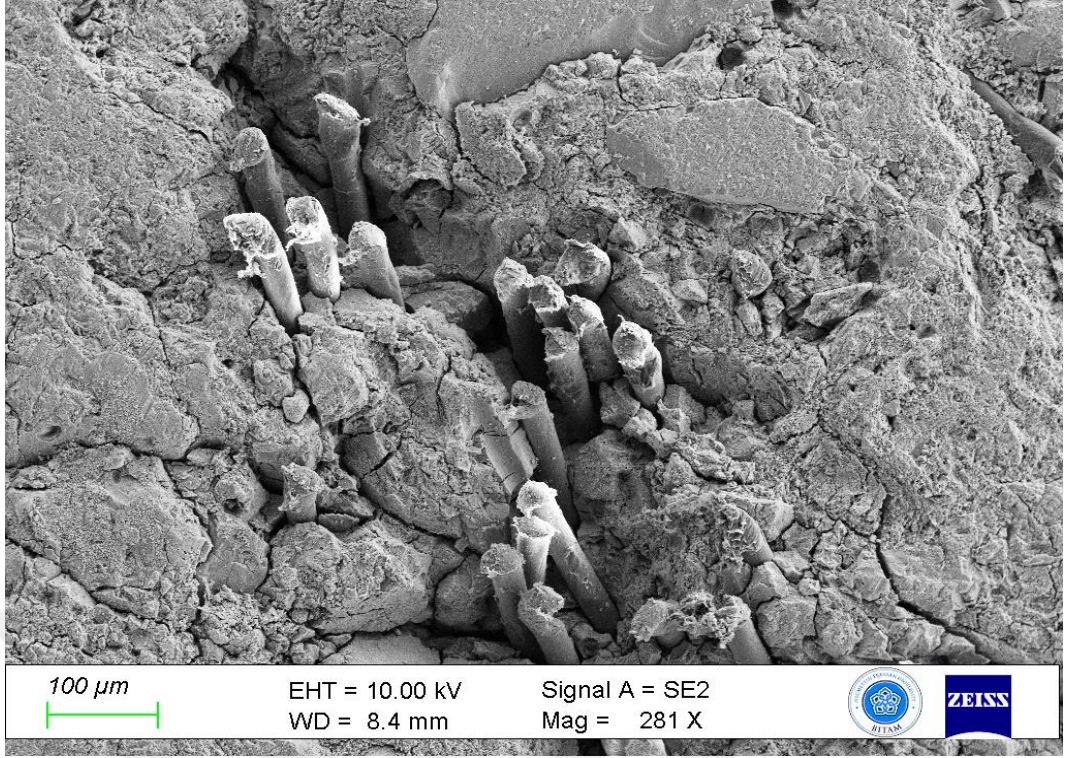
Bu çalışmada yer alan mikro yapı analizleri taramalı elektron mikroskopu analizleri yer almaktadır. Yapılan bu incelemeler uçucu kül içeren bu geopolimer harca yapılan lif katkısı sonucu ortaya çıkan ürünün nicelik ve nitelik tanımlamalarının gerçekleştirilmesidir. FE-SEM analizlerine ait görüntüler sırasıyla Şekil 4.16.-20.'de görülmektedir. Analizler, harç numunenin kırılan parçalarından elmas testere ile yaklaşık 2 mm kalınlığında kesilip hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Kesilen numunelerin yüzeyleri 1500 zımpara kâğıdı ile düzeltilerek parlatılmıştır. Parlatılan numuneler desikatör ve vakum sistemi

yardımıyla 750 torr basınç altında üç gün süreyle vakumlanarak kurutulmuştur. Kuruyan tüm numuneler ortam neminden ve karbonatlaşma etkisinden korunmak amacıyla desikatörden çıkarılarak vakumlu torbalarda saklanmıştır. Numunelere altın paladyum kaplaması yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir.

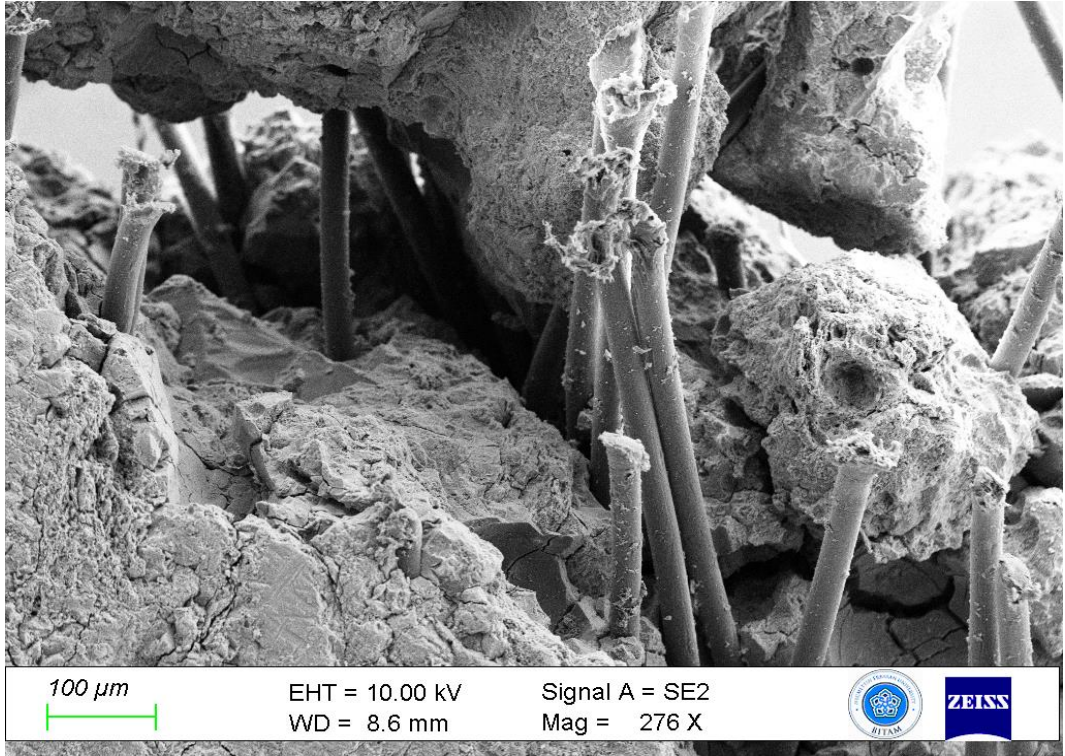
Görüntülere bağlı olarak kullanılan lif çapının 28 μm olduğu tespit edilmiştir. Liflerin matris içerisinde dağılımının, yer yer topaklaşmalar olsa bile, iyi olduğu görülmektedir. Lif oryantasyonu incelendiğinde, bir bölgedeki liflerin aynı yönde hizalanmasından dolayı eğilme dayanımında avantaj sağlayabileceği düşünülmektedir. Bu durum karışımlara lif ekleme yönteminin uygunluğunu göstermektedir. Numuneye yaklaşma mesafesinin düşük olmasından dolayı hidratasyon ürünlerinin ve türlerinin tespiti yapılamamıştır.



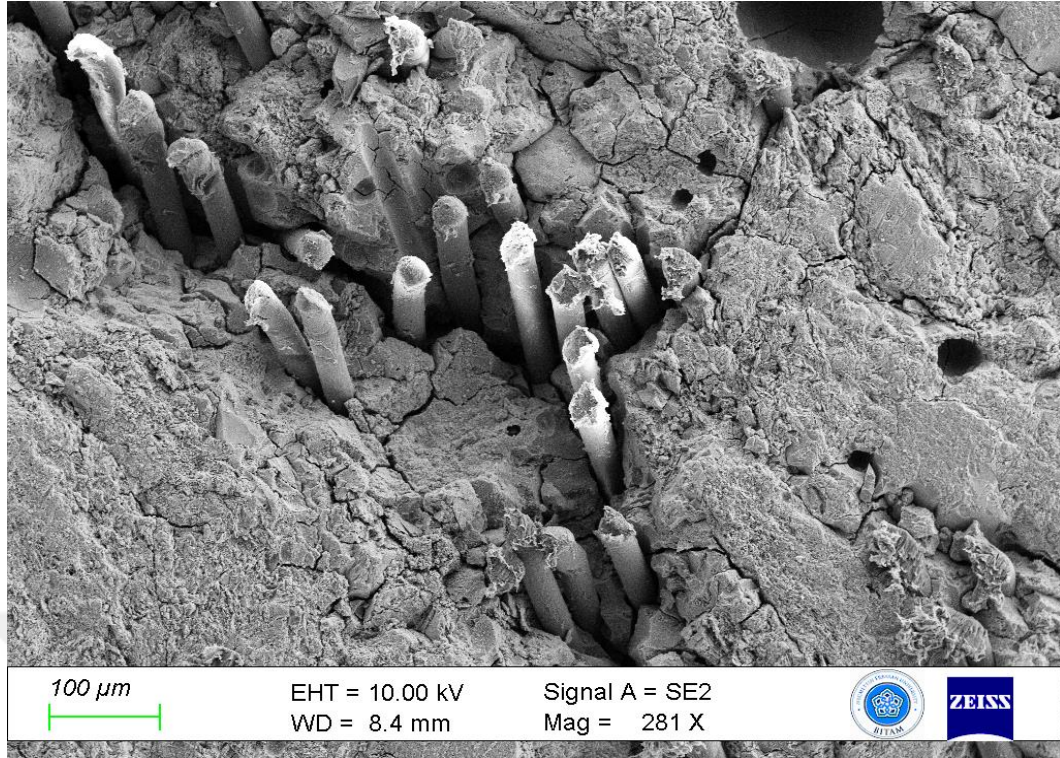
Şekil 4.16. Lif katkılı geopolimer harçların SEM-EDS görüntüleri-1



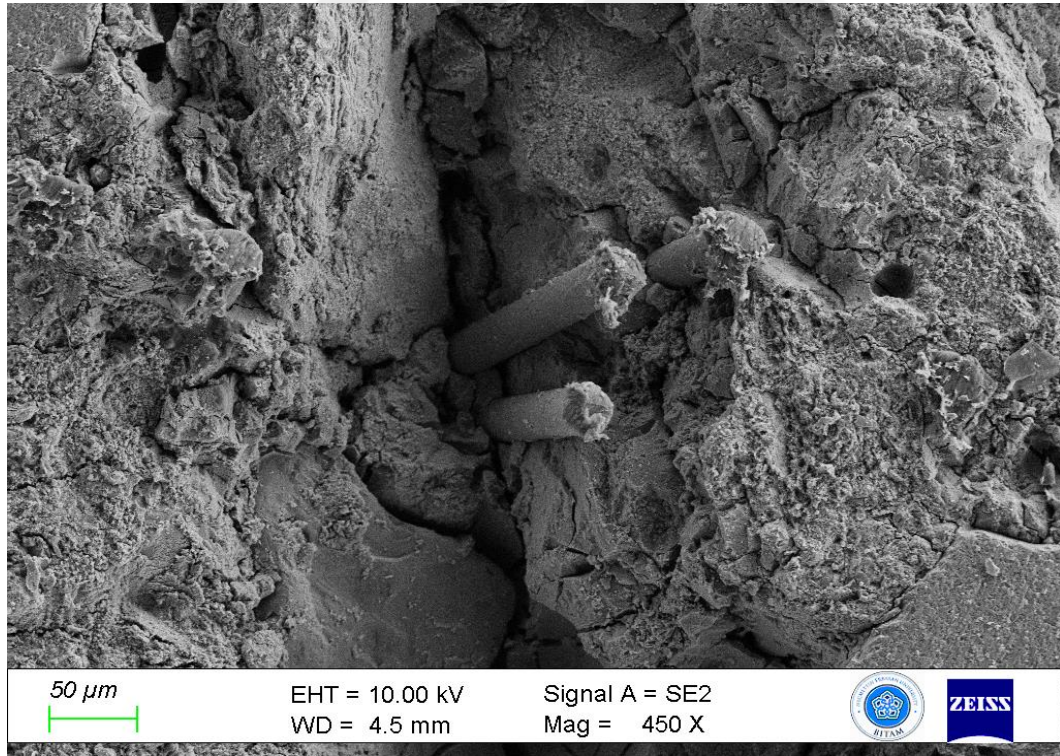
Şekil 4.17. Lif katkılı geopolimer harçların SEM-EDS görüntüleri-2



Şekil 4.18. Lif katkılı geopolimer harçların SEM-EDS görüntüleri-3



Şekil 4.19. Lif katkılı geopolimer harçların SEM-EDS görüntüleri-4



Şekil 4.20. Lif katkılı geopolimer harçların SEM-EDS görüntüleri-5

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılmış olan tez çalışmasında, Konya Çumra ilçesindeki fabrikaların üretimi sonucunda ortaya çıkan ve istif edilen, özellikleri tam olarak bilinmeyen bir C sınıfı uçucu kül ile Konya Çimentodan temin edilen Portland çimentosu (PÇ) karıştırılarak, geopolimerik reaksiyon ile harç haline getirilmiş ve içerisine geleneksel lif ve yeni nesil lifler ikame ettirilerek sünek bir davranışa sahip olup, kırılma ve akma anlarında sehim kapasitesinin artırılması, süneklik kapasitelerinin artırılması amaçlanmıştır. Referans numunesi olarak kullanılan numunelerle kıyaslandığı zaman lif ilavesi içeren karışımlarda çok ciddi miktarda eğilme ve basınç dayanımı artışına sahip olduğu görülmekte ve bunun yanında rijit bir yapıdan uzaklaşıp süneklik kazandığı anlaşılmaktadır.

Referans numunelerine kıyasla poliamid lif (PL) katkılı harçların nihai basınç dayanımının %71.7 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Bu değer, geopolimerizasyonun bir süre daha devam etmesine izin verildiği takdirde (bu çalışma için 90 gün) %123,3 oranında bir dayanım artışına kadar ulaşmaktadır.

Hazırlanan karışım harçlarının eğilme dayanımları referans numuneleri ile kıyaslandığında 28. Günde %52.05'lik bir eğilme dayanımı artışı sağlanmış olup bu değer yine geopolimerizasyon bir süre daha devam edip tekrar deneye tabii tutulduğunda %76,6 oranında artışa kadar ulaşmaktadır. Bu çalışmada hazırlanan karışımlarda matris içerisinde bulunan liflerin artan yükü matrise transfer etmesi ve çoklu çatlaklar oluşturarak betonun şekil değiştirme kapasitesini artırmak amaçlanmıştır. Yapılan dört noktalı eğilme deneyi verileri ile çizilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri incelendiği takdirde bu amaca ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Hazırlanan karışımlar hem yüksek eğilme gerilimi değerlerine ulaşmış hem de kırılma gerçekleştikten sonra da deplasman kapasitesini artırarak hedeflediği gibi ciddi sehim kapasitelerin çıktığını ve sünek davranış sergilediğini göstermektedir.

Karışımın durabilite değerlerine bakıldığında donma çözünme açısından bakıldığında 30 ve 60 çevrimlerde dahi basınç dayanımının arttığı, 90 çevrime ulaşınca

dayanım kaybına uğradığı gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı değerlendirildiğinde ise her çevrim değeri için biraz daha artan bir dayanım kaybı yaşandığı görülmektedir. Bu durumun sebebinin, poliamid liflerin (PL) dışının yağ tabakası ile kaplı olmaması ve bu nedenle matriste yer alan su ile kendisi arasında su itici bir bölge oluşturamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Karışımın sülfat direnci değerlendirildiği takdirde, 28 Gün boyunca sülfat içerisinde beklemiş karışımın basınç dayanımında %8,23'lük bir dayanım kaybına neden olmuştur. Bunun nedeni daha önce belirtildiği üzere geopolimerlerin yapısının sülfat tarafından bozulmasından kaynaklanmaktadır. Eğilme dayanımında meydana gelen %20,2 değerindeki azalma yine geopolimerlerin yapısının sülfat tarafından bozulmasından kaynaklandığı görülmektedir.

5.2 Öneriler

- Bu tez çalışmasında geopolimer harç üzerine lif ikamesi yapılmış olup mekanik özelliklerine (basınç ve eğilme dayanımları) ve durabilite özelliklerine (donma-çözülme, sülfat direnci, SEM) bakılmıştır. Bu çalışmada iki tür lif kullanılmış olup bunlardan bir tanesi geleneksel (poliamid lif (PL)) diğeri ise yeni nesil (PVA) lif kullanılmıştır. Aynı karışım oranlarında daha çeşitli yeni nesil lifler ve geleneksel liflerle deneyler yapılabilir.
- Bu çalışmada ön deneylerle ideal bir molarite oranı belirlenmiş olup o oranda karışımlar üretilmiştir. Karışımlar için molarite değeri çeşitlendirilerek harcın özelliklerine olan etkisi ve lifin sünekliğe olan katkısına olan etkisi üzerine çalışılabilir. Aynı zamanda molarite etkisinden dolayı hazırlanan harç çabuk reaksiyona girdiği için taze harç deneyleri yapılmamıştır, daha sonra yapılacak olan çalışmalarda karışım tasarımı buna uygun olarak yapıp taze beton deneyleri de yapılabilir.
- Hazırlanan karışım prensipleri değiştirilerek kıvamca kendiliğinden yerleşen betona yakın bir değere sahip olan bir beton elde edilmesi denenebilir.

KAYNAKLAR

- Aitcin, P. C., Autefage, F., Carles-Gibergues, A. 1986. "Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes". Proc. of 2nd Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, V. 1, 91-114.
- Andrew, R. M. 2018. "Global CO₂ emissions from cement production". Earth System Science Data, 10(1), 195–217.
- Anonim. 1992. "TS 10513, Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, Türk Standartları".
- Anonymous. 1991. "ASTM C 618, Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete, ASTM."
- Arisoy, B. 2005. "Lifli Hafif Betonların Optimum Karışım Tasarımı". Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 23-25 Mart 2005, s.912-916.
- Aruntaş, H. Y. 2006. "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli". Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt 21, No 1, 193-203.
- Aygörmez, Y. 2018. "*Kolemanit Atığı ve Silis Dumanı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harcın Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi*". Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-8, 24-26.
- Bakharev, T. 2005. "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing". Cem. Concr. Res., 35(6), 1224–1232.
- Balun, B. 2019. "*Alkalilerle Aktive Edilmiş Bitlis Yöresi Pomzası İçeren Hibrit Bağlayıcıların Üretilebilirliğinin İncelenmesi*". Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 5, 18-24, 34-37.
- Bartos, P. 1992. "French Concrete-Properties and Tests". Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Cho, Y. K., Yoo, S. W., Jung, S. H., Lee, K. M., Kwon, S. J. 2017. "Effect of Na₂O content, SiO₂/Na₂O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer". Constr. Build. Mater., 145, 253–260.
- Comrie, D. C., Paterson, J. H., Ritcey, D. J. 1988. "Applications of Geopolymer Technology To Waste Stabilization". in Proceedings Geopolymer'88 (Eds: J Davidovits and J Orlinski), Compiegne, France, 107-124.
- Davidovits, J. 1994. "Properties of Geopolymer Cements, Published in Proceedings". First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, 131-149.
- Davidovits, J. 1999. "Chemistry of Geopolymeric Systems". Terminology, International Conference, France.
- Davidovits, J. 2008. "Geopolymer Chemistry and applications". Institut Géopolymère 16 rue Galilée F-02100 Saint-Quentin, France.
- Demortier, G. 2004. "PIXIE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Gaza". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B226, 98-109.
- Durak, U. 2019. "*Nanoparçacık Katkıların Geopolimer Harcın Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*". Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1-5, 13-19.
- Erdoğan, S. T. 2011. "Öğütülmüş Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Üretimi". 8. Ulusal Beton Kongresi, İzmir, 1-7.
- Farooq, M., Bhutta, A., Banthia, N. 2019. "Tensile performance of eco-friendly ductile

- geopolymer composites (EDGC) incorporating different micro-fibers". *Cement and Concrete Composites*, 103, 183–192.
- Fernandez-Jimenez, A., Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A. 2007. "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials". *J. Mater. Sci.*, 42(9), 3055–3065.
- Görür, E. B. 2015. "*Alkali Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması*". Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 111-113.
- Gümüş, A., "Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi", Afyon Kocatepe Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon, 2016.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H. 2005. "Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları". Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005, İzmir, Türkiye.
- Hassan, A., Arif, M., Shariq, M. 2020, Şubat 1. "A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements- A clean technology option for sustainable development". *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G. 2013. "Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites". *Cem. Concr. Compos.*, 37, 108–118.
- Hlavacek, P. 2014. "*Engineering properties of alkali activated composites*". Doctor Of Philosophy Thesis, Czech Technical University In Prague, Prague.
- Kantarcı, F. 2013. "*Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması*". Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 1-3, 32-69.
- Kantarcı, F. 2018. "*Nano Silis Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tüf Esaslı Geopolimer Beton Üretim ve Özelliklerinin Araştırılması*". Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 1-5, 27-39, 49-56.
- Kaya, M. 2020. "Yüksek ve Düşük Kalsiyum İçeren Uçucu Küller ile Üretilen Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi". Üniversitesi, Yozgat Bozok Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Mühendisliği.
- Ken, P. W., Ramli, M., Ban, C. C. 2015. "An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products". *Constr. Build. Mater.*, 77, 370–395.
- Kılınçarslan, Ş., Başıyigit, C., Uzun, İ. 2010. "Ağır Betonların Sülfat Etkisinde Mekanik Özellikleri". Süleyman Demirel Üniversitesi, SDU International Technologic Sciences.
- Kuranlı, Ö. F. 2020. "*Farklı Bağlayıcı ve Lif İçeren Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi*". İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13.
- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y. 2004. "Development of Sustainable Cementitious Materials Proc.". *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, 55-76.
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., Shaikh, F. U. A. 2014. "Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites". *Construction and Building Materials*, 70, 54–64.
- Ohno, M., Li, V. C. 2014. "A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites". *Construction and Building Materials*, 57, 163–168.
- Özyurt, N. 2000. "*Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerin mekanik*

- davranış*". Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S. 2008. "Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products". *Construction and Building Materials*, 22, 1305-1322.
- Palomo, A., Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., van Deventer, J. S. J. 2007. "Geopolymer technology: the current state of the art". *J. Mater. Sci.*, 42, 2917–2933.
- Provis, J. L. 2017. "Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*". <https://www.sciencedirect.com/journal/cement-and-concrete-research/vol/114/suppl/C>, [Ziyaret T.
- Shilang, X., Qianghua, L. 2007. "An Experimental Study on Bending Behaviour of Cementitious Composites Reinforced in Combination with Carbon Textile and Short-Cut PVA Fiber". Department of Civil Engineering, Dailan University of Technology, China.
- Sing, N. S., Middendorf, B. 2020. "Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview". *Construction and Building Materials*, 20 Mart.Issue 237.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. Chindaprasirt, P. 2011. "NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature". *Fuel*, 90(6), 2118–2124.
- Soroushian, P., Bayasi, Z. 1991. "Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete". *ACI Materials Journal*, V.88,No.2, MarchApril.
- Sun, P., Wu, H. C. 2008. "Transition from brittle to ductile behavior of fly ash using PVA fibers". *Cement and Concrete Composites*, 30(1), 29–36.
- Tanyildizi, H., Yonar, Y. 2016. "Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature". *Construction and Building Materials*, 126, 381–387.
- THBB. 2019. "Dünyada Sektör".
- THBB. 2022. "Hazır Beton Sektörü İstatistikleri".
- Ünal, M. T. 2020. "*Çimento Harçlarında Optimum Uçucu Kül ve PVA Lif Oranının Belirlenmesi*". Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-9.
- Wang, X., He, J., Mosallam, A. S., Li, C., Xin, H. 2019. "The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC)". *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Yonar, Y. 2014. "*Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı*". Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 8-9.
- Zahid, M., Shafiq, N., Razak, S. N. A., Tufail, R. F. 2020. "Investigating the effects of NaOH molarity and the geometry of PVA fibers on the post-cracking and the fracture behavior of engineered geopolymer composite". *Construction and Building Materials*, 265, 120295.
- Zeybek, O. 2009. "*Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi*". Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.