

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

**KARMA (HİBRİT) LİFLİ GEOPOLİMER HARÇLARLA ÜRETİLEN YIĞMA
DUVARLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

MERVE BÜYÜKTAPU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

OCAK 2023

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

**KARMA (HİBRİT) LİFLİ GEOPOLİMER HARÇLARLA ÜRETİLEN YIĞMA
DUVARLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

**Merve BÜYÜKTAPU
(36203621017)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

OCAK 2023

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, bana rehberlik eden danışman hocam Sayın Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ'a,

Tezimi şekillendirmemde büyük katkısı olan Sayın Hocam Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a,

Tez savunma komitemde yer alarak değerli görüşleri ile bana destek olan aynı zamanda lisans eğitimimde kendisinden mekanik adına bildiğim birçok şeyi sayesinde öğrendiğim Doç. Dr. Erkut SAYIN'a,

Tez çalışmamın her aşamasında tecrübelerinden yararlandığım ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım Sayın Öğr. Üyesi Enes EKİNCİ ve Arş. Gör. Alper ÖZMEN'e

Çalışmalarım boyunca yardımını ve desteğini esirgemeyen Sevgili Arkadaşım Arş. gör. Tuğba ŞENTÜRK'e

Tüm hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen aileme,

Tezin uygulama aşamasında projeye (FYL-2021-2780) vermiş oldukları maddi destekten dolayı, İnönü Üniversitesi BAP birimine

Teşekkür ederim

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Karma (Hibrit) Lifli Geopolimer Harçlarla Üretilen Yığma Duvarların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

İnşaat Müh. Merve BÜYÜKTAPU



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ.....	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1 Yığıma Duvarlarla İlgili Çalışmalar.....	3
2.2 Lifli Harçlarla İlgili Çalışmalar.....	5
2.3 Geopolimerler Üzerine Yapılmış Çalışmalar.....	6
2.4 Geopolimer	10
2.5 Çimentodan Kaynaklanan Çevre Problemleri.....	11
3. MATERYAL ve METOD	13
3.1 Ham Madde.....	13
3.1.1 Geopolimer harç hazırlanmasında kullanılan malzemeler.....	13
3.1.1.1 Yüksek fırın cürufu	13
3.1.1.2 Silis dumanı	14
3.1.1.3 Agrega	14
3.1.1.4 Sodyum hidroksit.....	15
3.1.1.5 Sodyum silikat	16
3.1.1.6 Lifler	16
3.1.2 Yığıma duvarların hazırlanmasında kullanılan malzemeler.....	18
3.1.2.1 Duvar örgü malzemeleri.....	18
3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	20
3.2.1 Geopolimer harçların hazırlanması.....	20
3.2.2 Lifli geopolimer harçların hazırlanması.....	21
3.2.3 Yığıma duvar örneklerinin hazırlanması.....	24
3.3 Hazırlanan Örnekler Üzerinde Yapılan Deneyler.....	27
3.3.1 Yayılma tablası deneyi.....	27
3.3.2 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi.....	28
3.3.3 Eğilme deneyi	30
3.3.4 Mikroyapı deneyleri.....	31
3.3.5 Ultrasonik hız ölçümü deneyi.....	32
3.3.6 Duvarlar üzerinde yapılan deneyler.....	34
3.3.6.1 Eksenel basınç dayanımı deneyi.....	34
3.3.6.2 Kayma (diyagonal yükleme) deneyi.....	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME.....	36
4.1 Geopolimer Harçların Basınç Dayanımları.....	36
4.2 Lif Takviyeli Geopolimer Harç Deney Sonuçları.....	38
4.2.1 Yayılma tablası deneyi.....	38
4.2.2 Ultrasonik hız ölçümü deney sonuçları.....	39
4.2.3 Tek eksenli basınç dayanımı sonuçları.....	40
4.2.4 Eğilme dayanımı sonuçları.....	41

4.2.5 Lif takviyeli geopolimerlerin mikroyapı özellikleri.....	43
4.3 Yığma Duvar Deney Sonuçları.....	46
4.3.1 Eksenel basınç dayanımı sonuçları.....	46
4.3.2 Kayma dayanımı sonuçları.....	50
4.3.3 Çatlak modelleri.....	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	66



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu.....	14
Çizelge 3.2: Silis dumanı kimyasal bileşimi.....	14
Çizelge 3.3: Kullanılan agreganın granülometrik analiz değerleri.....	15
Çizelge 3.4: Sodyum hidroksit ve sodyum silikatin kimyasal özellikleri.....	16
Çizelge 3.5: Kırpılmış karbon elyaf özellikleri.....	17
Çizelge 3.6: Cam liflerin kimyasal özellikleri.....	17
Çizelge 3.7: Cam liflerin fiziksel özellikleri.....	17
Çizelge 3.8: Polipropilen lifin teknik özellikleri.....	18
Çizelge 3.9: Malzeme karışım tablosu.....	20
Çizelge 3.10: Geopolimer Harç içindeki Lif Oranları.....	21
Çizelge 3.11: Geopolimer harcın işlenebilirlik kriterleri.....	27
Çizelge 4.1: Geopolimer harç 7 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	37
Çizelge 4.2: Geopolimer harç 28 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	37
Çizelge 4.3: Lif takviyeli geopolimer harç yayılma çapları.....	39
Çizelge 4.4: Lif takviyeli geopolimer harç UPV sonuçları.....	40
Çizelge 4.5: Lif takviyeli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri...41	
Çizelge 4.6: Lif takviyeli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları..42	
Çizelge 4.7: Yığılma duvarların basınç ve kayma dayanımı.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Geopolimer ve aktivatör türleri.....	9
Şekil 2.2: Çimento üretiminden kaynaklanan CO ₂ gazı emisyonu.....	12
Şekil 3.1: İnce agrega.....	15
Şekil 3.2: Tuğla çeşitlerinin genel özellikleri.....	19
Şekil 3.3: Cam lif.....	22
Şekil 3.4: Polipropilen lif.....	22
Şekil 3.5: Karbonfiber lif.....	22
Şekil 3.6: Lif karışım oranları.....	23
Şekil 3.7: Lifli geopolimer numunelerin hazırlanması.....	24
Şekil 3.8: Standart çimentolu harç ile hazırlanan numunelerin harç malzemesi.....	25
Şekil 3.9: Standart çimentolu harçla duvar örülmesi işlemi.....	25
Şekil 3.10: Kuru harç karışımının hazırlanması.....	26
Şekil 3.11: Geopolimer harcın hazırlanması ve duvara uygulanması.....	26
Şekil 3.12: Duvar numunelerinin görünümü.....	26
Şekil 3.13: Yayılma tablası deneyine ait görüntüler.....	28
Şekil 3.14: Basınç dayanımı test cihazı.....	29
Şekil 3.15: Eğilme dayanımı deneyi için hazırlanan numunelerin kalıplara yerleştirilmesi..	30
Şekil 3.16: Eğilme dayanımı test cihazı.....	31
Şekil 3.17: Eğilme deneyi sonrası lifli numunenin kırılmış görüntüsü.....	31
Şekil 3.18: LEO (Zeiss) EVO40 SEM-EDX cihazı.....	32
Şekil 3.19: Ultrasonik hız testi a) Test cihazı b) Çalışma prensibi.....	33
Şekil 3.20: Ultrasonik hız testi ölçüm metotları.....	33
Şekil 3.21: Eksenel basınç dayanımı deney düzeneği.....	34
Şekil 3.22: Diyagonal yükleme düzeneği ve diyagonal yükleme başlığı.....	35
Şekil 3.23: Duvar kayma dayanımı deney düzeneği.....	35
Şekil 4.1: Geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı.....	38
Şekil 4.2: Lif takviyeli geopolimer harç yayılma çapları.....	39
Şekil 4.3: Lif takviyeli geopolimer harçların UPV grafiği.....	40
Şekil 4.4: Lif takviyeli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	41
Şekil 4.5: Lif takviyeli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları.....	42
Şekil 4.6: KR2 karışımına ait yük-deplasman eğrisi.....	43
Şekil 4.7: KR2 karışımına ait SEM görüntüleri.....	45
Şekil 4.8: KR3 karışımına ait SEM görüntüleri.....	46
Şekil 4.9: Yığma duvarların Eksenel basınç altında yük-deformasyon eğrisi.....	48
Şekil 4.10: Düşey yük altında yığma duvarların göçme mekanizması.....	49
Şekil 4.11: Diyagonal yük altında yığma duvarların yük-deformasyon eğrisi.....	51
Şekil 4.12: Diyagonal yük altında yığma duvarların göçme mekanizması.....	52
Şekil 4.13: GPM1 numunesine ait olan çatlak görüntüleri.....	54
Şekil 4.14: GPM1 duvar numunesine ait yük-deplasman grafiği.....	54
Şekil 4.15: GPM2 duvar numunesine ait çatlak görüntüleri.....	55
Şekil 4.16: GPM2 duvar numunesine ait yük-deplasman grafiği.....	56
Şekil 4.17: GPM3 VE GPM4 numunesine ait olan çatlak görüntüsü.....	57
Şekil 4.18: GPM3 ve GPM4 numunesine ait olan yük-deplasman grafiği.....	57

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan deney ve malzeme birliği
°C	: Santigrat derece
F	: Y¼k (N)
FRGM	: Fiber takviyeli geopolimer harç
GH	: Geopolimer harç
GPM	: Lifli Geopolimer harçla hazırlanan duvar numunesi
K₂SiO₃	: Potasyum silikat
KR	: Lifli karışım
M	: Molarite
Mbps	: Megabits per second
MPa	: Mega paskal
Ms	: Silis mod¼lü (SiO ₂ /Na ₂ O)
NaOH	: Sodyum hidroksit
Na₂SiO₃	: Sodyum silikat
NM	: Standart harçla hazırlanan duvar numunesi
OH	: Hidroksit
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
UK	: Uçucu kül
UPV	: Ultrasonik hız ölçümü
XRD	: X-Işınları difraktometresi
YFC	: Yüksek fırın c¼ruf
PP	: Polipropilen
SD	: Silis dumanı
PVA	: Polivinil alkol

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARMA (HİBRİT) LİFLİ GEOPOLİMER HARÇLARLA ÜRETİLEN YIĞMA DUVARLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Merve BÜYÜKTAPU

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

66+ ix sayfa

2023

Danışman: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

Geçmişten günümüze kadar barınma ihtiyacını karşılamak için yığma yapılar kullanılmıştır. Yığma yapılarda en önemli yapı malzemelerinden biri de harçlarıdır. Bu çalışmada günümüzde en çok kullanılan bağlayıcısı çimentolu harç yerine, çimentosuz ve yüksek dayanımlı yenilikçi bir harç üretmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak 4 farklı karışım türü belirlenip her karışım 3 farklı şekilde aktive ederek 12 çeşit geopolimer harç karışımı (GH) oluşturulmuştur. Bu 12 karışımın her birinden 6 numune dökülmüş ve 72 adet GH numunesi hazırlanmıştır. Bu GH numuneleri 7. ve 28. günlerde basınç testlerine tabi tutularak, en yüksek basınç dayanımını veren numune, lifli karışımlarda kullanılmak üzere seçilmiştir. Daha sonra 3 farklı lif çeşidi; karbon lif, polipropilen lif (PP) ve cam lif optimum karışıma eklenmiştir. Bu 3 çeşit lif ile 7 farklı kombinasyon oluşturulmuş ve seçilen GH ile ayrı ayrı karıştırılmıştır. Karışımların işlenebilirliğini test etmek amacıyla yayılma tablası deneyi uygulanmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Bu karışımlar KR1-KR2-KR3-KR4-KR5-KR6-KR7 olarak isimlendirilmiş ve 40*40*160 mm lik kalıplarda döküm yapılmıştır. Döküm sonrası 7. ve 28. günlerde numunelere önce eğilme dayanımı daha sonra tek eksenli basınç dayanımı testleri belirlenmiştir. Ayrıca, UPV ve basınç dayanımları arasında yakın korelasyon elde edilmiş ve bu deneylerin sonucunda en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım KR2, en düşük sonuçları veren karışım ise KR3 olarak belirlenmiştir. Bu iki karışımın mikroyapısal özelliklerine bakmak amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve mineral yapısını ortaya koymak için EDX analizleri yapılmıştır. Seçilen KR2 karışımını duvarlarda test etmek amacıyla 70*70 cm ebatında pres tuğla malzemesi ile 10 adet duvar örülmüştür. Duvarların 5 adedi KR2 karışımıyla (GPM) kalan 5 adedi ise standart çimentolu harç (NM) ile örülüp 28 gün sonra eksenel ve diyagonal yükleme altında test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda GPM duvarlar, eksenel yükleme altında %55, diyagonal yükleme altında %100 daha fazla basınç dayanımı göstermiştir. NM duvarlarda ani ve gevrek bir göçme mekanizması görülürken, bunun aksine GPM duvarlarda, göçme durumunda kılcal çatlaklar gözlenmiş ve daha sünek bir davranış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Harç, Yığma Duvarlar, Lifli Geopolimer, Sünek

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MASONRY WALLS PRODUCED WITH MIXED (HYBRID) FIBER GEOPOLYMER MORTARS

Merve BÜYÜKTAPU

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Civil Engineering Department

66+ ix sayfa

2023

Supervisor: Associate Professor Müslüm Murat MARAŞ

From the past to the present, masonry structures have been used to meet the need for shelter. One of the most important building materials in masonry structures is mortars. In this study, it was aimed to produce a new cementless and high strength mortar instead of cement mortar, which is the most widely used binder of today. In this context, firstly, 4 different mixture types were determined and 12 types of geopolymer mortar mixture (GH) were created by activating each mixture in 3 different ways. Six samples were poured from each of these 12 mixtures and 72 GH samples were prepared. These GH samples were subjected to compression tests on the 7th and 28th days, and the sample with the highest compressive strength was selected for use in fibrous mixtures. Then 3 different fiber types; carbon fiber, polypropylene fiber (PP) and glass fiber added to the optimum mixture. Seven different combinations were created with these 3 types of fiber and mixed separately with the selected GH. To test the workability of the mixtures, the spreading table test was applied and the results were recorded. These mixtures were named as KR1-KR2-KR3-KR4-KR5-KR6-KR7 and were cast into 40*40*160 mm molds. On the 7th and 28th days following casting, the specimens were first determined for flexural strength and then uniaxial compressive strength. In addition, a close correlation was obtained between UPV and compressive strengths, and as a result of these tests, the mixture with the highest compressive strength was determined as KR2, and the mixture with the lowest results was determined as KR3. Scanning electron microscopy (SEM) to look at the microstructural properties of these two mixtures and EDX analyzes to reveal the mineral structure were performed. In order to test the selected KR2 mixture on the walls, ten walls were built with 70*70 cm pressed brick material. Five of the walls were built with KR2 mixture (GPM) and the remaining five with standard cementitious mortar (NM) and tested 28 days later under axial and diagonal loading. As a result of the experiments, GPM walls showed 55% more compressive strength under axial loading and 100% more under diagonal loading. While a sudden and brittle failure mechanism is observed in NM walls, on the contrary, in GPM walls, thin cracks were observed in case of failure and showed a more ductile behavior.

Keywords: Mortar, Masonry wall, Fiber Geopolymer, Ductile

1. GİRİŞ

İlkel zamanlardan günümüze kadar barınma gereksinimini karşılamak amacıyla yapılar inşa edilmiş ve bu yapılarda duvar örme amacıyla çeşitli örgü malzemesi ve bağlayıcı malzemeler kullanılmıştır.

İlk zamanlarda duvarlar taşıyıcı olarak kullanılmış, fakat betonarme teknolojisinin hayatımıza girmesiyle taşıyıcı eleman olma özelliğini yitirmiş ve bölme duvar şeklinde yapı elemanı olarak kullanılmıştır.

Yerleşik hayata geçişte ilk olarak kerpiçten duvarlar inşa edilmiş, daha sonra ise duvar yapımında taş, tuğla, briket, gazbeton gibi çeşitli yapı malzemeleri kullanılmıştır. Tuğla malzemesi, kil veya killi topraktan üretilen bir örgü malzemesidir ve genel olarak taşıyıcı duvarların üretiminde kullanılır. Yüksek sıcaklıkta seramik bağ elde edilene kadar pişirilmek suretiyle üretilen tuğlalar yatay ve dikey delikli olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Düşey delikli tuğlalar oturma yüzeyine dik bir konumda yerleştirilirken, yatay delikli tuğlalar ise oturma yüzeyine paralel doğrultuda tasarlanmıştır.

Örgü malzemelerini birbirine bağlamak için harç malzemesi kullanılmış ve kullanılan bu harçlar sahip oldukları çeşitli dezavantajlar sebebiyle sürekli olarak gelişime tabi tutulmuştur. Sahip olduğu birtakım olumlu özellikler sebebiyle çimento esaslı harçlar kullanılır.

Duvar üretiminde kullanılan harç içeriğindeki çimento veya kireç miktarı, agreganın tane dağılımı ve nitelikleri ile karışım suyunun oranı, harcın özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Harcı meydana getiren malzemeler arasında yalnızca çimento katılırsa harcın dayanımının, yalnızca kireç katılırsa harcın şekil değiştirme yeteneğini değiştirebilir.

Harç malzemesi üretiminde, çimento ve kirecin belirli oranlarda bir arada kullanılması ile harcın dayanımı ve şekil değiştirme kabiliyetinin arttığı görülmüştür. Bu sonuç bize harçta kullanılan malzemenin harcın davranışı üzerinde doğrudan etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca duvardaki dayanım da örgü malzemelerinin dayanımı ile doğrudan bağlantılıdır. Duvar inşasında kullanılan çimentolu harçlar, yatay durumda bir tabaka şeklinde taş ve tuğlaların etkisinde kaldığı kuvvetleri bir sıradan sıraya taşır, ayrıca harcın düşey durumda

iken taş ve tuğlaların birbirine bağlanmasını sağlar. Bu özelliklerini yerine getirmesi için harcın; işlenebilirlik ve plastiklik özelliklerini göstermesi, doluluk miktarının ve mukavemetinin yüksek olması, geirirmliliğinin düşük olması gerekir [1].

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel faaliyetler sonucunda yan ürün olarak açığa çıkan puzolanik malzeme kullanarak, yüksek dayanımlı çimentosuz yığma duvar harcı elde etmektir. Yıllardır süregelen deprem ve yapı ağırlığından dolayı yükleme sonucu meydana gelen duvar hasarları, ani göçmelere ve yıkılmalara sebebiyet vermektedir. Bu alışma kapsamında günümüzde bağlayıcı madde olarak imento kullanılan harçların yerine bağlayıcı olarak çimentosuz ve daha yüksek dayanımlı yeni bir geopolimer harç üretmek amaçlanmıştır.

Bu amaçla öncelikle geopolimer harç karışımını elde etmek amaçıyla, yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) yapılarda bağlayıcı üretiminde kullanıldığı Na_2SiO_3 ve NaOH aktivatörü ile aktivasyonu sağlanan geopolimer harç numuneleri yüksek basınç dayanımı elde etmek amaçıyla optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada en iyi dayanımı veren geopolimer harç karışımına 7 farklı kombinasyonda 3 farklı lif katılarak en yüksek kayma ve basınç dayanımı veren lifli geopolimer harç kombinasyonu araştırılmıştır. Basınç ve eğilme deneylerinin sonucunda elde edilen optimum lifli geopolimer harcın yığma duvarların davranışları üzerindeki etkisini test etmek amaçıyla 10 adet yığma tuğla duvar hazırlanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan literatür taraması sonucunda geopolimer harçlar ve yığma duvarlar konusu altında yapılmış çalışmalar mevcuttur. Bu alanda yapılmış olan bazı çalışmalar bu bölümde özetlenecektir.

2.1 Yığma Duvarlarla İlgili Çalışmalar

Literatürde yığma duvarlarda kullanılan harç türleriyle ilgili çalışmalar mevcuttur. Yapılan bu çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

Erol [2] yapmış olduğu bir çalışmada sıvasız ve sıvalı olmak üzere toplam 31 adet 755x755 mm boyutlarında duvar örneği üretmiştir. Bu duvar numunelerin üretiminde malzeme olarak yatay delikli tuğla modeli tercih edilmiştir. Duvar örgü işinde kullanılan harç karışımı malzeme oranları sırasıyla su:çimento:kireç:kum 1:1:0,5:4,5 şeklinde hazırlanmıştır.

Capozucca [3] yapmış olduğu bir çalışmada, 630x630x50 mm ölçülerinde 1/3 ölçeğinde duvar numuneleri üretmiştir. Duvar numunelerinin örgüsünde takviyeli harç kullanmıştır. Harç karışım malzemesi çimento, kireç, kum sırasıyla 1:1:5 şeklinde hazırlanmıştır. Deneysel çalışmasında, yük- deformasyon ilişkisini, duvarların kesme yüzeyleri doğrultusunda çatlak ilerleyişini sonlu elemanlar analizinden elde ettiği teorik sonuçlar ile kıyaslamıştır.

Gündüz ve ark. [4] yaptıkları çalışmalarında, agrega katkılı genleşmiş perlit harcın, bu standartlara uygun olan 5 sıra boşluklu duvar blok elemanlarının üretiminde yapısal davranışlarını araştırmışlardır. Deneylerinde 5 sıra boşluklu bimsblok kullanılarak zıvanalı 190x390x185 mm boyutlarında duvar blok elemanların mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

Kılıç [5] deneysel çalışmasında, boyutları 190x190x85 mm olan tuğla malzemesi kullanmıştır. Numuneler sıvalı ve sıvasız olarak üretilmiştir. Sıva ve harç karışımında kireç ve kumu karıştırarak takviyeli harç elde edilmiş ve duvar örümünde kullanılmıştır.

Döndüren [6] yapmış olduğu çalışmada, standart çimentolu harçla ürettiği duvarda, bağlayıcılığı yüksek olan harç ile üretilen duvarın mekanik özellikleri ile ilgili davranışları incelemiş ve deney sonuçlarını kıyaslamıştır. Aynı ölçü, geometri ve özelliklerde iki farklı duvar numunesi örmüştür. Çalışması sonucunda; standart çimento ile hazırladığı numunenin gevrek bir kırılma yaptığını ama bağlayıcılık özelliğini katkı malzemeleri kullanarak

arttırdığı harç örneği ile hazırladığı duvarın ani göçtüğü tespit edilmiştir. Duvar bileşenlerinde bulunan blokların bu noktalarda düşük çekme dayanımı değeri gösterdiği belirlenmiştir. Bu da bize yük uygulandığında bloklar arasında kayma meydana geldiğini göstermektedir. Sonuç olarak yapının mekanik olarak yapmış olduğu davranışı, harç ile bağlayıcı olan duvar örgü malzemesinin birleşim yüzeyinin önemini ve kayma dayanımı etkisini göstermiştir.

Kanıt ve Döndüren [7] yaptıkları araştırmada, standart çimentolu harçla üretilen bir duvar numunesi ile, katkılı harç ile hazırlanan duvar numunesinin mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Birbiri ile benzer boyutlarda 600x600x200 mm olan 6 adet duvar numunesi farklı miktardaki katkıları baz alınarak örülmüş, daha sonraki aşamada bu numuneler kayma deneyi ile incelenmiştir. Deney sonucunda numunelerdeki çatlaklar ve numune davranışları incelenmiş ve yük-şekil değiştirme grafikleri ile kayma gerilmesi değerleri kıyaslanmıştır.

Alecci ve ark. [8] çalışmaları kapsamında, kireçten üretilen harç, takviyeli harç ve çimento esaslı harç kullanarak harman tuğlası ile duvar numunesi üretmişlerdir. Deneyler için kullanılacak olan duvarlar 1200x1200x120 mm ve 400x400x50 mm ölçülerinde iki çeşit olarak üretilmiştir. Üretilen harcın ağırlıkça karışım oranı kum: çimento: kireç=8:1:1 olarak belirlenmiştir. Duvar elemanlarına diyagonal yükleme yapılarak kayma dayanımlarını tespit etmişlerdir. Çimentolu harçla örülen numunelerde fazla yük kapasitesi taşımaya karşın ani kırılmalar oluşmuştur. Takviyeli harç ile örülen duvar numunelerinde kırılmaların daha sünek bir davranış sergilediği gözlenmiştir.

Arioğlu [9] tasarlamış oldukları deneysel veriler içeren bir çalışmada, takviyeli harç ve bimsblokla örülen 6 adet 1800x3600x190 mm ölçülerinde duvar numunesi üretmişlerdir. Takviye içerikli harç karışımı oranı çimento:kireç:kum=1:0,2:3,5 olarak belirlenmiştir. Duvar numuneleri üzerinde kesme dayanımının araştırıldığı bu çalışmada, gevrek malzemelerden üretilen duvarlarda, yük etkisi ile ani göçmeler meydana gelmekte, taşıma limitini aşınca ani göçmeler ve çatlamlar oluşmuştur. Yığma yapıların davranışını, duvarlardaki bağlayıcı özellikli harcın mekanik ve kimyasal özellikleri ve yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri etkilemektedir. Yığma yapılar konusunda genel bir teori oluşturmak güçtür çünkü duvar yapımında kullanılan malzemeler birbirinden farklı davranışlar göstermektedir.

Costigan ve ark. [10] tarafından yapılan bir çalışmada, duvarlardaki basınç dayanımı ile elastisite modülünü incelenmiştir. Yığma yapı duvar numuneleri, farklı hidrolik

karışımlardaki harçlar kullanılarak üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre 14 MPa dayanım gösteren hidrolik harçlarda, en yüksek dayanımı veren duvar basınç dayanımını yaklaşık 6.5 MPa olarak elde etmişlerdir. Ayrıca duvarlarda daha yüksek dayanımlı tuğla kullanılmasının duvar basınç dayanımına etkisinin de aynı oranda olmadığı belirtilmiştir.

Duvarlar türlü örgü şekliyle örülen ve birbirine harç ile bağlanmış olan kâgir birimlerden oluşan birleşimlerdir. Kâgir basınç dayanımı ve yükleme başlığının sürtünmesi, ayrıca narinlik veya yüklemeye dış merkez etkilerinin yapısal davranışlarında oldukça büyük bir öneme sahiptir [11].

2.2 Lifli Harçlarla İlgili Çalışmalar

Ohno ve Li [12] (polivinil alkol) PVA ve çelik lifleri kullanarak uçucu kül tabanlı geopolimer kompozitlerinin yüksek çekme sünekliğini gösterdiğini ve böylece gerinim sertleştirilmesiyle sünek davranış sergileyen geopolimer kompozitlerinin geliştirilmesinin fizibilitesini belirlemiştir.

Junior vd. [13] fiber takviyeli geopolimer harçlar (FRGM) bağlayıcı kullanarak, farklı mono ve hibrit elyaf türü takviyeler kullanmışlardır. İşlenebilirlik, taze FRGM'nin akış testi ve mekanik özellikleri incelenmiş, sertleştirilmiş FRGM numunelerinin basınç ve kayma dayanımı ile tokluk parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan lif türleri çelik (S), polivinil alkol (PVA), alkaliye dayanıklı cam (ARG) ve polipropilen (PP) liflerinden oluşmaktadır. Fiberlerin mono ve hibrit kombinasyonlarının FRGM'nin işlenebilirliği ve mekanik özelliklere etkileri test sonuçları baz alınarak karşılaştırılmıştır.

Valluzzi ve diğ. [14], lifli geopolimer harcın yığma duvarların üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 24 güçlendirilmiş ve 9 güçlendirilmemiş toplam 33 duvar numunesi üretmişlerdir. Lifli polimer cinsi numunenin her iki yüzüne veya tek yüzüne uygulama, lifli polimerin uygulanma biçimi ve farklı katmanlarda polimer güçlendirmeler uygulamışlardır. Deney sonuçları, tek yüzüne güçlendirme uygulanmış olan numunelerde asimetric güçlendirme sebebiyle rijitlik farkı oluştuğunu ve kayma deformasyonu gözlemlendiğini, ayrıca hasarın büyük kısmının güçlendirilmemiş yüzeyde oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Fakat, ağ şeklindeki güçlendirme uygulamasının duvardaki ani kırılmayı engellemede daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Güçlendirilmiş olan numunelerin göçme modu, lifli geopolimerin yüzeyden ayrılması ve rijitliği az olan lifli geopolimerin kayma dayanımı

arttırmada etkisinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları, kesme dayanımını tahmin etmek amacıyla kullanılan analitik modeller ile kıyaslanmıştır.

Lifler [15] mono veya hibrit formlarda kullanılabilir. Hibrit liflerin kullanımı, farklı özelliklerin iyileştirilmesiyle bir kompozitteki farklı lif türlerinin faydalarından yararlanır. Kısa liflerin genellikle macun veya harçla birlikte kullanıldığında olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir. Lifler iki farklı gruba ayrılabilir. Bunlar mikro lifler ve makro liflerdir. Mikro lifler 12,7 mm'den kısa olan, makro lifler ise 12,7 mm'den fazla olan liflerdir.

Mikro lifler [16] karışımda rastgele dağıtılır ve bu nedenle kompozitin her yönünde ekstra mukavemet sağlar. Ayrıca, kısa liflerin çapları mikro metre aralığında olduğu için yüzey alanının daha büyük olduğunu göstermektedir.

Ahmed ve Mihashi'nin [17] yaptığı çalışmada, kısa lifler küçük boyutları ve daha yüksek ara yüzey alanları nedeniyle daha yüksek bir nihai yük sergiler ve bu da lifler tarafından aktarılacak maksimum yükte bir artışa yol açar. Farklı elyaf türlerinin hibridizasyonunun, kompozitlerin özelliklerinde büyük iyileştirmeler [18] ile sonuçlanabileceği ve gerçek hayattaki uygulamalar için daha iyi kompozitler yapılabileceğini gösterilmiştir. Bununla birlikte, liflerin belirli bir bağlayıcı ile en etkili ve verimli hibrit kombinasyonlarını belirlemek için kapsamlı çalışmalar yapılması gereklidir.

Son zamanlarda yapılan birkaç çalışma, liflerin geopolimer kompozitlerin davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Shaikh [19] çelik ve polivinil alkol (PVA) liflerini, 0.5 ve 0.75 kum-bağlayıcı oranlarına sahip geopolimer kompozitlerde mono ve hibrit kombinasyonuyla yapısal davranışı incelemiştir. Liflerin %2'lik hacim fraksiyonunun geopolimer kompozitlerin sertleşmesini ve çoklu çatlak sağladığını göstermiştir.

2.3 Geopolimerler Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Geopolimerden üretilen harçlar bağlayıcı olarak uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu, ve aktivatör olarak: sodyum ve potasyum esaslı hidroksit ve silikat çözeltiler kullanılmaktadır. Alkali aktivasyon işleminde farklı kombinasyonlar mevcuttur örneğin; alkali silika, damıtılmış su, hidroksit, sodyum silikat vb. olabilmektedir. Bu süreç hammaddenin çözülmesi, taşınması ve reaksiyon ürünlerinin polikondenzasyonunu, alümino-silikat malzemelerin geopolimerizasyonu, gibi karmaşık süreçlerden oluşan kimyasal işlemlerdir [20].

Van ve ark. [21] geopolimer harçlar, yeni nesil inorganik bağlayıcılardır, bu bağlayıcılar standart Portland çimentosu (SPÇ) türevi harçların yerini almak için üretilen yüksek potansiyele sahip ürünlerdir.

Provis [22], Geopolimerle ilgili olan ilk çalışmalara 1940 yılında Purdon adım atmıştır ve YFC ile alkalileri birleştirerek kompozit üretmiştir. Kullandığı cürufu %10 sodyum hidroksit kullanarak aktive etmiş haliyle dayanımının 25 MPa'a ulaştığı elde edilmiştir. Böylece sodyum hidroksitin YFC ile priz almasının katalizör görevi gösterdiğini yaptığı çalışma ile doğrulamıştır.

Rusya'da 1950'lerde Portland çimentolu hammaddelerin eksikliği yaşanmış ve bu çalışmaların öncülüğünde yeni çalışmalar yapılmıştır. Eski Mısır ve Romalılar döneminde kullanılan harçlar incelenmiş ve volkanik kayaçların zeolitlere dönüşümü süreçleri izlenerek endüstride kullanılan alkali atıklarla YFC karışımı karıştırılarak yeni zemin çimentosu adı verilen bağlayıcılar geliştirilmiştir. Bu dönemde üretilen bu yeni ürün döşemelerde, konutlarda, prefabrik bloklarda, demiryollarında ayrıca drenaj kanalları ve beton sulamada kullanılmıştır [23].

Davidovits [24] Fransa'da 1970'lerde maruz kaldığı katastrofik yangınlara bir çözüm yolu ararken ısı ile ateşe dayanan ve malzeme olarak plastiğe benzeyen bir ürün üretmeyi amaçlamıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, alkalilerle aktive edilen bağlayıcılarla yeni bir ürün üretmek istemiştir. Alkali silikat ve metakaolin (MK) tabanlı yeni bir bağlayıcı üretilmiştir. Metakaolin esaslı bu malzemelere daha sonra geopolimer adını vermiştir.

Sonraki yıllarda ise geliştirilen bu malzemelere geoçimento [25], alkali aktive edilmiş çimento ve inorganik polimer beton gibi isimler verilmiş ve bulunduğumuz zamana kadar araştırılması süregelmiştir. Bu yeni nesil bağlayıcının Portland çimentolu standart harçlardan üstünlüklerinden birisi de asit direncinin daha yüksek olmasıdır. Bu özelliği sayesinde geopolimer beton, atık yönetimi alanları ile gıda endüstrisi alanlarında kullanımı ve uygulanması fazlasıyla önemli hale gelmiştir.

Uçucu kül esaslı geopolimer betonun %5 asetik asit ile sülfürik asitli ortama maruz bırakıldığı bazı çalışmalarda içeriğindeki alkali aktivatörlerin asit direncine karşı önemli bir etkisinin olduğunu ve çimentolu harca oranla geopolimer içeriğindeki daha düşük kalsiyumun bu performansta etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca sodyum hidroksit aktivatörü ile üretilen harçlarda ağırlık değişimi %2 ile sınırlanırken standart çimentolu betonlarda %10'un üstünde bir değişimin olduğu ortaya çıkmıştır [26-28].

Duxson ve ark. [29] geopolimer harç yapımında amorf silis (Si) ve alüminyum (Al) içerikli doğal mineraller veya yan sanayi ürünü olan endüstriyel atık ürünlerin kullanılabilceğini belirtmişlerdir. YFC, MK ve UK esaslı geopolimerlerin birleşiminde daha yüksek su ihtiyacı doğuran metakaolin bazlı geopolimerler, diğer hidratlara oranla dayanım açısından daha fazla avantaj göstermiştir. UK esaslı geopolimerler ise daha yüksek durabilite sağlarken, daha yüksek erken yaş mukavemeti ve asit dayanımı göstermişlerdir.

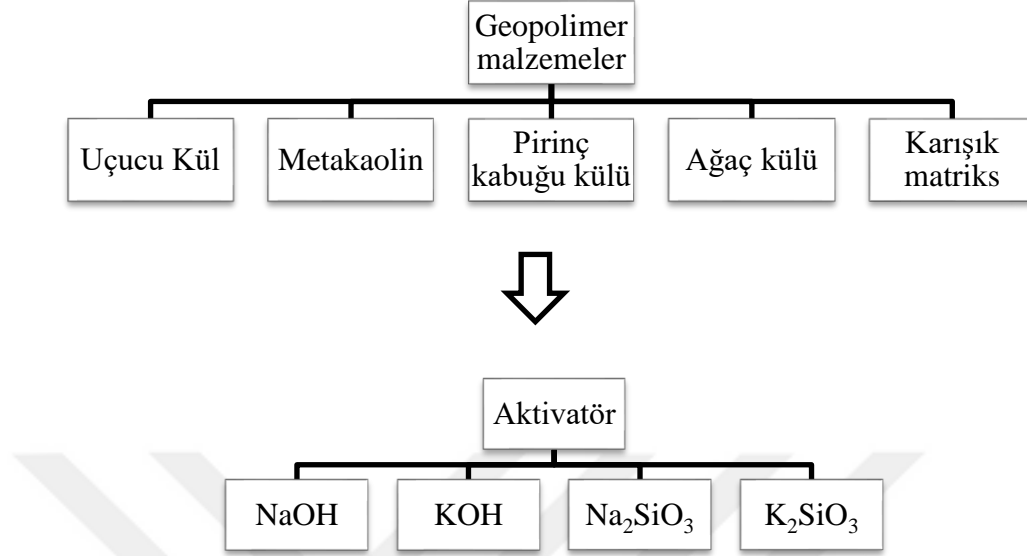
UK esaslı sodyum hidroksit konsantrasyonlu geopolimer harcın dayanımının kesme dayanımı ve su emme miktarına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada [30], sodyum hidroksit konsantrasyonu ve kuruma süresi değiştirilip, 24 saat, 48 saat ve 72 saat kürleme süresiyle 8M, 12M, 16M NaOH konsantrasyonlarında toplam 9 karışım oluşturulmuştur. Araştırmanın neticesinde, sodyum hidroksit konsantrasyonundaki artış ile basınç dayanımının artışı arasında bağlantı olduğu görülmüştür. Priz süresi ise kürleme süresindeki artışla daha da artmış, fakat 48 saatlik kürleme süresinin bitiminden sonra basınç dayanımında anlamlı artışlar olmamıştır. Sonuç itibari ile 60 °C'de ısı kur uygulanması ile 3 MPa'a kadar kayma dayanımı ve yaklaşık 60 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Ayrıca, numunelerin su emme miktarının sodyum hidroksit konsantrasyonu ve sertleşme süresindeki artışa bağlı azaldığı gözlenmiştir.

Yapılan çalışmada [31] bir günlük kürlenmiş geopolimer harç ile onarılmış beton numunelerinin, kürlemesi 28 gün sürdükten sonra, sanayide mevcut ticari olan onarım ürün ve maddeleri ile tamir edilen diğer örneklerinden daha yüksek aderans sağladığı belirtilmiştir. Bu da geopolimer harcın beton tamiri için kullanılacak yeteneğe sahip üçüncü bir harç kategorisi olarak tanımlanmasını sağlamıştır [32].

Geopolimer harçlar alkali/bağlayıcı oranı ile SiO_2/Al_2O_3 tarafından etkilenmektedir [33-34]. Geopolimer betonların içeriğindeki alkali oranının değişimine bakılmış ve değişen alkali içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımları artış göstermiştir. Öte yandan, silika içeriğinin artması ile dayanımda düşüş olduğu gözlenmiştir. Sadece sodyum hidroksit ile aktivasyonunun, Si / Na oranı değişimine bağlı şekilde, kristal ya da başka bir çeşit zeolitin kristallerini meydana getirdiğini, sodyum silikat eklenmesinin boşluk miktarını arttırdığı ve kristalit oluşumunu önemli ölçüde azaltıp dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Geopolimer betonlardaki geçirimsizlik özelliklerinin tespit edilmesi için yapılan çalışmada [35], geopolimer betonun ve çimento esaslı betonun su emme kapasiteleri ve açık boşluk hacimleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar geopolimer betonun standart Portland

çimentolu betona oranla %37,62 oranında boşluk azalması yaptığı ve %38,38 değerinde daha az oranda su emdiği tespit edilmiştir.



Şekil 2.1: Geopolimer ve Aktivatör türleri

Yang ve ark. [36] öğütülmüş YFC tabanlı geopolimeri kullanarak alkali ile aktive edilmiş köpük betonun özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen örneklerin birim ağırlık değerleri, 325-462 kg/m³ arasında değişirken, 28 günlük basınç dayanımı değerleri ise 0.5-1.97 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Polipropilen elyaf (PPF), geopolimer beton uygulamalarında kayma mukavemetini, enerji emilimini ve dayanıklılığını arttırmak amacıyla yaygın bir oranda kullanılmaktadır [37-39]. Bununla beraber, yüksek PPF içeriğinin, aynı zamanda, işlenebilirlikte azalmaya ve yüksek gözenekliliğe yol açabildiği belirtilmiştir [40-41]. Bu araştırma, polipropilen elyaf takviyeli hücreli hafif yüksek kalsiyum uçucu kül geopolimerinin (PPF-CLFAG) kuru birim ağırlığını, mukavemetini ve mikro yapı özelliklerini araştırmaktadır. PPF içeriğinin, NaOH konsantrasyonunun; kuru birim ağırlık, basınç dayanımı, kayma dayanımı incelenmiştir. Ayrıca mikroyapı ve taramalı elektron mikroskopu teknikleri ile araştırılmıştır. PPF-CLFAG'ın kuru birim ağırlığını, basınç dayanımını ve kayma dayanımını tahmin etmeye yönelik denklemler de Statistical Package for Social Science (SPSS) adı verilen program kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen bilgiler, yapısal olmayan üretimler için mühendislik, ekonomik ve çevresel açılarından çok faydalı model olmuştur [42].

Prota ve ark. [43] Akdeniz bölgesinde bulunan ülkelerin tarihi yapılarında, o dönemde kullanımı yaygın olan sünger taşıyla yapılan yığma duvarlarda bir takım deneysel çalışma

yapmışlardır. 8 adet deney numunesi ve 4 adet kontrol numunesi üretmişlerdir. Çalışmada güçlendirme yapmak amacıyla numune yüzeyine ağ şeklinde yapıştırıcı olarak cam lifli veya çimento harçlı lif uygulanmıştır. Lifli polimer numunenin her iki yüzüne veya tek yüzüne uygulanacak şekilde, iki veya tek kat olarak uygulayıp farklı kombinasyonlar oluşturmuşlardır. Numunelerin dayanımını ve düzlem içi deformasyonlarını görmek amacıyla diyagonal yükleme yapılmıştır. Bu deneyler neticesinde, iki yüze de iki kat cam lif içerikli polimer uygulanan numunelerde süneklik olduğunu, daha yüksek kayma dayanımı ve mekanik özelliklerde olumlu artışlar elde edilmiştir. Yalnızca bir tarafı güçlendirilen numunelerde yükü eşit tabanlı almamasından kaynaklı düzlem dışı deformasyonlar oluşarak gevrek göçme modu izlenmiştir.

Görhan ve Kürklü [44] yaptıkları bir çalışmada, UK kullanılarak yapılan geopolimer harçların mekanik özellikleri dikkate alındığında yalnız NaOH ile aktivasyonun, Na_2SiO_3 ile birlikte belirli oranlarda kombine halde kullanımına kıyasla daha düşük sonuçlara yol açtığı belirtilmiştir. Bu durumun ise, geopolimerizasyon sürecinde Na_2SiO_3 kullanılması halinde Si içeriği yüksek olan reaksiyon ürünleri oluşmasından kaynaklandığı şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir. Alkali aktivatör solüsyonlarının geopolimer üretiminde kullanılacak ham maddenin içeriğindeki alüminyum ve silis oksitlerinin çözünmesinde ciddi bir rol oynadığı belirlenmiştir. Aynı şekilde, geopolimerlerin NaOH, KOH, Na_2SiO_3 veya potasyum silikat gibi yaygın olarak kullanılan bu kuvvetli alkali aktivatörler ile alüminosilikat reaktif maddeleri karıştırarak sentezlendiği belirtilmiştir. Bunun yanında, geopolimer üretim işleminde kullanılacak alkali katyonu tipi ve konsantrasyonu gibi parametrelerin, alüminosilikat ham malzemelerinden içerisindeki Si ve Al atomlarını çözerek geopolimer ürünlerini oluşturmak için büyük önem taşıdığını ve üretilen geopolimerlerin yapısını ve mekanik performansını belirlemede önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir.

2.4 Geopolimer

Geopolimer üretiminde UK, SD, YFC gibi yan sanayi ürünleri olan endüstriyel ürünler yaygın olarak kullanılır. İçeriğinde yüksek oranda reaktif alüminosilikatlar bulunan geopolimerler genellikle sodyum veya potasyum bazlı alkaliler ile aktive edilirler.

Geopolimer, endüstriyel yan atık ürünleri kullanılarak bunun çeşitli malzemeler ile aktive edilmesi yoluyla bağlayıcılığı yüksek olan ve geleneksel betona alternatif dayanımı yüksek bir malzemedir. Portland çimentosu üretmek amacıyla kullanılan enerjinin yüksek olması ve

çimento üretiminin çevresel problemlere yol açması, endüstriyel faaliyetler sebebiyle meydana gelen ve yan ürün olarak elde edilen malzemelerin bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolimer kompozitleri daha cazip kılmıştır. Ayrıca, geopolimer üretiminde bağlayıcılığı yüksek olan UK, Portland çimentosundan çok daha ucuzdur. Aynı zamanda depolanması maliyetli ve sıkıntılı olan bu atık ürünleri üretime kazandırarak, tozlaşma etkisiyle bitkilerin zarar görmesini engellerken hem ekonomik hem de çevre dostu bir yapı malzemesi üretimi sağlanmıştır. Son yıllarda geopolimer adı verilen bu yenilikçi bağlayıcı malzeme ile ilgili araştırmalar sıklıkla sürdürülmektedir.

Tanımlanmış olan 9 çeşit geopolimer malzeme mevcuttur [45].

- * UK tabanlı geopolimer
- * Organik maden tabanlı geopolimer
- * Fosfat tabanlı geopolimer
- * Cam suyu tabanlı geopolimer; polisiloksonat (Si: Al=1:0)
- * Metakaolin tabanlı geopolimer; poly(sialate-siloxo) (Si: Al=2:1)
- * Kaolin hidrosodalit tabanlı geopolimer; polisialat (Si: Al=1:1)
- * Kalsiyum tabanlı geopolimer; sialate (Ca, K, Na) / (Si: Al=1, 2, 3)
- * Kayaç tabanlı geopolimer; (1 < Si: Al5)
- * Silika tabanlı geopolimer; (Si: Al>5).

2.5 Çimentodan Kaynaklanan Çevre Problemleri

Küresel ısınmaya sebebiyet veren sera gazlarının %7'sini karbondioksit gazı oluşturur. Çimento üretimi yüksek oranda karbondioksit salınımı yapan önemli bir unsurdur. Üretim yöntemlerine bakıldığında inşaat endüstrisini çevreye zarar veren bir sektör haline getirmektedir. Yeşil çevre konseptinin yaygınlaşmasıyla son zamanlarda, yenilenebilir enerji sistemleri, doğal kaynakların daha az harcanması ve çevreye daha düşük zararlı atık salınımı gibi konular gündeme gelmiştir. Çevre dostu malzemeler üzerine eğilim gösteren bilimsel araştırmaların sayısı da her geçen gün artmaya devam etmektedir. Bu noktada, inşaat sektöründe çimento kullanımını engellemek amacıyla çimentonun yerini alacak malzemeler araştırılmaya başlanmış ve çimentosuz beton adı verilen geopolimer betonlar üretilmiştir.

Özellikle son yıllarda vazgeçilmez yapı malzemesi olarak görülen çimentonun, çok yüksek bir kullanım kapasitesine eriştiği ve yıllık artış miktarının %9 civarında seyrettiği belirtilmiştir [46]. Yapılan araştırmalarda, 1 kg çimento üretiminin yaklaşık 0,81 kg CO₂ gazı salınımına neden olduğu ve dünya çapında yıllık 4,1 milyar ton civarında çimento üretimi olduğu bilinmektedir. Bu durum çimento üretimi ve kullanımının, yaşamın devamını tehlikeye sokan büyük bir tehdit haline geldiğini göstermektedir [47].

Sudan sonra en yüksek tüketime sahip malzemenin çimento olduğu belirtilmiştir [48]. Betonlaşmanın artması ile dünyadaki ortalama sıcaklıkların yükselmesine bağlı olarak iklim değişikliği yaşanmaktadır. Bu olumsuz sonuçların temel nedeninin ise betonun esas bileşeni olarak adlandırılan çimento olduğu söylenebilir.

Yapılan bir çalışma sera gazı emisyonlarının geopolimer uygulaması ile %60'a kadar azaltılabileceğini göstermiştir [49]. Şekil 2.1 çimento üretiminden kaynaklanan doğaya bırakılan CO₂ gazı emisyonlarını göstermektedir [50].



Şekil 2.2: Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ gazı emisyonu

3. MATERYAL ve METOD

3.1 Ham Madde

3.1.1 Geopolimer harç hazırlanmasında kullanılan malzemeler

Doğadaki minerallerin kristal yapıları ve kimyasal bileşimleri belirli bazı teknikler ile değişime uğrayarak yeni malzemeler üretilmiş ve bu malzemeler "geopolimer veya inorganik polimer" olarak adlandırılmıştır. Geopolimer betonun standart çimento içerikli betonlara oranla hidrasyon ısısı daha düşük ve donatılarda oluşan korozyona karşı daha etkili olduğu, ayrıca asit yağmurlarına ve saldırılarına karşılık daha yüksek direnç gösterdiği bilinmektedir. Bu yetenekleri ile amorf yapıdaki geopolimer betonlar; betonarme su tankı, istinat duvarları, öngermeli köprü ve baraj inşaatında, ısıya yangına ve asite karşı dayanıklılık isteyen yapı malzemelerinde, nükleer atıklardan korunmada, sağlığa zararlı kimyasalların bertaraf edilmesinde dirençli ürün üretiminde normal betonlara kıyasla tercih edilmektedir.

Kısaca kimyasal, ısı, yangın, asit direncinde portland çimentolu betonlara göre geopolimer betonlar birçok üstünlüklere sahiptir [51]. Bu sebeple maden, baraj, inşaat ve atık yönetimi gibi alanlara uygulanma potansiyeline sahiptir. Geopolimer betonlar, oda sıcaklığında hızla priz alabilir ve 4 saat içinde 20 MPa'a kadar basınç dayanımı gösterir. 20°C'deki 28 günlük basınç dayanımları, hidrolik bağlayıcı harçlara uygulanan standart testler ile test edildiğinde, 70-100 MPa aralığında dayanım gösterirler. Donma-çözülme dayanımı, sülfat dayanımı, korozyon direnci, düşük rötre, yüksek erken dayanım gibi avantajlı özellikleri sayesinde uzun süreler boyunca kullanımını sağlar. Bu yüksek alkali geopolimerler hiçbir alkali-agrega reaksiyonuna girmezler.

3.1.1.1 Yüksek fırın cürufu

Kısa adıyla YFC, demir-çelik tesislerindeki, yüksek sıcaklıklı fırınlarda demir üretilirken açığa çıkan bir çeşit yan üründür [52-63]. Kok kömürünün yakıt olarak kullanıldığı 1500 °C sıcaklıkta yüksek fırınlarda demir üretmek amacıyla kükürt, alümin ve silis içeren demir cevheri, gerçekleşen reaksiyonlar sonucu erimiş demir ve erimiş cürufu meydana getirmektedir. Yüksek sıcaklık sebebiyle erime sonucunda eriyik demir alt kısımda bulunurken eriyik cüruf üst kısımda yüzer. Yüksek basınçlı su jetleri ile hızlıca söndürülen erimiş cüruf sönmeye sonucu 5 mm çaptan daha küçük boyutta granüle cüruf meydana gelmektedir. Hızlı soğutma işleminin yapılmasının amacı kalsiyum aluminosilikat içeren ve

%95'i kristal olmayan granüle bir malzeme oluşturmak ve kristal oluşumunu engellemektir. İşlenebilirlik özelliğini artırmak için kurutma işlemine tabi tutulan granüle cürufu ince toz haline getirmek amacıyla dönen bilyeli öğütücü içinde öğütülür. Oluşan bu ürüne öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu denir. YFC, geleneksel standart portland çimentosu ile aynı kimyasal bileşenlere sahiptir fakat malzeme içindeki oranları farklılık göstermektedir. Malzeme içeriğini MgO, CaO, Al₂O₃, SiO₂ oluşturmaktadır. YFC'nin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
%	32.47	9.94	1.25	32.45	9.31	0.31
Element	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Mn ₂ O ₃	Cl	
%	0.85	1.16	0.82	3.51	0.015	

3.1.1.2 Silis dumanı

Endüstriyel bir yan ürün olan silis dumanı (SD), ana bileşeni yüksek kuvarsın 2000 °C'nin üzerinde elektrik ark fırınlarında indirgenen, 1 µm'den küçük küresel, amorf, camsı silika (SiO₂) parçacıklarından oluşur. Silisyum metal veya demir-silikon alaşımlarının ergitilerek elde edilen ve yüksek derecede puzolanik özelliğe sahip bir malzemedir. Özgül yüzey alanı çok büyük olan (15.000- 25.000 m²/kg), çok ince taneciklere (ortalama çap 0,15 µm), amorf yapıya ve yüksek SiO₂ fraksiyonuna sahip, oldukça reaktif bir malzeme türüdür. Pek çok yararlı özelliği olan silis dumanının, taşınmasını, işlenmesini ve depolanmasını zorlaştıran çok ince, düşük yoğunluklu bir malzemedir [54]. Çok yüksek miktarda SiO₂ (2 ve üzeri) içeren SD, az miktarda demir, magnezyum ve alkalin oksitler içerir [55]. Silis dumanının kimyasal bileşimi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Silis dumanı kimyasal bileşimi

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	K.K
SD	85.98	0.64	0.32	0.70	4.91	0.63	-	-	2.66

3.1.1.3 Agregat

Hafif agregalar, maksimum kuru yoğunluğu 1200 kg/m³ veya maksimum tane yoğunluğu 2000 kg/m³ olan taneli malzemelerdir. Bazı hafif agregalar doğada hazır olarak bulunurken,

diğerleri yapay olarak üretilir [56]. Hafif agregalar genel olarak üretim yöntemleri ve süreçlerine göre sınıflandırılır. Doğal hafif agregalar genellikle volkanik kökene sahiptir. Yapay agregalar ise endüstriyel cam malzemesi, UK ve YFC gibi ürünlerden elde edilmektedir [57-60].

Çalışmada 0-4 mm tane boyutu ölçülerinde ince dere agregası kullanılmıştır. Agregaya ait görsel Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Kullanılan kumun granülometri özellikleri Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3: Kullanılan agreganın granülometrik analiz değerleri

Elek çapı (mm)	Elekten geçen (%)	Elek üstünde kalan (%)
4	100	0
2	78,6	21,2
1	62,5	37,5
0,5	45,5	54,5
0,25	20,4	79,6
0,125	7,6	92,4
0,063	1,0	99,0



Şekil 3.1 : İnce agrega

3.1.1.4 Sodyum hidroksit

OH- iyonunu sağlamak için genellikle tercih edilen NaOH bir alkali aktivatördür. NaOH (SH) molaritesi geopolimer harcın özelliklerini belirleyen en önemli etkenlerden biridir. Kimyasal çözünme yüksek NaOH konsantrasyonu ile hızlandırırken, etrenjit ve C-S-H oluşumunu sağlamaktadır. NaOH konsantrasyonunun artması, reaksiyonun erken

zamanlarında daha yüksek dayanım sağlarken, çözelti içindeki yüksek miktarda OH- varlığı nedeniyle ortaya çıkan geopolimer karışımın uniform olmayan bir yapısına neden olup dayanımını negatif olarak etkileyebilmektedir. Sodyum hidroksit ile aktifleşen geopolimerin yapısının kristalleştiği ve geliştiği, aşırı yoğun sülfat ve asit ortamlarında dengesinin korunduğu belirtilmiştir. NaOH konsantrasyonu ile reaksiyon sırasında ortaya çıkan ısı ile arasında doğrusal bir orantı vardır [61].

3.1.1.5 Sodyum silikat

Piyasada ismi cam suyu olarak da geçen ve bir alkali etkinleştirici olan Sodyum silikat (SS), Kuvars kumu (SiO_2) ve sodyum karbonatın (Na_2CO_3) 1100 °C'nin üzerinde kaynatılması ve yüksek basınçlı buhar ile yarı viskoz bir sıvı halinde çözülmesiyle elde edilmektedir [62]. Cam suyu, puzolanik bir reaksiyon başlatmak amacıyla yeterli miktarda OH- iyonu içermediğinden saf alkali aktivatör olarak nadiren kullanılır. Alkaliliği ve kuvveti arttırmak ve reaksiyonu başlatmak için genellikle NaOH ile reaksiyona girerler. Bu nedenle geopolimerizasyonda en yaygın kullanım alanına sahip ve kullanım potansiyeli yüksek olan alkali aktivatörler sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkalileri birlikte kullanılmaktadır [63-64]. Na_2SiO_3 'ün varlığı, agregalar ve geopolimer harçlar arasındaki ara yüzey bağımlı iyileştirmektedir [65]. NaOH ve sodyum silikatın kimyasal özellikleri Çizelge 3.4' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4: Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kimyasal özellikleri

Molekül formülü	NaOH	Na_2SiO_3
Molekül kütlesi (g/mol)	40.0	122.0
Renk	Beyaz	Renksiz
pH	13-14	11-12.5
Bağıl yoğunluk (g/cm^3)	2.14	
Na_2O içeriği (%)	-	11.5-13.50
SiO_2 içeriği (%)	-	24-26
H_2O içeriği (%)	-	60-65

3.1.1.6 Lifler

Karbon fiber, polipropilen ve cam lifler, denemesi yapılan karışımlardan en yüksek dayanımı veren karışıma belirli kombinasyonlar baz alınarak katılmıştır. Bu lifler özelliklerine göre seçilmiş ve kullanılan oranlarının karma lifli harç malzemesinin

üzerindeki etkileri basınç ve kayma dayanımları ile test edilerek incelenmiştir. Geopolimer harçlarda kullanılan liflerin narinliği 6mm'dir ve kırılmış lif özelliğindedir. Karbon lif elyaf özellikleri Çizelge 3.5' de gösterilmiştir. Cam liflerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir. Cam liflerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.7'de gösterilmiştir. Polipropilen lifin özellikleri Çizelge 3.8' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5: Kırılmış karbon elyaf özellikleri

Özellikler	SI	US
Çekme dayanımı	3800 MPa	550 Ksi
Elastisite modülü	228 GPa	33 Msi
Elektrik iletkenliği	0,00155 ohm-cm	0,00061 ohm-in
Özgül ağırlık	1,81 gr/cc	0,065 lb/in ³
Elyaf çapı	7,2 mikron	0,283 mils
Karbon yüzdesi	%95	%95
Elyaf uzunluğu	6mm-8mm-12mm	0,25-0,35-0,50 (inch)

Çizelge 3.6: Cam liflerin kimyasal özellikleri

H ₂ O: 24 s	1,9	1,2	0,7	0,8	0,6	0,7	0,5	0,4
168-s	4,8	2,9	5,8	0,9	0,8	1,4	0,6	0,7
% HCl: -24 s	1,5	4,2	21,6	43	5,4	2,5	9,4	3,7
168s	-	7,5	21,9	44	7,6	3	10,1	5,1
%10 H ₂ SO ₄ :	0,5	2,3	18,6	39	6,2	1,3	9,9	4,1
168s	2,4	4,9	19,6	41	10,3	5,4	10,8	5,6
%10	-	25	13,6	2,1	-	1,3	3,0	2,0
168s	-	31	36,4	2,1	1,8	1,5	-	2,1

Çizelge 3.7: Cam liflerin fiziksel özellikleri

	A-tipi	C-tipi	D-tipi	E	Advante	ECRGlas	AR
Yogunluk	2,43	2,51	2,14	2,55	2,61	2,70	2,71
Refrakto	1,528	1,532	1,464	1,557	1,561	1,575	1,562
Yumuşama	704	750	771	846	915	882	772
Tavlanma	-	587	521	656	736	-	-
Gerilme	-	521	476	614	691	-	-
Gerilme Mukavemeti (MPa)							
-196°C	-	5380	-	5310	-	53 10	-
23°C	3310	3310	24 15	3445	-	3445	3241

371°C	-	-	-	2620	-	2 165	-
538°C	-	-	-	1724	-	1724	-
Young Modülü (Gpa)							
23°C	68,8	68,9	51,6	72,4	76,5	80,2	73,2
538°C	-	-	-	81,2	843	813	-
Esneme %	4,7	4,8	4,6	4,7	4,5	4,7	4,5
Spesifik	-	144	124	146	-	141	-
Spesifik	-	3	2,6	3,1	-	3,24	-

Çizelge 3.8: Polipropilen lifin özellikleri

Teknik özellik	Açıklama
Kimyasal yapı	% 100 polipropilen
Yoğunluk	0,91 g/cm ³
Lif uzunluğu	12 mm
Lif Çapı	18 mikron-nominal
Su emme	Eser miktarda
Ergime noktası	160 °C
Tutusma sıcaklığı	365 °C
Isı iletkenliği	Düşük
Liflerin özgül yüzey alanı	250 m ² /kg
Asit direnci	% 100
Çekme Dayanımı	300/400 MPa
Elastisite Modülü	4000 MPa

3.1.2 Yığma duvarların hazırlanmasında kullanılan malzemeler

Yapıyı dış etkenlerden koruyan, mekanları ve binaları çevreleyen, mekanları birbirinden ayıran, Üst yapı elemanlarının yüklerini temele aktaran düşey yapı elemanlarına duvar denir [66].

3.1.2.1 Duvar örgü malzemeleri

Ülkemizde sıklıkla 2 tip tuğla çeşidi sıkça tercih edilmektedir. Bunlar, yatay delikli ve düşey delikli yığma tuğlalardır. Tuğla seramik olarak da adlandırılan yüksek sıcaklıklarda ısı işlemiyle silikat ve metal oksitten oluşan yapı malzemesine denir. Pişirme esnasında tuğlalarda birçok boşluklu yapı, çatlaklar ve poroziteler oluşur ve oluşan bu deformasyonlar tuğlanın mekanik ve fiziksel birçok parametresini olumsuz etkilemektedir. Ülkemizde betonarme taşıyıcı sistemden oluşan binalarda, yatay delikli olan

tuğlalar genellikle bölme duvar yapma amacıyla, düşey delikli tuğlalar taşıyıcı olarak kullanıla gelmektedir. Yatay delikli tuğlaların 8,5-10-13,5-25'lik gibi seçenekleri bulunmaktadır. Farklı tuğla çeşitlerinin özellikleri Şekil 3.2' de verilmiştir.



Ağırlık (kg)	2
Boyut (cm)	8,5×19×19
Basınç Dayanımı (N/mm)	2,5
Sarfiyat (adet/m²)	25-35
Isı iletkenliği (W/Mk)	0,32

a)



Ağırlık (kg)	6,5
Boyut (cm)	29×19×10
Basınç Dayanımı (N/mm²)	7
Sarfiyat (adet/m²)	18-25
Isı iletkenliği (W/Mk)	0,32

b)



Ağırlık (kg)	1,4
Boyut (cm)	19×9×5
Basınç Dayanımı (N/mm²)	4,9
Sarfiyat (adet/m²)	60
Isı iletkenliği (W/Mk)	0,33-0,45

c)

Şekil 3.2 : Tuğla çeşitlerinin genel özellikleri a) 8,5'lik yatay delikli tuğla b) Taşıyıcı olarak kullanılan delikli bir tuğla c) Pres tuğla

Pres tuğlalar, kil, toprak, kum ve bazı durumlarda kiremit tozunun suyla karıştırılmasıyla elde edilir. Pres tuğlanın oluşturulması amacıyla yüksek basınç uygulayarak kalıplanması ve pişirilmesi gerekmektedir. Kalıplama işlemi yüksek basınç altında gerçekleştiğinden bu tuğlaların basınç dayanımı fazla ve su emme oranları diğer tuğla çeşitlerine göre daha düşüktür. Pres tuğlalar kaplanmadan kullanılan tuğlalardır. Dolu, delikli veya özel profilli olarak da üretilir. Boyutları normal tuğla veya modüler boyutlarda düzgün yüzlü ve temiz kesilmiş tuğlalardır. Bu tez çalışmasında hazırlanan yığma duvarlarda örgü malzemesi olarak pres tuğla kullanılmıştır.

3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

3.2.1 Geopolimer harçların hazırlanması

Çalışmanın bu bölümünde en yüksek dayanıma sahip geopolimer harcın elde edilmesi amacıyla farklı geopolimer harç (GH) karışımları hazırlanmıştır. GH üretiminde bağlayıcı malzeme olarak YFC ve Silis Dumanı (SD) farklı oranlarda kullanılmıştır. Sodyum Hidroksit (NaOH) ile Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) aktivatör olarak kullanılmıştır. Kullanılan aktivatörün konsantrasyonunun geopolimerizasyon reaksiyon oluşumu ve basınç dayanımı özellikleri üzerinde büyük bir öneme sahip olduğu bilinmektedir. OH^- iyonunun konsantrasyonu (derişimi) arttıkça, aktivatör çözeltisi içerisindeki aluminosilikatların çözünürlüğü yükselir ve silikat iyonlarının polimerizasyon derecelerinde de artış olur. NaOH çözeltisi, beyaz katı parlak bir iyonik bileşiktir. Sodyum katyonlarının (Na^+), hidroksit anyonları (OH^-) ile birleşmesinden oluşur. OH^- peletlerinin (%98 saflıkta) suda çözülmesiyle hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılmış olan aktivatörlerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir. Sodyum hidroksitin yoğunluğu 2.130 g/cm^3 'tür. Sodyum hidroksit konsantrasyonunun etkisi, mekanik özellikler belirlenerek 8 M ila 12 M aralığında değişimleri incelenmiştir. Karışımların bağlayıcı, agrega, aktivatör oranı 1:3:0,6 olarak alınmıştır. Numunelerin 7. gün ve 28.gün basınç ve eğilme dayanımları incelenmiştir.

Çizelge 3.9: Malzeme karışım tablosu

	YFC (gr)	SD (gr)	Agrega (gr)	SS (gr)	SH (gr)	Toplam ağırlık
100YFC	540	-	1620	220	110	2670
8M	540	-	1620	220	110	2670
10M	540	-	1620	220	110	2670
12M	540	-	1620	220	110	2670
95YFC+5SD	513	27	1620	220	110	2580
8M	513	27	1620	220	110	2580
10M	513	27	1620	220	110	2580
12M	513	27	1620	220	110	2580
90YFC+10SD	486	54	1620	220	110	2490
8M	486	54	1620	220	110	2490
10M	486	54	1620	220	110	2490
12M	486	54	1620	220	110	2490
90YFC+10SD (NaOH)	486	54	1620		330	2490

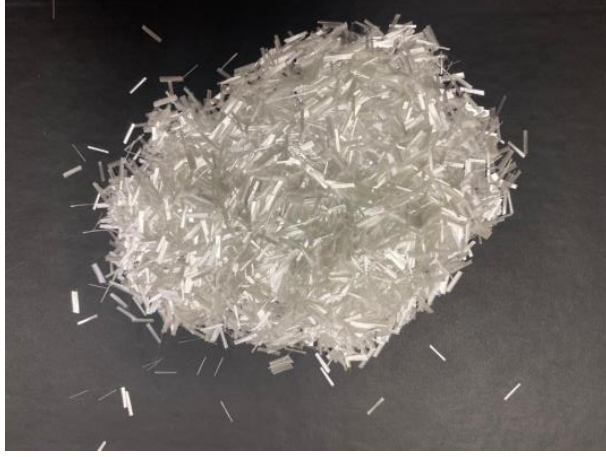
8M	486	54	1620	330	2490
10M	486	54	1620	330	2490
12M	486	54	1620	330	2490

3.2.2 Lifli geopolimer harçların hazırlanması

Lifli geopolimer harç üretmek amacıyla önceki aşamada referans olarak seçilen geopolimer harç karışımına 3 farklı tür (karbon, polipropilen, cam), farklı kombinasyonlarda lif takviyesi yapılmıştır. Şekil 3.3’de cam lif, Şekil 3.4’de polipropilen lif, Şekil 3.5’de karbon f life ait görseller verilmiştir. Lif kombinasyonları sonucu hazırlanan karışımlar KR1-KR2-KR3-KR4-KR5-KR6-KR7 olarak isimlendirilmiştir. Lif takviyeli geopolimer harç elde edilmesinde kullanılan lif oranları Çizelge 3.10’de verilmiştir. Ayrıca lif karışım oranları Şekil 3.6’ da sunulmuştur. Lifli geopolimer harç karışımlarının hazırlanmasına ait görüntüler Şekil 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.10: Geopolimer harç içindeki lif oranları

	KR-1	KR-2	KR-3	KR-4	KR-5	KR-6	KR-7
Karbon Lif	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,33
	2,5 cm ³	5 cm ³	-	0,5 cm ³	9,1 cm ³	2,5 cm ³	3,3 cm ³
	9,2 gr	18,1 gr	-	9,05 gr	18,1 gr	9,2 gr	12,2 gr
PoliPropilen Lif	0,25	0,25	0,5	-	0,5	0,5	0,33
	2,5 cm ³	2,5 cm ³	5 cm ³	-	5 cm ³	5 cm ³	3,3 cm ³
	4,6 gr	4,55 gr	9,1 gr	-	9,1 gr	9,1 gr	6,2 gr
Cam Lif	0,5	0,25	0,5	0,5	-	0,25	0,33
	5 cm ³	2,5 cm ³	5 cm ³	0,5 cm ³	-	2,5 cm ³	3,3 cm ³
	26 gr	13 gr	26 gr	26 gr	-	13 gr	17,4 gr



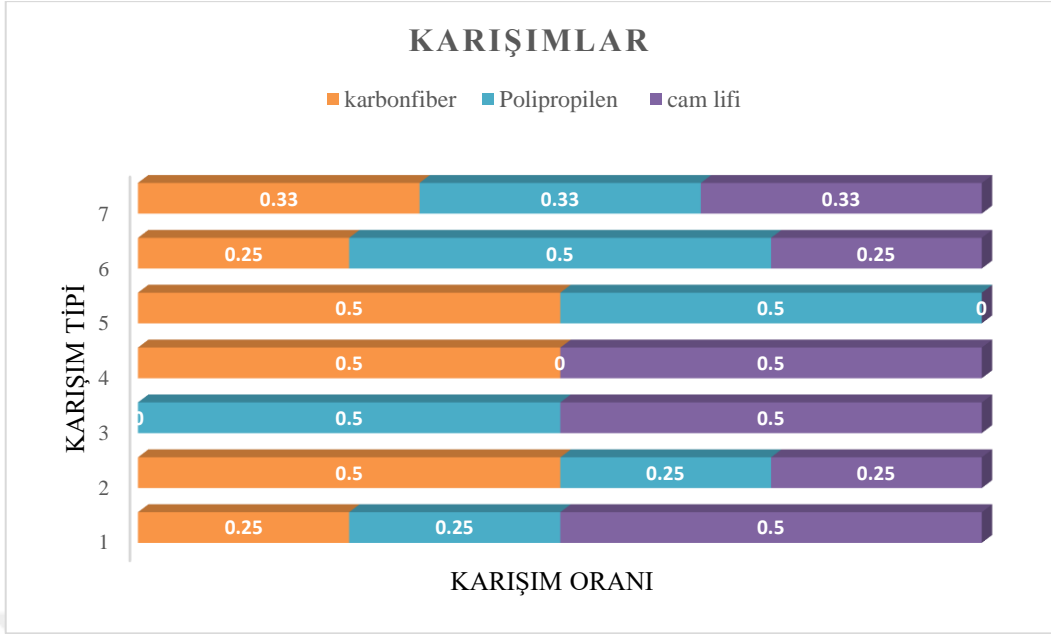
Şekil 3.3 : Cam lif



Şekil 3.4 : Polipropilen lif



Şekil 3.5 : Karbonfiber lif



Şekil 3.6 : Lif karışım oranları





Şekil 3.7 : Lifli geopolimer numunelerin hazırlanması

3.2.3 Yığma duvar örneklerinin hazırlanması

Yığma tuğla duvar örülmesi işinde pres tuğla kullanılmıştır. Yüksekliği 70 cm ve genişliği 70 cm olan 10 adet duvar örneği hazırlanmıştır. Bağlayıcı olarak 2 çeşit harç kullanılmıştır. Duvarlardan 5 tanesi standart çimentolu harç ile diğer 5 tanesi ise lifli geopolimer harç ile örülmüştür. Duvar üretiminde tuğlalar dizilirken, kilit örgü modeli ile üretilmiştir. Örgü işleminde, bir üst sıraya geçerken pres tuğlaların üzerine, malzemesi fazla gelmeyecek şekilde önceden hazırlanan harçlar mala ile sürülmüş ve düşey derzler üst üste konulurken birbiri üstüne aynı hizada gelmeyecek şekilde şaşırtmalı olarak dizilmiştir. Duvarın yatay veya düşey yönde herhangi bir sapma veya kayma yapmaması amacıyla su terazisi kullanılmıştır. Duvarların hazırlanmasına ait işlemler Şekil 3.8-3.12’de detaylı olarak verilmiştir. Lifli geopolimer harç karışımının işlenebilirliği düşük olduğu için pres tuğla deliklerinin içine %100 bir dolum gerçekleştirilememiştir. Bunun aksine çimentolu

harç karışımı daha akışkan bir formda olduğu için tuğla deliklerinin içine tam dolumu gerçekleştirmiştir. Duvara uygulanan harç karışımı CEM 32,5 dayanım sınıfı çimento kullanılarak yapılmıştır. Harç karışımı içinde kullanılan çimento, su ve agrega oranı 2:1:6 şeklinde olmuştur. Özetlemek gerekirse su miktarının iki katı kadar çimento kullanımıdır.



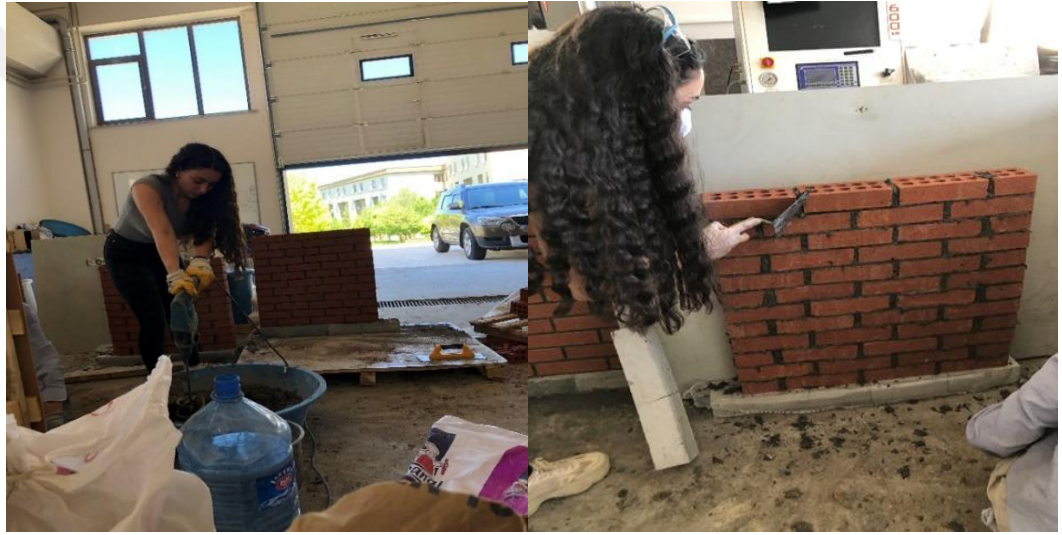
Şekil 3.8 : Standart çimentolu harç ile hazırlanan numunelerin harç malzemesi



Şekil 3.9 : Standart çimentolu harçla duvar örülmesi işlemi



Şekil 3.10 : Kuru harç karışımının hazırlanması



Şekil 3.11 : Geopolimer harcın hazırlanması ve duvara uygulanması



Şekil 3.12 : Duvar numunelerinin görünümü

3.3 Hazırlanan Örnekler Üzerinde Yapılan Deneyler

Bu çalışmada üretilen harç ve yığıma duvarlar üzerinde laboratuvar aşamasında yapılan deneyler detaylı olarak verilmiştir. Harç numuneler üzerinde yayılma tablası deneyi, tek eksenli basınç deneyi, eğilme testi, UPV ve SEM-EDX deneyleri yapılmıştır. Büyük ölçekli yığıma duvar numuneleri üzerinde ise, eksenel basınç ve kayma (diyagonal yükleme) deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerle ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

3.3.1 Yayılma tablası deneyi

ASTM C1437-15'e göre [67], harç örneklerinin hazırlanması sırasında taze geopolimer harçların yayılma çapını öğrenmek amacıyla, yayılma tablası deneyi yapılarak çaplar belirlenmiştir. Yayılma tablası; kıvam incelemesinde kullanılan deney aletinin ölçüleri; altta 300 mm çaplı tabla ve tablanın üstünde taban çapı 100 mm, üst yüz çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm olan kesik koni biçiminde kalıptan imal edilen kıvam ölçme deneylerinde kullanılan bir deney aletidir. Çevirmeli kol ile tablaya yerleştirilen numuneye 15 defa düşüş yaptırıldıktan sonra tablada yayılmış olan harcın yayılma çapı ölçülmektedir. TS EN 1015-3/ISO 9812 standartına göre testler gerçekleştirilmiştir. Yayılma çapı geopolimer harcın karıştırma işleminin tamamlanmasından hemen sonra ölçülmüştür. Huni, yayılma tablasının ortasına yerleştirilmiş ve 2 kademedeki taze harç ile doldurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Taze harcın üniform bir şekilde sıkıştırılması için akış tablası el ile çevirerek 15 saniyede toplam 25 kez düşürülmüştür. GH için gereken minimum standart yayılma çapı 150 ± 10 mm'dir. Bunun sebebi ise bu akış çapında GH kalıplara kolayca yerleştirilebilmektedir [68]. Harcın yayılma çapına bağlı olarak işlenebilirlik kriterleri Çizelge 3.11'de sınıflandırılmıştır [69]. Huninin üst yüzeyi düzleştirildikten sonra huni anında dikey olarak kaldırılmıştır. Yayılma çapını simetrik olacak şekilde 4 farklı açıdan okunan çap değeri ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Yayılma tablası deneyinin uygulanışı Şekil 3.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11: Geopolimer harcın işlenebilirlik kriterleri [69].

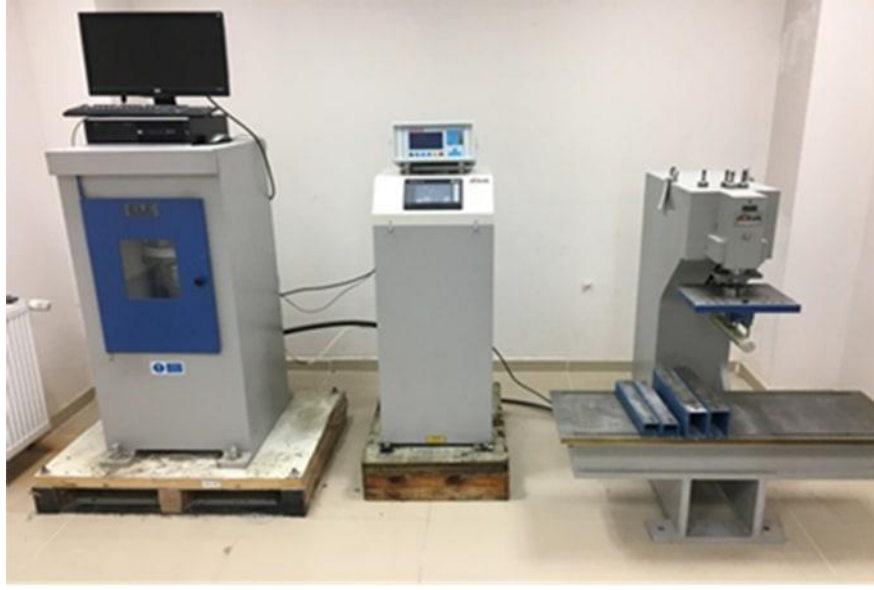
Sınıflandırma	Yayılma Çapı	İşlenebilirlik
1	250 mm <	Çok yüksek
2	180-250 mm	Yüksek
3	150-180 mm	Orta
4	120-150 mm	Katı
5	120 mm >	Çok düşük



Şekil 3.13 : Yayılma tablası deneyine ait görüntüler

3.3.2 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

Çeşitli parametreler kullanılarak üretilen harç malzemesi, basınç dayanımlarının belirlenmesi için ASTM C39 standartına uygun olarak test edilmiştir. Deneye başlamadan önce basınç dayanımı test cihazının yükleme başlıklarının yüzeyleri silinmiş ve böylece kırım esnasında olumsuz etki oluşturabilecek tane ve partiküller uzaklaştırılmıştır. Her karışımdan bir adet değer elde etmek amacıyla 3 numune kırılmış, bunların ortalaması alınarak basınç dayanımı belirlenmiştir. Boyutları 50x50x50 mm olan küp numunelere yükün uygulama yönü olarak harcın döküm yapılan yönüne dik olarak belirlenmiştir. Tek eksen yönünde basınç dayanımı deney seti Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.14 : Basınç dayanımı test cihazı

Basınç dayanımı değerleri, Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır,

$$F_c = P/A_s \quad (3.1)$$

Burada; F_c : Basınç dayanımı ve birimi MPa'dır. P : Numunenin kırılmadan taşıyabileceği maksimum yük (N), A_s : Yükün uygulandığı yüzey alanı mm^2 ölçü birimindedir. Bu alan, (EN 12390-1)'e göre numunenin ölçülerini kullanılarak, numune üzerinde ölçümü yapılan gerçek ölçüler ile hesaplanmıştır.

3.3.3 Eğilme deneyi

ASTM C348-14'e [70] göre, 7. gün ve 28. günlerde eğilme dayanımını elde etmek amacıyla 40x40x160 mm boyutlarında dörtgen prizmatik örnekler kullanılmış ve üç noktadan yükleme yapılmıştır. Her bir test değeri belirlemek için 3'er adet harç örneği kullanılmıştır. Eğilme deneyinde numuneye uygulanan yüklemenin hızı 0.05 kN/s standartlara uygun olarak alınmıştır. Her bir karışımın eğilme dayanımı 3 adet harç örneğinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Deney numuneleri hazırlanırken, hazırlanan harç karışımı Şekil 3.15'deki yağlanmış 40x40x160 mm boyutundaki kalıplara yerleştirilmiştir. Eğilme deney cihazı Şekil 3.16'da verilmiştir. Ayrıca lifli geopolimer harç örneğinin kırılmış görüntüsü Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Eğilme dayanımı deneyi için hazırlanan numunelerin kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 3.16 : Eğilme dayanımı test cihazı



Şekil 3.17 : Eğilme deneyi sonrası lifli numunenin kırılmış görüntüsü

3.3.4 Mikroyapı deneyleri

İnsan gözünün malzemeler içerisinde bulunan çok küçük ayrıntıları görme kapasitesinin oldukça sınırlı olması nedeniyle, görüntü iletimini gerçekleştiren ışık yollarının mercekler vasıtasıyla değiştirilerek, daha küçük detayları görmemize olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Fakat bu optik cihazlar ile elde edilen görüntülerin büyütme miktarlarının sınırlı bir düzeyde olması ve çıktı sağlanan görüntüler üzerinde farklı işlem yapılma olanağının olmayışı, bilim adamlarını farklı sistemler araştırma ve geliştirmeye yöneltmiştir. Bu arayış sonucunda, 1930 yıllarında Manfred von Ardenne'in ilk adımı atması ile geliştirilen taramalı elektron mikroskobu veya SEM (Scanning Electron Microscope), yüksek enerji potansiyeline sahip elektronlar yardımıyla malzeme bünyesindeki çok küçük alanlara odaklanmıştır. Bu yapılan çalışmada, SEM-EDX analizlerinde, LEO (Zeiss) EVO40 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve entegra EDX

kullanılmıştır. Bu cihazlara ait görüntüler Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Malzemelerin mineralojik ve mikroyapısal özelliklerini öğrenmek için SEM yani taramalı elektron mikroskobu ve energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) teknikleri kullanılmaktadır. Lif örneklerinin mineralojik ve mikro yapısal özellikleri ayrı ayrı incelenmiştir. Lif kullanılarak üretilen geopolimer numuneleriyle ilgili mikroyapı görüntüleri 4. Bölümde verilmiştir. Lifli geopolimer harcı numuneleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Merkezi (IBTAM) laboratuvarında polarizasyon mikroskobu altında incelenmiştir. Yapılan SEM/EDX analizi sonucunda, lifli geopolimer harcın içeriğindeki element miktarlarına bakılması amaçlanmış ve bağ dokuların bağlanım şeklini gözlemlemek amaçlanmıştır. EDX analizleri vasıtasıyla gözlenen yapıların element analizleri gerçekleştirilmiştir.

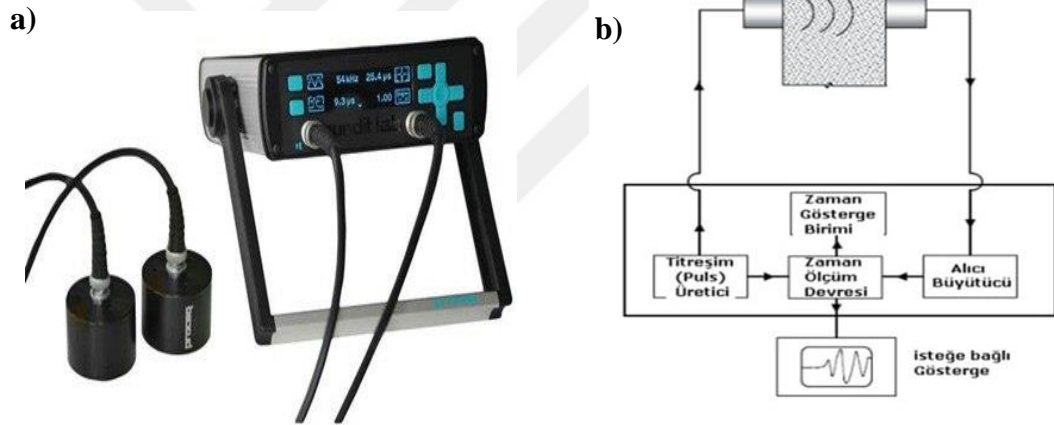


Şekil 3.18 : LEO (Zeiss) EVO40 SEM-EDX cihazı

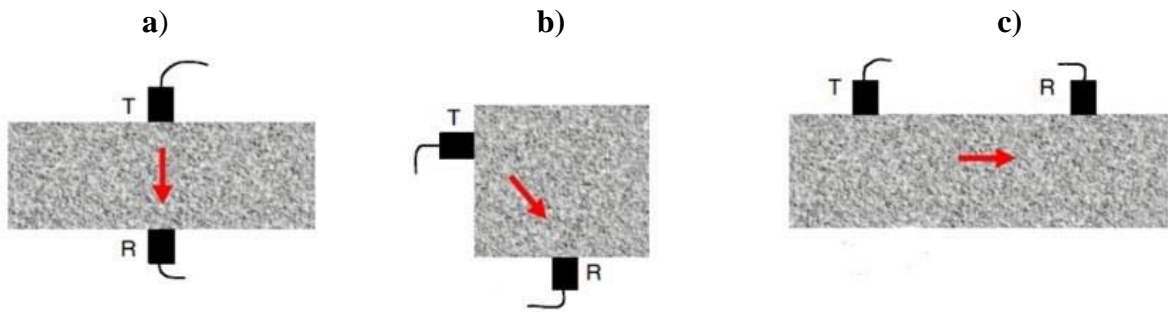
3.3.5 Ultrasonik hız ölçümü deneyi

Mekanik dalgaların elektrik titreşimlere (puls) ve bu elektrik titreşimlerinin mekanik titreşimlere dönüşümü işlemi ultrasonik test cihazlarının temelini oluşturur. Bu işlemde temel görevi pieoelektrik vericiler yüklenirler. UPV test cihazı beton numunelerde bir verici ile dalga titreşimi oluşturarak, alıcısı vasıtasıyla titreşimin varmasını sağlar. Bu şekilde harcı numunesi boyunca seyahat eden titreşimin seyahat süresini hassas biçimde ölçebilmektedir. Öte yandan UPV test aleti bir osiloskopa bağlandığında titreşimin davranışı ve yapısı hakkında bilgi sahibi olmak mümkün olmaktadır. İki başlıktan biri ultrasonik darbeyi iletir ve diğer başlık darbeyi alır. Darbenin ortalama hızı, dönüştürücülerin merkezleri arasındaki mesafenin, dalganın geçiş süresine bölünmesiyle hesaplanır. Ultrasonik dalga hızı testi, duvarın homojenliğini analiz etmek, çatlakların derinliğini belirlemek ve herhangi bir iç boşluğu tespit etmekte kullanılır [71-72]. Ultrases dalga hızı

testi ASTM C597 (C597-97, 1997) ve EN 12504-4 (EN 12504-4, 2012) küresel standartlarına göre yapılmıştır [73]. Ultrasonik dalga hızını belirlemek için kullanılan test ekipmanı ve cihazın çalışma prensibi Şekil 3.19’da verilmiştir. ASTM C597’ye göre deneyin uygulanmasında, farklı ölçüm konfigürasyonları kullanılabilir (doğrudan, dolaylı ve yarı doğrudan). Her numune grubu için en az üç ölçüm olacak şekilde ölçümler yapılmıştır ve numunenin UPV değerlerinin ortalaması olarak belirlenmiştir. Okumaların ortalama Ultrases geçiş hızının %30’undan fazla saptığı ölçüm durumlarında üç okuma daha yapılır. Ultrasonik ses hızının belirlenmesinde 3 farklı ölçüm metodu vardır. Bunlar; doğrudan ölçüm yöntemi, dolaylı ölçüm yöntemi ve yarı doğrudan ölçüm yöntemidir. Bu tez çalışmasında yapılan ultrasonik ses hızı testlerinde doğrudan metot kullanılmıştır. Şekil 3.20’de bu yöntemler gösterilmiştir. Şekillerde görülen T kutupları vericiyi, R kutupları ise alıcıyı temsil etmektedir.



Şekil 3.19 : Ultrasonik hız testi a) Test cihazı b) Çalışma prensibi



Şekil 3.20 : Ultrasonik hız testi ölçüm metotları a) Doğrudan ölçüm metodu b) Yarı doğrudan ölçüm metodu c) Dolaylı ölçüm metodu

3.3.6 Duvarlar üzerinde yapılan deneyler

Bu tez çalışması kapsamında standart çimentolu harç ve lif takviyeli geopolimer harçlar kullanılarak örülen duvar örneklerinin basınç ve kayma dayanımlarını elde etmek amacıyla aksel basınç ve kayma (diyagonal) deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerle ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

3.3.6.1 Aksel basınç dayanımı deneyi

Hazırlanan duvar numunesinin deneye hazırlanmasında ilk olarak duvar örneği düz bir çelik levhanın üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra duvar örneğinin üzerine yükün uniform dağılması için bir çelik levha yerleştirilmiştir. Duvar üzerine biri yatay yönde ve diğeri düşey yönde olacak şekilde deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Son olarak yükleme altındaki yapısal davranışları bilgisayarda kaydedilmiştir. Detaylı sonuçlar araştırma bulguları bölümünde daha kapsamlı olarak verilmiştir. Aksel basınç dayanımı deneyinde kullanılan yükleme düzeneği Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21 : Aksel basınç dayanımı deney düzeneği

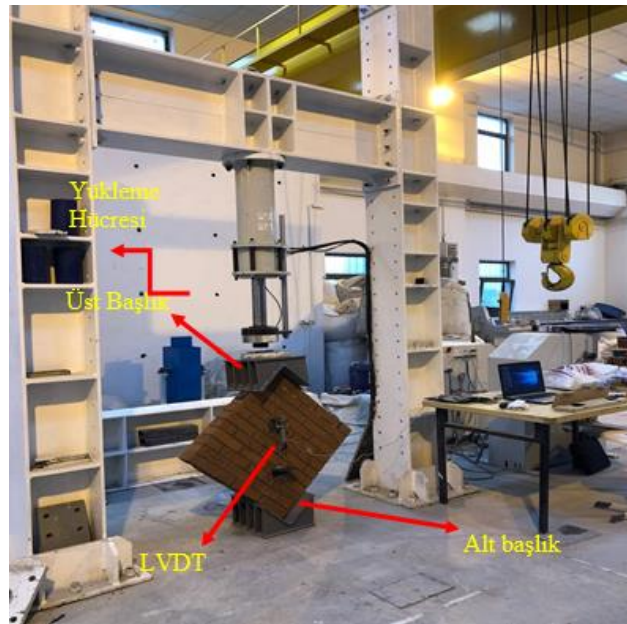
3.3.6.2 Kayma (diyagonal yükleme) deneyi

Yatay yükleme altında duvarın kayma dayanımını, duvarın yığma malzemeleri arasındaki enine derzlere gelen yükler altındaki direnci ortaya koymaktadır. Yığma duvar örneklerinin deneye hazırlanmasında ilk olarak duvar örneği 45° çevrilerek kayma dayanımı deneyi için çelikten hazırlanmış olan ve Şekil 3.22’de görülen başlığın içerisine yerleştirilmiştir. Çelik yükleme başlıklarının içerisine yerleştirilen duvar örneklerini boyuna doğrultuda gönyede olmasına ve çelik başlık ve duvar arasında boşluk olmamasına dikkat edilmelidir. Yığma duvar örneğinin üst kısmına oturtulan çelik başlığında yatayda

gönyesinde sabit durması sağlandıktan sonra çelik başlık üzerine üniform bir şekilde sürekli olarak yükleme yapılmıştır. Diyagonal yükleme deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.23’de gösterilmiştir. Duvar kayma dayanımı deneylerinde, ASTM E-519/81 (1981) standardında önerilen test metodu uygulanmıştır [74]. Diyagonal yükleme 60 ton maksimum kapasiteye sahip bir yükleme başlığı ile yapılmıştır. Yük, 1kN’luk artımlarla duvara uygulanmıştır. Hazırlanan yığma duvar örneklerinin düşey ve yatay deplasmanları, duvar örneklerinin ön bölümüne sabitlenen iki adet olan 50 mm kapasiteye sahip LVDT ile kaydedilmiştir. Deney sonuçları, veri toplayıcı ve bilgisayar yardımıyla 1 saniyelik zaman aralıklarıyla kaydedilmiştir.



Şekil 3.22 : Diyagonal yükleme düzeneği ve diyagonal yükleme başlığı



Şekil 3.23 : Duvar kayma dayanımı deney düzeneği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması 3 ana bölüme ayrılmıştır. 1. aşamada en yüksek basınç dayanımını veren geopolimer harç karışımı belirlenmiştir. 2. aşamada en yüksek dayanımlı geopolimer harç karışımı referans olarak seçilerek 7 farklı kombinasyonda ve 3 farklı lif çeşidi eklenmiş ve bu numuneler üzerinde optimum lifli karışım belirlenmiştir. Son aşamada ise, elde edilen en yüksek dayanımlı lifli geopolimer harç yığma duvarların üretiminde kullanılmış ve bu harcın yığma duvarlarda etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda, 10 adet yığma duvar üzerinde eksenel basınç ve diyagonal yükleme altında yapısal davranışı belirlenmiştir.

4.1 Geopolimer Harçların Basınç Dayanımları

Çalışmanın ilk bölümünde bağlayıcı madde olarak seçilen YFC ve SD ile alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SO₃ kullanılarak farklı karışım oranlarında geopolimer harç örnekleri hazırlanmıştır. Bu karışımlar 100YFC, 95YFC+5SD, 90YFC+10SD ve 90YFC+10SD (NaOH) karışımlarıdır. Bu 4 karışım, Na₂SiO₃ ve NaOH alkali aktivatörleri ile aktive edilerek 8-10-12 molarda araştırılmıştır. Bu 4 farklı harç karışım malzemesini 8-10-12 molarda aktive ederek toplamda 12 karışım grubu elde edilmiştir. Her bir grubun basınç değerini belirlemek amacıyla, bu gruplardan 3 adedi 7. günde ve diğer 3 adedi 28. günde basınç testinde test etmek amacıyla 6'şar adet numune dökülmüş ve toplamda 72 adet numune elde edilmiştir. Basınç testinde her gruptan kırılan 3 numunenin ortalaması alınarak hata payı düşürülmüş ve optimum sonuçlar elde etmek amaçlanmıştır. Testler uygulandıktan sonra sonuçlar kaydedilmiş ve en yüksek dayanıma sahip karışım optimum lif oranlarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

En yüksek basınç dayanımı 7. gün ve 28. günlerde 90 YFC+ 10 SD/10M (SS/SH=2) karışım oranında elde edilmiştir. 90YFC+10SD/10M (NaOH) karışımının oranında en düşük basınç dayanımını elde edilmiştir. Bu durum Na₂SiO₃' in geopolimer harcın basınç dayanımı üzerinde olumlu etkisinin olduğunu göstermiştir. NaOH kullanımının özellikle molarite düştükçe zamanla dayanımın düşmesine sebebiyet verdiği görülmüştür. Bu 4 farklı karışım grubuna baktığımızda YFC miktarı azaldıkça basınç dayanımında artma görülmüştür. Numunelerin büyük çoğunluğunda YFC miktarını azaltıp SD miktarını arttırdığımızda dayanımın yükseldiği gözlenmiştir. Numunelerin 7. günde basınç dayanımının 18,8-31.2 MPa aralığında, 28. Günde ise 16.4-37.8 MPa aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. 7 Günlük basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. 28 gün sonra ölçülen basınç

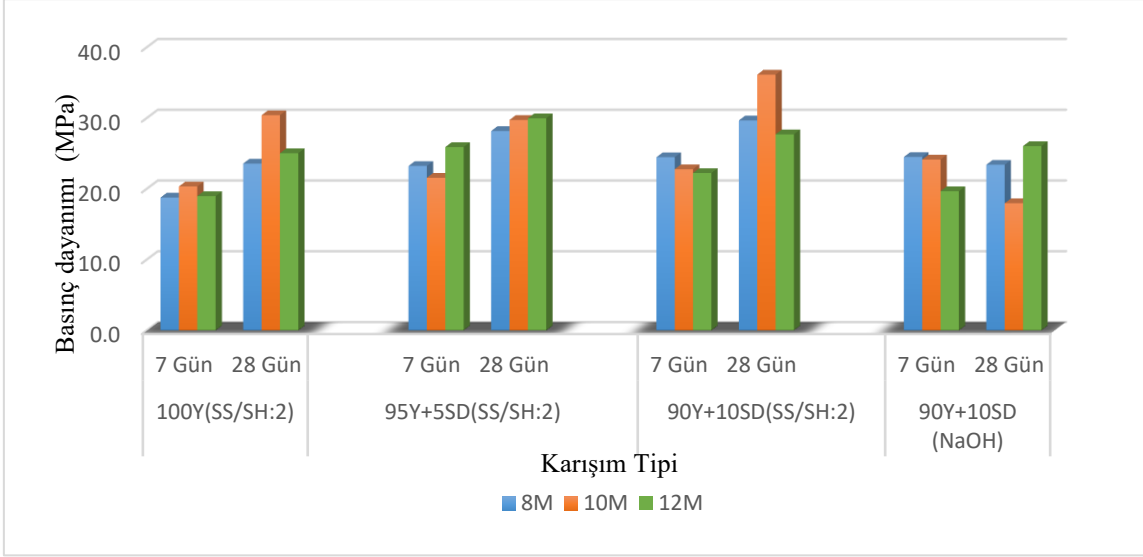
dayanımı sonuçları ise Çizelge 4.2’de verilmiştir. 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.3’de sunulmuştur. Ek olarak, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri ortalamasının grafik görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Geopolimer harç 7 günlük basınç dayanımı sonuçları

7 GÜN (SS/SH:2)									
100YFC	1	2	3	ORT	90YFC+10SD	1	2	3	ORT
8M	17,3	20,8	18,2	18,8	8M	23	22,6	27,8	24,4
10M	22,9	18,1	20	20,3	10M	28	18	22,3	22,7
12M	20,6	17,5	18,8	19,0	12M	22,9	18,6	25,2	22,2
95YFC+5SD	1	2	3	ORT	90YFC+10SD(OH ⁻)	1	2	3	ORT
8M	21,3	24,5	23,9	23,2	8M	22,2	28,6	22,7	24,5
10M	26,7	17	21	21,5	10M	33,3	20,3	18,8	24,1
12M	26,1	27,4	24,2	25,9	12M	17,6	19,6	21,8	19,6

Çizelge 4.2 : Geopolimer harç 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

28 GÜN (SS/SH:2)									
100YFC	1	2	3	ORT	90YFC+10SD	1	2	3	ORT
8M	20,8	27,1	22,8	23,6	8M	27,2	29,6	32,2	29,6
10M	31,2	28,9	31,1	30,4	10M	35,3	35,3	37,8	36,1
12M	26,7	24	24,4	25,0	12M	27,3	25,3	30,5	27,7
95YFC+5SD	1	2	3	ORT	90YFC+10SD(OH ⁻)	1	2	3	ORT
8M	25,9	29,8	28,8	28,1	8M	22,9	27,4	19,9	23,4
10M	27,8	31,4	30	29,7	10M	18,8	18,7	16,4	17,9
12M	27,8	31,2	30,9	29,9	12M	25,7	23,8	28,6	26,0



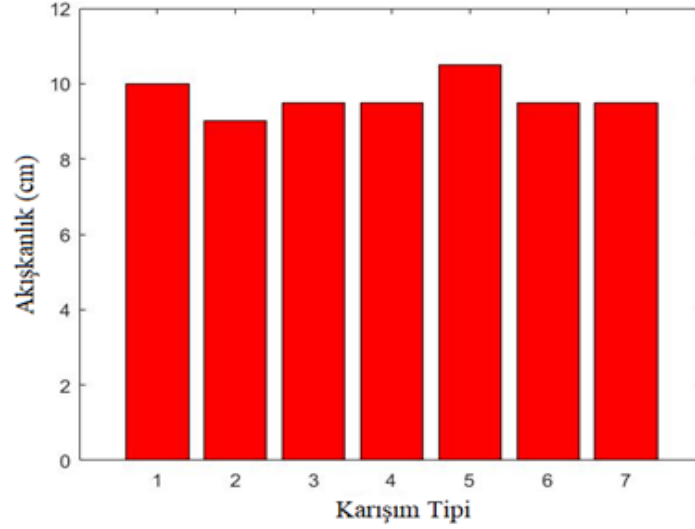
Şekil 4.1 : Geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı

4.2 Lif Takviyeli Geopolimer Harç Deney Sonuçları

Lif takviyeli geopolimer harç üretmek amacıyla geopolimer harçta kullanılacak 3 farklı lif çeşidi dikkate alınmıştır. Karbon, cam ve polipropilen lifler 7 farklı kombinasyonda karıştırılmıştır. Üretilen 7 adet numune KR1-KR2-KR3-KR4-KR5-KR6-KR7 olarak kodlanmış ve yayılma tablası deneyi, eksenel basınç ve eğilme dayanım testleri UPV ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir.

4.2.1 Yayılma tablası deneyi

Numunelerin üretimi esnasında yayılma tablası deneyi uygulanarak yayılma çapları kaydedilmiştir. Karışımların yayılma çapları Çizelge 4.4’de verilmiştir. Karışımların ortalama 10,5 değerinde olduğu belirlenmiş ve yayılma çapı değerlerinin birbirine yakın olduğu Şekil 4.2’de verilen grafikte de açıkça görülmektedir. Lifli geopolimer harçların hazırlanması sırasında harç karışımına lif katkısı eklenmesi ile kıvamında yoğunluk meydana geldiği ve standart harç karışımlarına göre daha katı bir kıvama dönüştüğü gözlenmiştir. Çizelge 3.11’deki geopolimer harcın işlenebilirlik kriterlerine baktığımız zaman harcımızın katı kıvamda olduğu ve işlenebilirliğinin düşük olduğu söylenebilmektedir. Bu da bize lif katkısının işlenebilirliği düşürdüğünü göstermiştir.



Şekil 4.2 : Lif takviyeli geopolimer harç yayılma çapları

Çizelge 4.3 : Lif takviyeli geopolimer harç yayılma çapları

Numuneler	KR-1	KR- 2	KR -3	KR -4	KR- 5	KR -6	KR -7
Yayılma Çapı (cm)	10	9	9,5	9,5	10,5	9,5	9,5

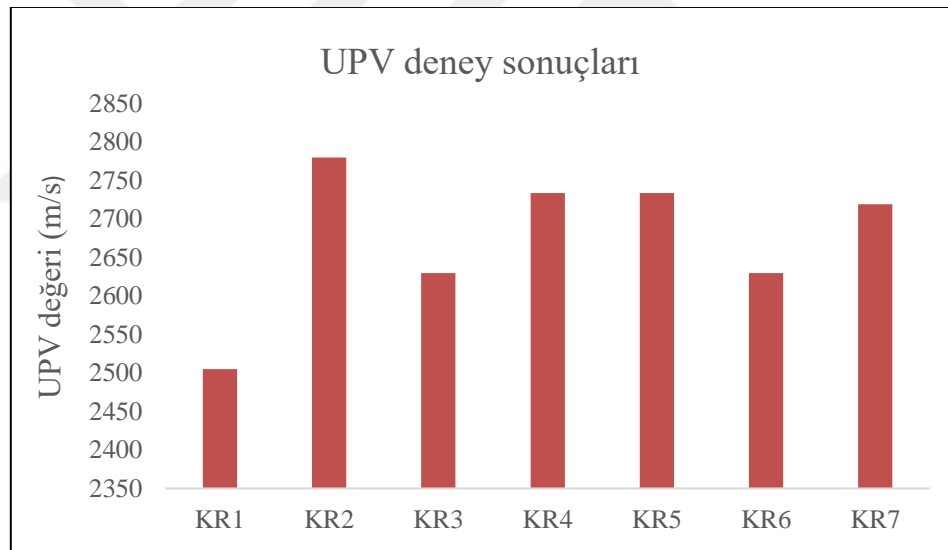
4.2.2 Ultrasonik hız ölçümü deney sonuçları

UPV ölçümü beton ve harç örneklerinde meydana gelen çatlakların lokasyonlarını ve derinliğini tahmin etmek için tercih edilen tahribat yapmayan bir test yöntemidir. Bu yöntem genellikle bir malzemenin yapısal homojenliğini araştırmak için sıkça tercih edilmektedir. Test yaşının artmasıyla artan ultrasonik titreşim hızları, 2590-3620 m/s aralığında değişmektedir. Lif takviyeli geopolimer harç örnekleri üzerinde yapılan UPV deneyi sonuçları incelendiğinde, en yüksek değerden en düşük değere doğru ortalama değerlerinin sırasıyla KR2-KR5-KR7-KR3-KR6-KR4-KR1 olduğunu görüyoruz. Sonuçları tek tek incelediğimizde de en yüksek değeri KR2 karışımında ve en düşük değeri KR1 karışımında da görmekteyiz. Basınç dayanımı test sonuçlarına baktığımızda da bize en yüksek dayanımı veren karışımın KR2 numunesine ait olduğunu görmekteyiz. Bu da bize deney sonuçlarımızın doğruluğunu destekleyici bir test sonucu olduğunu göstermektedir. 7 farklı karışıma ait UPV değerleri Çizelge 4.5’de sunulmuştur. KR2 karışımında içeriğindeki lif muhtevasının %50’sinin karbonfiber olduğunu, KR1 karışımının içeriğindeki lif muhtevasının %50’sinin cam lifi olduğunu görmekteyiz. Bu da bize karbonfiber lif katkısının cam lif katkısına oranla dayanımı, homojenliği ve UPV değerini daha fazla arttırdığını göstermektedir. KR3 ve KR5 karışımına da baktığımızda bu sonucu net şekilde

görebiliriz. Her iki karışımın lif muhtevasının % 50'si polipropilen lif fakat kalan %50'lik kısım KR3 numunesinde cam lifi, KR5 numunesinde ise karbon lifi olduğunu Şekil 3.6'a bakarak görebiliriz. UPV sonucunda da KR5 numunesi KR3 numunesinden daha yüksek değer vermiştir. Bu da bize tekrardan karbon lifinin UPV deney sonucu üzerindeki etkisini göstermiştir.

Çizelge 4.4 : Lif takviyeli geopolimer harç numunelerinin UPV sonuçları

UPV (28 GÜN)							
	KR1 (m/s)	KR2 (m/s)	KR3 (m/s)	KR4 (m/s)	KR5 (m/s)	KR6 (m/s)	KR7 (m/s)
1	2547	2792	2620	2584	2584	2649	2797
2	2572	2836	2689	2424	2749	2605	2680
3	2398	2711	2580	2580	2867	2635	2680
ORT	2505	2780	2640	2530	2734	2630	2719



Şekil 4.3 : Lif takviyeli geopolimer harç numunelerinin UPV grafiği

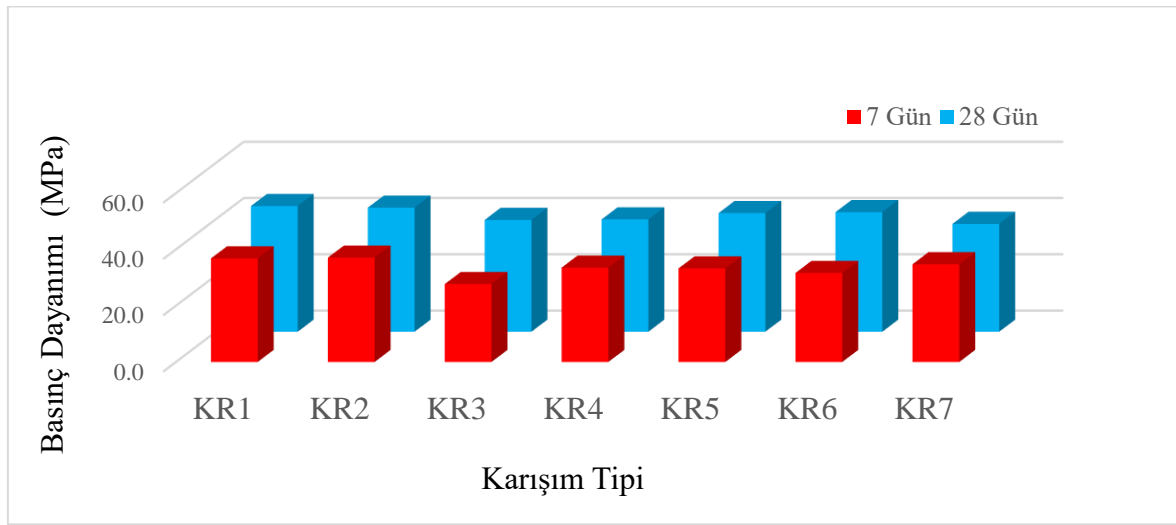
4.2.3 Tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

Lifli geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları tek eksenli basınç deneyi ile araştırılmıştır. Hazırlanan 7 farklı karışım önce 40x40x160 mm kalıplara döküldü. Bu deney numuneleri önce eğilme deneyinde 7. ve 28. günlerde test edildi ve orta kısmından simetrik olarak kırılmış olan parçalar daha sonra 7. ve 28. günlerde her karışımından 6 adet numune alınarak test eksenli basınç cihazında yüklemeye tabi tutuldu ve sonuçlar kaydedildi. Her karışım için kaydedilen 6 basınç değerinin ortalaması alınarak Çizelge 4.5'de ortalama

değerler verilmiştir. En yüksek basınç dayanımını veren numune KR2, en düşük basınç dayanımını veren numune KR3 olarak kaydedilmiştir. Bu basınç dayanımlarına ait sütun grafiği Şekil 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Lif takviyeli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri

	KR-1	KR-2	KR-3	KR-4	KR-5	KR-6	KR-7
7 gün	36,8	37,1	27,7	33,5	33,3	31,6	34,7
28 gün	43,9	44,1	39,7	39,9	42,1	42,5	38,3



Şekil 4.4 : Lif takviyeli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

UPV değerleri de incelendiğinde KR2 numunesinin en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Bu da basınç dayanımı sonuçlarının diğer testler ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

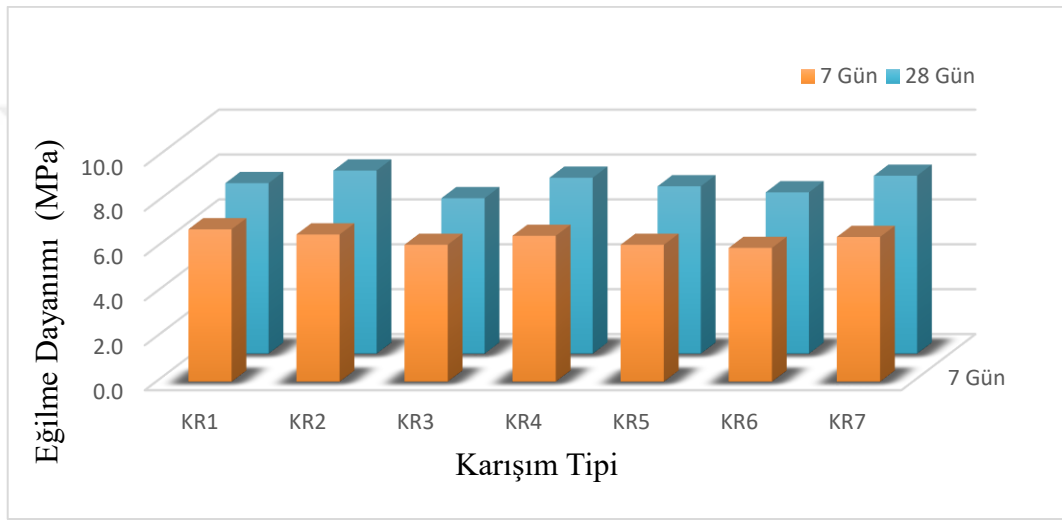
4.2.4 Eğilme dayanımı sonuçları

3 farklı lif çeşidinin farklı miktarlarda karıştırılması ile hazırlanan 7 farklı karışımın eğilme dayanımları incelenmiştir. Hazırlanan 7 farklı karışım önce 40x40x160 mm kalıplara dökülmüş ve numuneler üzerinde üç noktada eğilme deneyi yapılmıştır. 7 farklı numune çeşidine ait 7 gün ve 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinin ortalamaları alınarak, Çizelge 4.6’da sunulmuştur. Daha önce UPV ve tek eksenli basınç testlerinden elde edilen sonuçlarla paralellik göstererek KR-2 karışımı 28 .günlük eğilme deneyi sonucunda yine en optimum değeri vermiştir. En düşük değeri veren numune KR-6 karışımı olmuştur. 7 günlük numunelerin basınç dayanımı sıralaması en büyükten düşüğe doğru KR1-KR2-KR5-KR7-KR4-KR6 şeklinde olmuştur. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları sıralaması ise KR2-

KR5-KR7-KR1-KR4-KR6-KR3 şeklinde olmuştur. KR3 numunesi basınç dayanımı testi sonucu ile benzer şekilde eğilme deneyinde de en düşük sonucu vermiştir.

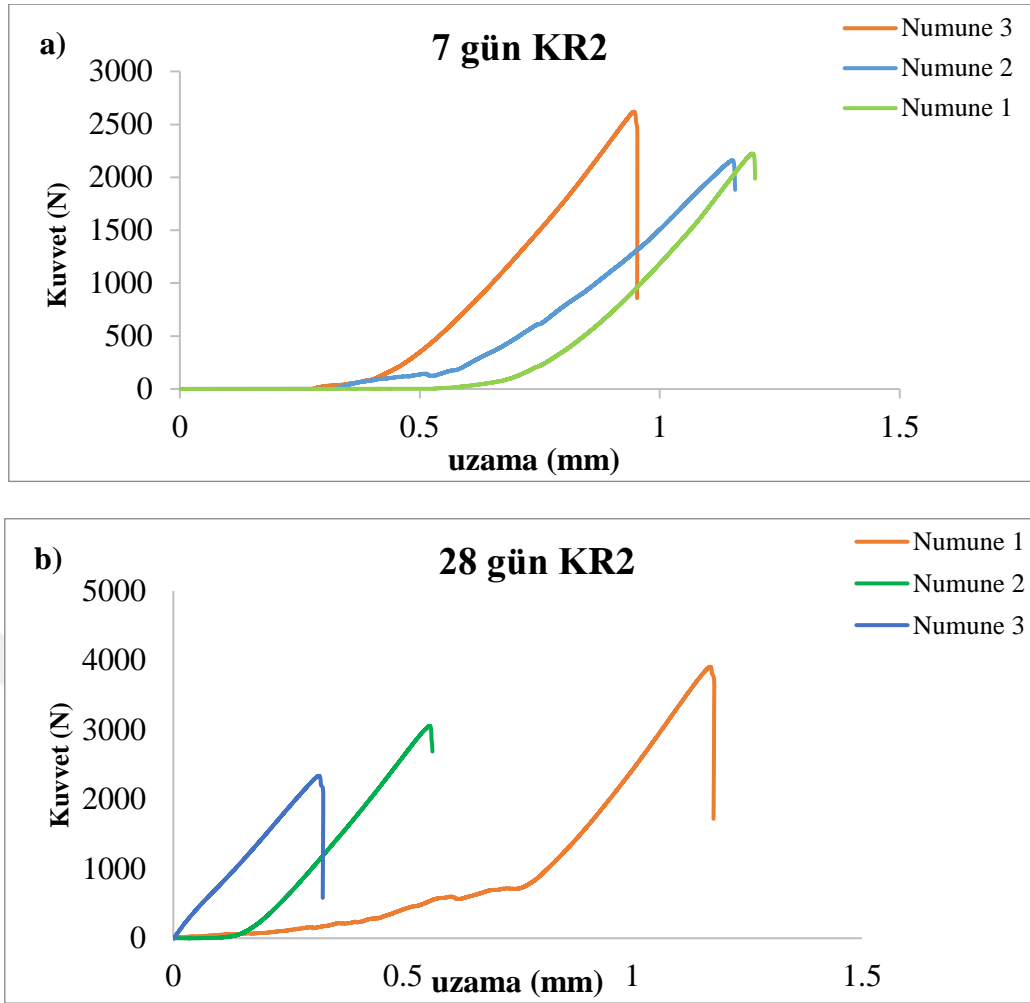
Çizelge 4.6 : Lif takviyeli geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları

7 Günlük	KR-1	KR-2	KR-3	KR-4	KR-5	KR-6	KR-7
Gerilme(MPa)	6,9	6,5	6,1	6,2	6,3	6,1	6,2
Fmax (N)	2505,2	2334,7	2168,1	2190,2	2233,2	2160,4	2192,6
28 Günlük	KR-1	KR-2	KR-3	KR-4	KR-5	KR-6	KR-7
Gerilme(MPa)	7,6	8,1	6,9	7,4	7,9	7,2	7,8
Fmax (N)	2697,4	3099,5	2678,3	3182,7	3382,6	3069,4	3344,6



Şekil 4.5 : Lif takviyeli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları

Üç noktalı eğilme dayanımı deneyinde cihaza entegre eksenel deplasman ölçerler kullanılarak numunelerin yük deplasman eğrileri elde edilmiştir. En yüksek 28 günlük eğilme dayanımı KR2 ye ait olduğu için K2 karışımından hazırlanan örneklerin yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde, lif takviyeli harçların önemli miktarda şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

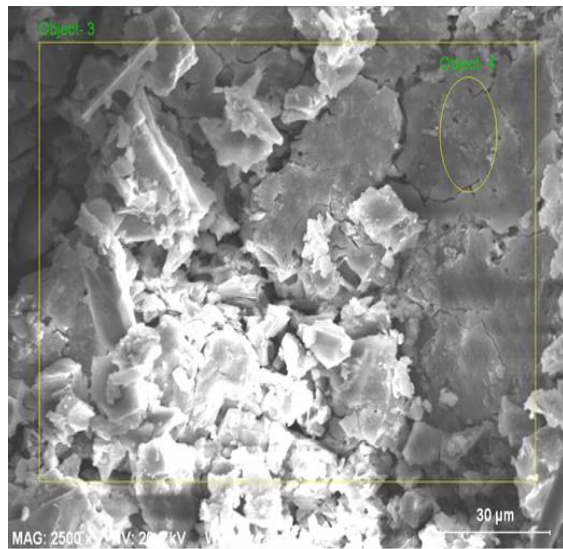
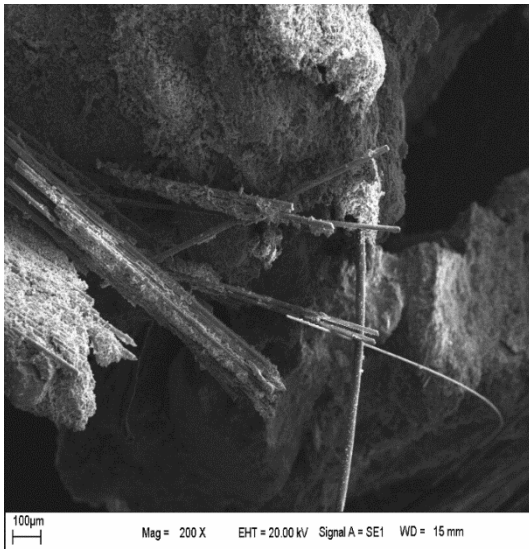
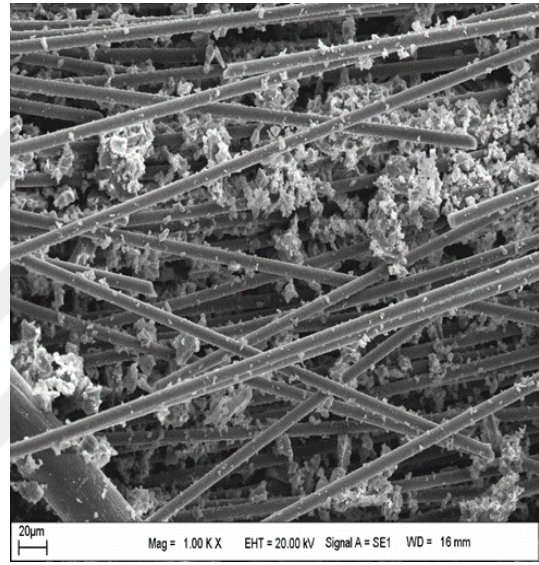
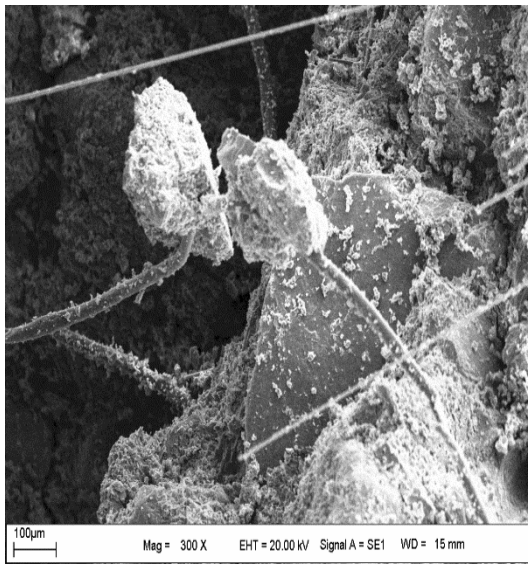


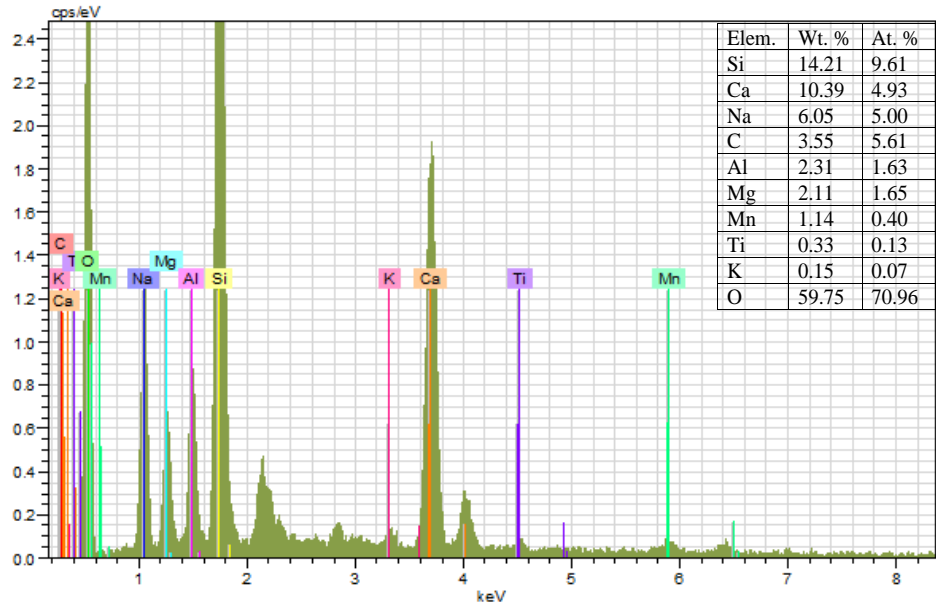
Şekil 4.6 : KR2 karışımına ait yük-deplasman eğrisi

4.2.5 Lif takviyeli geopolimerlerin mikroyapı özellikleri

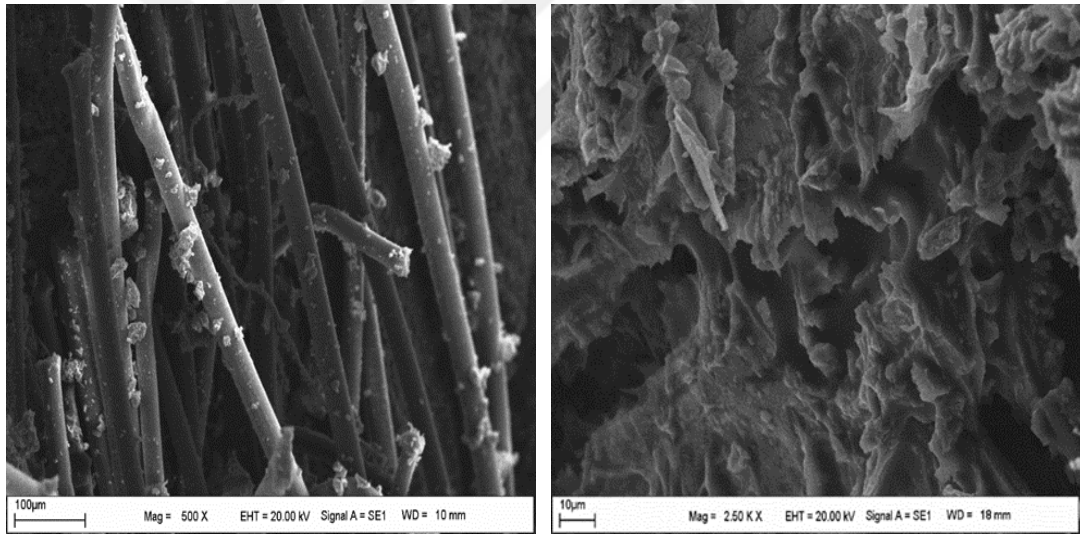
Bu çalışmada, 7 farklı lif takviyeli geopolimer karışımı üretilmiştir. Bu bölümde en yüksek ve en düşük (KR-2/KR-3) basınç/eğilme dayanımını veren lif takviyeli geopolimer harç karışımlarının mikroyapısal özelliği incelenmiştir. Hazırlanan örnekler kırıldıktan sonra küçük numune parçalarından örnekler alınmış ve bu harç örneklerine ait mikroyapısal özellikler incelenmiştir. KR-2 ve KR-3 örneklerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Ayrıca bu numuneler üzerinde EDX analizi yapılarak örnekler içerisindeki mineral yapısı da ortaya koyulmuştur. KR-2 ve KR-3 örneklerinin EDX grafikleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde KR-2 örneğinde çatlakların lifler tarafında iki yönde tutulduğu ancak KR3 karışımında çatlakların liflerle yeterince aderans sağlamadığı gözlenmiştir. Ayrıca KR2 karışımında lifler üzerinde geopolimer oluşum reaksiyonlarının gerçekleştiği

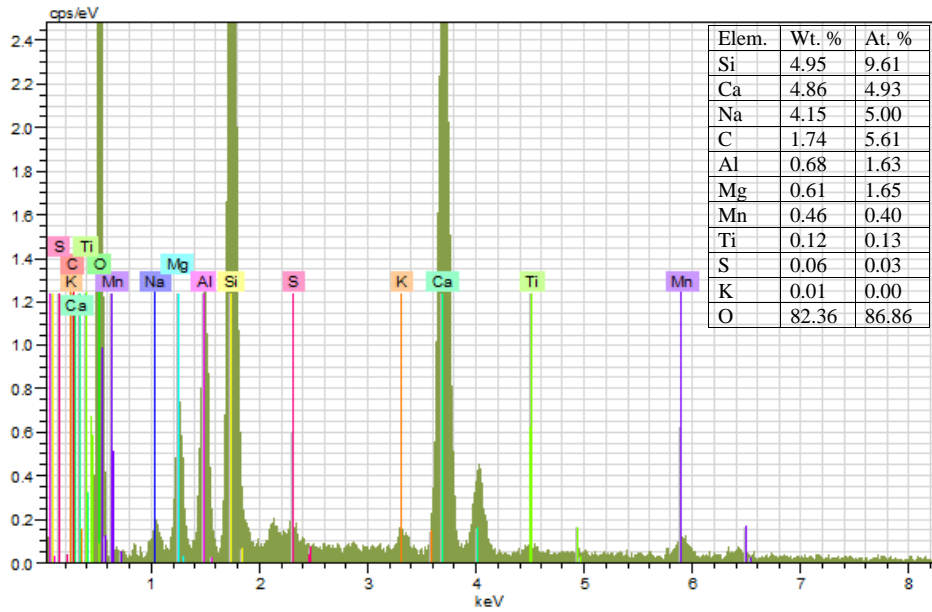
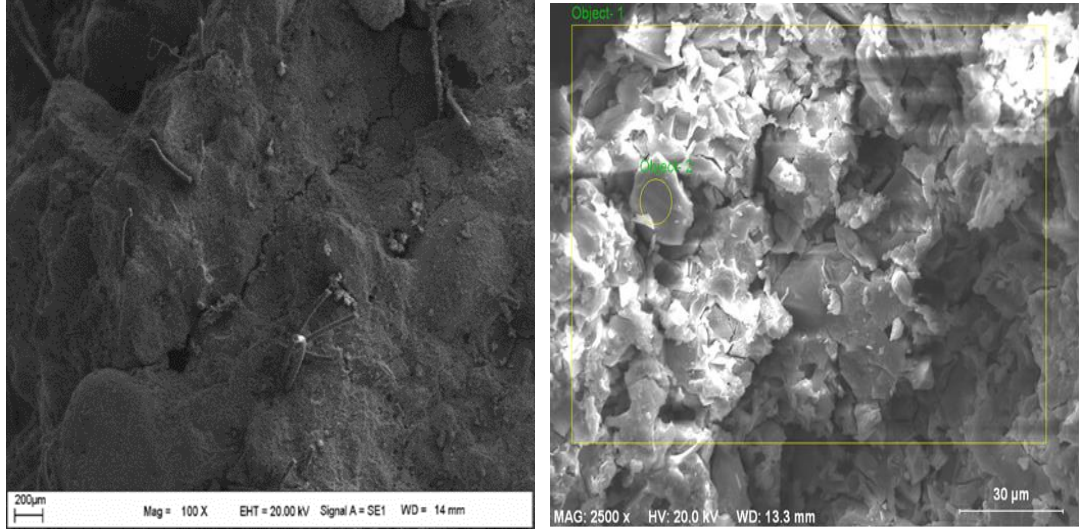
görülmektedir. Karışımdaki mineral içeriklerini görmek için EDX kullanılmış ve baskın elementin yüksek oranda %14,21 oranıyla silika olduğunu belirlenmiştir. Diğer elementlerin ise kalsiyum, sodyum, karbon, alüminyum, magnezyum, mangan, titanyum, potasyum, oksijen elementleri olduğu tespit edilmiştir. Bu analizler ile bulunan yüksek silis yüzdesinin dayanım üzerine önemli etkisi olduğunu göstermektedir. GH'ların SEM görüntülerinde bağlayıcıların bağ dokularının düzgün geçtiği gözlenmiştir. Silika ve kalsiyum oranının ara yüzlerde daha fazla olduğu gözlenmiş bu C-S-H türü hidrolik bağlayıcıların malzememize daha yüksek miktarda mekanik özellikler sağladığını göstermiştir.





Şekil 4.7 : KR2 karışımına ait SEM görüntüleri





Şekil 4.8 : KR3 karışımına ait SEM görüntüleri

4.3 Yığma Duvar Deney Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan 5'i standart çimentolu ve 5'i lif takviyeli geopolimer harçtan üretilmiş olmak üzere toplam 10 adet yığma duvar hazırlanmıştır. Bu duvarlar üzerinde aksel basınç ve kayma deneyler uygulanmış ve sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır.

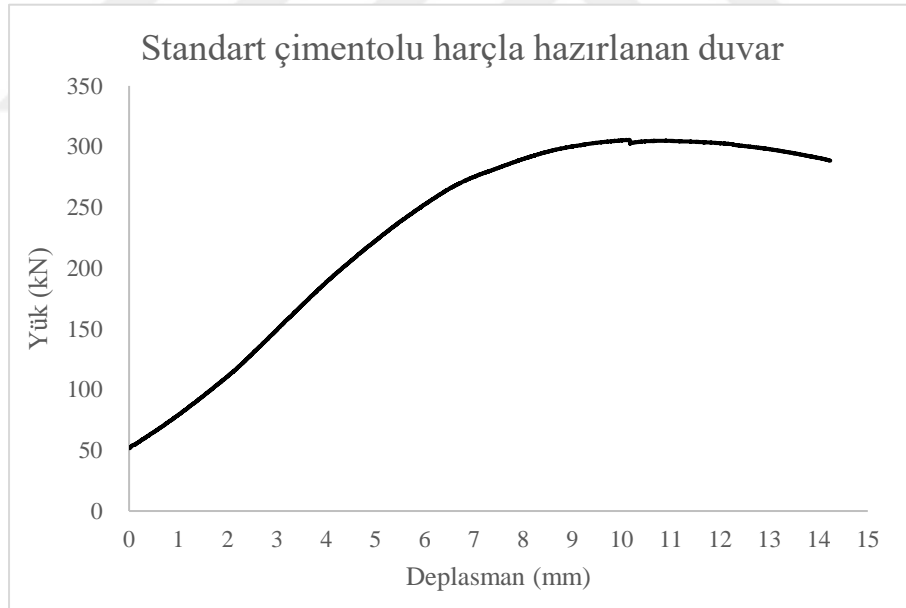
4.3.1 Aksel basınç dayanımı sonuçları

Eksel basınç dayanımı testlerinde ASTM C1314-10 standartına uygun olarak test edilmiştir. Uygulanan düşey yük, üst ve alt yüzlere yerleştirilen iki adet çelik plaka ile yığma duvar örneklerine düzgün olarak aktarılmıştır. Hazırlanan yığma duvar örnekleri üzerine

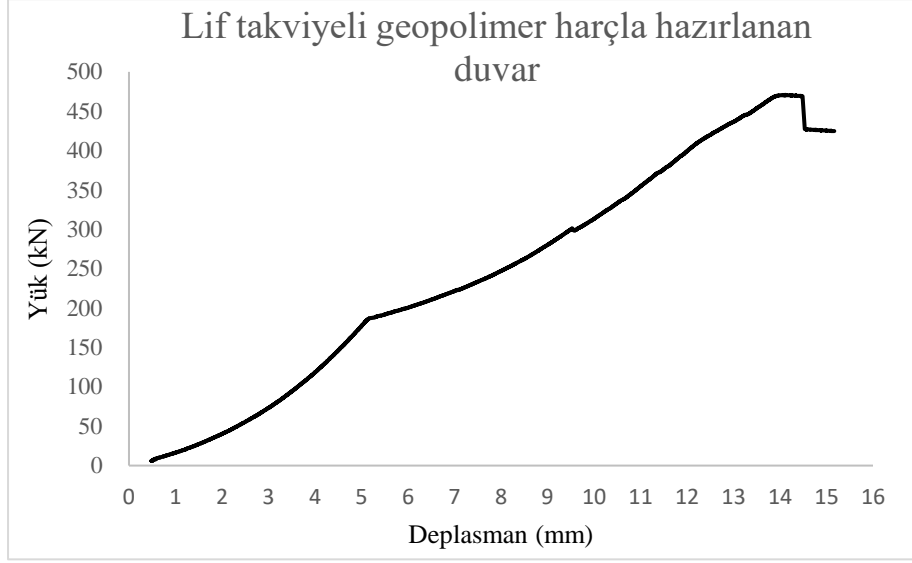
LVDT deplasman ölçer sabitlenmiştir. Yer değiştirme ölçerler numune üzerine düşey ve yatay doğrultularda yerleştirilmiştir. LVDT'lerin doğru bir şekilde ölçüm alabilmeleri için duvar örnekleri üzerine özel bir aparatla sabitlenmiştir. Deney sonucunda yük ve deplasman değerleri belirlenmiş standart çimentolu harçlı duvar ve lif takviyeli geopolimer harçlı duvar örneklerinin yük-deformasyon eğrileri çizilmiştir. Duvar örneklerinin aksenal yük altında ortalama yük-deformasyon eğrileri Şekil 4.9'da sunulmuştur. Ayrıca yığma duvarın ortalama basınç ve kayma dayanımları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Yığma duvarların basınç ve kayma dayanımı

Duvarların basınç dayanımı	Eksenel basınç d.	Kayma dayanımı
Standart çimentolu duvar (MPa)	304,54	143
Lifli geopolimer duvar (MPa)	470	286



Şekil 4.9 : Devam ediyor



Şekil 4.9 : Yığma duvarların aksenal basınç altında yük-deformasyon eğrisi

Sonuçlar incelendiğinde standart çimentolu harç ile hazırlanan duvar maksimum 304 kN düşey yük taşıırken, lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvar maksimum 557 kN yük taşımıştır. Şekil 4.9'a baktığımız zaman lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvarların ortalama 470 kN aksenal basınç dayanımı yaptığını görmekteyiz. Bu da bize lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvarların %55 daha fazla aksenal basınç dayanımı yaptığını göstermiştir. Her iki duvar örneğinin, göçmeden önce yaptıkları deformasyonlar birbirlerine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Duvarların göçme mekanizmaları Şekil 4.10'da verilmiştir. Buna göre, standart çimentolu harç ile hazırlanan duvarlarda göçmeden önce gözle görünür bir hasar meydana gelmeden ani ve gevrek bir göçme mekanizması görülmüştür. Bunun tam aksine lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvarlarda, göçme durumuna gelmeden önce kılcal çatlaklar ortaya çıkmış ve daha sünek bir göçme meydana gelmiştir.



a)



b)



c)

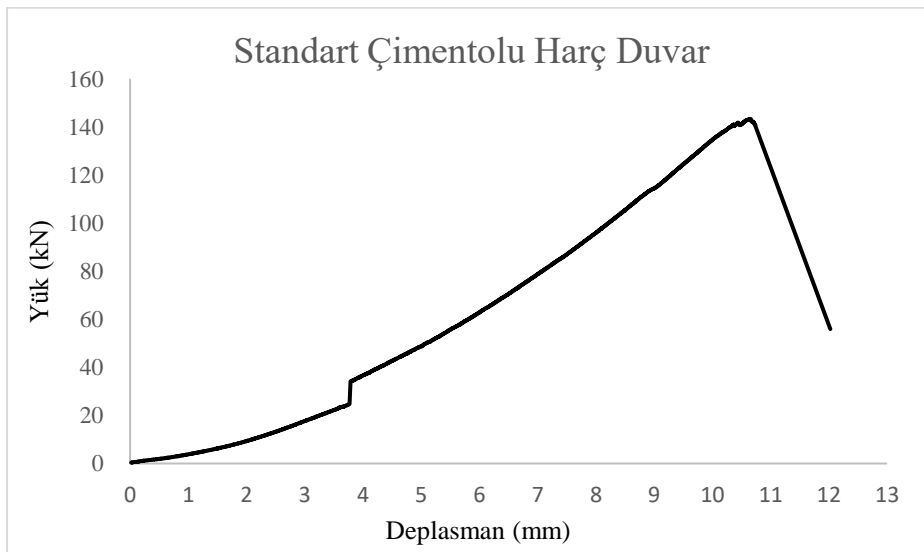


d)

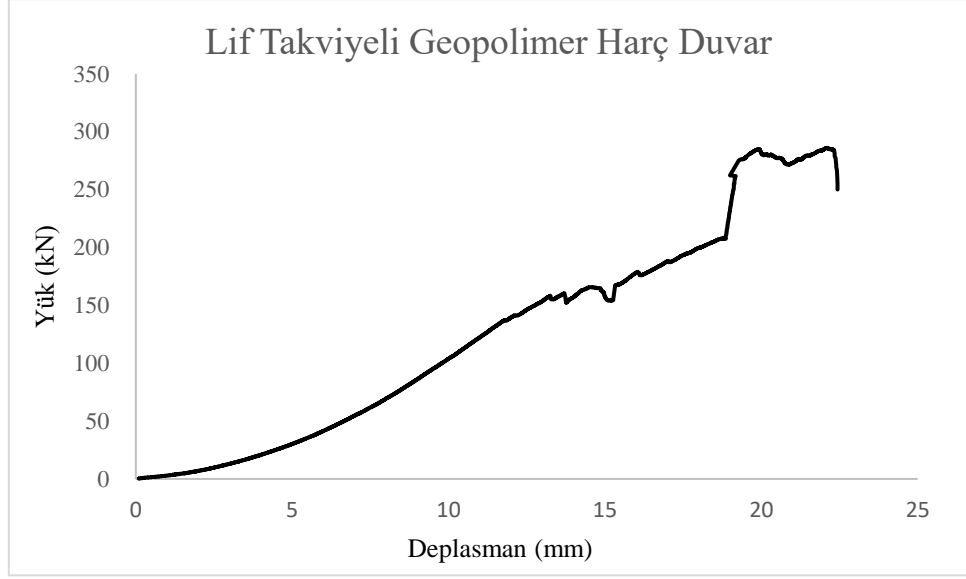
Şekil 4.10 : Düşey yük altında yığma duvarların göçme mekanizması a) standart çimentolu harç ile hazırlanan duvar (göçme öncesi durum) b) standart çimentolu harç ile hazırlanan duvar (göçme durumu) c) Lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvar (göçme öncesi durum) d) Lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvar (göçme durumu)

4.3.2 Kayma dayanımı sonuçları

Mevcut yığma binaların deprem karşısında davranışları için ana parametrelerden biri olan duvarların kayma dayanımını belirlemek için birçok teknik geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden diyagonal yükleme testi, yığma duvarların düzlem içi hasar mekanizmasını elde etmek amacıyla en çok tercih edilen test yöntemidir. Bu bölümde standart çimentolu harç ve lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan yığma duvar örnekleri üzerinde diyagonal yük altında kayma dayanım değerleri incelenmiştir. Deplasmanları kaydetmek için LVDT'ler kullanılmıştır. Bunlardan biri basınç eksenini üzerinde, diğeri ise gerilim eksenini üzerinde birbiriyle açıları 90 derece olacak şekilde, duvar örnekleri üzerine sabitlenmiştir. Duvar örnekleri üzerinde sürekli olarak yükleme yapılmıştır. Veri toplayıcı ve bilgisayar yardımıyla, uygulanan yük ve yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Diyagonal yükleme altında ASTM E 519 standartlarına göre test edilmiştir. Duvar numunelerinin diyagonal yük altında ortalama yük-deformasyon eğrileri Şekil 4.11'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde normal standart çimentolu harç ile üretilen duvarlar 143 kN yatay yük taşıırken, lif takviyeli geopolimer harç ile üretilen duvarlar 286 kN yatay yük taşımıştır. Bu da bize yatay yükleme etkisinde lif takviyeli geopolimer harç ile üretilen duvarların %100 daha fazla basınç dayanımı yaptığını göstermiştir. Şekil 4.11'e baktığımızda standart çimentolu harç ile üretilen duvarların 12 mm, lif takviyeli geopolimer harç ile üretilen duvarların 20 mm deplasman yaptığını görmekteyiz. Bu da lif takviyeli geopolimer harç ile üretilen duvarların daha fazla yer değiştirme yaptığı ve enerji sönümlenme kapasitesinin daha yüksek olduğu göstermektedir.



Şekil 4.11 : Devam ediyor



Şekil 4.11 : Diyagonal yük altında yığma duvarların yük-deformasyon eğrisi

Her iki duvar örneğinin, göçmeden önce yaptıkları deformasyonlar birbirlerine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Duvarların göçme mekanizmaları Şekil 4.12’de verilmiştir. Standart çimentolu harç ile hazırlanan duvarlarda göçmeden önce gözle görünür bir hasar meydana gelmeden ani ve gevrek bir göçme mekanizması görülmüştür. Bunun tam aksine lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvarlarda, göçme durumuna gelmeden önce kılcal çatlaklar ortaya çıkmış ve sünek davranış sergilemiş ağır hasar oluşmamıştır.



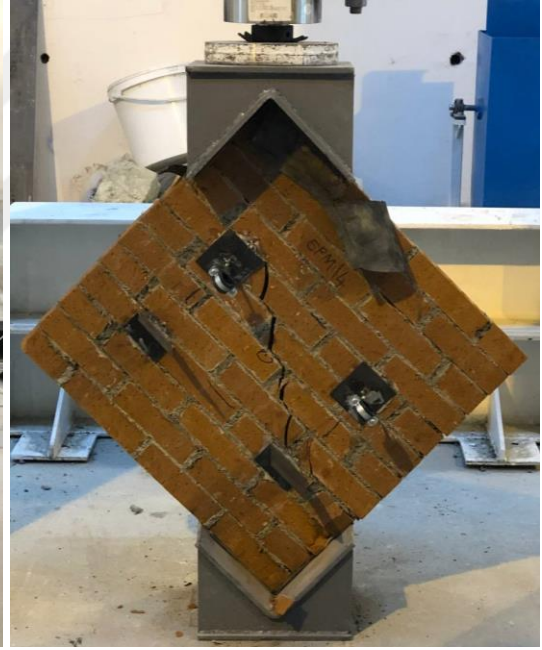
a)



b)



c)

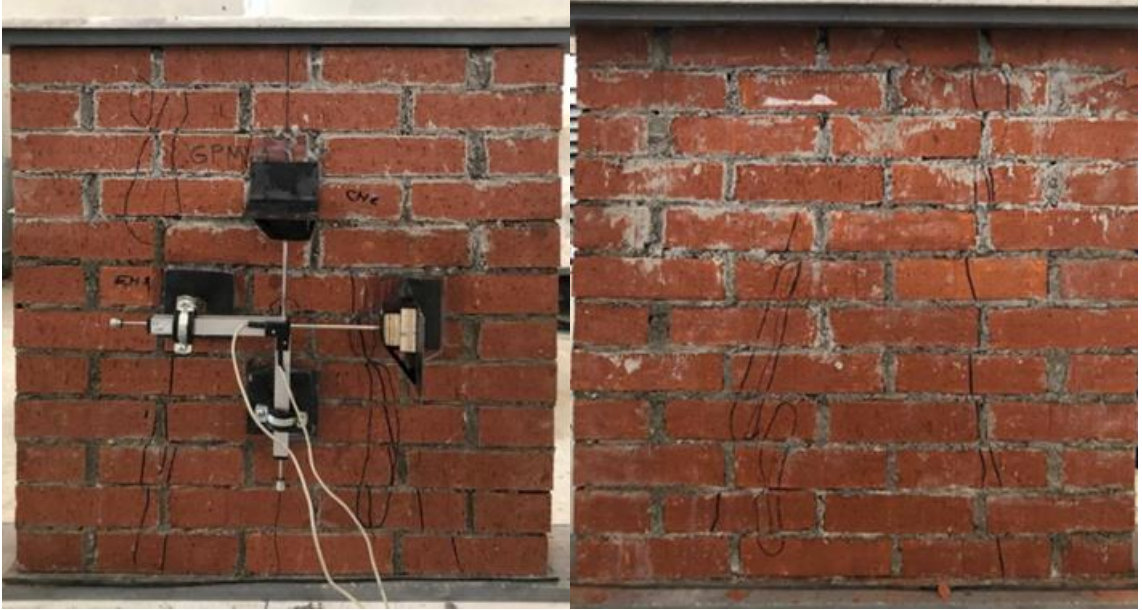


d)

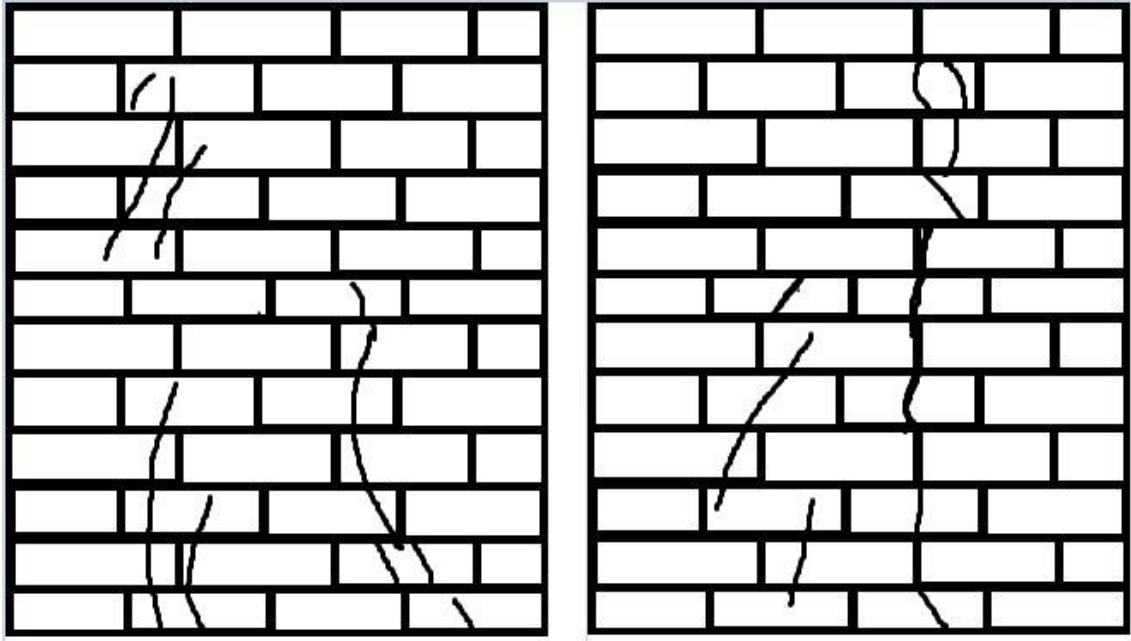
Şekil 4.12 : Diyagonal yük altında yığma duvarların göçme mekanizması
a) standart çimentolu harç ile hazırlanan duvar (göçme öncesi durum) b)
standart çimentolu harç ile hazırlanan duvar (göçme durumu) c) Lif takviyeli
geopolimer harç ile hazırlanan duvar (göçme öncesi durum) d) Lif takviyeli
geopolimer harç ile hazırlanan duvar (göçme durumu)

4.3.3 Çatlak modelleri

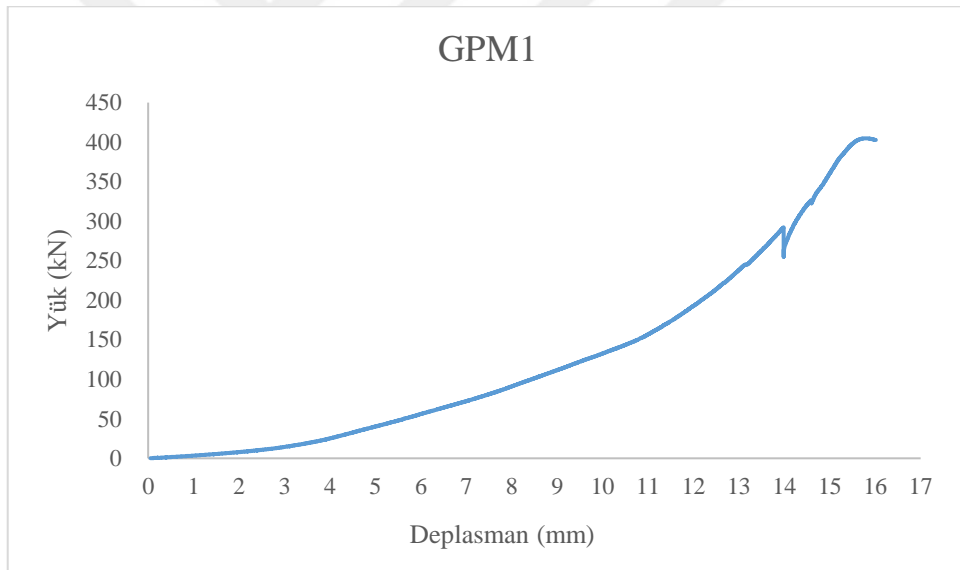
Eksenel yükleme altında duvar davranışları incelenmiştir. Duvar numunelerinde meydana gelen çatlamlar şema üzerinde gösterilmiştir. Çatlamlar tuğla malzemesinin taşıyabileceği maksimum yük kapasitesinin çok üzerinde olduğu için çatlamların büyük bölümü tuğla malzemesinin üzerinde görülmektedir. Harç malzemesinin olduğu ara bölümlerde ayrışma minimal düzeyde görülmüştür. Lifli geopolimer harç tuğlalar arasında aderansı ve bağ yapma kapasitesini de arttırdığı için duvar numunesi 557 kN yüke kadar dayanım sağlamıştır. Yükleme sonucunda 557 kN basınca ulaştıktan sonra aldığı basınç miktarında azalma olmaya başlamıştır ve ani göçme meydana gelmemiştir. GPM1 duvar numunesine ait olan arka ve ön yüzünün görüldüğü görüntü Şekil 4.13’de ve GPM2’ ye ait olan arka ve ön yüz görseli Şekil 4.15’ de gösterilmiştir. Bu numunelere ait olan yük deplasman grafiği Şekil 4.14 ve Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



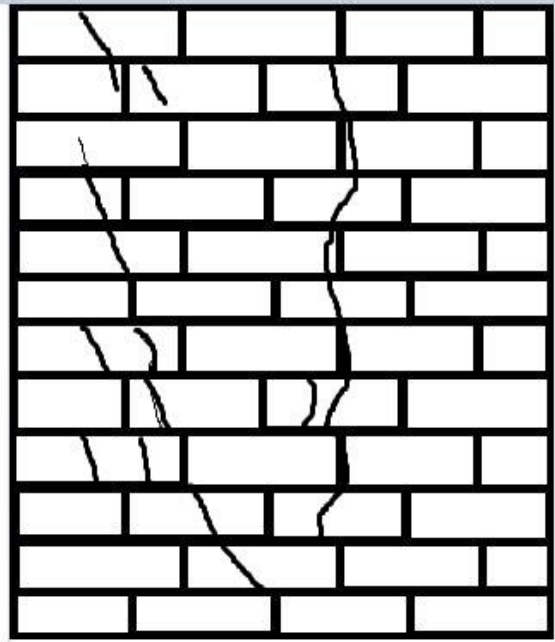
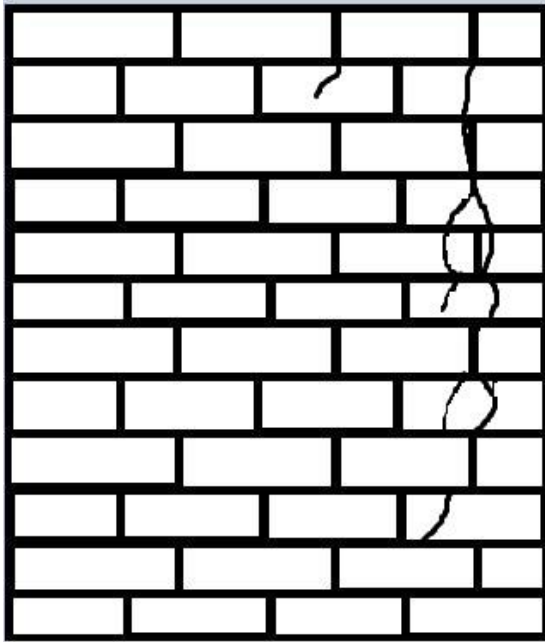
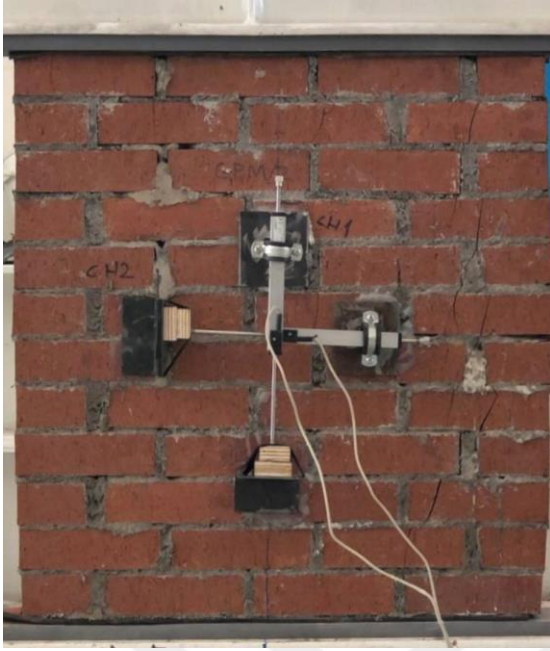
Şekil 4.13: Devam ediyor



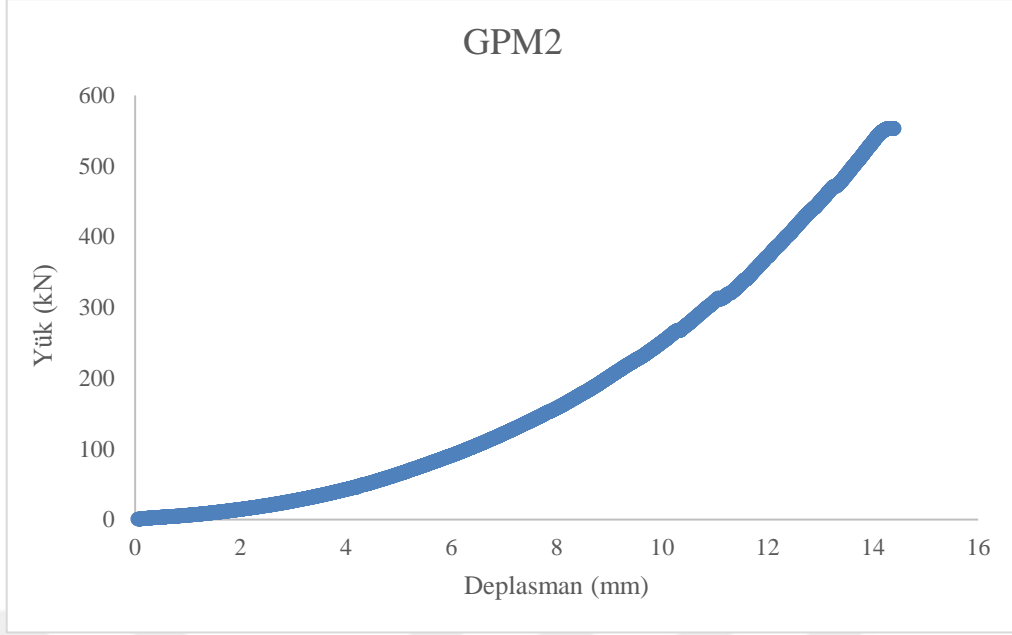
Şekil 4.13 : GPM1 numunesine ait olan çatlak görüntüleri



Şekil 4.14 : GPM1 duvar numunesine ait yük-deplasman grafiği

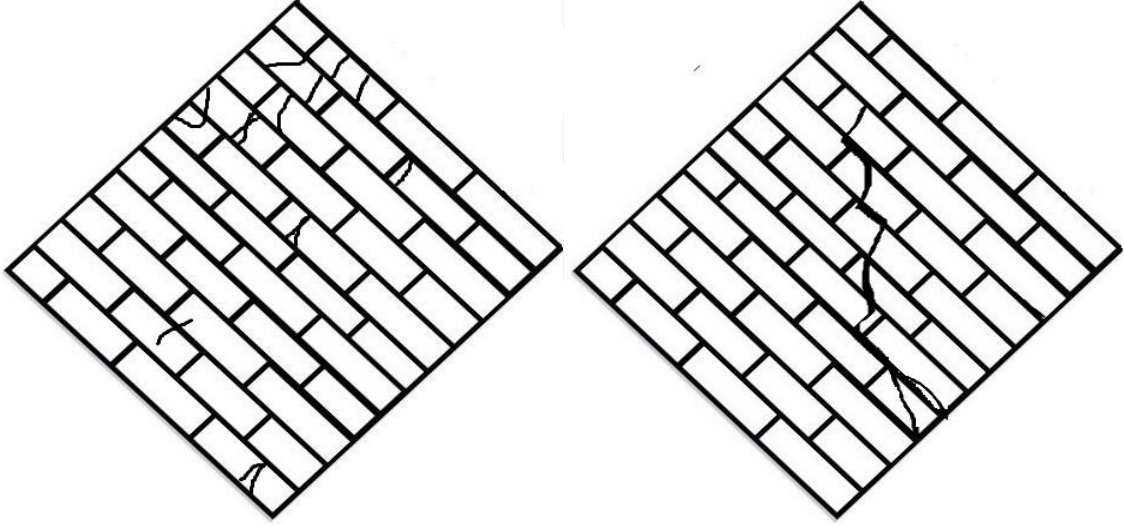


Şekil 4.15 : GPM2 Numunesine ait çatlak görüntüleri

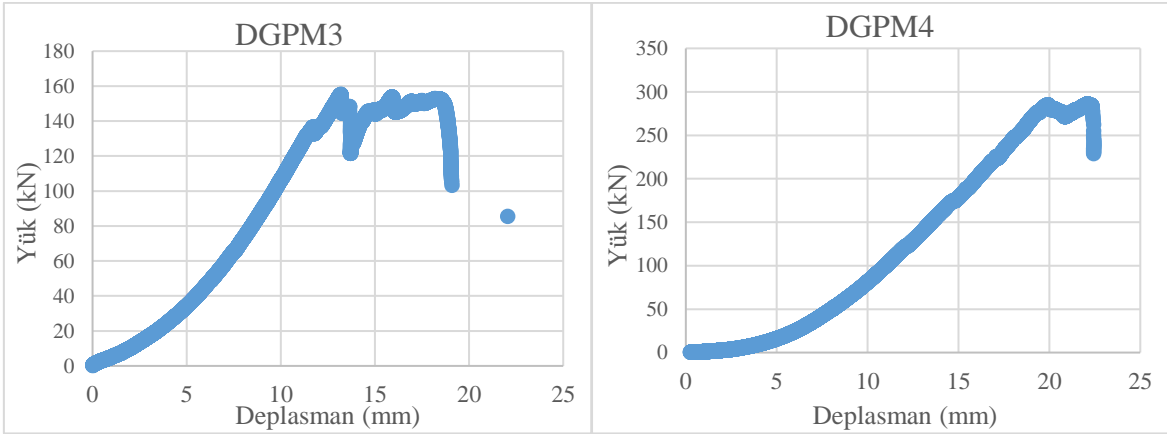


Şekil 4.16 : GPM2 duvar numunesine ait olan yük-deplasman grafiği

Diyagonal yükleme altında GPM3 duvar numunesi yüklemenin yapıldığı dış kısım üzerinden çatlamlara uğramış ve ani göçme meydana gelmemiştir. Lifli geopolimer harç tuğlalar arasında aderansı ve bağ yapma kapasitesini de arttırdığı için duvar numunesinin 286 kN yüke kadar dayanım sağlamıştır. Yükleme sonucunda 286 kN yüke ulaşıktan sonra ani göçme meydana gelmemiştir. GPM4 isimli duvar numunesinde yükleme sonucunda diyagonal yönde çatlak meydana gelmiştir. Bu numunede de kırılmada sünek davranış görülmüş ve ani göçme meydana gelmemiştir. GPM3 ve GPM4 duvar numunesine ait olan görüntü ve çizim şeması Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Yük-deplasman grafikleri Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.17 : GPM3 VE GPM4 numunesine ait olan çatlak görüntüleri



Şekil 4.18 : GPM3 ve GPM4 numunesine ait olan yük-deplasman grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, lif kullanılarak üretilen geopolimer harçların belirli kombinasyonlarda alkali aktivatör ve konsantrasyonları ile aktive edildikten sonra elde edilen harç örneklerinin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin ve bu harcın duvarda uygulanıp duvardaki etkilerinin incelendiği kapsamlı deneysel veri sunmaktadır.

Aynı karışım oranının farklı aktivatör kombinasyonlarında birleştirilmesi sonucunda, aktivatör içeriğinde Na_2SiO_3 bulunan karışımın en yüksek dayanımı vermesi ve sadece NaOH aktivatörü bulunan karışımın en düşük dayanımı vermesi bize Na_2SiO_3 'ün GH dayanımında olumlu etkisinin olduğunu göstermiştir. Sonuçlara bakıldığında 7.gün basınç dayanımı sonucunda 90YFC+10SD/10M (NaOH) karışımı 24,1 MPa basınç dayanımı elde edilmiş, fakat 28.gün sonunda bu dayanımın 17,9 MPa'a kadar düştüğü gözlenmiştir. Bu da sadece NaOH kullanımının zamanla basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkilerinin olduğunu göstermiştir.

KR2 ve KR3 karışımının içeriği incelendiğinde, KR2 karışımında lif muhtevasının %50'sinin karbon fiber olduğunu, KR3 karışımında lif muhtevasının %50'sinin cam lifi olduğu görülmektedir. Bu da bize karbon fiber lif katkısının cam lif katkısına oranla dayanımı daha fazla arttırdığını göstermektedir. Bu kapsamda SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Görüntüler incelendiğinde KR2 karışımında çatlakların lifler tarafında iki yönde tutunduğu ve bağ dokularının düzgün geçtiğini ancak KR3 karışımında çatlakların liflerle yeterince aderans sağlamadığı gözlenmiştir. Ayrıca KR2 karışımında lifler üzerinde geopolimer oluşum reaksiyonlarının gerçekleştiği görülmektedir. Karışımdaki mineral içeriklerini görmek için EDX testi yapılmış ve baskın elementin karışımlarda silika olduğu belirlenmiştir. Silika ve kalsiyum oranının ara yüzlerde daha fazla olduğu gözlenmiş bu C-S-H türü hidrolik bağlayıcıların malzememize daha yüksek miktarda mekanik özellikler sağladığını göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda KR2 karışımı yığılma duvarlarda test edilmek üzere referans karışım olarak belirlenmiştir.

Yığılma duvar örneklerinde yapılan aksenal basınç testi sonucunda standart çimentolu harç ile hazırlanan duvar örneklerinin maksimum 304 kN düşey yük taşıırken, lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvarın maksimum 557 kN yük taşıdığı belirlenmiştir. Her iki duvar örneğinin, göçmeden önce yaptıkları deformasyonlar incelenmiştir. Standart çimentolu harç ile hazırlanan duvarlarda göçmeden önce gözle görünür bir hasar meydana gelmeden ani ve gevrek bir göçme mekanizması görülmüştür. Bunun tam aksine lif takviyeli

geopolimer harç ile hazırlanan duvarlarda, göçme durumuna gelmeden önce kılcal çatlaklar ortaya çıkmış ani bir kırılma gözlenmemiş ve daha sünek bir göçme meydana gelmiştir.

Yığma duvar örneklerinde yapılan kayma dayanımı deney sonucunda standart çimentolu harç ile üretilen duvarlar 143 kN yatay yük taşıırken, lif takviyeli geopolimer harç ile üretilen duvarlar 286 kN yatay yük taşımıştır. Bu da bize yatay yükleme etkisinde lif takviyeli geopolimer harç ile üretilen duvarların %100 daha fazla basınç dayanımı yaptığını göstermiştir. Standart çimentolu harç ile hazırlanan duvar örnekleri 12 mm deplasman yaparken, lif takviyeli geopolimer harç ile hazırlanan duvarlar 20 mm deplasman yapmıştır. Bu da yük etkisinde daha fazla yer değiştirme yaptığı ve enerji sönümlenme kapasitesinin daha yüksek olduğu göstermektedir.

Kayma etkisinde her iki duvar örneğinin, göçmeden önce yaptıkları deformasyonlar belirlenmiştir. Lifli geopolimer harç ile hazırlanan duvar örneklerinde tuğla boyunca basınç yönünde gelişen diyagonal çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Harç ile tuğla arasında da ince çatlaklar oluşmuş, harcın aderansının yüksek olduğu gözlenmiştir. Oluşan diyagonal çatlakların tuğlanın taşıma kapasitesinin aşılması sonucu oluştuğu tespit edilmiştir. Üretilen harç numunesinin, yığma duvarların aksenal taşıma kapasitesini ve kayma dayanımını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bundan sonraki yapılacak olan çalışmalarda farklı lif çeşitleri ve farklı örgü malzemeleri kullanılarak bu konudaki çalışmaların geliştirmesinin önemi açıktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Postacıoğlu, B.** (1987). *Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton*. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, 2(s 211,323).
- [2] **Erol, G.** (2011). *Karbon Lişlerle Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevesel* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Capozucca, R.** (2011). Shear behaviour of historic masonry made of clay bricks. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 5(1).
- [4] **Gündüz, L., Şapçı, N., Bekar, M., & İsker, M.** (2006). Bimsbetonların genleştirilmiş perlit agregalar ile teknik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine teknik bir analiz. 4. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, 2-4.
- [5] **Kılıç, A.** (2012) *Betonarme çerçevesel yapılarda dolgu duvarların güçlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [6] **Döndüren, M. S., (2008)**. Bağlayıcı özelliği artırılan duvar ve sıva harcının düzlem dışı yüklenen tuğla duvarların mekaniksel davranışına etkisi. *Selcuk University Journal Of Engineering Sciences*.
- [7] **Kanıt, R., & Döndüren, M. S.** (2008). Bağlayıcı Özelliği Artırılan Harçla Oluşturulan Yığma Duvarların Mekaniksel Davranışları. *Selcuk University Journal Of Engineering Sciences* 7(1):34–50.
- [8] **Alecci, V., Fagone, M., Rotunno, T., & De Stefano, M.** (2013). Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 1038-1045.
- [9] **Arioğlu, E.** (1974). Türkiyede kırsal konutların son yıllardaki tahripkar depremlere mukabelesi. Ankara: *Deprem Araştırma Bülteni*.
- [10] **Costigan, A., Pavía, S., & Kinnane, O.** (2015). An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression. *Journal of Building Engineering*, 4, 283-294.
- [11] **TS EN 1052-1** (2000). Kâgir - Deney Metotları -Bölüm 1: Basınç Dayanımı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [12] **Ohno, M., & Li, V.** (1992). A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Constr. Build. Mater*, 57, 163–168.
- [13] **Junior, J., Saha, A. K., Sarker, P. K., & Pramanik, A.** (2021). Workability and Flexural Properties of Fibre-Reinforced Geopolymer Using Different Mono and Hybrid Fibres. *Materials*, 14(16), 4447
- [14] **Valluzzi, M. R., Tinazzi, D., & Modena, C.** (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building materials*, 16(7), 409-416.
- [15] **Erdogmus, E.** (2015). Use Of Fiber-Reinforced Cements İn Masonry Construction And Structural Rehabilitation. *Fibers*, 3, 41–63.
- [16] **Kundu, S.P., Chakraborty, S. & Chakraborty, S.** (2018). Effectiveness Of The Surface Modified Jute Fibre As Fibre Reinforcement İn Controlling The

Physical and Mechanical Properties Of Concrete Paver Blocks. *Constr. Build. Mater*, 191, 554–563.

- [17] **Ahmed, S.F.U., Mihashi, H. & Shaikh, F.** (2010). Strain Hardening Behavior Of Lightweight Hybrid Polyvinyl Alcohol (Pva) Fiber Reinforced Cement Composites. *Mater. Struct.* 44, 1179–1191.
- [18] **Yuan, F., Chen, M., & Pan, J.** (2019). Experimental Study On Seismic Behaviours Of Hybrid Frp–Steel-Reinforced Ecc–Concrete Composite Columns. *Compos. Part B Eng*, 176, 107272.
- [19] **Shaikh, F. U. A.** (2013). Deflection hardening behaviour of short fibre reinforced fly ash based geopolymer composites. *Materials & Design*, 50, 674-682.
- [20] **Li, C., Sun, H., & Li, L.** (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. *Cement and concrete research*, 40(9), 1341-1349.
- [21] **Van Deventer, J. S., Provis, J. L., Duxson, P., & Brice, D. G.** (2010). *Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 145-155.
- [22] **Provis, J. L.** (2014). Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Materials and structures*, 47(1), 11-25.
- [23] **Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Miraldo, S., & Kheradmand, M.** (2017). *Alkali-activated cement-based binders (AACBs) as durable and cost-competitive low-CO2 binder materials: some shortcomings that need to be addressed.* Handbook of low carbon concrete, 195-216.
- [24] **Davidovits, J.** (1989). Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis*, 35(2), 429-441.
- [25] **Krivenko, P.** (1994). Alkaline cements., *Proceedings of the 1 st International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, (131-149)
- [26] **Palacios, M., & Palomo, A.** (2004). Alkali-activated fly ash matrices for lead immobilisation: a comparison of different leaching tests. *Advances in cement research*, 16(4), 137-144.
- [27] **Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., & Lukey, G. C.** (2007). Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and concrete research*, 37(2), 251-257..
- [28] **Bakharev, T.** (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670.
- [29] **Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S.** (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.
- [30] **Mishra, A., Choudhary, D., Jain, N., Kumar, M., Sharda, N., & Dutt, D.** (2008). Effect of concentration of alkaline liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete. *ARPJ. Eng. Appl. Sci*, 3(1), 14-18.
- [31] **Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. P., & Jalali, S.** (2008). Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of

OPC concrete substrate surface treatment. *Construction and Building Materials*, 22(3), 154-161.

- [32] Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Miraldo, S., Baklouti, S., & Ding, Y. (2012). An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. *Construction and Building Materials*, 36, 1053-1058.
- [33] Zhang, B., MacKenzie, K. J., & Brown, I. W. (2009). Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate. *Journal of materials science*, 44(17), 4668-4676.
- [34] De Vargas, A. S., Dal Molin, D. C., Vilela, A. C., Da Silva, F. J., Pavao, B., & Veit, H. (2011). The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement and concrete composites*, 33(6), 653-660.
- [35] Srinivas, T., Rahul, V., & Rao, N. R. (2017). Studies On Permeability And Sorptivity Of Low Calcium Flyash And Slag Based Geopolymer Concrete. *Gokaraju Rangaraju Institute of Engineering & Technology*, 387.
- [36] Yang, K. H., Lee, K. H., Song, J. K., & Gong, M. H. (2014). Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete. *Journal of Cleaner Production*, 68, 226-233.
- [37] Al-Mashhadani, M. M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M., & Erdem, S. (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and building materials*, 167, 505-513.
- [38] Ranjbar, N., Talebian, S., Mehrali, M., Kuenzel, C., Metselaar, H. S. C., & Jumaat, M. Z. (2016). Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Composites Science and Technology*, 122, 73-81.
- [39] Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., & Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and concrete research*, 33(12), 2031-2036.
- [40] Bernal, S., De Gutierrez, R., Delvasto, S., & Rodriguez, E. (2010). Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. *Construction and building Materials*, 24(2), 208-214.
- [41] Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P., & Songpiriyakij, S. (2018). Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. *Construction and Building Materials*, 161, 37-44.
- [42] Yoosuk, P., Suksiripattanapong, C., Sukontasukkul, P., & Chindaprasirt, P. (2021). Properties of polypropylene fiber reinforced cellular lightweight high calcium fly ash geopolymer mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00730.
- [43] Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G., & Aldea, C. (2006). Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites. *Journal of Composites for Construction*, 10(3), 223-233.

- [44] **Görhan, G., & Kürklü, G.** (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites part b: engineering*, 58, 371-377.
- [45] **Gambogi, J.** (2020). *Mineral commodity summaries: Rare earths*. US Geological Survey, Washington, DC <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information>. Accessed, 14.
- [46] **Hendriks, C. A., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., & Riemer, P.** (1998). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies* (pp. 939-944). IEA GHG R&D Programme Interlaken, Austria.
- [47] **Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D.** (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of cleaner production*, 17(7), 668-675.
- [48] **Mathew, B. J., Sudhakar, M., & Natarajan, C.** (2013). Strength, economic and sustainability characteristics of coal ash–GGBS based geopolymer concrete. *International Journal of Computational Engineering Research*, 3(1), 207-212.
- [49] **Davidovits, J.** (1994). *Properties Of Geopolymer Cements*. Saint-Quentin, France, *Geopolymer Institute*.
- [50] **Url-1**<<https://ichef.bbci.co.uk/news/800/cpsprodpb/E901/production/104494695/gettyimages-184404565.jpg>>
- [51] **Siddique, R., & Klaus, J.** (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400.
- [52] **Hiraskar, K. G., & Patil.** (2013). Use Of Blast Furnace Slag Aggregate In Concrete, *International Journal Of Scientific Engineering Research*, 4(5), 95-98.
- [53] **Hosseini, S., Soltani, S. M., Fennell, P. S., Choong, T. S., & Aroua, M. K.** (2016). Production and applications of electric-arc-furnace slag as solid waste in environmental technologies: a review. *Environmental Technology Reviews*, 5(1), 1-11.
- [54] **Pedro, D., De Brito, J. & Evangelista, L.** (2017). Evaluation Of High-Performance Concrete With Recycled Aggregates: Use Of Densified Silica Fume As Cement Replacement. *Construction and Building Materials* 147, 803-814.
- [55] **González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., & Rodas, M.** (2009). Characterization of lightweight aggregates manufactured from washing aggregate sludge and fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 571-581.
- [56] **Baykal, G., & Döven, A. G.** (2000). Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results. *Resources, Conservation and Recycling*, 30(1), 59-77.
- [57] **Videla, C., & Martinez, P.** (2002). Physical, mechanical and microscopic characterization of cold bonded fly ash lightweight aggregates. *Materiales de Construcción*, 52(268), 5-18.

- [58] **Kim, K. Y., Park, K. H., Park, H. C., Goo, N. S., & Yoon, K. J.** (2005). Performance evaluation of lightweight piezo-composite actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 120(1), 123-129.
- [59] **Khale, D., & Chaudhary, R.** (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, 42(3), 729-746.
- [60] **Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Pürsünlü, Ö., & Mermerdaş, K.** (2013). Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates. *Composites Part B: Engineering*, 53, 258-266.
- [61] **Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A.** (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and concrete research*, 35(10), 1984-1992.
- [62] **Chareerat, T., Lee-Anansaksiri, A., & Chindaprasirt, P.** (2006). Synthesis of high calcium fly ash and calcined kaoline geopolymer mortar. In Proceedings of the 1st International Conference on Pozzolan, *Concrete and Geopolymer*, Khon Kaen, Thailand (pp. 327-335).
- [63] **Kong, D. L., & Sanjayan, J. G.** (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*, 40(2), 334-339.
- [64] **Zhang, J., Provis, J. L., Feng, D., & van Deventer, J. S.** (2008). Geopolymers for immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺. *Journal of Hazardous materials*, 157(2-3), 587-598.
- [65] **Costigan, A., Pavia, S., & Kinnane, O.** (2015). An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression. *Journal of Building Engineering*, 4, 283-294.
- [66] **Arslan, M.** (2012). *Yapı Teknolojileri 2*. Seçkin Yayınevi, Ankara, 21.
- [67] **A.S.T.M.** (2007). C1437: *standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. Annual book of ASTM standards.
- [68] **Mermerdaş, K., Algin, Z., Oleiwi, S. M., & Nassani, D. E.** (2017). Optimization of lightweight GGBFS and FA geopolymer mortars by response surface method. *Construction and Building Materials*, 139, 159-171.
- [69] **Ghosh, K., & Ghosh, P.** (2012). Effect of Na₂O/Al₂O₃, SiO₂/Al₂O₃ and w/b ratio on setting time and workability of fly ash based geopolymer. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(4), 2142-2147.
- [70] **ASTM.** (2013). C348-14 American Society for Testing and Materials. Committee C-1 on Cement. *Standard test method for compressive strength of hydraulic*

cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International.

- [71] **Martini, R., Carvalho, J., Barraca, N., Arêde, A., & Varum, H.** (2017). Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests. *Procedia Structural Integrity*, 5, 1108-1115.
- [72] **McCann, D. M., & Forde, M. C.** (2001). Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *Ndt & E International*, 34(2), 71-84.
- [73] **EN 12504-4.** (2004). *Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity.*
- [74] **ASTM.** (2012). E519/E519M-10: *Standard Test Method For Diagonal Tension (Shear) In Masonry Assemblages.* American Society for Testing and Materials.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Merve BÜYÜKTAPU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **İlköğretim** : Muş Gazi İlköğretim Okulu
- **Ortaöğretim** : Muş IMKB Anadolu Lisesi
- **Lisans** :2020, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü