

**T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI İNCELİKLERE SAHİP MERMER VE BAYBURT TAŞI
ATIKLARININ LİF DONATILI GEOPOLİMER BAĞLAYICILI
SİSTEMLERDE KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nurullah ÖKSÜZER

Eylül - 2016

BAYBURT



**FARKLI İNCELİKLERE SAHİP MERMER VE BAYBURT TAŞI
ATIKLARININ LİF DONATILI GEOPOLİMER BAĞLAYICILI
SİSTEMLERDE KULLANILMASI**

Nurullah ÖKSÜZER

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. İlker TEKİN**

**T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI İNCELİKLERE SAHİP MERMER VE BAYBURT TAŞI
ATIKLARININ LİF DONATILI GEOPOLİMER BAĞLAYICILI
SİSTEMLERDE KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nurullah ÖKSÜZER

2016

BAYBURT

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAY SAYFASI

Farklı İnceliklere Sahip Mermer ve Bayburt Taşı Atıklarının Lif Donatılı Geopolimer Bağlayıcılı Sistemlerde Kullanılması

Yrd. Doç. Dr. İlker TEKİN danışmanlığında, Nurullah ÖKSÜZER tarafından hazırlanan bu tez çalışması 07/09/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

İmza :



Üye : Yrd. Doç. Dr. İlker TEKİN

İmza :



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ertekin ÖZTEKİN

İmza :



Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.



Doç. Dr. Metin UÇURUM

Enstitü Müdür v.

Bu çalışma TUBİTAK 213M450 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Not: Bu tezde kullanılan ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bu çalışmada şahsıma ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Nurullah ÖKSÜZER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI İNCELİKLERE SAHİP MERMER VE BAYBURT TAŞI ATIKLARININ LİF DONATILI GEOPOLİMER BAĞLAYICILI SİSTEMLERDE KULLANILMASI

Nurullah ÖKSÜZER

Bayburt Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İlker TEKİN

Türkiye doğal taş bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Birçok ilimizde endüstriyelmiş ya da endüstriyelşmekte olan doğaltaş üretimi ülkemizin ekonomik kalkınmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Ocak ve atölye işletmeciliği ile yapılan doğaltaş üretimlerinde yaklaşık %30-70 oranında atık ürün oluşturmaktadır. Bu atıkların bir kısmı inşaat sektörü başta olmak üzere birçok alanda değerlendirilmektedir. Ancak çoğunluğu atık sahalarında depolanmaktadır. Bu atık sahalarından rüzgâr ve yağmur erozyonu ile taşınan partiküller tarım arazilerini kirletmekte, içme sularını tahrip etmekte ve tozlaşma sonucunda doğa kirliliği oluşturmaktadır.

Bayburt Taşı (BT) orijin olarak tuf/tüfit yapılı taş grubundadır. Kimyasal olarak yüksek oranda silis içermekte ve bu silisi yapı genel olarak zeolit minerallerinden meydana gelmektedir. Bayburt ilindeki rezervin yaklaşık miktarının 180 milyon metreküp olduğu MTA tarafından yapılan araştırmalarda belirtilmiştir. BT genel olarak dış duvar kaplaması, denizlik ve yüzey kaplamalarının yanı sıra çeşitli restorasyon işlerinde, köprü, cami ve çeşme gibi imalatlarda kullanılmaktadır. BT'nin ocak işletmeciliğinde modern yöntemlere geçilememesi sebebiyle %70'e varan verim kayıpları oluşmaktadır. Bu verim kaybı atık oranını artırarak tarım arazilerini ve havayı kirleterek çevre problemlerine sebep olmaktadır. BT üretimindeki atıklar depolama sorunlarını da beraberinde getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, yapı malzemesi biliminin son zamanlarda ilgi gören konularından, sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu sağlayan malzemelerden biri olan geopolimer malzeme üretilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışmada NaOH yapılı bir alkali aktivatör kullanılmış olup BT atıklarından yüksek dayanımlı kompozit yapı malzemesi üretilmesi planlanmıştır. Deneysel çalışmalarda Bayburt bölgesinde bulunan, farklı oranlarda mermer atıkları (MA) ile BT kullanılarak NaOH ile aktive edilmiş geopolimer kompozit malzemeler üretilmiştir. Çalışma üç aşamada tamamlanmıştır. BT ve MA 125 mikron ve 10 mikron olmak üzere iki incelikte öğütülmüştür. Ardından öğütülen malzemeler farklı oranlarda polipropilen mikro lifli ve lifsiz halde karıştırılarak 10 mol derişime sahip NaOH çözeltisiyle birlikte hamur haline getirildikten sonra kalıplara yerleştirilmiş ve 90 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Son olarak elde edilen sertleşmiş numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı, eğilme dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme, kapiler su emme, aşınma direnci ısıl iletkenlik ve yüksek sıcaklığın dayanım üzerindeki etkileri test edilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde civa püskürtmeli porozimetre (MIP), x-ışını oksidal spektrum

analizi(XRF), x-ışını kırınımı yöntemi (XRD) ve taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) mikro yapı görüntüleme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda %60 BT kullanımında 90 günde herhangi bir presleme işlemi yapılmaksızın lifsiz kompozitlerde yaklaşık 34 MPa, lifli kompozitlerde 39 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Görünür porozite değerleri yaklaşık % 25-45 oranlarında olan geopolimer kompozit malzemenin genel olarak su direncinin zayıf olduğu belirlenmiştir.

2016, 107 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geopolimerizasyon, Bayburt Taşı, Kil, Mermer tozu, Alkali aktivatör.



ABSTRACT

MS Thesis

UTILIZATION OF DIFFERENT FINENESS MARBLE AND BAYBURT STONE WASTES IN FIBER-REINFORCED GEOPOLYMER BINDER SYSTEM

Nurullah ÖKSÜZER

Bayburt University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. İlker TEKİN

Turkey is a quite rich country in terms of natural stones. Industrialized or ongoing industrialization production of natural stones is taking important role in a lot of city. Production of natural stones which making by mining or factory brings into waste at the rate of 30-70 %. A part of these wastes have been used in the construction sector and the others used the other fields. But most of them are stocked up in the waste field. The wastes stocked in the waste fields pollute farms, potable waters and also nature by way of wind and by becoming dust.

Bayburt Stone (BS) is originally in the geological group of tuff/tufite. As chemically, it contains highly silica, and the form of it derive from the zeolite minerals. According to the MTA values, there is 180 million cubic meter BS reserve in Bayburt region. BS is mostly using in siding of buildings, shipping and covering of surfaces. Moreover, it is also used in restoration of mosques and production of water fountains. Due to the lack of modern methods in production of BS, efficiency of production is about 30%. This production mistakes increased rate of waste, and so causing pollution with environmental problems. Furthermore increasing wastes in the future will cause more storage problems.

In this study of thesis, geopolymer material produced which has eco efficiency and sustainable material that is the one of the most interest subject for the science of construction materials recently was aimed. In this context, an alkali-activator (NaOH) was used to produce high-

strength composite material contained wastes of BT and marble. Different rates of marble waste (MA) and BS which exist in Bayburt region are used in the experimental studies. Then composite materials were produced with the wastes activated by NaOH. Study was performed in three phase: I) BT and MA grinded as two different fineness such as 125 micron and 10 micron. II) Grinded samples mixed with different ratios of polypropylene micro fibers and without fibers. Accordingly solution of NaOH with 10 molar concentration was added the mixtures and produced pastes placed steel molds. And then they waited in laboratory for 90 days. III) Finally, specimens tested on compressive strength, bending strength, weight per unit of volume, water absorption, capillary water absorption, abrasion resistance, thermal conductance and effect of high temperature on strength. Also samples were analyzed by Mercury Intrusion Porosimetry, X-Ray Diffractometer, X-Ray Fluorescence and Scanning Electron Microscope. After the study, without any pressing non-fibrous composites reached to 34 MPa, fibrous composites reached to 39 MPa after 90 days. Geopolymer composite materials have 25-45% apparent porosity approximately and also they have vulnerable to the water.

2016, 107 pages

Keywords: Geopolymerisation, Bayburt Stone, Clay, Marble Dust, Alkali activator

TEŞEKKÜR

Bu alana yönelmemde büyük katkıları bulunan ve bu araştırmada beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. İlker Tekin'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarının kapılarını sonuna kadar açan Yrd. Doç. Dr. İbrahim Hakkı Karakaş'a, öğütme çalışmasında tecrübelerini esirgemeyen Doç. Dr. Metin Uçurum ve Yrd. Doç. Dr. Tahsin Ünlü hocama ayrı ayrı teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Her aşamasında desteklerini hiç esirgemeyen, bilgi ve becerilerini benimle paylaşan değerli meslektaşlarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin gerçekleşmesinde 213M450/2013 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tezimin analizlerinde yardımcı olan Aşkale Çimento A.Ş. çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan ve bu yoldaki en büyük destekçim olan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Nurullah ÖKSÜZER

Eylül/2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1 Kompozit malzemeler	3
2.1.1 Kompozit teknolojisinin gelişimi	3
2.1.2 Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları	4
2.2 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri	5
2.2.1 Çimentolu kompozitler.....	5
2.2.2 Çimentosuz kompozitler	6
2.2.2.1 Plastik malzemeli kompozitler	6
2.2.2.2 Metal matrisli kompozitler	6
2.2.2.3 Seramik kompozitler	6
2.2.3 Sol-jel yöntemi	7
2.2.4 Geopolimerizasyon	7
2.2.4.1 Geopolimer kimyası	10
2.2.4.2 Geopolimer çeşitleri	14
2.2.4.3 Geopolimer bağlayıcıların enerji verimliliği.....	19
2.2.4.4 Geopolimerizasyon ile üretilmiş yapı malzemeleri.....	21
2.2.4.5 Geopolimer üretiminde kullanılan alkali-aktivatörler.....	23
2.3 Doğal taşlar	24
2.3.1 Magmatik (püskürük) kökenli doğal taşlar	25
2.3.1.1 Volkanik Tüfler.....	26
2.3.1.2 Volkanik tüf çeşitleri.....	26
2.3.2 Metamorfik (başkalaşım) kökenli doğal taşlar.....	28

2.3.2.1	Mermer	29
2.3.3	Sedimanter (tortul) kökenli doğal taşlar	31
2.4	Literatür araştırması	32
3.	MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1	Materyal	38
3.1.1	Bayburt Taşı	38
3.1.2	Mermer	45
3.1.3	Sodyum Hidroksit	47
3.1.4	Polipropilen lif	48
3.2	Yöntem.....	48
3.2.1.	Taze hamur deneyleri	50
3.2.1.1	Kıvam ve priz sürelerinin belirlenmesi	50
3.2.1.2	Yayıma tablası deneyi	50
3.2.2	Sertleşmiş hamur deneyleri	51
3.2.2.1	Basınç ve eğilme deneyleri	51
3.2.2.2	Su emme ve kapiler su emme deneyleri	52
3.2.2.3	Aşınma deneyi.....	53
3.2.2.4	Yüksek sıcaklık etkisi deneyi.....	53
3.2.2.5	Civa Porozimetri (MIP).....	54
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	56
4.1.	Fiziksel özelliklere ait deney sonuçları	56
4.1.1.	Taze GKH'lerin standart kıvam ve priz süreleri deney sonuçları.....	56
4.1.2.	Yayıma deneyi sonuçları.....	60
4.1.3.	Su emme, kapiler su emme deneyleri ile civa püskürtmeli porozimetre (MIP) deney sonuçları ve değerlendirme	63
4.2.	Mekanik özellikler	73
4.2.1.	Eğilme ve basınç dayanımı	73
4.2.2.	Aşınma Deneyi.....	82
4.3.	Termik Özellikler	85
4.3.1.	Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	85
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
	KAYNAKLAR	95
	EKLER.....	103

EK 1	104
EK 2	105
EK 3	106
ÖZGEÇMİŞ	



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

P	Basınç
t	Zaman
T	Sıcaklık
M_0	Etüv kurusu ağırlığı
M_1	Suya doymun kuru yüzey ağırlığı
M_2	Su içerisindeki ağırlığı
c	Kılcal su emme katsayısı (cm^2/sn)
F	Kılcal su emme yüzey alanı (cm^2)
m	t zaman aralığında emilen su miktarı (cm^3)
L	Mesnetler arası uzaklık
b	En kesit uzunluğu
d	Boy kesit uzunluğu
W	Su emme oranı
P_g	Görünür porozite
fc	Basınç dayanımı
ρ	Yoğunluk
A_c	Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı
σ_e	Eğilme dayanımı
δ	Özgül ağırlık

Kısaltmalar

BHA	Birim hacim ağırlık
BT	Bayburt taşı
Ç/B	Çözelti/Bağlayıcı
Ç/T	Çözelti/Toz malzeme
GH	Geopolimer hamur
GK	Geopolimer kompozit

GKH Geopolimer kompozit hamur
GiK Geopolimer ince kompozit
GkK Geopolimer kaba kompozit
KSEK Kapiler su emme katsayısı
MIP Mercury Intrusion Porosimetry (Cıvalı Porozimetre Deneyi)
MA Mermer atığı
MTA Maden Tetkik ve Arama
PP Polipropilen



ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Zeolitlerin kristal yapısı (Köktürk, 1995).....	28
Şekil 3.1 : Bayburt ili maden haritası (MTA).....	39
Şekil 3.2 : Öğütmeden önceki BT'nin SEM görüntüleri.....	40
Şekil 3.3 : Öğütmeden önceki BT'nin SEM görüntüleri a) 1. bölgenin büyütülmüş görüntüsü b) 2. Bölgenin büyütülmüş görüntüsü.....	41
Şekil 3.4 : Şekil 3.3a görüntüsünün EDS analizi.....	41
Şekil 3.5 : BT'nin XRD (mineralojik) analiz sonucu.....	42
Şekil 3.6 : Öğütülmüş 125 µm olan BT ve MA'nın lazer tanecik analizi.....	45
Şekil 3.7: Öğütülmüş 10 µm olan BT ve MA'nın lazer tanecik analizi.....	45
Şekil 3.8 : a) MA'nın SEM görüntüsü b) a'dan büyütülmüş SEM görüntüsü.....	46
Şekil 3.9 : MA'nın mineralojik XRD analizi (ODTÜ Merlab).....	46
Şekil 3.10 : Yüksek sıcaklık uygulama prosesi.....	54
Şekil 4.1 : a) BT oranıyla ç/b oranı korelasyon eğrisi b) BT oranıyla ç/t oranı korelasyon eğrisi.....	57
Şekil 4.2 : Yayılma ve ç/b korelasyon eğrisi.....	57
Şekil 4.3 : a) Vicat cihazında kıvam belirlenmesi b) Priz başlangıcı ve priz sonu belirlenmesi.....	58
Şekil 4.4 : BT 'nin priz başlangıç ve bitiş süreleri.....	59
Şekil 4.5 : Taze hamurda yayılma.....	62
Şekil 4.6 : a) Lifsiz numunelerde yayılma deneyinin son durumu b) Lifli numunelerde yayılma deneyinin son durumu.....	62
Şekil 4.7 : a)10µ numunelerin kapiler su emme katsayısının belirlenmesi b) 125µ numunelerin kapiler su emme katsayısının belirlenmesi.....	65
Şekil 4.8 : 7 gün 10µ MIP sonuçları.....	70
Şekil 4.9 : 7 gün 125µ MIP sonuçları.....	70
Şekil 4.10 : 28 gün 10µ MIP sonuçları.....	71
Şekil 4.11 : 28 gün 125µ MIP sonuçları.....	71
Şekil 4.12 : 90 gün 10µ MIP sonuçları.....	71
Şekil 4.13 : 90 gün 125µ MIP sonuçları.....	71
Şekil 4.14 : 7 ve 28 günlük su emme deneyi.....	72

Şekil 4.15 : Kapiler su emme deneyi	73
Şekil 4.16 : a) Kapiler su emme için etüv sonrası görüntü b) Su emme için suda bekletilen numune	73
Şekil 4.17 : 7 günlük basınç dayanımı.....	74
Şekil 4.18 : 28 günlük basınç dayanımı.....	75
Şekil 4.19 : 90 günlük basınç dayanımı.....	76
Şekil 4.20 : 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	77
Şekil 4.21 : 10 μ numuneler için korelasyon eğrileri	78
Şekil 4.22 : 125 μ numuneler için korelasyon eğrileri	78
Şekil 4.23 : 28 gün sonrası %80 BT'li numuneler.....	79
Şekil 4.24 : 7 günlük eğilme dayanım grafikleri	79
Şekil 4.25 : 28 günlük eğilme dayanım grafikleri	80
Şekil 4.26 : 90 günlük eğilme dayanım grafikleri	81
Şekil 4.27 : 10 μ numuneler için aşınma deneyi.....	83
Şekil 4.28 : 125 μ numuneler için aşınma deneyi.....	83
Şekil 4.29 : Aşınma deneyi görüntüleri	85
Şekil 4.30 : 10 μ BT ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklık sonucu	85
Şekil 4.31 : 125 μ BT ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklık sonucu	87
Şekil 4.32 : 10 μ numuneler için BHA	88
Şekil 4.33 : 125 μ numuneler için BHA	89
Şekil 4.34 : a)300 °C etüv sonrası b)500 °C etüv sonrası c)700 °C etüv sonrası numune görüntüleri.....	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1 : Bazı bölgelere ait volkanik tüflerin kimyasal analiz sonuçları (Ören, 1996)	26
Çizelge 2.2 : Doğal zeolitlerin fiziksel özellikleri(Doğan, 2003)	28
Çizelge 2.3 : Doğal taşların kökenlerine göre sınıflandırılması (Ünal, 2003).....	32
Çizelge 3.1 : Bayburt beyaz taşının kimyasal özellikleri (Aşkale Çim. Fab. XRF analizi).....	42
Çizelge 3.2 : Bayburt beyaz taşının fiziksel ve mekanik özellikleri (MTA 2005)....	43
Çizelge 3.3 : BT ve MA özgül ağırlık ve özgül yüzey deney sonuçları	44
Çizelge 3.4 : Mermer tozunun kimyasal analiz sonuçları (Aşkale Çimento A.Ş. Laboratuvarı).....	47
Çizelge 3.5 : Deneysel çalışmada kullanılan alkalinin kimyasal kompozisyonu	47
Çizelge 3.6 : Polipropilen lifin teknik özellikleri	48
Çizelge 3.7 : 1 dm ³ için karışım oranları	49
Çizelge 4.1 : GKH'lerin standart kıvam ve priz süreleri deney sonuçları.....	58
Çizelge 4.2 : Yayılma deney sonuçları	61
Çizelge 4.3 : 10µ numunelerin su emme, kapiler su emme ve MIP analiz sonuçları	64
Çizelge 4.4 : 125µ numunelerin su emme, kapiler su emme ve MIP analiz sonuçları	67
Çizelge 4.5 : 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları.....	74

1. GİRİŞ

Günümüzde bağlayıcı olarak kullanılan en yaygın malzeme çimentodur. Taleplerin artmasından dolayı Portland Çimentosu'nun da üretiminin arttığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden atmosfere salınan karbondioksit miktarı da gittikçe artmaktadır. Bir ton çimento üretimi için atmosfere neredeyse 1 ton karbondioksit salınmaktadır. (Torgal F.P, 2008) Böylece çimento atmosfere salınan karbondioksitin yaklaşık %7'sinden sorumlu olmaktadır.(Guo X, 2010) Çevre duyarlılığının artması üzerine enerji tasarrufu ve finansal giderler de göz önüne alınarak betonda kullanılabilmesi için çimentonun yerine farklı puzolanik malzemeler geliştirilmiştir. (Atis C.D., 2005) Puzolanlar çimentoda kullanılmasının haricinde, toksik maddenin taşınmasına karşı engel oluşturmak maksadıyla da kullanılmaktadır (Spence, 1980)

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki grupta incelenmektedir. En eski ve rezervi en fazla olan puzolanlar volkanik tüflerdir. Bunlar yüksek oranda silis içeren ve yapısında genellikle zeolit minerali barındıran malzemelerdir. Zeolitler kafes yapılarında alüminyum, silis ve oksijen, gözeneklerinde ise alkali veya toprak alkali metaller ile beraber su içeren mikro gözenek yapılı kristal katılardır (Haque M.N, 1984). Puzolanlar tek başlarına bağlayıcılık özellik göstermezler fakat ortamdaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek bağlayıcı yapıları meydana getirirler. Bundan dolayı puzolanların reaksiyon kapasiteleri ortamda bulunan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı ile doğrudan ilişkilidir (Huanq C.H., 2013).

Günümüzde lifli yapı malzemelerine ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Özellikle gevrek yapılı malzemelerde sünekliliği artırmak üzere yapılan çalışmalarda özellikle lif kullanımının hem eğilme hem de basınç dayanımını güçlendirici etki gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Lifli kompozitler, kompozit malzemenin içerisine narinlik oranı yüksek olan üç boyutlu rastgele ya da belirli bir doğrultuda çelik, karbon, aramid, polipropilen, cam vb. katılması ile elde edilir. Lifli kompozitler kompozit malzemenin önemli bir kısmını oluşturur. Lifler kompozit içerisine doğru oranlarda katıldığı sürece

kompozitin, çekme, eğilme, çarpma, kesme gibi özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Bilindiği üzere, her malzeme olumlu ve olumsuz özelliklerini bir arada taşır. Amaçlara uygun malzeme seçilirken, bilinçli veya bilinçsiz olarak birbirleri için seçenek oluşturabilen malzemeler arasında, özelliklerini her yönüyle inceleyerek, içerisinde bulunan koşullar altında en uygun malzemeyi seçmek gerekmektedir. Malzemenin liflerle donatılmasında ki öncelikli amaç mekanik dayanımları daha iyi olan bir kompozit üretmektir. (Ersoy, 2001).

İncelik üzerine yapılan çalışmalarda özellikle çimento inceliğinin betonun mekanik mukavemetleri üzerinde önemli etkisinin olduğu belirtilmektedir. Ancak bu etki özellikle erken dayanımlarda görünürken geç dayanımlarda aynı oranda görülmektedir. (Kocataşkın F., 1965). Özgül yüzey alanı arttığında taban külünün de puzolanik özelliklerinde artış meydana geldiği bilinmektedir. (Kaya A.İ., 2010) Bu çalışmada malzemenin inceliği arttıkça özgül yüzeyi artacağından, su ihtiyacı, reaksiyon kapasitesi buna bağlı olarak kohezyon davranışının da artması beklenmektedir. İnceliğin fazla olması sonucunda boşlukların içerisini dolduracağından gözeneklilik ve su emme oranının azalması beklenmektedir.

Bu çalışmada alkali aktivatör ile atık doğal taşlar kullanılarak yüksek dayanımlı yapı malzemesinin üretilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda Mermer atığı ve volkanik tüf sınıfında bulunan Bayburt Taşı iki farklı incelikte öğütüldükten sonra 10 mol derişimli NaOH çözeltisi ile birleştirilerek geopolimer malzeme üretilebilirliği üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu amaçla “Bayburt Taşı ve Mermer atıkları ile “yüksek dayanımlı çimentosuz geopolimer kompozit üretilebilir” hipotezi kurulmuş ve bu hipotezin doğruluğu deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda Bayburt taşı iki farklı incelikte elde öğütülüp, lifli ve lifsiz olan iki farklı birleşim ile alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH çözeltisi ile karıştırılarak kompozit üretilmiştir. Üretilen kompozitler farklı kür sürelerinde bekletildikten sonra üretilen numuneler üzerinde basınç, eğilmede çekme, su emme, kapiler su emme, yüksek sıcaklık, aşınma, birim hacim ağırlık, mikroskobik ve mineralojik analizler yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Kompozit malzemeler

İki veya daha çok bileşenli malzemelere kompozit malzeme adı verilir. Genelde iki farklı bileşenden üretilmektedir. Makro boyutlarda homojen görünen bu malzemeler aslında içyapıda mikro boyutlarda heterojen bir yapıya sahiptirler. (Ersoy, 2001)Kompozit malzemenin içyapısını oluşturan malzemeler birbirleri ile kimyasal tepkimeye girebilirler ancak birbiri içerisinde çözünmezler. (Kısaöz vd., 2014)

Kompozitler de çekirdekte lifli bir materyal bulunduğu, bu materyalin çevresinde hacim olarak çoğunluğu meydana getiren matris bulunmaktadır. Bu iki malzemedeki fiber olarak adlandırılan lif, kompozitin dayanım ve tokluk özelliğini, matris olarak kullanılan malzeme ise kompozitin dayanımında rol almaktadır. Böylece fiber malzemelerde plastik deformasyon meydana geldiğini ortaya çıkacak olan çatlak ilerlemesi önemli ölçüde engellenmiş olacaktır. (Ersoy, 2001)

2.1.1 Kompozit teknolojisinin gelişimi

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman gibi lifle donatılmış çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Bugün taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzemeler de evlerimizin esas yapılarını oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları genellikle şehircilikte toplu konut yapımında, çevre güzelleştirme çalışmalarındadır. Prefabrik üretim ve yerinde üretime olanak tanıdığı için üreticinin çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz maliyet imkânları, yüksek yalıtım kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım gibi avantajlar sağlamaktadır. (Selçuk, 2010).

Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme olarak inşaat sektöründe uygulanmaktadır.

Tasarımın esnek ve kolay olmasının yanı sıra nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlamıştır. İzolasyon problemi çözülmekte ve bakım giderlerinin azaldığı görülmektedir. Tarım Sektöründe ise seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptir. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istendiği takdirde ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi faydalar da sağlayabilmektedir (Erdem, 2010).

2.1.2 Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları

Birçok özellikleri metallerinkine göre farklılık gösteren kompozit malzemeler, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozit malzemelerin özgül ağırlıklarının az olması hafif konstrüksiyonlarda kullanılabilmesine sebep olmuştur. Diğer taraftan, lif takviye edilmiş kompozit malzemelerin aşınma dayanımları, ısı, ses ve elektrik yalıtımı sağlamaları da bir üstünlük olarak görülmektedir. (Güneş, 2013).

Kompozit malzemelerin çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha fazla olduğu bilinmektedir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere istendiği yönde ve istenen bölgede gerekli mukavemet dayanımı sağlanabilir. Bu sayede malzemelerden tasarruf edilerek, daha hafif ve daha ucuz ürünler üretilebilmektedir. Elde edilmek istenen büyük ve karmaşık görünümlü malzemeler tek bir kalıplama işlemiyle kompozit malzemelerde elde edilebilmektedir. Bu malzemenin ve işçilikten büyük kazançtır. (Güneş, 2013).

Çok üstün elektriksel özelliklere sahip malzemeler üretebilmek mümkündür. Bu sebeple kompozitler büyük enerji nakil hatlarında gerektiği zaman çok iyi bir iletken veya çok iyi bir yalıtkan olarak kullanılabilir. Bazı kompozitler kimyasal etkilerden ve korozyondan etkilenmezler. Bu özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler kimyasal madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçlarının yapılmasında güvenle kullanılabilir. (Güneş, 2013).

Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşturulursa kompozitlerin yüksek sıcaklığa dayanıklılığı artmaktadır. Katkı maddeleri kullanılarak kompozit malzemelerin yüksek ısıya direnci artırılabilir. (Selçuk, 2010).

Bu kadar olumlu yönlerinin haricinde kompozit malzemelerin olumsuz yönleri de şu şekilde sıralanabilir:

- Kompozit malzemenin içerisinde bulunan hava taneleri malzemenin yorulma özelliğini olumsuz yönde etkiler.
- Kompozitin içyapısına bağlı olarak farklı yönlerde farklı mekanik özellikler gösterebilmektedir.
- Kompozit malzemeler de delik delme, kesme türü işlemleri liflerde açılmaya sebep olduğundan, kompozit malzemelerde hassas imalat söz konusu değildir (Erdem, 2010).

2.2 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Kompozit malzemeler birbiriyle bağımsız iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşurlar. Metal alaşımlar ve polimerlerin bazıları kompozit olarak tanımlanmazlar çünkü mikroskobik yapının dışında mikroskobik olarak da birleşmektedirler. Kompozit malzemelerin en büyük özellikleri kendilerini oluşturan malzemelerin en iyi özelliklerini yansıttığından, hafiflik ve yüksek dayanım beklenen yerlerde, metaller yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır. (Arıcasoy, 2006) kompozit malzemelerin üretim yöntemleri kısaca alt başlıklarda verilmiştir.

2.2.1 Çimentolu kompozitler

Çimento, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve “klinker” olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilen bir üründür; su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcı özelliği kazanmaktadır (Turhan, 2013). Çimento tanelerinin büyüklükleri yaklaşık olarak 5 ile 90 mikron arasındadır ve çimento son yıllarda en çok kullanılan kompozit madde olarak bilinen betonda bağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır (Ersoy, 2001).

İnşaat alanında da kullanılan kompozit maddeler içyapılarına göre;

- Partiküllü kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Lifli kompozitler

Liflerle donatılı kompozitler matris ve lif fazının davranışına göre;

- Kırılğan lif sünek matrisli sistemler
- Kırılğan matris-sünek lifli sistemler olarak iki grupta incelenebilir.

Lifler kompozit bir madde olan betonda çatlak oluşmasını geciktirir, çatlak yayılımını ve ilerlemesini önler ve aşamalı olarak matristen kopma ve sıyrılma mekanizması ile betonun enerji yutma kapasitesini önemli oranda geliştirirler. (Ersoy, 2001)

2.2.2 Çimentosuz kompozitler

2.2.2.1 Plastik malzemeli kompozitler

Bu tip kompozitler polimer yapılı bir plastik bileşeni ile destekleyici ve direnç artırıcı diğer malzemelerin diğer bileşen olduğu kompozit malzemeler grubundadır. Malzeme ihtiyaçlarına göre 4 şekilde üretilebilirler.

Plastik-plastik kompozitler

Plastik-cam elyaf kompozitler

Plastik-metal fiber kompozitler

Plastik-köpük kompozitler

2.2.2.2 Metal matrisli kompozitler

Metal kompozitlerin birçoğu yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında kırılğanlık özellikleri artmaktadır. Fakat metal lifle donatılmış metal matrisli kompozitlerde fazlar uyumlu ise yüksek sıcaklıkta da direncin yüksek olduğu görülmüştür. Liflerin malzemeyi daha dayanıklı hale getirmesi yüzeysel boşlukların az oluşuna bağlıdır. Teorik olarak liflerin belirli bir uzunluğun altında olmaması fiber ve matris arasındaki adezyon kuvvetini etkilemektedir. Kompozitlerde metal matris içindeki lifler, gelişmiş güzel dağılacığı gibi sürekli lif şeklinde de olabilir (Sarı, 2010).

2.2.2.3 Seramik kompozitler

Seramik kompozitler metal olan veya olmayan malzemelerin birleşiminden oluşur. Yalıtkan özellikte olan seramik kompozitler, yüksek sıcaklığa karşı da çok iyi bir direnç sağlamaktadırlar. Üç ayrı grupta toplanırlar:

- Seramik-Seramik Sistemi: Saf çinilerde olduğu gibi iki seramik fazın karışımından oluşurlar.
- Seramik-Cam Sistemi: Porselenlerde olduğu gibi Kuvars liflerinin cam bir matris içerisine çini ile birlikte karıştırılıp yerleştirilmesiyle meydana gelirler.
- Seramik-Metal Sistemi: Seramik ve metalin karmaşık bir şekilde ilave fazlarından oluşmuştur. Elmas örnek olarak verilebilir. (Akbulut, 1993)

2.2.3 Sol-jel yöntemi

Seramik imalatında kullanılabilecek başlıca metotlardan bir tanesi sol-jel'dir. Sol jel metodu bir süspansiyonun jelleştiği tüm sistemleri barındırır. İleri teknoloji seramik üretilmesi için kullanılmakta olan hammaddelerin mikron altı boyutta, saf, reaktif ve düşük sıcaklıklarda sinterlenebilir özelliklere sahip olması gereklidir. Sol jel yöntemi ile nano boyutlarında; seramik tozu sentezi, ince film seramik kaplamalar, seramik içerikli malzemeler ve lifler üretilebilir (Evcin & Kavas, 2004). Sol jel terimi sıvı içyapısında dağılmış nano boyutlu katı parçacık (sol) aglomerasyonu sonrasında sıvı içerisinde üç boyutlu ve sürekli bir ağ yapısı meydana getirmesi (jel) işlemidir (Gupta & Chaudhury, 2007). Solun devamlı olan kısmı sıvı, dağılan kısmı ise katı oluşmuş yapıdır. Yapının sol olarak tanımlanabilmesi için nano boyutundaki katı parçacıkların anında çökmemesi gereklidir. Sol içeride dağılmış katı fazı merkez kaç gibi dış kuvvetlerle homojen bir şekilde dağıtması mümkündür (Pierre, 1998). Jeller nano parçacıklarla üç boyutlu yerleşmiş ve katıya benzer ıslak yapıdadır. Jel içerisindeki sürekli faz; nano parçacıkların oluşturduğu katı ağ yapısı, dağılmış kısmı ise sıvı fazdır. Jeller katı ile sıvı özellik arasında görünürler. Atomlar arasında katılarda görüldüğü gibi belirli ilişkiler mevcutken yoğunluk değerleri sıvılara yakındır (Niederberger & Pinna, 2009).

2.2.4 Geopolimerizasyon

Silika moleküllerinin zincir bağlarından oluşmuş siloksan ya da silikat moleküllerinin (AlO_4) alüminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile elde edilen polisialatların keşfi ile geopolimer kimyasının temelleri atılmıştır (Davidovits, 2008). Kil, oksit mineraller içeren önemli bir malzemedir. Kaolin, montmorillonit, pirofilit, muskovit, klorit, laterit gibi hemen hemen tüm killi topraklar alkali soda ($NaCO_3$,

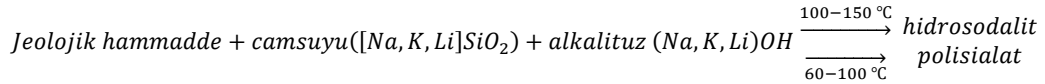
NaOH, KOH) ile tepkime vererek ısı etkisinde katılaşmaktadır. Özellikle kaolin kili içinde yüksek orandaki Al ve Si elementlerinin oksitli bileşikleri bağlayıcılık ve hacimsel tokluk sağlayan monomerleri meydana getirebilir (Davidovits, 2008).

Yapılmış çalışmalarda alkali ortamda kaolin ve benzeri kil tipleri ile alkali tuz (NaOH) karıştırılmış ve feldispatoit ile zeolit türü kayaçların yapay olarak eldesi araştırılmıştır. 1972 yılında kaolinit kili ve alkali aktifleştiricilerin etkisiyle 15 MPa basınçla sıkıştırılmış pastanın 100 - 130 °C sıcaklıkta sunta üzerine 30 bar basınçlı buhar ile preslenmesiyle yanmaz ahşap panel üretimi gerçekleştirilmiştir (Davidovits, 2008).

Davidovits ve diğerleri, silisyumlu monomerlerle üretilen polimer malzemenin üretim prosesine “Siliface” ismini vermişlerdir. Ayrıca aynı ekip erken dayanımı yüksek beton, refrakter malzemeler gibi üretimler için çeşitli doğal ve yapay minerallerle alkali tuz ve alkali silikatların kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşan yarı seramik, genellikle üç boyutlu ve hegzagonal kristal yapılı bağlayıcı, çimento, harç, rezene gibi ürünler geliştirmiştir. İçinde yüksek fırın cürufunun ve alkali tuzların (NaOH, KOH) hidrolik bağlayıcı olarak kullanıldığı beton, yüksek basınç dayanımı, esneklik, erken yüksek dayanım ve yüksek asit direnci göstermiştir. Pyrament olarak bilinen geopolimerik çimento pastası, 1984’de ABD’de havalimanı pist betonu dökümünde Portland çimentosu ile yapılmış betonla karıştırılıp kullanılmış ve 6 saat içerisinde uçağın iniş yapabileceği dayanım ve sertlikte beton üretilmiştir. Betonun 28 gün sonunda basınç dayanımı 80 MPa civarındadır (Davidovits, 2008). Davidovits (Davidovits, 2008), üretilen ürünlerin doğal taş yapısına benzeyen özellikte olması, içinde alüminyum ve silisyum bileşikleri bulunduran alkali ortamda jeolojik oluşumlu kayaçların bağlayıcılık kazandığı bir reaksiyon sonucu oluştuğu, içinde toprak mineralleri bulundurduğu ve termoset polikondensasyon reaksiyonlu polimer kimyasıyla benzer reaksiyonlarla elde ediliyor olmasından dolayı geopolimer adını vermiştir.

Geopolimer işlemi bir polimerleşme sürecidir ve özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral molekül içeren monomerlerin birbiri ile aralarında polikondensasyon sonucunda meydana gelen kovalent yapıda karmaşık zincir bağlı polimerler kurması ile oluşur. Yapılmış çalışmalarda geopolimerin en iyi özellikler gösterdiği ürünler

750°C’de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen pastanın, düşük ısıda (40-100 °C) fırınlanmasıyla elde edilmiştir (Davidovits, 2008). Geopolimer malzemeler gördüğü ısı işlemler sonrası seramik yapıya ulaşır. Geopolimerlerde girenler ve ürünler şu şekilde verilebilir:



Hidrosodalit ve polisialatlar hegzagonal üç boyutlu molekül dizilimindedir. Yani hidrotermal polikondensasyon sonucunda içindeki suyu kimyasal ve fiziksel yollarla vererek (dehidratasyon+dehidrasyon) zeolit kayaçlarına benzer, ancak zeolit kristallerinden farklı, amorf üç boyutlu hegzagonal moleküler bağ yapıda olan, alümino silikat toprak malzemeleri oluştururlar (Keyte & Deventer, 2006). Geopolimeri zeolitlerden ayıran bir diğer faktörde 80 °C’de sentezlenebiliyor olmasıdır. Bundan dolayı geopolimer, yapısında su moleküllerinin bir kısmını da tutmaktadır. Zeolit ise 150-250 °C’de yapısında boşluklar bırakarak kristalleşmektedir. Geopolimerde amorf yapıyı sağlayan durum, suyun kaynama sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda sentezlenebiliyor olmasıdır. Ancak yüksek ısı ve ani soğuma molekül yapısının kristalleşmesine neden olur. (Colella C. vd., 2001) 1950’de Gluchowsky, zeolitini temeline oluşturan alkali aktive edilmiş alümino silikat hidratlarla hidrosodalit eldesi ile ilgili çalışmalar yapmıştır. (Komnitsas & Zaharaki, 2007).

Geopolimer malzemeler prefabrik yapılarda, beton esaslı yol kaplamalarında, zemin iyileştirmede, nükleer atıkların depolanmasında, heykeltçilik sanatı ve süsleme sanatlarında, seramik malzemelerde, taşıyıcı olan ve olmayan yapı malzemelerinde, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretiminde, güçlendirmede, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin yenileme işlemlerinde, uçak ve yarış arabası endüstrisinde kullanılmaktadır. (Pinto & Eduardo, 2005).

PÇ ile üretilmiş olan betonlara göre alkali ile aktive edilmiş olan bağlayıcılar erken ve daha yüksek dayanımların yanında (Bernal ve Al, 2011), daha düşük hidratasyon ısısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli üstünlükleri vardır. Avantajların yanı sıra büzülme, çiçeklenme, ani priz ve mikro çatlak oluşumu gibi bazı

dezavantajları da bulunmaktadır (Baradan vd., 2012). YFC'nin reaksiyonu sonucunda çimento içerikli bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır (Aydın, 2010). Ani prizi önlemek için yapılan bazı çalışmalarda fosforik veya malik asit kullanılmıştır (Özodabaş, 2013).

2.2.4.1 Geopolimer kimyası

Geopolimerizasyon işlemi uçucu kül (UK), kömür cürufu, yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD) gibi endüstriyel atıklar, volkanik tüf, ufalanmış doğal başkalaşım kayaları ya da 750 °C da fırınlanmış kaolinit kili (metakaolinit) gibi dehidrasyona uğramış alümino-silikat yapıdaki toprak katımlarla alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkimeye girmesidir. Elde edilecek ürünün istenilen amaca uygun fiziksel özelliklerini sağlaması için katı hammaddeler belli derişimlerde hazırlanan ilgili kimyasallarla karıştırılarak tepkimeye sokulur. Sertleşme işlemi uygulanan ısıl kür ya da kalsinasyon işlemi ısısı ve süresine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Colella C. vd., 2001). İlaveten geopolimerizasyon yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondensasyon hareketlerini kapsayan bir ekzotermik kimyasal prosesdir. Bu kimyasal süreç geopolimer aluminatlar ile silikatlar oksijen atomu elektronlarını paylaşır ve kovalent bağlı bileşik oluşturur. Silikat (SiO_2) mineralleri son derece kararlı bileşiklerdir. Alkali aktifleştiricilerin SiO_2 monomerlerinin üç boyutlu ağ yapısını zayıflatması, ilerleyen tepkime sürecinde geopolimer ana bileşiği olan Si-O-Al sialatların oluşumunu sağlar (Davidovits, 2008).

Geopolimerizasyon ile üretilen malzemelerin molekülün yapısını belirleyen esas faktör jeolojik toprak kaynağı ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si:Al molar oranıdır. Oran 1 olduğunda zeolit kristaline benzeyen tuğla seramik ve yangından koruyucu ürünler elde edilebilir. Oran 2 olduğunda seramik amorf yapıda geopolimer çimento ve betonu sentezlenebildiği gibi biraz daha ileri teknoloji ile radyoaktif atıkların istiflenmesi için gerekli malzemeler üretilmektedir. Oran 3 olduğunda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta fırın kaplamaları, fiberglas, yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için 1000°C dayanabilen malzemeler üretilmektedir. Oran 3'den fazla olduğunda dolgu malzemesi köpükler üretilmektedir. Si:Al>15 olduğunda 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer

pastası oluşmakta ve meydana gelen bu yapı savaş uçakları gibi nano kompozitlerde ısı ve yangına direnç gösterdiğinden rahatça kullanılmaktadır (Davidovits, 2008).

Karışım içerisindeki alkali tuzların etkisiyle geopolimerizasyon süreci ekzotermik bir davranış oluşturur. Bu süreçte su moleküllerinin dehidratasyonu geopolimer polikondensasyonunda önemli bir rol oynar. Kullanılacak olan temel hammadde mineral kompozisyonu, incelik modülü, her malzemede olduğu gibi geopolimerik ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Bazı malzemelerden basınca dayanma özelliği olmayan zayıf yapıları karışımlar oluşturulurken uygun oranlarda Al-Si bileşiği barındıran ve serbest kalsiyumun az olduğu mineral karışımlardaki uçucu küllerle (F tipi UK) veya 750 °C’ de fırınlanmış metakaolinit gibi ham maddelerle daha yüksek dirençli özellikleri olan malzemeler üretilebilmektedir. Fırınlanmamış olan kaolin kilinin basınç dayanımı daha düşüktür. Seramiklerin üretimindeki gibi hammaddeye uygulanan fırınlama işlemi sonunda; boşluk suyu ile karbonlu bileşiklerin ayrışmasını sağlamak ve karışım içerisindeki mineral element ve bileşiklerin enerji düzeyinin artması ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamakta böylece ürünün reolojik özellikleri gelişmektedir (Rangan vd., 2005).

Bazı araştırmacılar geopolimer kimyasını tanımlayabilmek için sadece kimyasal yapısı iyi bilinen killeri kullanarak ham maddenin düzensiz özelliklerinin deneysel çalışmaya etkisini azaltmıştır. Fakat ham maddede ön iyileştirme yapılsa da Al-Si minerallerin kimyasal ve yapısal özellikleri karmaşık ve farklı sonuçlar verebilir (Brew & Mackenzie, 2007). İstenilen jel kompozisyonunu sağlamak için geopolimer çözelti içindeki Al çözünümü azaldığında ilave kaolinit ya da Al elementi eklenebilir. Alüminatların yavaş reaksiyonundan dolayı tepkimenin tüm ana bileşenleri arasında bağlanma reaksiyonları gerçekleşmektedir. Ancak sadece yüksek alüminat içeren kaolinitli bir karışım daha zayıf malzeme özellikleri verir (Van Deventer vd.,1989).

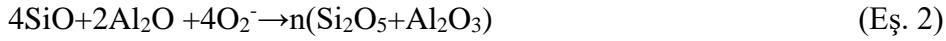
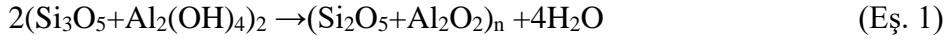
Geopolimer reaksiyonları oda sıcaklığında başlatılabilir ve istenen karışım sağlandıktan sonra 40-100 °C sıcaklıklarda etüv ya da buhar odasında ısı işleme bırakılarak polimerizasyon süreci geliştirilir. Böylece oluşturulmak istenen geopolimer malzemelerin özellikleri de iyileştirilmiş olur. Geopolimerlerin kimyasal mekanizması ve tepkime entalpi değerleri tam olarak tanımlanamamıştır. Ancak metakaolinit içindeki Si ve Al’li oksit parçacıkların üç boyutlu tetrahedral bağlı

termoset polimer mikro moleküler yapıyı oluşturmasıyla elde edilen yarı camsı-amorfun seramiksi yapıyı oluşturduğu belirlenmiştir. Bu davranışta alkali tuzlar içinde bulunan Na, K, Ca gibi alkali metaller elektron vererek ve Si ile Al'un oksijen atomlarını paylaşarak kimyasal bağ kurarlar. Böylece Si-O-Al moleküllerinden meydana gelen sialat adlandırılan alkali silikon okso-alüminatlı yapıyı oluşturmaktadır (Komnitsas & Zaharaki, 2007). Polimer bağ yapısı içindeki oksijenlerin dizilişlerinin sıklığına ve elementlere göre sialat (Si-O-Al-O-), polisialat siloxo veya polisialat di siloxo oluşmaktadır. Sialat yapısı SiO_4 ve AlO_4 molekülleri arasında tüm oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurması ile oluşur. Geopolimerin içinde bulunan Si/Al oranı malzemenin özelliklerini olumlu/olumsuz etkilemektedir (Davidovits, 2008).

Polisialatlar kristal yapıdayken polisialat silokso amorf yapıdadır. Polisialat yapı $Mn\{- (SiO_2)_z - AlO_2\}_n wH_2O$ olarak tanımlanır. M: katyon (Na, K gibi), n: polikondensasyon sayısı, z: üç boyutlu polikondensasyon ağ yapısı tekrar sayısıdır. Davidovits'in tanımladığı geopolimer tepkimesine giren ve ortaya çıkan moleküller şu şekildedir:

- Si-O-Si-O-siloxo, poly(siloxo) (camsuyu) bağlayıcılık kazandırıcı hammadde
- Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo)
- P-O-P-O- phosphate, poly(phosphate)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly(phospho-sialate)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone (website of geopolymer institute, 2012)

Geopolimerler yapılarda Portland Çimentosu'ndaki gibi iç reaksiyonlar sürmektedir. Geopolimer ekzotermik reaksiyonu üç boyutlu oligomer makro moleküler yapıyı meydana getirecek şekilde devam eder. Al-Si-OH'ların ısıtılması ile hidroksil iyonları su oluşturacak şekilde ayrışır ve böylece polimerik Si-O-Al bağları oluşmaktadır. Geopolimerin yoğunlaşma polikondensasyon ile oluşması ise Eşitlik 1 ve 2'de verildiği gibi gerçekleşmektedir. Buhar fazında gerçekleşen bu reaksiyon ve önceki reaksiyon ham maddeye uygulanan ön ısıtma ve 100 °C'ye kadar olan ısıl kür işlemlerinin, geopolimer reaksiyonlarını hızlandırdığını ve reaksiyona giren alümino silikat miktarını arttırdığını göstermektedir (Ivanova vd., 2002).



Alkali ortam OH^- iyonlarının da etkisiyle silikat ve alüminatların çözülmesini kataliz ederek hızlandırır. Daha hafif bir element olan sodyumun bulunduğu alkali tuzlar potasyumlu tuzlara nazaran daha fazla çözebilme yeterliğindedir. Bunun sebebi daha hafif ve küçük bir atom olan sodyum silikatlara daha kolay katılarak stabilize etmektedir. Sodyum'un elektron ilgisinin daha az olması da OH^- iyonlarını bırakmasını kolaylaştırabilir. Alkali tuz ile birlikte UK içerisinde bulunan ana bileşenlerin daha düzenli çözünebilmesi ve böylece geopolimer malzeme özelliklerini iyileştirmek için camsuyu sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya gibbsit [sodyum alüminat] ($\text{Na}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) ilave edilmektedir (Ivanova vd., 2002). Bu kimyasalların eklendiği çözeltiler katı-jel çözeltiler olarak adlandırılmaktadır. Bu tür çözeltilerde kimyasal çözmek için kullanılan suyun miktarı arttıkça basınç dayanımı düşmektedir ve oluşumlarda çökelti halindeki sodyum iyonu da fazladır. Çünkü sodyumdan ayrılan alüminat ve silikat molekülleri birlikte reaksiyon vermektedir (Zeybek, 2009).

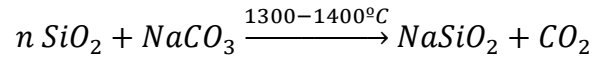
Geopolimerin basınç dayanımını aldığı süreçte pH düzeyinin düşüşü de önemlidir. Geopolimer ısı işlem sıcaklığı yükseldikçe hamurun pH düzeyi düşer. 85°C de pH 10,5 iken 700°C 'lik ısı işlem gördüğünde geopolimer hamuru pH'ı 7,5'e düşmektedir. $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranı ısı kür sıcaklığının yüksek olduğu işlemlerde pH düzeyini dengelemek için artırılmaktadır. Geopolimer hamurunun genel pH düzeyi 10–12 arasındadır (Davidovits, 2008). Tanımlanmış 9 tip geopolimer yapı mevcuttur:

- Camsuyu esaslı geopolimer, polisiloksonat (Si:Al=1:0)
- Kaolinhidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat (Si:Al=1:1)
- Metakaolinit esaslı geopolimer, poly(sialate-siloxo) (Si:Al=2:1)
- Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si:Al=1, 2, 3)
- Kayaç esaslı geopolimer, poly(sialate-multisiloxo) ($1 < \text{Si:Al} < 5$)
- Silika-esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağlı poly(siloxonate) (Si:Al>5)
- Uçucu kül esaslı geopolimer
- Fosfat esaslı geopolimer
- Organik maden esaslı geopolimer (website of geopolymer institute, 2012)

2.2.4.2 Geopolimer çeşitleri

Alkali silikatlar (siloksanat-cam suyu)

Geopolimer hamurunun işlenebilirliğini ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan en önemli bileşen alkali silikat ya da siloksanat olarak da isimlendirilen, kum içerisindeki kuartz mineralini oluşturan silikat moleküllerinin alkali tuzlar ile ergitilmesi ve suda çözünmesi ile elde edilen cam suyudur (Zeybek, 2009). Günümüz teknolojisi ile kuartz kumu ve sodyum karbonatın 1300–1400 °C ergitilmesi ve su içinde soğutulması ile sıvı ya da öğütülmüş granüle alkali silikatlar elde edilir. Deterjan, yapıştırıcı, diş macunu bileşeni, korozyon önleyici yapımında kullanılan alkali silikatlar zeolit sentezi, silika jel (silikon) geopolimer üretiminde önemli hammaddelerdir. Ürün sınıflandırmasında Na_2O/SiO_2 molar oranı belirleyicidir. Molar oranın 0,5 olduğu sodyum ortosilikat Na_4SiO_4 formülüne sahip iken, molar oranın 2 olduğu sodyumdisilikat ($Na_2Si_2O_5$) genellikle yoğun üretilen ticari bileşiktir. Geopolimer çalışmalarında kullanılan sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) molar oranı 1-3'dür (Davidovits, 2008).



Na veya K bazlı olması alkali silikatların suda çözünürlüğünü farklı etkilemektedir. Suda çözünürlük geopolimer sentezi için önemlidir. Yapılan NMR çalışmaları sodyum bazlı ve Na_2O/SiO_2 molar oranının 3 olduğu camın suda çözünürlüğü 60 °C'da %50 iken potasyum bazlı 2,5 molar oranlı camın 48 saat içinde %100'ünün suda çözüldüğünü göstermektedir. Çünkü potasyum bazlı sistemde kuvarsın tamamı alkali silikata dönüşmüştür. Dolayısıyla potasyum bazlı alkali silikatların kullanımının geopolimer pastasının özelliklerini iyileştireceği gözlenmektedir (Davidovits, , 2008).

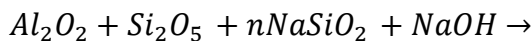
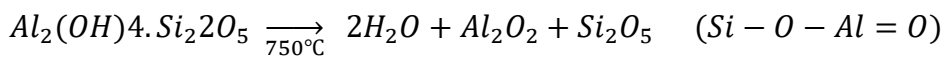
Kaolit/hidrosodalit esaslı geopolimerler

Malzemedeki Al ve Si oksitli bileşiklerde geopolimer oluşabilmesi için Al^{+3} ve Si^{+4} olması ve oksijen bağlarının kovalent ya da iyonik olması durumu kimyasal analizle

gözlenmelidir. Ardından seçilecek malzemenin karışım oranları ve uygulanacak ısı işlemler buna göre belirlenmelidir. Kaolinit kilinin mineral kompozisyonu zeolit kristallerini elde etmek için oldukça uygundur. Ancak 100 °C altında geopolimer sentezi Al⁺'nin oluşturduğu OH⁻ iyonlarının bağlı olduğu jipsit kristallerinden dolayı oldukça zordur. Doğada kaolinit A, B, C olmak üzere üç tiptir. A tipi % 94 kaolinit, % 6 kuvars ve muskovit; B tipi % 92 kaolinit, % 8 montmorillonit, anastaz ve kuvars; C tipi ise %33 kaolinit, %66 kuvars muskovit ve profillit içerir. Bundan dolayı A ve B tipi kaolindeki %45 düzeyindeki SiO₂ ve %45 düzeyindeki Al₂O₃ geopolimer reaksiyonu için gerekli içeriği sağlamaktadır. Ancak kaolinit kili alkali tuzlarla kararlı reaksiyonlar vermemektedir. Yüksek pH'lı ortamda kaolin kili içerisindeki Al molekülleri ayrışmaktadır. Daha çok kankrinit tipi zeolitlerin sentezinde kullanılan kaolin kili ile geopolimerizasyon 150 °C ısıda 30 MPa buhar presi ile üretilmiş panellerde sağlanmıştır. 150 °C ısı kil içindeki dehidroksilasyonu sağlamakta ve Al-OH-Si-O bağları arasındaki su molekülleri buharla birlikte ayrışmaktadır. Oluşan ürün sentetik polisialat hidrosodalittir. Mikro moleküler yapı jeolojik feldispatoit kayaları ile aynıdır. Panel presle üretilen malzemenin iç kısmı 100 °C kadar ısınmadığı için hegzagonal kaolinit kristalleri oluşurken yüzeyde amorf düzensiz yapı elde edilir (Fransa Patenti Patent No. 2.324.427, 1974).

Metakaolinit esaslı geopolimerler

Metakaolinit esaslı geopolimer üretiminde de A ve B tipi kaolin tercih edilmektedir. Kaolinit 750 °C sıcaklıkta fırımlandığında dehidroksilasyona uğrar ve su molekülleri ayrıştığında alümina silikat oksitler elde edilir. Bu yapı metakaolinit ya da kandoksi MK 750 olarak adlandırılmaktadır.



Metakaolinit+ alkali silikat+ alkali tuz → mineral polimer rezene

Metakaolinit tanecik büyüklüğü kaolin kilerinden daha yüksektir bu durum fırınlama etkisiyle kil taneciklerinin genişlemesinden kaynaklanmaktadır (Davidovits J. , 2006). Metakaolinit molekül bağ yapısı dehidroksilasyon sonrası kaolinden farklı ve daha

kararlı bir Al-O-Si bağ yapısıdır. Dehidroksilasyon sonrasında metakaolin içinde oluşan Van-der Wals kuvvetlerine bağlı olarak 4–5 ve 6 koordinatlı alüminyum bağları oluşmaktadır. Metakaolinit esaslı geopolimer sentezi ile yüzey sertliği yüksek olan ürünler, ısı dayanımı yüksek malzemeler, yüzey pürüzsüzlüğünün önemli olduğu sanatsal seramik ürünler elde edilebilmektedir. Metakaolinit ile üretilen geopolimerin priz alma süresi $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ molar oranı ile ilişkilendirilmektedir. 80 °C'deki sentezde 1,23 oranında 1 saatte priz alırken, bu oran 2'yi geçtiğinde uygun sertliğe 4 saatte ulaşılmaktadır (Davidovits J. , 2008).

Kalsiyum esaslı geopolimerler

Kalsiyum esaslı geopolimerlerde gehlenit adlı yapı oluşmaktadır. Gehlenit kalsiyum alumino-sialat ($\text{Ca}_2(\text{Al}_2\text{SiO}_7, n\text{H}_2\text{O})=\text{Ca}-(\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O})-\text{Ca}$) yapıdadır (Davidovits J., 2008). Kalsiyum esaslı geopolimer reaksiyonu Al-O ve Si-O moleküllerinin çökeltme ve karıştırma ile yeniden reaksiyona girme davranışıyla sürmektedir. Kalsiyumun suda çözünürlüğünün az olması geopolimer reaksiyonunun yavaş sürmesine neden olur. Oluşan ürünlerin erken dayanımı da düşüktür (Zeybek, 2009).

YFC ve polialatların kullanımı ile erken dayanımı yüksek beton üretiminde kalsiyum esaslı geopolimerizasyon kimyası kullanılmıştır. YFC, Portland çimentosu, NaOH ve KOH gibi alkali tuzlar, camsuyu ve sitrikasit ile pH 12 olan ortamda aktive edilerek hem erken dayanımını 4 saatte 30 MPa düzeyinde alan hem de hacimsel genişlemeye uğramayan geopolimer betonu üretilmiştir (US Patent No. 4,509,985,1985, 1984). Bu beton pyrament ismi ile patentlendirilmiştir. Farklı kaynaklar kullanılarak erken dayanımı yüksek geopolimer malzemeler geliştirilmiştir. Bu çimentolu sistemin ana yapısını oluşturan alümino silikat oksitler ($\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$), potasyum disilikat [$\text{K}_2-(\text{H}_3\text{SiO}_4)_2$] ve kalsiyum disilikat (CaH_3SiO_4) olan 3 farklı kimyasal sistemin varlığı tespit edilmiştir. Kalsiyum esaslı geopolimerlerde Si:Al=3 olduğunda radyoaktif atık stabilizasyonu yapılabilmektedir (Davidovits & Comrie 2008).

Kayaç esaslı geopolimerler (Polisialatmultisilokso)

Doğal jeolojik oluşumlu kil kayaçlar geçirimsizliklerinin yüksek olması yönü ile radyoaktif atık depolama sistemlerinde kullanıma uygundur. Yüksek ve düşük değişken pH'lı radyoaktif çözeltiler hapis olunduğu malzemeyi delerek depolardan sızmakta ve yeraltı sularının kirlenmesi tehditini oluşturmaktadırlar. Özellikle Portland çimentolu beton esaslı depolar oldukça kolay aşınmakta, yeraltı suyuna karışan sızıntılar oluşmakta, ayrıca iptal olmuş nükleer santralin atıkları çimentonun hidrotermal reaksiyonunun da etkisi ile sürekli ısınan nükleer bombalara dönüşmektedir. Patlamadan sonra Portland çimentolu betonla kaplanan Çernobil santrali bunun en korkunç örneğidir ve bilim adamlarına göre hala tehlike arz etmektedir (Davidovits & Comrie 2008).

Kil kayaçların esaslı olan feldispatoitler ve kumu oluşturan kuartz yeryüzünde en çok bulunan toprak madenleri olmakla birlikte kimyasal potansiyelleri tam olarak bilinmemektedir. Düşük ve yüksek pH'lı ortamların oluştuğu radyoaktif çözeltilere dayanabilecek malzemelerin her iki ortamda da kararlı davranması gereklidir. Çeşitli feldispat kayaçlar ve kuartzın etkileştirilmesinden üretilen geopolimer radyoaktif nükleotid eşlenik ve eşlenik olmayan çözeltileri radyoaktif sızıntıyı önleyici özellikte depolama amacıyla kullanılabilirler. Eşlenik çözünme iyonik bağ yapısına bağlı iken eşlenik olmayan çözeltilerde feldispat içindeki Al oksitlerle kuartz içindeki silikatlar pH düzeyine bağlı olarak etkileşmekte ve sulu ortamda orto-siklo-sialat-disiloksohidratı oluştururlar. Radyoaktif elementler geopolimer monomerlerinin çerçeve yapısında hapsolür. Böylece uzun süre radyoaktif sızıntı ya da ısınma oluşmamaktadır. Diğer geopolimer oluşumlarından farklı olarak kayaç esaslı geopolimer sentezinde farklı tipteki kayaçlar asit içerisinde çözünür. Cs, Co, Sr, Tc, U, Cr gibi radyoaktif elementlerin düşürülmüş enerjili atık izotopları asit çözeltiler içinde reaktifliklerini tamamen yitirmekte ancak yine de hiper alkalın çözeltiler oluşturmaktadır. Çözünmüş alümino silikat kaynağı kayaç daha sonra alkali tuz ve silikat çözeltilerin etkisi ile geopolimere dönüşmektedir (Davidovits & Comrie 2008). Geopolimer betonu, Portland çimentolu betona göre 2–3 kat daha fazla çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca potasyum polisialat esaslı geopolimerlerin donma çözülme dayanımları da daha iyidir. Doğaya zarar veren arsenik, sülfirik asit,

radioaktif atıkların zaptedilmesinde geopolimer kayaç yapısı gelecek vaat etmektedir. Geopolimer 50 ticari ismindeki K-poli-sialat formülü ile pH düzeyinin 1,5–3 arasında olduğu Kanada'daki uranyum ve arsenik atıkların kapsülasyonu araştırılmış ve geopolimer matris yapısının bozulmadan radyoaktif mineralleri hapsedebileceği gözlenmiştir (Davidovits & Comrie 2008).

Silis ve silika dumanı esaslı geopolimerler

Günümüzdeki SiO₂ kaynağı ise kuvarsın 3–10 µm aralığında öğütülmesi ile üretilen SD ve ferrosilikon çelik üretiminde açığa çıkan 0.05–1 µm silis dumanıdır. SD yüzey kaplaması aşınma yüzeyi ve parlak seramik yüzey üretiminde ince dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Davidovits J 2008). SD'nin çimentolu beton içinde filler ve puzolan olarak kullanımı mevcuttur. SiO₂ mükemmel bir puzolan malzemedir. Geopolimer sentezinde ise silis dumanı, NaOH ve KOH gibi alkali sotaları ile oldukça kolay aktiveleştirilebilen bir kaynaktır. Çözünür silikat ve siloksonatlar içindeki silis partikülleri nano geopolimer üretimini sağlamaktadır. Oluşan nano polisilanol geopolimer ile ısı ve yangın dayanımı yüksek paslanmaz çelik boyaların yanısıra, yüksek ısı direnci olan seramik yapılar da üretilebilir (Davidovits J 2008).

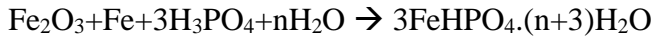
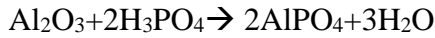
Uçucu kül esaslı geopolimerler

UK termik santral bacalarından elde edilmiş, içi boş, küresel tanecik yapıları bir atık malzemedir. UK tanecikleri amorf camsı yapıda mullit, hematit, magnetit, kuvars gibi kristaller içermektedir. Kristal tipleri kömürün çıktığı bölgeye ve baca ısısına bağlıdır. UK'nin geopolimer üretimlerde içerdiği yüksek Al₂O₃ ve SiO₂ miktardan dolayı özellikle F tipi UK'leri kullanılmaktadır. Baca ısısının 1200 °C ve üstüne çıktığı santrallerde oluşan içi boş ince küresel yapıdaki ve camsılığın yüksek olduğu UK'ler geopolimer sentezi için kullanışlıdır (Sullivan & Hill, 2001). Mikro yapısı incelendiğinde geopolimer reaksiyonunun alkali aktif çözeltisi ile küresel UK taneciklerinin bir kısmı reaksiyon vererek geopolimer yapısı içinde yer alırken bir kısmı yüksek pH'lı alkali ortamda ve kür ısısı ile parçalanmakta ve alkali silika jeli boş UK küresi taneciği içine girebilmektedir (Zeybek, 2009).

Geopolimer reaksiyonu için gerekli 40-100 °C sıcaklıklarında ısıtım işlem uygulandığında ise UK taneciklerinin genleştigi gözlenmektedir. UK ve alkali silika çözeltisi ile üretilen ilk ürün Amerika'da patentlendirilmiş CAFA çimentosudur (USA Patent No. 601.643, 1997). 90 °C de 18 saat kür edilmiş beton örnekleri 85 MPa kadar dayanım vermektedir. Çözünür silikatın kullanılmadığı yalnızca alkali tuz içeren çözeltilerle de zeolit matrisli uçucu kül geopolimer sentezi gerçekleştirilmektedir. Ancak yüksek alkali ortam oluşturan bu karışım kullanıcıya zarar verici tehlikeli bir döküm işlemi gerektirmektedir (Davidovits J 2008).

Fosfat esaslı geopolimer

Diğer geopolimer sentezlerinden farklı olarak fosfat esaslı geopolimer düşük pH'lı ortamda iki veya üç değerlikli bir metal oksitin H₃PO₄ (ortofosforik asit) içinde asit baz reaksiyonları vermesi ile sentezlenmektedir. Fosfo siloksonat geopolimeri Si-O-P-O-Si zincirbağı asit ortamda gerçekleşmektedir.



Bir diğer geopolimerik oluşum şekli Ca-fosfo silikattır. Vollastonit (CaSiO₃) molekül yapısı fosfat ile reaksiyon vermektedir. Mikro yapısı iğne yığınına andıran vollastonit seramik üretiminde önemli bir kaynaktır. Yapay vollastonit üretiminde fosfat kullanımını silikat zincir oluşum hızını azaltarak, iğnecik kristallerinin daha düzenli oluşumunu sağladığı ve hidrasyon rötresini azalttığı tespit edilmiştir. Fosfat esaslı geopolimer diş protez harcı üretiminde yapı malzemesi üretiminde kullanıldığı gibi en önemli kullanım alanlarından biri de radyoaktif atık depolama işleminde kullanılmasıdır. Fosfat esaslı geopolimer ile ilgili çalışmalar oldukça kısıtlı olmakla beraber gelecek vadede bir araştırma konusudur (Davidovits J 2008).

2.2.4.3 Geopolimer bağlayıcıların enerji verimliliği

Kalsiyum esaslı, kayaç esaslı ve UK esaslı geopolimer sentezleri ile geopolimer çimento bağlayıcılar üretilebilmekte ve oda sıcaklığında priz alması sağlanmaktadır. PÇ klinkeri 3 mol CaO molekülüne 1 mol SiO₄ bağlanması ile oluşur. Geopolimer

çimentosu ise 1 mol alkali oksidin (Na_2O , K_2O) 6 mol polisialat (Si-O-Al-O-SiO) molekülünü aktive etmesi ile oluşmaktadır (Davidovits J 2008). Bu yönüyle bakıldığında geopolimer pastasının bağlayıcılık özelliğinin daha az alkali aktivasyon ile gerçekleştiği söylenebilir. Bu birim ürün için daha az entalpi enerjisi gerekecektir.

Günümüzde çimentolu beton üretimi yüksek düzeyli CO_2 emisyonuna neden olması yönüyle çevreciler tarafından sorgulanan bir konudur. 1 ton çimento üretilirken çimento fırınına ısıtmak için 0,55 ton, klinker oluşum reaksiyonu ile de 0,4 ton CO_2 salınımı oluşmaktadır. 1990 yılında dünyada bir milyar tonluk dünya çimento tüketimi sonucu atmosfere 1 milyar ton CO_2 bırakılmıştır. 40-100 °C gibi düşük ısılarda sentezlenen geopolimer hamuru ile üretilen beton kuşkusuz 1400–1450 °C ısıda sentezlenen çimento harcına kıyasla atmosferde %80–90 daha az CO_2 oluşumuna neden olacaktır (Clark, 2009).

Metakaolinit esaslı geopolimerin hammaddeleri olan camsuyunu (Na veya K silikat) elde etmede kullanılan 1200 °C lik füzyon sıcaklığını sağlayacak enerji ve 750 °C de metakaolinit sinterleme işlemi için gerekli enerji hesaba katılsa dahi; PÇ klinkeri kalsinasyonu için gerekli olan 1400 °C lik fırın sıcaklığını sağlayacak enerji ile kıyaslandığında geopolimer çimentosu 3 kat fazla enerji verimliliğine sahiptir. Ayrıca klinkerin kalsinasyonunda yan ürün olarak açığa çıkan CO_2 ve fırını ısıtmak için kullanılan fosil yakıtlardan ayrılan CO_2 'e göre aynı verimlilikte geopolimer bağlayıcı üretilirken yayılan CO_2 çimento fabrikalarının 1/5'i kadardır. 1 ton PÇ üretebilmek için gerekli kalsinasyon ve öğütme işlemleri için 3500 MJ enerji harcanırken kayaç esaslı geopolimer üretiminde 1000 MJ enerji yeterlidir (Davidovits J 2008).

UK esaslı geopolimer çimentosu ve PÇ enerji verimliliği yönü ile kıyaslarsak çok daha şaşırtıcı bir gerçekle karşılaşırız. Termik santrallerin elektrik enerjisi üretirken açığa çıkardığı atık geopolimer hammaddesi olarak kullanılabilir UK'dir. UK bundan dolayı ayrıca bir sinterleme işlemi gerektirmez. (Davidovits J 2008).

2.2.4.4 Geopolimerizasyon ile üretilmiş yapı malzemeleri

Geopolimer betonlar

Geopolimerin priz alma ve fiziksel dayanıklılık özelliklerindeki bilinmezler dünyada geopolimer beton üretiminin yaygınlaşmasını önlemektedir (Rangan vd.,2005). Bununla birlikte Avustralyalı araştırmacı PeterDuxson Melbourne de ticari olarak geopolimer E-crete betonunun kullanımını başlatmıştır. Deneysel olarak geopolimer ile üretilmiş birçok katlı binanın betonarme projesini de 2009 sonunda gerçekleştirmiştir. Geopolimerin basınç dayanım, rötne ve yangın dayanımı özellikleri çimentolu betona göre çok üstün olmakla birlikte fiziksel dayanıklılık (durabilite) özelliklerini zaman gösterecektir. Ayrıca bugünkü üretim koşullarında çimentolu betona göre %10–15 daha fazla maliyetlidir (Deventer, 2012).

Geopolimer betonunun, yapılarda kullanımının gerçekleşmesi için PÇ’li betonun sağladığı malzeme standartlarını sağlaması gerekmektedir. Betonarme uygulamalar için beton ve çeliğin mukavemet uyumlarını doğrulayan basınç-çekme dayanım değerlerinin, çekip çıkarma (pull out) deneyiyle, beton çelik donatı aderansının ve elastisite modülüne ulaşabilmek için poisson oranının belirlenmesi gerekmektedir. Bir master çalışmasında geopolimer beton özellikleri değerlendirilmiş ve betonarme için gerekli malzeme katsayıları belirlenmiştir. Avustralya’da üretilen geopolimer betonunun yoğunluğu 2,35 t/m olup poisson oranı 25 MPa dayanımlı beton için 0,16’dır. Bu değerler PÇ’li beton değerlerine yakın olup bu çalışmada betonarme ile ilgili korelasyonlar da yapılmıştır (Deventer, 2012). Yeni Zelanda’da J.Morris ve S.Hodges ‘un yaptığı elektrot deneyleri içeren çalışmalar ise geopolimer betonu içerisindeki çeliğin çimentolu betona kıyasla daha az korozyona uğradığını göstermektedir (Morris & Hodges, 2005).

UK esaslı geopolimer çimento üretiminde uçucu külün öğütülerek incelik modülünün artırılması oluşacak hamurdaki mikro yapıyı iyileştirerek basınç dayanımını arttırmaktadır (Kumar vd., 2005).

Geopolimer, alkali sülfatlar (Na_2SO_4) ve diğer asit etkilerine de yüksek dayanıklılık göstermekte olup; pH 12'den daha yüksek ortamda sentezlenmesine rağmen geopolimerde tehlikeli ve mikro yapıyı bozucu ASR oluşmamaktadır (Li vd., 2005). Prefabrik geopolimer beton üretimi ile ilgili bir başka çalışmada, atık su büz borularının geopolimer çimentolu betondan üretiminde gerekli olan asit aşınma deneyleri uygulanmış PÇ'li betonun 50 yıl dayandığı sülfirik asit etkisine geopolimer betonunun 900 yıl dayanabileceği deneylerde gözlenmiştir. Aynı araştırmacılar alkali agrega oluşumu, karbonatlaşma, çelik korozyonu, klor difüzyonu ile ilgili deneyleri de uygulamışlar PÇ'nin ana yapısını oluşturan CAH'ın geopolimer çimentosunda olmayışı geopolimerin bu tür etkilere de çok daha dayanıklı olmasını sağlamıştır. Geopolimer yangın direnci de PÇ'li betonun yangın direnci ile karşılaştırılmış ve geopolimer betonunun 1000 °C sıcaklıkta yanmadığı gözlenmiştir. Ayrıca prefabrik betonu üretiminde 60 °C sıcaklıkta 3-4 saat uygulanan buhar küründe 70 MPa dayanımı olan PÇ'li beton kür sırasında 20 MPa'lık dayanımına ulaşırken 100 Mpa dayanım vermesi istenilen geopolimer çimentolu prekast betonu 70 °C sıcaklıkta 2 saat kür ile 70 Mpa'lık erken dayanıma ulaşmaktadır (Gourley & Johnson, 2005).

Geopolimer tuğlalar

Geopolimer tuğla üretimi ilk kez 1982 yılında düşük ısıli geopolimer prizi yöntemi ile lateritik diye de adlandırılan kırmızı kil topraktan üretilmiş ve Fransa'da patentlenmiştir (Boutterin & Davidovits, 1988). Ağırlıkça %5 alkali soda (NaOH, KOH) ve kırmızı toprağın 70 °C civarında bir sıcaklıkta sentezlenmesiyle üretilen geopolimer tuğlanın basınç dayanımı, 900 °C ısıli işlemle üretilen seramik kil tuğlaların basınç dayanımından daha yüksek bulunmuştur (Bouterrin & Davidvits, 1982). Ayrıca geopolimer lateritik tuğlanın mikromoleküler yapısının suyu tutma özelliği bina içerisinde nem oluşumunu önlemekte ve serinlik sağlamaktadır (Davidovits J. , 2006). Düşük ısıli geopolimer oluşumunda alkali tuz (NaOH) oranı %1-5 aralığında değişirken 85 °C ısıli işlem sıcaklığında 6-18 MPa arası dayanımlar elde edilirken ısıli işlem sıcaklığı 450 °C olduğunda, basınç dayanımı 60 MPa'a çıkmıştır (Zeybek, 2009). Geopolimer tuğla üretiminde NaOH veya KOH ile aktifleştirilmiş kil esaslı hammadde preslenir. Alkali soda seramik sentezinde ısıli rötrenin önüne geçmekte böylece üretilen malzemede çatlak ve porozite oluşmamaktadır. Davidovits'e göre

geopolimer tuğlası üretiminde, modern teknolojili pişirilmiş tuğla üretimine göre 2/5 düzeyinde bir enerji verimliliği sağlanmaktadır (Boutterin & Davidovits, 1988).

Geopolimer tuğla üretim örneklerinden biri de yangın dayanımı yüksek dekoratif modern seramik geopolimer tuğlalardır. Geopoly-therm ticari ismi ile Cordi geopolymer tarafından patentlendirilmiş kaplama seramikleri refrakter olarak kullanıldığı gibi yüksek ısı ve ışığa maruz kalan dekoratif yüzeylerde de kullanılmıştır. 1400 °C sıcaklığa dayanan bu malzeme 80-90 °C sentezlendikten sonra yüzeyinde sırlama işlemi için 1120 °C sıcaklık uygulanmaktadır (Zeybek, 2009).

Mikromoleküler yapının nefelin ve albit çerçeve yapısına yaklaştığı köpük kil tuğla üretimi ile yüksek ısıda fırınlanarak köpükleşen kil içerisine metakaolinit esaslı polisialat geopolimer ilave edilerek 950°C de fırınlanmış kilin basınç dayanımı 20 MPa'dan 90MPa'a çıkmıştır. Elde edilen ürün yüksek boşluklu, düşük yoğunluklu ve yüksek basınç dayanımındadır (Buchwald vd., 2004).

2.2.4.5 Geopolimer üretiminde kullanılan alkali-aktivatörler

PÇ dışında bir bağlayıcı üretiminin en fazla ilgi gören UK ve YFC'nin alkalilerle aktive edilmesidir. Teori de silika ve alümina içeren bütün malzemeler alkalilerle aktive edilebilmektedir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killer, metakaolin, UK, kırmızı çamur, zeolit gibi malzemelerin aktivasyonunda en yaygın olarak kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (POH, NaOH) ile cam suyu (Na_2SiO_3) veya potasyum cam suyu ($\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$) karışımıdır (Baradan vd., 2012).

Alkalileri 6 grupta inceleyebiliriz ;

1. Kostik alkaliler
2. Zayıf asitli tuzlar
3. Silikatlar
4. Alüminatlar
5. Alüminosilikatlar
6. Güçlü asitli tuzlar

En çok kullanılan alkaliler; sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum sülfat ve sodyum silikattır. Sodyum karbonat ve sodyum sülfat doğal kaynaklardan elde edilir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ise sadece üretilerek elde edilir (Özodabaş, 2013).

Kimya endüstrisi ve birçok endüstride de kullanılan temel bileşik kostik olarak ta adlandırılan sodyum hidroksittir. Kostik beyaz renkte ve nem çeken bir maddedir. NaOH, dünyanın en kuvvetli bazı olmasının yanı sıra kimya sanayisinin de temel olarak kullanılan hammaddesidir. Yanıcı olmamakla beraber, su ile temas etmesi durumunda yanıcı maddelerin ateşlenebilmesi için gerekli ısıyı verebilir. Metallerle reaksiyona girerken hidrojen gazı açığa çıkarır. Kostik kuvvetli asitlerle, metallerle, yanıcı maddelerle, organik maddelerle suyla ve hidrokarbonlarla reaksiyona girer. Kostik iyi bir dezenfektan olmakla beraber saflık oranına göre ticari olarak farklılık gösterir. Su içerisinde çözülmüş olarak kullanılabilirken değişik formları da bulunmaktadır. Doygun çözeltilerinde altı farklı hidrat formu vardır; NaOH.H₂O, NaOH.2H₂O, NaOH.3,5H₂O, NaOH.4H₂O, NaOH.5H₂O ve NaOH.7H₂O. Çözeltide ki su azaldıkça NaOH konsantrasyonu artmaktadır. Sodyum hidroksitin çözünmesi sırasında yüksek miktarda ısı meydana gelir, ısının artmasıyla beraber NaOH konsantrasyonu da artmaktadır. Sıcaklığın artması NaOH çözeltisinin viskozitesini bir miktar azaltacaktır. (Shi vd., 2006; Elibol, 2012).

Endüstri içerisinde bir çok kimyasal maddenin üretiminde, asit nötralizasyonunda, iyon değiştirici reçinelerin rejenerasyonunda, su arıtma, zeytincilik, deterjan ve sabun, ilaç, yapay ipek, kağıt hamuru, boya, döküm, alüminyum işleme ve tarımsal kimyasallar sektörlerinde ve petrol rafinelerinde kullanılmaktadır (Kurt ve Bittner, 2005).

2.3 Doğal taşlar

Doğal taş eski çağlardan beri bilinen en eski yapı malzemelerinden biridir. Dayanıklılık özelliği sebebiyle yapılarda tercih edilmektedir. Taşa özelliğini kazandıran doğal nitelikleri olan güzellik, kalıcılık, değiştirilebilirliği ve ekonomisi sayesinde taşın kullanımı artmıştır. Devlet Planlama Teşkilatı'nın (DPT) yapmış olduğu genel tanımlamaya göre; yerkabuğundan çıkartılıp direkt olarak veya belirli

işlemlerde geçerek istenilen amaç için yapı içerisinde kullanılan taşlara doğal taş denilmektedir. (DPT, 2001).

Yerkabuğunu oluşturan elementler %46 oksijen, %28 silisyum, %8 alüminyum, %5 demir, %3 kalsiyum; oksitler ise %56 SiO₂, %15 Al₂O₂, %5 CaO ve %3,7 FeO'tir. Bu elementlerden doğal taşları oluşturan bileşikler ise kalsiyum esaslı (Karbonat-CaCO₃, Sülfat-CaSO₄.2H₂O) ve silisyum esaslı (Kuvars SiO₂, Feldispat-KAlSi₃O, Mika, Anfibol, Piroksen, v.s.) bileşikler olarak iki ana grupta toplanmıştır (Eriç, 2002).

Yapı ve sanayide kullanılan taşlar jeolojik olarak, yani, oluşum tarzına ve kökenine göre Magmatik (Püskürük), Sedimanter (Tortul) ve Metamorfik (Başkalaşmış) taşlar olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Bu taşlar, derinlerde erime, kristalleşme, dağılma çökme, basınç, ısı ve kimyasal faktörlerle başkalaşarak bir diğerine dönüşebilir (Bayramgil,1959).

2.3.1 Magmatik (püskürük) kökenli doğal taşlar

Magmatik kökenli doğal taşlar yerküre tabakalarında tamamen eriyik halde ve yüksek sıcaklıktaki magma tabakasının yerkabuğunun yapısına bağlı olarak yerkabuğunun içerisine sokulması ve bunun sonucunda sokulduğu derinliklerde soğuyarak kristalleşmesi neticesinde oluşan taşlardır. Bu sokulma işlemleri yerkabuğunun özelliğine göre yarı ve çatlakların doldurulması veya kütle halinde yavaşça soğuması ile oluşmaktadır. Sokuldukları mesafenin durumuna göre derinlik kayaçları, yarı derinlik kayaçları ve yüzey kayaçları olarak üçe ayrılırlar. Derinlik kayaçları olarak bilinen kayaçlar eriyik halde bulunan magmanın yerkabuğunun derinliklerinde yavaş yavaş ve uzun bir sürede soğuması sonucunda oluşurlar. Bu kayaçlara örnek granit, granodiyorit, dünit ve siyenit gibi kayaçlardır. Yarı derinlik kayaçları ise magmanın yerkabuğunun derinliklerine doğru değişik yollarla kırık ve çatlaklarla çıkması esnasında iç kısımlarda soğuması sonucunda oluşur. Yarı derinlik kayaçlarına örnek diyabazdır. Yüzey kayaçları ise magmanın herhangi bir jeolojik olay sonucunda yüzeye çıkması veya yüzeye çok yakın yerlerde soğuması sonucunda oluşan kayaçlar olarak adlandırılırlar. Yüzey kayaçlarına örnek bazalt, andezit ve riyalit gibi kayaçlardır (Erguvanlı, 1955).

2.3.1.1 Volkanik Tüfler

Magmatik kayaçların yüzeyde katılaştıran kayaçlar kısmına girmektedir. Lav volkanların kraterlerinden çıkan sıvı haldeki maddenin katılaşmasıyla oluşur. Volkanların püskürmesi sırasında başka maddelerde açığa çıkmaktadır. Volkan külü olarak adlandırılan bu ince taneli maddelerin göl, deniz veya yamaçlarda birikmesi sonucunda açığa çıkan oluşuma Volkanik tüf adı verilmektedir (Erguvanlı vd., 1955).

Volkanik tüfler, volkanik patlamalar sonucunda atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarının hava tepkimesi sonucun tüfün camsı yapısının zeolitleşmesine neden olarak puzolanik özelliğini artırır. Tüflerin içerisinde bulunan silis oranı ve camsı yapısıyla puzolanik aktivitesi doğru orantılıdır. Doğal puzolanların hemen hemen hepsinin volkanik kökenli olduğu bilinmektedir. Tüflerin kimyasal içerikleri neredeyse aynı olmasına rağmen kimyasal yapıları yöresel olarak farklılık gösterebilmektedir (Liebig vd., 1998). Ülkemizin farklı yerlerinde bulunan volkanik tüflerin kimyasal içeriklerini gösteren tablo Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Bazı bölgelere ait volkanik tüflerin kimyasal analiz sonuçları (Ören, 1996)

	Gölcük	Nevşehir	Van-Bitlis	Dünyada 80 farklı bölge Ort.
SiO ₂	61.55	68.50	69.00	70.38
AlO ₃	15.50	14.00	14.65	15.82
Fe ₂ O ₃	6.05	3.00	2.50	1.50
CaO	2.24	1.50	1.10	1.56
MgO	2.40	1.40	0.53	0.48
Na ₂ O	3.30	3.25	3.50	3.70
K ₂ O	3.43	3.50	3.50	4.10
TiO ₂	0.40	0.25	0.38	-
SO ₃	0.94	0.002	0.40	-
Kızd. Kaybı	1.40	3.90	4.63	3.62

2.3.1.2 Volkanik tüf çeşitleri

Traslı tüfler; kızgın halde olan ince parçacıkların su veya su buharı ile birden soğumuş proklastik tüflerdir. Birden soğuduğu için böyle tüflerin camsı kısmı diğer tüflerden daha fazladır. Bu tüflerin ince olarak öğütülmesi sonucunda puzolanik aktivitelerinin arttığı bilinmekle beraber, kireç veya çimento ile karıştırılması durumunda havada ve

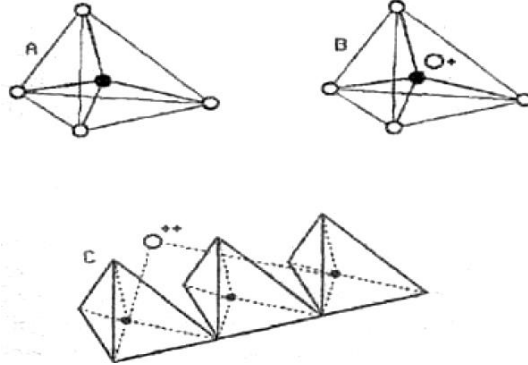
suda çözülemeyen bileşikler oluşturmaktadırlar. Traslı tüfler arazide genel olarak yeraltındaki su seviyesinin daha alt kısımlarında bulunmaktadır. Bloklanmış ya da taneli halde de bulunabilmektedir (Ünsal, 2001).

Proklastik malzemeler oluşurken aralarına volkanik olmayan başka maddeler karışabilmektedir. Bu şekilde tüfit adı verilen ve tabakalaşma görülen yeni doğal kayaçlar meydana gelir. Bugün görülen tüfitler yer kabuğunun düşey hareketleri sonucunda yeryüzüne çıkmışlardır. Oluşma şekliyle kaynaklanan bir sonuç olarak içerisinde farklı oranlarda karbonat kil vb. maddeler olabilir. Proklastik malzemenin doğal yollardan birbirlerine bağlanmasında bazen bu maddelerin silisten daha etkili olabilmektedir (Erguvanlı, 1955).

Pomza taşı diğer adıyla sünger taşı adında tuf çeşidi bulunmaktadır. Bu taş magmatik parçalarının hızlı soğuması sonucunda meydana gelir. Eriyik şeklinde olan kütlenin hızlı soğuması sonucunda içerisindeki gazın kütleyi terk etmesi ile çok boşluklu bir yapı oluşur. Pomzanın içerisindeki silikat miktarları çok fazladır ve yoğunlukları genellikle 1 kg/dm^3 'ten daha azdır (Ertek, 2008).

Zeolit kelime olarak "Kaynayan taş" anlamına gelmektedir. İlk zeolit, 1756 yılında İsveçli mineralog Freiherr Axel Fredrick Cronstedt tarafından bulunmuştur. Zeolitler, yıllar önce su ortamında değişime uğrayan volkanik küllerin alkalilerin ve toprak alkalilerin hidrat içerikli doğal silikatlarından oluşan bir mineral grubudur. Feldspatların ve diğer alumino-silikatların zeolite dönüşüm olayına zeolitleşme denir (Ünsal, 2001). Zeolitin 40'tan fazla minerali bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri klinoptilolit, hoylandit, şabazit, analsim, eriyonit, natrolit'dir. 150'den fazla da sentetik minerali bulunmaktadır. Zeolit mineralleri, oksijen atomlarını birbirleriyle paylaşarak bağlanan tetrahedral AlO_4 ve SiO_4 'in üç boyutlu sınırsız uzayabilen ağdan oluşan aluminosilikat yapıdadırlar (Şekil 2.1) (Köktürk, 1995). Yapıları içerisinde bal peteği veya kafese benzer değişebilir katyonlar ve su içermektedir. Levhaları arasında var olan mikro gözenekler, mikro pencerelerle birleşip bir, iki veya üç boyutlu boşluk sistemleri ve kanalları meydana getirir. Toplam hacmin içerisindeki boşluk miktarı %20 ile %50 arasındadır. Çizelge 2.2'de doğal zeolitlerin fiziksel özellikleri verilmiştir. Zeolit minerallerinin en belirgin özelliği; bu boşluklara rahatça girebilen

ve yer değiştiren sıvı ve gaz molekülleri ile toprak alkali iyonlar vasıtasıyla "moleküler elek" olmasıdır (Doğan, 2003).



Şekil 2.1 : Zeolitlerin kristal yapısı (Köktürk, 1995)

Kullanım alanı oldukça geniş olan zeolitler; iyon değiştirme, su ve gaz tutma gibi faydalarından dolayı ziraat alanında, balıkçılıkta, su, gaz ve radyoaktif artıkların temizlenmesinde, kurutmada, güneş enerjisi ve gaz depolanmasında, koku kontrolünde, yapı elemanı olarak, iyi kalite kâğıt yapımında ve pek çok alanda kullanılabilir. Zeolitlerden dünyada rezervi en fazla olan ise klinoptilolittir (Gülen vd., 2012).

Çizelge 2.2 : Doğal zeolitlerin fiziksel özellikleri(Doğan, 2003)

Zeolit	Gözenek Hacmi (%)	Isı dengesi	İyon değiştirme kapasitesi (meq/g)	Özgül ağırlığı (g/cm ³)
Analsim	18	Yüksek	4,54	2,24-2,29
Şabazit	47	Yüksek	3,84	2,05-2,10
Klinoptilolit	34	Yüksek	2,16	2,15-2,25
Eriyonit	35	Yüksek	3,12	2,02-2,08
Hoylandit	39	Düşük	2,91	2,18-2,20
Mordenit	28	Yüksek	4,29	2,12-2,15
Fillipsit	31	Orta	3,31	2,15-2,20

2.3.2 Metamorfik (başkalaşım) kökenli doğal taşlar

Oluşumunu tamamlamış kayaçların doğal olaylar sonucunda (jeolojik ve tektonik) yüksek sıcaklık ve basınç altında yapı, doku, mineral bileşim ve fiziksel özelliklerinin değişmesi sonucu oluşan kayaçlara metamorfik (başkalaşım) kayaçlar denir. Bu tip

kayaçlara örnek olarak gerçek mermerler başta olmak üzere şist, arduaz ve gnays gösterilebilir (Ünsal, 2001).

2.3.2.1 Mermer

Adını günümüzden yaklaşık 2000 yıl önce antik olarak mermer işletmeciliğinin başladığı yer olarak bilinen Marmara adasının sessiz harflerinden alan mermer zaman içerisinde birçok medeniyetin kurulmasında ve bir kültür olarak geliştirilmesinde rol almış bir yapı taşıdır (Erkek & Özdemir, 2011). Mermer tanım olarak çok geniş bir sınıfa içine almakla beraber, genel olarak bilimsel ve ticari olmak üzere iki ayrı tanımla ifade edilmektedir. Bilimsel tanımda; başkalaşım (metamorfizma) süreci geçiren ve başkalaşımın izlerini taşıyan kalker, dolomit gibi karbonat bileşimli kayaçlara mermer denir. Yüksek oranda kalsiyum karbonat (CaCO_3), az miktarda magnezyum karbonat (MgCO_3) ve diğer metal oksitleri içeren kayaçlar hakiki mermerler olarak adlandırılırlar. Özellikle kalker (CaCO_3) ve dolomitik kalkerin (CaMgCO_3) yüksek sıcaklık ve basınç altında başkalaşıma uğrayarak tekrar kristalleşmesi sonucu oluşmuşlardır ve karbonatlı bileşimlerle birlikte başkalaşım izlerini de bulunduran kayaçlardır.

Kalker (CaCO_3) yani kalsit minerallerinden oluşan mermerlere içerisindeki magnezyum karbonat (MgCO_3), silisyum oksit (SiO_2) gibi bileşimler ve metal oksitler renk vermektedirler (DPT, 2001). Mermer, metamorfizma olayı neticesinde dolomitik kalker ve kalkerlerin tekrar kristalleşmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Bileşimlerinde çok az miktarda MgCO_3 bulunurken %90 ile %98 arasında CaCO_3 bulunmaktadır. CaCO_3 kristallerinden oluşan mermerlerde mermerin esas minerali “Kalsit”tir. Aynı zamanda az miktarda olsa silis, silika, feldspat, demiroksit, mika, florin ve organik maddeler bulunabilmektedir (Ünsal, 2001). Kimyasal formülü CaCO_3 olan ve karbonatlı kayaçları meydana getiren endüstriyel mineral kalsittir. Farklı şekillerde kristalleşebilen mineral, camsı parlaklıkta ve renksiz saydam yapılıdır. Öğütülmesi durumunda beyaz toz şeklini alır. Kalker ya da kireç taşı olarak bilinen karbonatlı kayaçlar suyun direkt olarak kristalleşmesi veya deniz canlılarının kabuklarının birikip sıkışması ile oluşmuştur (Erguvanlı, 1955). Kireç taşları grubunda olan saf kalsit, dolomit ve aragonit beyaz ve temizdir ancak safsızlığını bozan katkılar nedeniyle sarımtırak kahverengi ve gri renkler alabilmektedir.

Cinel (2007)'e göre; endüstri içerisinde mermer olarak adlandırılan kayaçların tamamı jeolojik olarak mermer değildir. Fakat kayacın türü ne olursa olsun bazı özelliklerinden dolayı mermer olarak kabul edilebilmektedir. Bunlar; blok halinde çıkarılabilme, kesilme, cilalanma gibi özelliklerdir.

2.3.2.1.1 Mermerin yapısal özellikleri

Oluşumunu tamamlamış kireçtaşı yatakları termik metamorfizma olarak bilinen volkanik kayaçlardan gelen ısı ve basıncın etkisiyle mermere dönüşmektedirler. Safa yakın kalsitin (kireçtaşı) tekrar kristalleşmesi sonucu parlak ve beyaz mermer oluşmaktadır. Birçok mermer ise, derinlerde depolanmış kireçtaşlarının (kalsit) doğrudan yüksek basınç ve yüksek sıcaklığın etkisiyle dinamo termik metamorfizmayla (başkalaşım) oluşmaktadır. Bu basınç sadece kalsit yapılarda değil diğer tabakalarda olduğu gibi kıvrımlarda da etkisini göstermektedir. Mermer ocaklarında ince şeritler halinde farklı renk minerallerin olması yataklar içerisinde çok küçük farklı mineral kıvrımlarının olduğunun belirtisidir. Bu kıvrımlar simetrik olmayan kıvrımlardır. Hep aynı büyüklükte çıkartılan bloklar ancak bu tür kıvrımların eksen bölgesinden çıkarılmaktadır. Mermerde de granitte olduğu gibi yatay yönde kaya genişlemesi ancak kanallar yoluyla yanal hareketlenme sonucunda gerçekleşir. Eğer kayacın elastisitesi sınırı aşarsa kırılmalar oluşur. (T.C.S.T.B.,1995).Mermerlerin özellikleri aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Sertlik: Cinsine göre değişiklik gösteren sertlik, yapısında silikat minerallerinin artması sonucu artmaktadır. Mermerin sertliğinin kesilme ve cilalanmaya da etkisi olmaktadır. (Onargan,vd., 2006).

Birim hacim ağırlığı (yoğunluk): Yoğunluk mermerin yapısına ve cinsine göre 2200 – 3200 kg/m³ arasında değişmektedir (Onargan vd., 2006). Ticari olarak birim hacim ağırlığı 2700 kg/m³ olarak kabul edilmektedir.

Çözülme özelliği: Taşların tamamı atmosferle temasın sonucunda az veya çok fiziksel ve kimyasal etkileşimle değişim göstermektedirler. Asitlerle tepkimeye girmektedir. Mermerler (CaCO₃) asitlerle tepkimeye girerek H₂CO₃ ortaya çıkarırlar. H₂CO₃ ise su ve karbondioksit olarak açığa çıkmaktadır.

Renk: Mermere renk veren maddeler; koyu gri ve siyah rengi verenler; organik maddeler ve fazla miktardaki MnO ve grafitir. Siyah damarlar; MnO'in kayaç içerisinde yoğunlaştığı yerlerdir. Kırmızı renk; FeO veya az miktarda Cr₂O₃, yeşil renk; klorik, aktinolitik, tremolit ve yüksek oranda Cr₂O₃, mavi renk; Cl veya Na çokluğu veya cıva içermesi ile oluşurken sarı renk; kükürt ve FeO, mor veya leylak; az oranda kayaç içinde dağılmış Mn'den kaynaklanmaktadır (Kun, 2000).

Porozite: Bu oran kayacın gözeneklilik özelliğini göstermektedir (Kun, 2000). Porozite ne kadar artarsa mermerin ekonomikliği azalmaktadır. Çünkü porozite arttıkça mukavemet düşmekte ve atmosfer olaylarına dayanım azalmaktadır. Bu durum mermerde istenmeyen bir durumdur. Kalitesi iyi bir mermerin porozitesi % 0,0002 - % 0,5 arasında olması istenmektedir. Ancak travertenlerde porozite oranı % 18'lere kadar çıkmasına karşılık bu durum olumsuzluk olarak değerlendirilmez (Onargan vd., 2006).

Mukavemet: Mermerin direnci kristal yapısı içerisindeki CaCO₃ miktarına, yabancı madde içeriğine göre farklılık göstermektedir. Genellikle tek eksenli basınç dayanımı 500 – 1500 kg/cm² arasında değişmektedir. Tabakalı yapılanmalarda direnç; tabakalaşmaya dik yönlerdeki yüklemelerde, paralel yöne göre daha büyük olmaktadır (Onargan, vd., 2006).

Yabancı maddeler: İçlerinde barındırdıkları yabancı maddelerin özelliklerine göre etkileri de farklılık göstermektedir. Bu yabancı maddeler demir-sülfidler, silisli ve silikatlı minerallerden oluşmaktadır. (Onargan, vd., 2006).

2.3.3 Sedimanter (tortul) kökenli doğal taşlar

Geçmişte oluşumlarını tamamlamış kayaçlardan doğal olaylar neticesinde koparak ayrılan parçaların yine doğal olaylarla taşınarak belli bir alanda, tabakalı bir yapıda depolandıktan sonra zaman içerisinde basınç ve sıcaklıkla oluşan kayalara tortul kayaçlar denir.

Çizelge 2.3 : Doğal taşların kökenlerine göre sınıflandırılması (Ünal, 2003)

Tortul Kayaçlar (Sedimanter Kayaçlar)	Püskürük Kayaçlar (Mağmatik-Volkanik)	Başkalaşmış Kayaçlar (Metamorfik Kayaçlar)
<ul style="list-style-type: none"> • Dolomit • Alçıtaşı • Arduvaz • Killi şist • Kuvarsit • Traverten • Konglomeralar • Kalkerler <ul style="list-style-type: none"> ○ Oolitik Kalker ○ Tebeşir ○ Kalker tuf ○ Killi kalker 	<ul style="list-style-type: none"> • Granitler • Siyenit • Diorit • Gabro • Volkanitler • Porpirler <ul style="list-style-type: none"> ○ Andezit ○ Lavlar ○ Bazalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Mermer • Gnays • Mikaşist • Serpantin

2.4 Literatür araştırması

Ortega ve diğerleri (Ortega E.A. vd. 2000) yaptıkları çalışmada UK, YFC, doğal puzolan ve zeolit kullanarak alkali-aktive edilmiş karışım ile preslenmiş haldeki malzeme üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı, kapilarite ve geçirimsizlik gibi deneyler sonucunda alkali-aktivite edilmiş numunelerin basınç dayanımlarının yaklaşık 39 MPa kadar ulaştığı belirlenmiştir. Çalışmada malzemeler en az 45 µm boyuta kadar öğütülmüştür. Ancak 45 – 150 µm boyutlu taneler için denemeler gerçekleştirilmiştir. Bunların sonucunda elde edilen malzemenin özellikleri karışımda kullanılan malzemelerin inceliğine bağlı olarak geliştiği de belirtilmiştir.

Demir ve Başpınar (Demir İ. & Başpınar M.S., 2001) mermer çökeltme havuzlarında biriken mermer tozlarının hafif duvar bloğu üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çökeltme havuzundan alınan örneklerin tane boyutu analizine göre mermer tozu 0 – 100 µm aralığındadır. Çalışmada kullanılan hammadde mermer katkı ise genleştirilmiş perlittir. Mermer tozuna gözenek oluşturmak amacıyla %2,5-5 oranında perlit katılmıştır. Mermer tozu, genleşmiş perlit ve bağlayıcı olarak değişik oranlarda katılan kireç- alçı malzemeler önce kuru karışım yapılarak homojen karışımı sağlanmıştır. Karışıma su ilave edilerek homojen ve plastik kıvamına gelinceye kadar

karıştırılmıştır. Örnekler kalıba döküldükten 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak mukavemet kazanmaları için nemli bez ile örtülerek 28 gün süre ile kür edilmiştir. Dene örnekleri üzerinde fiziksel ve mekanik testler uygulanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçta kendi gurubuna giren hafif beton duvar malzemeleri ile karşılaştırıldığında ekonomik şartlarda ve yeterli mekanik özellikleri sağlayan hafif duvar elamanı üretilebileceği belirlenmiştir.

Brough ve Atkinson (Brough A.R & Atkinson A., 2002) cüruf, toz malzeme ve aktivatör oranlarını sırasıyla 1:2,33:0,5 oranlarında kullanarak, geopolimer harç hazırlayarak basınç dayanımını 40 MPa'ya ulaştırmışlardır. Sodyum silikatla aktive edilmiş harçlar daha az boşluk oranı içerdiğinden yüksek dayanım gösterirken Potasyum hidroksit ile aktive edilmiş harçlar boşluk oranı yüksek olduğundan daha düşük dayanımlar göstermiştir.

Ünal ve diğerleri (Ünal T. & Uygunoğlu O., 2003) agrega olarak 0 – 4 mm, 4 – 8 mm ve 8 – 16 mm olarak boyutlandırılan pomza, diyatomit ve volkanik tüf kullanmıştır. Agregalarının kullanıldığı serilerde iri agrega oranı % 20 olarak sabit tutulmuş, ince ve orta malzeme oranları değiştirilerek uygun farklı granülometrilere belirlenmiştir. Bütün serilerde su/çimento oranı 0,15 alınmıştır. Çimento miktarı 220 ile 120 kg/m³ arasında değiştirilmiştir. Ayrıca bazı serilerde çimento miktarı belirli oranlarda uçucu kül ile yer değiştirmiştir. Hazırlanan karışımlarla 10x10x10cm kenarlı küp numuneler ve farklı boyutlarda boşluklu blok elamanlar üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde 7 – 56 günlük fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre pomza ve volkanik tüfün blok elaman üretiminde kullanılması uygun olmasına karşılık diyatomit agregası uygun olmadığı belirlenmiştir.

Akın (Akın E., 2007) yaptığı çalışmada matris malzeme olarak polyeester, takviye malzemesi olarak da mermer tozlarını kullanmıştır. Diğer taraftan puzolanik yapıdaki uçucu kül mermer tozu yer değişimi esasına yönelik olarak uçucu kül ilavesinin mukavemet üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca, öğütülmüş hurda termoplastiklerin polyeester ile yer değiştirilmesi esasına dayalı olarak malzemenin mukavemet özelliklerindeki değişimi belirlenmiştir. Polimer sertleştirici olarak metil etil keton

peroksit ve kürleşmede reaksiyon hızlandırıcı olarak da kobalt naftanat kullanılmıştır. Hazırlanan malzemeler kalıplanmıştır. Kalıptan çıkartılan numuneler hava ve etüvde küre tabi tutulmuştur. Kompozit malzeme üretilirken sertleştirici, hızlandırıcı, polyester miktarı ve kür şartları sabit tutularak öncelikle polyester/mermer tozu oranı parametrik olarak incelenmiştir. Kompozit malzemenin üç noktalı eğilme mukavemeti ve sertlik değerleri ölçülerek en yüksek değere polyester/mermer oranı $\frac{1}{4}$ de ulaşılmıştır. İkinci parametrik çalışma olarak polyester/dolgu maddesi (mermer tozu+uçucu kül) oranı 0.38 olduğunda ise en yüksek üç noktalı eğilme ve sertlik değerlerine ulaşmıştır. Üçüncü parametrik ölçümde, mermer tozu ve uçucu kül takviyeli, hurda termoplastik ve polyester matrisli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen malzemelerin mekanik özellikleri test edilmiştir. Test sonuçları polyester yerine ikame edilen termoplastiğin malzemenin mekanik özelliklerini azalttığı gözlemlenmiştir. Matris içerisindeki termoplastik oranı %0 iken, üç noktalı eğilme deneyi değeri 30 MPa iken; %17 termoplastik içeriğinde 21,7 MPa, %50 termoplastik içeriğinde ise 16,5 MPa olarak belirlenmiştir.

Yang ve arkadaşları (Yang K. vd., 2009) alkali ile edilmiş karışımların yayılma değerlerinin su/bağlayıcı oranının artışı ve toz/bağlayıcı oranının düşüşüyle arttığını görmüştür. Toz/bağlayıcı oranın 2.5'tan büyük olduğu değerlerde harcın viskozitesi son derece belirgin bir biçimde düşmüştür. Bu deneyler sonucunda aynı karışım oranlarında yüksek fırın cürufu harçların, uçucu küllerle üretilen harçlara kıyasla daha yüksek dayanım göstermesine karşın daha düşük viskozite gösterdiğini keşfetmişlerdir. Düşük sıcaklık kürüne tabi tutulan uçucu küllerin düşük dayanım göstermeleri, reaksiyona girmeyen uçucu kül parçacıklarının ve yüksek sayıdaki boşlukların varlığını göstermiştir. Toz/bağlayıcı oranının 2.5'a yaklaşmasıyla birlikte dayanımlar artış gözlemlenmiştir. Bu artış sıradan Portland çimentosunun eşik değerine göre daha düşüktür. Aynı zamanda, alkali ile aktive edilmiş harçların büzülme değeri de normal Portland çimento harcının büzülme değerinden düşük olduğunu belirlemişlerdir.

Zuda ve arkadaşları (Zuda L. vd., 2010) ısıya dayanıklı hafif agrega içeren alkali ile aktive edilmiş alüminosilikat kompozitlerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması

sonucunda 800 °C'de basınç dayanımı %35, eğilme dayanımı ise %66 oranında düşmüştür. 1200 °C de ise %30 oranında daha düşük çıktığı gözlenmiştir.

Kong ve Sanjayan (Kong & Sanjayan, 2010) yaptıkları çalışmalarında uçucu külü sodyum silikat ve potasyum hidroksit aktive ederek geopolimerler üretmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, agrega boyutu, agrega tipi, numune boyutu ve süper akışkanlaştırıcı gibi parametrelerin yüksek sıcaklık (800 °C) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ortam şartının ve karışım özelliklerinin aynı olduğu karışımlarda agrega boyutu 10mm üzerinde daha iyi dayanım göstermiştir. Geopolimer matris ve agregadaki termal uyumsuzluktan dolayı basınç dayanımlarında düşüşler olduğu belirtilmiştir.

Turgut (Turgut P., 2010) çalışmasında kireçtaşı tozu, C tipi uçucu kül ve su kullanarak çimentosuz bir duvar elemanı üretmiştir. Kireçtaşı tozu hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül birlikte yeni karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar suyla karıştırılarak hamur kıvamındaki malzeme çelik kalıplar içinde 20 MPa basınç altında preslenerek sıkıştırılmıştır. 7, 28 ve 90 gün süresince kür yapılan numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, UPV ölçümleri yapılmıştır. 28 gün yaşında ise yoğunluk, su emme ve ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Sonuç olarak kireçtaşına eklenen uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanımlarının da önemli oranda arttığı gözlenmiştir. %30 uçucu kül ilavesiyle 28 ve 90 gün yaşlarında 15 ve 18 MPa dayanım elde edilmiştir.

Turgut (Turgut P., 2010) çalışmasında kireçtaşı tozu, C tipi uçucu kül, silis dumanı ve su kullanarak tuğla yerine geçebilecek bir duvar elemanı üretmiştir. Bu amaçla kireçtaşı tozu, uçucu kül ve silis dumanı suyla karıştırıldıktan sonra hamur kıvamındaki malzeme 20 MPa yükleme altında preslendikten sonra 48 saat sprey ile sulama yapılarak 7, 28 ve 90 gün süreyle su içine bırakılmıştır. Numuneler 7, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç ve eğilme dayanımları, yoğunluk, su emme, porozite ve ısı iletkenlikleri belirlenmiştir. Silis dumanı içeren numunelerde basınç ve eğilme dayanımlarında önemli derecede artış gözlenmiştir. Silis dumanı oranı %20 olduğunda 28 ve 90 gün yaşındaki numunelerin basınç dayanımları 23 ve 26,5 MPa olmuştur. Bu üretim normal kil tuğlaları 6,4 kez daha ucuzlatmıştır.

Diop ve Grutzeck (Diop M.B. vd., 2011) geopolimerizasyon teknolojisini kullanarak tuf ve kaolin kili ile düşük sıcaklıklarda tuğla üretmeye çalışmışlardır. Bu kapsamda tuf ağırlıkça %80 oranında karışımda kullanılmıştır. Çalışmada NaOH molar yoğunluk, kür sıcaklığı ve kür süreçleri üzerinde yapılan değişiklikler neticesinde, sonuç olarak NaOH alkali aktivatörünün molar oranı arttıkça dayanımdaki yükselme gözlenmiştir. Ayrıca yazarlar %50'si 10 µm'nin altında olan tuf ile gerçekleştirilmiş karışımlarda 60 günlük kür süresinde, 80 °C'de en yüksek dayanım elde edilirken, süre uzadıkça ve aktivatörün molar yoğunluğu arttıkça iletkenlik artmakta olduğunu belirlemişlerdir.

Turgut (Turgut P., 2012) atık kireçtaşı testere tozunu az miktarda Portland çimentosuyla karıştırılmıştır. Bunlara ek olarak diğer taraftan atık kireçtaşı testere tozu, az miktarda Portland çimentosu ve toz haldeki atık camı karıştırdıktan sonra numuneleri 28 gün süreyle kirece doymun suda küre bırakmıştır. Sonra basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Tüm deney numunelerinin basınç dayanımları 24,9 MPa'dan, eğilme dayanımları 3,94 MPa'dan yüksek çıkmıştır.

Kamiloğlu, Yurdagül ve Tekin (Yurdagül E. vd., 2012) toz haldeki Bayburt Taşı'nı kireçli zemin stabilizasyonunda kullanmış ve yol altı stabilizasyon malzemesi olarak uygunluğunu çalışmışlardır. Bu çalışmada farklı oranlarda Bayburt Taşı'nı yol altı temel malzemesi için kullanılan kil+kireç karışımlarına ilave olarak karıştırmışlardır. Elde edilen malzemelerin optimum su muhtevalarını belirledikten sonra standart zemin deneyleri ile karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Çalışmanın sonunda kesme kutusu ve tek yönlü basınç deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak Bayburt Taşı farklı oranlarda kullanıldığında ağırlıkça %10'a kadar kesme ve basınç dayanımlarında artış göstermiştir.

Segui ve diğerleri (Segui P. vd., 2013) puzolan, kireç ve alçı kullanarak çeşitli oranlardaki karışımlarla alkali-aktive edilmiş malzemeler üretmişlerdir. Hazırlanan %80 puzolan, %15 kireç ve %5 alçı içerikli malzeme sıkıştırılmadan kalıplanmış ve 1 yıl süreyle küre tabi tutulmuştur. 50 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin basınç dayanımları 1 yıl sonra 9 MPa olarak test edilmiştir.

Türker ve arkadaşları (Türker vd., 2016) alkali aktive edilmiş harçlar ile Portland Çimentolu harçların kür ve yüksek sıcaklık etkisini inceleyerek, basınç dayanımı, SEM, XRD, ve TGA deneyleri uygulamışlardır. Basınç dayanımı deneyleri sonucunda 200 °C de önemli bir artış görülmüştür. Bu büyük olasılıkla hidrasyon sırasındaki ısıtma nedeniyle, aktif olmayan toz parçalarının 200 °C de aktif olmasından ortaya çıkmıştır. Ancak numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce oda sıcaklığında tutulması, alkali aktive edilmiş harçların basınç dayanımında önemli bir etki oluşturduğundan söz edilmiştir. Hava ve yüksek sıcaklıkta kür yapılan alkali aktive edilmiş harçların basınç dayanımları 2 saat 400 °C yüksek sıcaklığa tabi tutulduktan sonra 30 MPa olarak neredeyse aynı çıkmıştır. Diğer taraftan 400 °C sonrasında ortam sıcaklığında alkali aktive edilmiş harçların basınç dayanımlar keskin bir biçimde düşmüştür, basınç dayanımındaki azalma oranları 600 °C ve 800 °C sıcaklıkları için sırasıyla %60.9 ve %79.7 değerinde olduğu belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

Deneysel çalışmalarda Bayburt ili çevresinde bulunan taş kesme atölyelerinin atıkları olan beyaz renkli Bayburt Taşı (BT), Bayburt ili traverteni ve Nigtaş A.Ş.'den temin edilen kalsit ile Solvay marka Fransız üretimi NaOH kullanılmıştır. Bunlara ilaveten 6 mm uzunluğunda 13 mikron çapında polipropilen kırpık lifler kullanılmıştır. Bu malzemeler detaylı olarak alt başlıklarda açıklanmıştır.

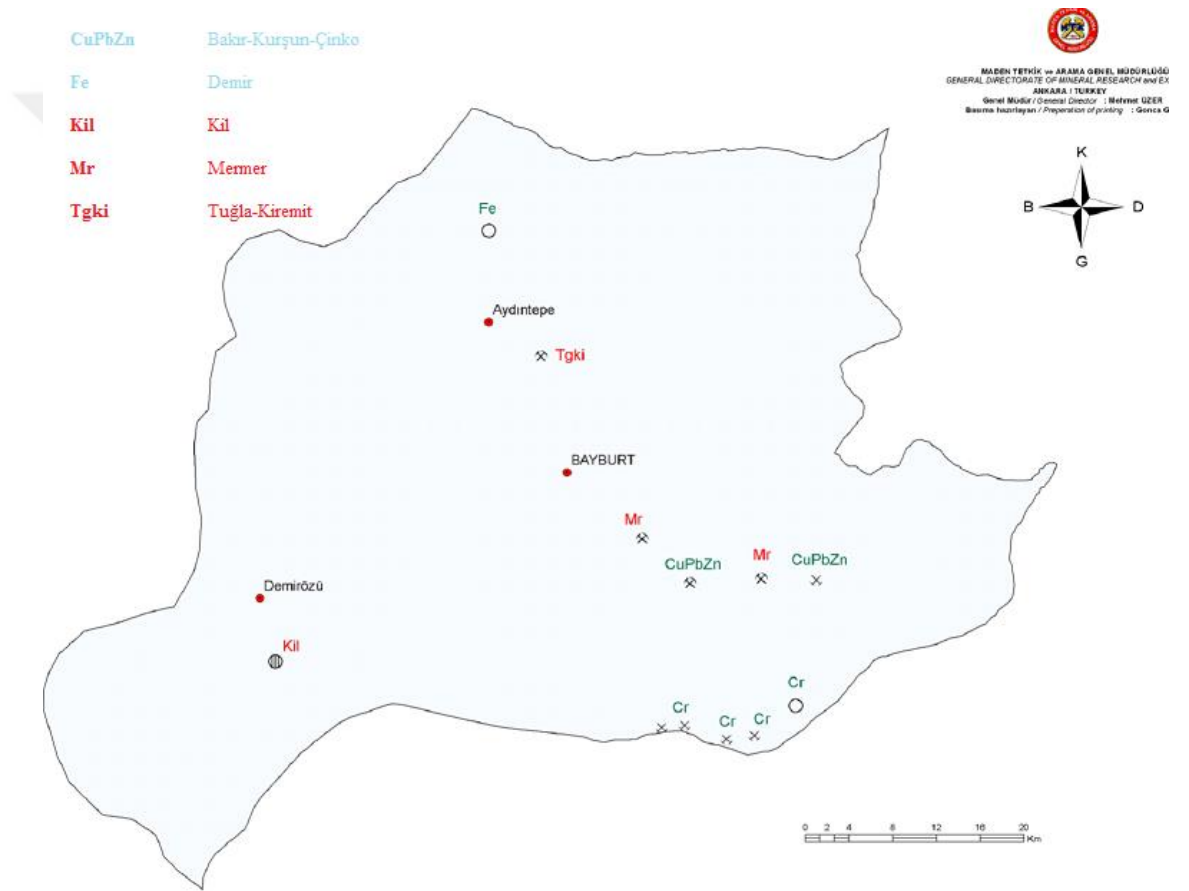
3.1.1 Bayburt Taşı

Bayburt ili sahip olduğu jeolojik yapı sebebiyle çeşitli maden yataklarının oluşması için uygun bir ortam sunmaktadır. Bu jeolojik oluşum içerisinde bilinen maden yatakları oldukça azdır. Bayburt ilindeki metalik madenler bakır ve krom yatakları görülmektedir. Merkez-Helvaköy ve Anzarya bakır sahasında 200.000 ton potansiyel kaynak belirlenmiştir. Kopdağı Bölgesi'nde % 15-45 Cr₂O₃ tenörlü çok sayıda krom yatak ve zuhurları tespit edilmiştir. (MTA, 2005)

Bayburt ili ve civarında bulunan ve "Bayburt Taşı" olarak bilinen Bayburt tüf ve tüfitleri il ekonomisinde, özellikle yapı taşı olarak kullanılması ile ticari bir öneme sahiptir. 2005 yılında Bayburt Valiliğinin talebi ile MTA Genel Müdürlük tarafından Bayburt ilinde detaylı etütler gerçekleştirilmiş ve Toptepe, Sırataşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüşdamla sahalarında toplam 2.535.700 ton görünür rezerv tespit edilmiştir. Ayrıca Bayburt ili ve çevresinde BT dışında traverten yatakları da bulunmaktadır. İldeki açık, koyu bej renkli ve resifal özellikli Jura kireçtaşları ile oniks ve granitler de bölgenin önemli doğaltaş potansiyelleri arasında yer almaktadır. Ayrıca, ilde bulunan bir diğer endüstriyel hammadde kaynağı ise Demirözü ilçesindeki Edire ve Gümüşgöze kil sahalarıdır. % 22 ile 31 arasında değişen Al₂O₃ içeriklerine

sahip sahaların toplam görünür+muhtemel kil rezervi 386.100 ton olarak belirlenmiştir. (MTA, 2005)

BT jeolojik adı Riyo-dasitik bileşimli vitrik tuf olarak tanımlanmaktadır. Kayaç içinde volkanik malzemelerden oluşan bir matrix ve matrix içinde kuvars-plajiolklaz-biyotit ve kayaç parçaları bulunmaktadır. Matrixte pekişmiş volkanik malzemelerin yanı sıra kuvars ve feldispat mikrolitleri ile demiroksit ve alterasyon ürünü minerallerin de oluşumu belirlenmiştir (MTA, 2005).

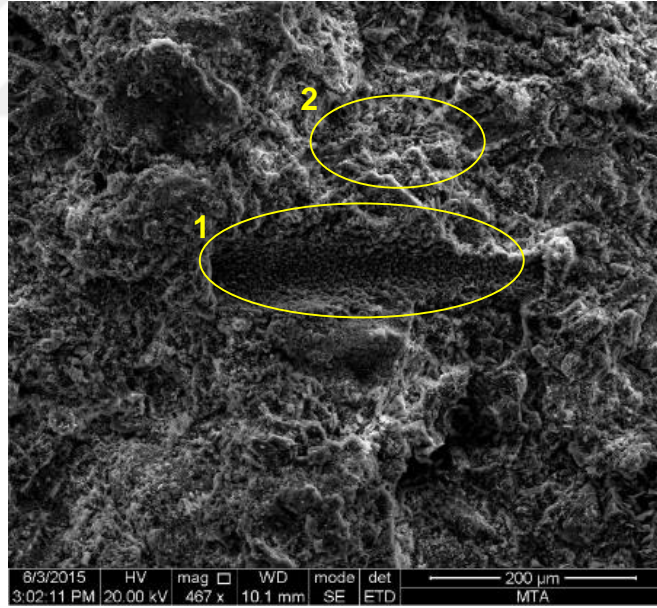


Şekil 3.1 : Bayburt ili maden haritası (MTA)

Bayburt ili mevcut doğal taş kapasitesi açısından oldukça zengin bir konumdadır. İle 2009 yılı itibariyle 81 adet arama 12 adet işletme ruhsatlı saha bulunmaktadır. Bayburt ilinde 11 ufak çaplı el işleme atölyesi, 2 orta büyüklükte işleme tesisi bulunmaktadır. Ayrıca 1 adet AB destekli taş ocağı kurulum aşamasındadır. Mevcut 13 işletme 9 ay çalışmakta olup, ortalama yıllık 40.000 m³ taş işlenmektedir. Bu işletmeler dışında 2

traverten, 1 beyaz mermer, 1 bej kireçtaşı, 1 beyaz tuf, 1 yeşil tuf, 1 sarı tuf ocağı faal olarak işletilmektedir (MTA, 2005). BT bölgede yeşil, sarı ve beyaz renklerde bulunmakta ve yapılarda dış cephe ve iç cephe ince yonu kaplama taşı olarak kullanılmaktadır (Önenç, 2002). Kalınlıkları 10 cm olan ve uzunlukları 30-40 cm ve genişliği 20 cm bulunan duvar elemanı olarak kullanılabilen yapı taşı üretiminde de kullanılmaktadır. Ayrıca yapıların dışında dekoratif amaçlı ve mezar, mihrap, barbekü olarak da kullanılmaktadır.

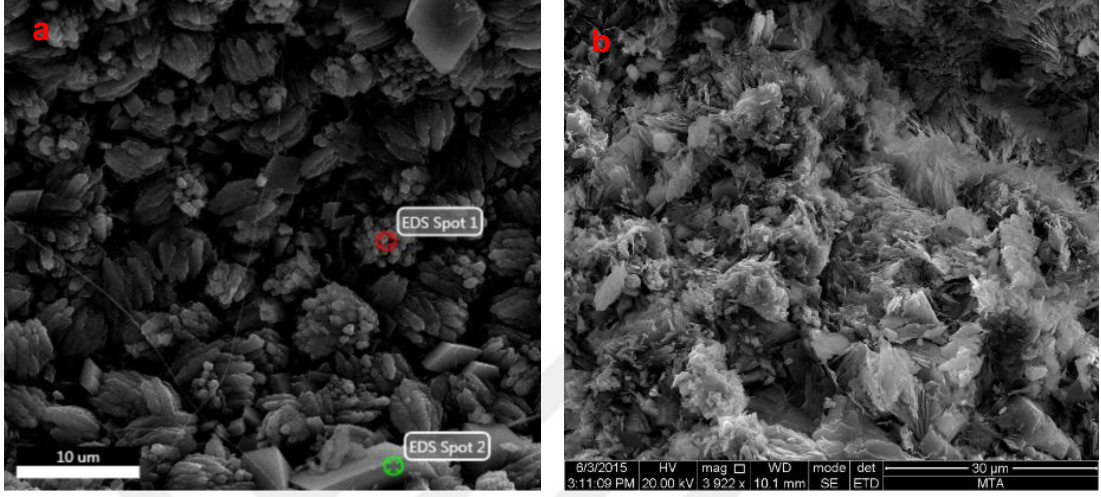
Deneysel çalışmalarda beyaz renkli BT kullanılmıştır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3de BT'den alınmış numune örnekleri üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, Şekil 3.4'de yine aynı analizden elde edilen mikro yapılar üzerinde Elektron Dispersive Spectrum (EDS) noktasal element analizi ve Şekil 3.5'te aynı numune üzerinde x-ışını difraksiyonu mineralojik analizi (XRD) MTA Mineraloji ve Petrografi laboratuvarlarında yapılarak analiz sonuçları verilmiştir.



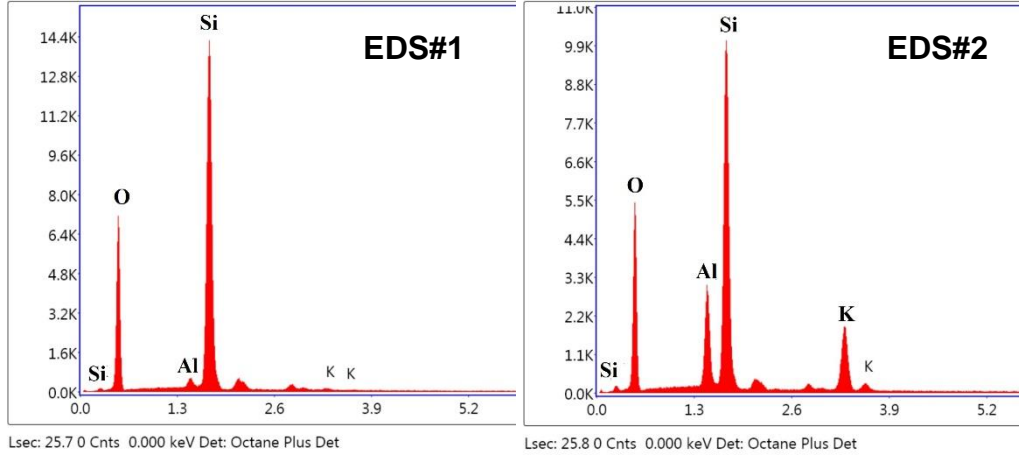
Şekil 3.2 : Öğütmeden önceki BT'nin SEM görüntüleri

Şekil 3.2'den büyütülmüş SEM görüntüsü olan Şekil 3.3a'da kübik ve rombohedral kristal yapılarda kuvars (SiO_2) ve zeolit mineralleri ($\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}$) görülmektedir. Bunlar Şekil 3.4'te EDS noktasal analizlerinde de görülmektedir. Şekil 3.3b'de görüldüğü gibi BT'de ayrıca kil minerali olarak bilinen hoylandit'de bulunmaktadır.

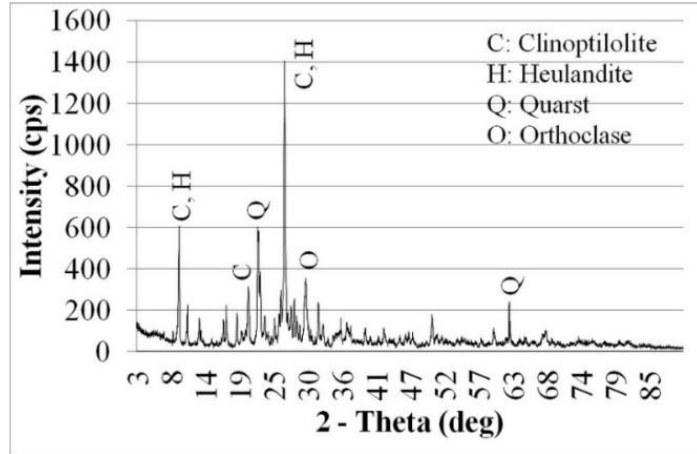
Şekil 3.5'teki XRD'ye göre BT porfirik dokulu, kuvars, alkali feldispat ve zeolitik minerallerce zengin özellikle klinoptilolit ve hoylandit içeren bir kayadır. (Tekin, 2016)



Şekil 3.3 : Öğütmeden önceki BT'nin SEM görüntüleri a) 1. bölgenin büyütülmüş görüntüsü b) 2. Bölgenin büyütülmüş görüntüsü



Şekil 3.4 : Şekil 3.3a görüntüsünün EDS analizi



Şekil 3.5 : BT'nin XRD (mineralojik) analiz sonucu

Deneylerde kullanılan BT'nin kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 de x-ışını frekans analizi (XRF) (oksit) analizi olarak Erzurum Aşkale Çimento Fabrikası tarafından gerçekleştirilmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Bayburt beyaz taşının kimyasal özellikleri (Aşkale Çim. Fab. XRF analizi)

Oksitler (%)	Beyaz BT	TS EN 450-1	TS EN 197-1	ASTM C 618
SiO ₂	68,92			
Al ₂ O ₃	11,96			
Fe ₂ O ₃	0,34			
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	81,22			> 70,00
CaO	3,85			
MgO	1,29		< 5,00	
SO ₃	0,21	< 3,00		< 5,00
Na ₂ O	0,23			
K ₂ O	2,38			
Toplam	99,31			
Kızdırma Kaybı	10,13	< 5,00		< 6,00

Tekin (2013)'e göre CEM I (42.5R) kullanılarak yapılan dayanım aktivite indeksi deneyinde çimento yerine %20 BT ikamesi ile yapılmış ve sonuç olarak 100% CEM I

içeren kontrol harcına göre 7 günde 74.5% ve 28 günde 77.4% basınç dayanımı elde edilmiştir. ASTM C 618'e göre doğal puzolanlar için dayanım aktivite indeksi deneyi 7 ve 28 gün basınç dayanımı kontrol harcına göre 75% ve $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}>70\%$ olmalıdır. BT 'de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}=84.7\%$ ve dayanım aktivite indeksi %75'den büyük olduğu için puzolanik bir malzemedir. BT'nin silica/alümina oranı ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) 5.76'dır. (Tekin, 2016)

Çizelge 3.2 : Bayburt beyaz taşının fiziksel ve mekanik özellikleri (MTA 2005)

Sertlik	(Mohs)	4-5
Birim hacim ağırlığı	(gr/cm^3)	1.69
Atmosfer basıncında su emme	Ağırlıkça (%)	12.2
	Hacimce (%)	20.6
Kaynar suda su emme	Ağırlıkça (%)	13.1
	Hacimce (%)	22.0
Görünür Porozite	%	20.6
Basınç direnci	(kgf/cm^2) 1	605
Don sonrası basınç direnci	(kgf/cm^2) 1	480
Don kaybı	%	0.22
Darbe direnci	(kgf/cm^3)	13.0
Eğilme direnci	(kgf/cm^2)	100
Doluluk oranı	%	70.1
Gözeneklilik derecesi	%	29.9
Ortalama aşınma	($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)	25.6

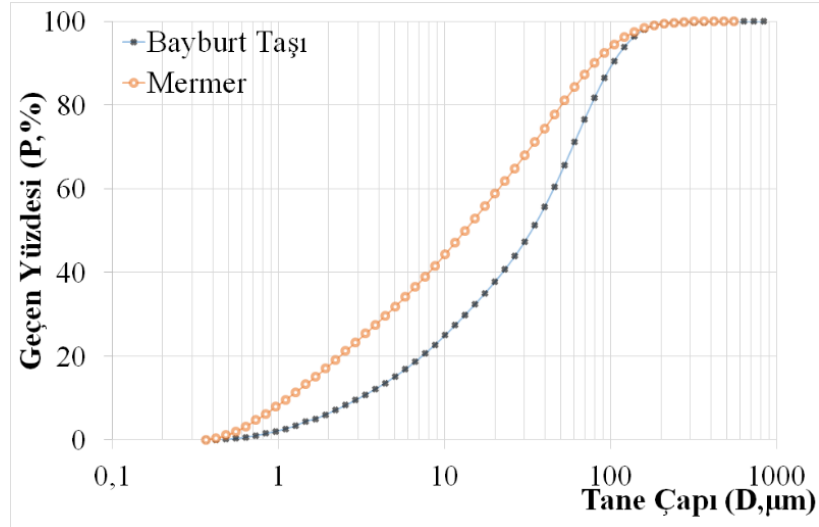
Deneyleerde kullanılmak üzere BT'ler Bayburt ili sanayii bölgesi atık sahasından paledyen boyutlarında (5-30 cm atık taşlar) toplandıktan sonra BT Ek 3 Şekil A.1a'de gösterildiği gibi laboratuvar ortamına taşınmıştır. Ardından BT Ek 3 Şekil A.1b'de gösterildiği gibi laboratuvar tipi konkasörde kırıldıktan sonra 0 – 2 mm boyut aralığına indirgenmiştir. Konkasörden alınan kırılmış malzeme 24 saat süreyle 105 ± 5 °C sıcaklıkta etüvde bekletildikten sonra 10 kg ağırlıkta yaklaşık 75 °C sıcaklıktaki BT Los Angeles cihazına Ek 3 Şekil A.1c'de gösterildiği gibi yerleştirilmiş ve çeşitli ebatlarda 26 kg ağırlıktaki çelik bilyeler ile öğütülmüştür. Malzemede $D_{90}=125$ µ inceliği elde edebilmek için yaklaşık 50 dk öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öğütme

cihazının sınırlarından dolayı $D_{50}=10 \mu$ öğütme yapabilmek amacıyla 2 farklı sistemde öncelikle konkasörden çıkan malzemeyi Los Angeles cihazında $D_{90}=35 \mu$ mertebelerine indirilmiş ve bunun için yaklaşık 210 dk öğütme işlemi yapılmıştır. Ardından düşey eksenli motorlu rotating blender tipi öğütücü ile öğütme işlemi sürdürülmüştür. $D_{90}=125 \mu$ inceliği elde edebilmek için 50 dk süreyle öğütülmüş toz haldeki malzemelerin %10'u $3 \mu\text{m}$, %50'si $33 \mu\text{m}$ ve %90'ı $100 \mu\text{m}$ 'den geçerken (Şekil 3.6), 210 dk süreyle öğütülmüş olan numunelerin %10'u $1 \mu\text{m}$, %50'si $10 \mu\text{m}$ ve %90'ı $35 \mu\text{m}$ 'den geçmiştir.

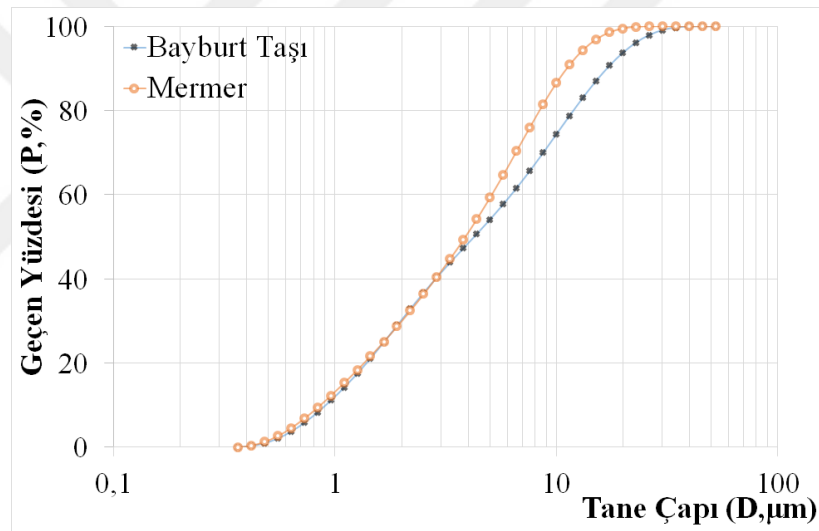
Los Angeles aşındırma cihazı kullanılarak 210 dk boyunca öğütülen %90'ı 35μ incelikte olan BT numuneleri yine mevcut neminin bünyeden uzaklaştırılabilmesi için 24 saat süreyle $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bekletilmiştir. Ardından Ek 3 Şekil A.2a 'da gösterilen blender tipi bilyeli öğütücünün içerisine konan yaklaşık $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 'taki 750 g BT, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm ve 4 mm çaplarındaki toplam 6 kg bilye ile dakikada 1400 RPM devir ile 10 dk süreyle öğütülmüştür (Ek 3 Şekil A.2c). Öğütme sırasında öğütücünün paletlerinin sıyırmadığı malzeme Ek 3 Şekil A.2b'de gösterildiği gibi kenarlara yapışarak BT'nin öğütme işlemi zorlaştırmıştır. Bu yapışmanın sebebi BT'ni yapısında bulunan hidrolitik zeolit kristallerinden (molekül suyu olan zeolitik yapı) kaynaklanmaktadır. Öğütme sonunda elde edilen malzeme üzerinde MTA Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarı tarafından ve Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yapılan lazer tane dağılımı analizi (Şekil 3.6, Şekil 3.7), yüzey alanı (BET) ve laboratuvar ortamında ölçülen özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 3.3 'de verilmiştir. Buna göre deneylerde kullanılacak olan ince öğütülmüş BT'nin %10'u (D_{10}) $0,9 \mu\text{m}$, %50'si (D_{50}) $4,3 \mu\text{m}$ ve %90'ı (D_{90}) $18,8 \mu\text{m}$ 'den geçmiştir.

Çizelge 3.3 : BT ve MA özgül ağırlık ve özgül yüzey deney sonuçları

Doğal Taş Adı	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey (Blaine) (cm^2/g)
Bayburt Taşı (10μ)	2,44	20607
Bayburt Taşı (125μ)	2,43	9085
Mermer (10μ)	2,77	26615
Mermer (125μ)	2,71	2645



Şekil 3.6 : Öğütülmüş 125 µm olan BT ve MA'nın lazer tanecik analizi

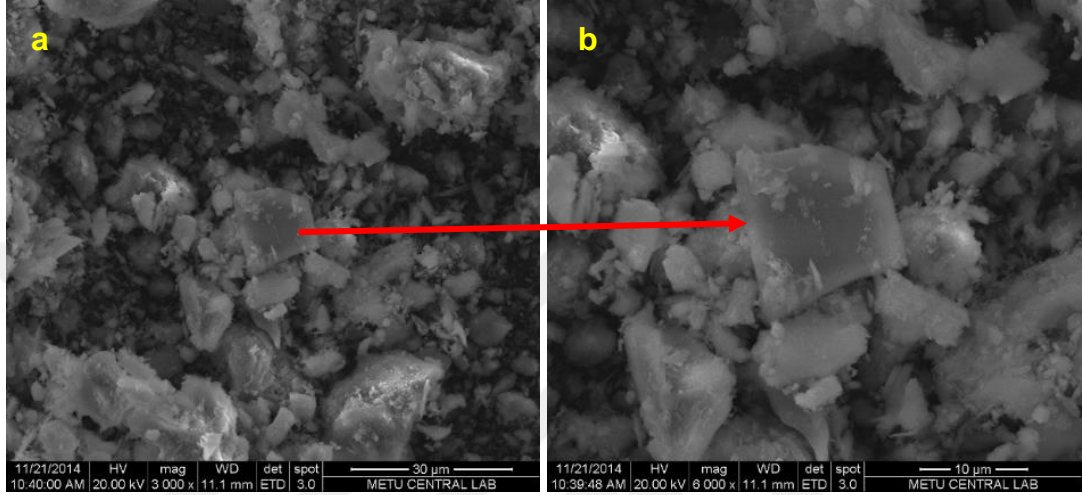


Şekil 3.7: Öğütülmüş 10 µm olan BT ve MA'nın lazer tanecik analizi

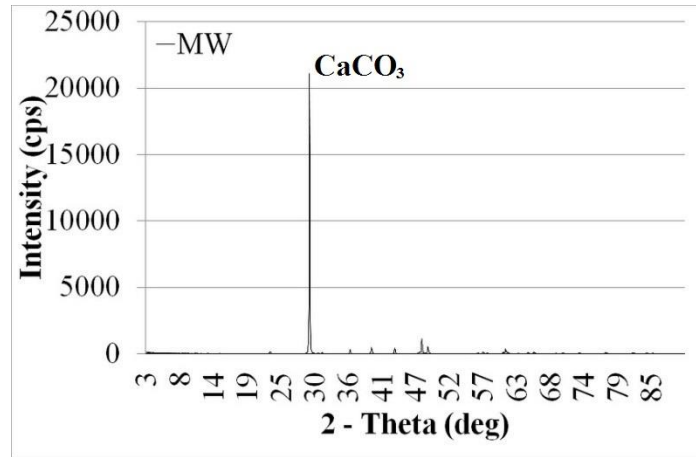
3.1.2 Mermer

Deneysel çalışmalarda bir diğer malzeme olarak öğütülmüş mermer atıkları (MA) kullanılmıştır. MA'nın numune hazırlığındaki etkisinin dolgu amaçlı olduğu düşünülmüştür. MA'nın öğütme prosesi şu şekilde olmuştur: MA laboratuvar ortamına paletler halinde getirildikten sonra $D_{90}=125$ mikron malzeme elde etmek için Los Angeles cihazında 50 dk süreyle 26 kg bilye ile öğütülmüştür. Öğütülmüş olan numunelerin %10'u 1 µm, %50'si 13 µm ve %90'ı 79 µm'den geçmiştir. Ultra ince $D_{50}=10$ mikron olarak kullanılacak MA öğütülmüş halde yaklaşık %99 CaCO_3 olup

Niğtaş Mikronize Kalsit San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. D_{90} 'ı $10\ \mu\text{m}$ inceliğe sahiptir. Deneylerde kullanılan MA'nın mikroskobik yapısı Şekil 3.8'de, özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 3.3'de, kimyasal ve fiziksel analizleri Çizelge 3.4'de, Master Siezer 2000 cihazı ile yapılan tane dağılım analiz grafiği ise Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 'de verilmiştir.



Şekil 3.8 : a) MA'nın SEM görüntüsü b) a'dan büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 3.9 : MA'nın mineralojik XRD analizi (ODTÜ Merlab)

Çizelge 3.4 : Mermer tozunun kimyasal analiz sonuçları (Aşkale Çimento A.Ş. Laboratuvarı)

Oksitler	Mermer
CaCO ₃ (%)	99,35 ±0,2
MgO (%)	0,3 ±0,1
CaO (%)	55 ± 1
SiO ₂ (%)	< 0,1
Fe ₂ O ₃ (%)	0,04 ±0,01
Sertlik	3 (Mohs)
pH	9,0 ±0,5

3.1.3 Sodyum Hidroksit

Deneysel çalışmada alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH %99 saflıkta, pelet halde olup Solvay İstanbul Kimya Tic. ve San. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Kullanılan NaOH'in kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Deneysel çalışmada kullanılan alkaninin kimyasal kompozisyonu

Kimyasal adı	Sodyum hidroksit, Kostik
Kimyasal formül	NaOH
pH	>13
Molekül ağırlığı	40.01 g/mol
Yoğunluk	2.13 g/cm ³
Erime noktası	318.4 °C (591 K)
Kaynama noktası	1.388 °C (1.663 K)

Deneysel çalışmalarda alkali-aktivatör olarak kullanılan pelet haldeki NaOH ile 10 mol konsantrasyona sahip çözelti hazırlanmıştır. 10 mol konsantrasyona sahip NaOH çözeltisinin hazırlığında, 400 gr pelet haldeki NaOH 1 lt kapasiteli cam bir beher içine konulduktan sonra beherin 1 lt çizgisine kadar saf su ekleyerek NaOH taneciklerinin su içerisinde çözülmesi sağlanmıştır. NaOH'in su içerisinde çözülmesi sırasında oldukça yüksek miktarda ısı açığa çıkmıştır. 15 °C'taki su NaOH katkısıyla yaklaşık 60 °C'a kadar çıkmaktadır.

3.1.4 Polipropilen lif

Deneysel çalışmalarda lifli kompozitlerin hazırlığında Dost Kimya Endüstri Hammadde San. ve Tic. Ltd. Şti.' den temin edilen kırpılmış polipropilen lifler kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan polipropilen liflerle ilgili teknik özellikler Çizelge 3.6' da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Polipropilen lifin teknik özellikleri

Saflık	%100 polipropilen
Tip	Homopolimer
Katkı	Yok
Görünüm	Doğal beyaz
Kesit	Dairesel
Fiber Uzunluğu	6 mm
Lif çapı	13 µm
Çekme mukavemeti	350 MPa
Özgül Yoğunluk	0.9 gr/cm ³
Yumuşama noktası	140 °C
Ergime noktası	165-170 °C

3.2 Yöntem

Deneysel çalışmalarda çeşitli oranlarda BT + MA karışımları yapılmıştır. Bu oranlar sırasıyla karışıma giren toz malzeme hacimce oranı dikkate alınarak 0.4:0.6, 0.6:0.4 ve 0.8:0.2 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma iki aşama halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada hamur karışımların standart kıvam için ihtiyacı olan çözelti miktarları belirlenmek üzere TS EN 196-3'e göre Vicat aleti ile standart kıvam ve priz deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada standart kıvam için gerekli olan çözelti miktarları işlenebilirliği de sağlamak amaçlı her bir karışım için belli miktarlarda artırılarak diğer deneylerin yapılacağı kompozit hamur numuneler üretilmiştir.

Her iki aşamada aynı karıştırma prosesi uygulanmıştır. Bu amaçla numune hazırlığında toz malzemeler homojen karışımı sağlamak için öncelikle 60 s süreyle

mikserde kuru halde karıştırılmış, karışım devam ederken 30 saniye içinde NaOH çözeltisi eklenerek ardından hamur 75 s daha 1400 devirde karıştırılmıştır. Hamur hale gelen karışım, mikser durdurulduktan sonra altüst yapılarak tekrar 2800 devirde 90 saniye daha karıştırılmıştır. Araştırma kapsamında yürütülmüş olan deneylerde kompozit hamur numunelerin ikinci aşama hazırlığında kullanılan karışım tasarımı Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. 10 μ inceliğinde öğütülmüş numuneleri Gi, 125 μ inceliğinde öğütülmüş numuneler Gk kodlaması ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 : 1 dm³ için karışım oranları

Kod	Hacimce malzeme oranları (%)				
	Çözelti	BT	MT	PP	Toplam (dm ³)
Gi1	0,50	0,20	0,30	0	1
Gi2	0,50	0,30	0,20	0	1
Gi3	0,50	0,40	0,10	0	1
GiL1	0,49	0,19	0,28	0,04	1
GiL2	0,50	0,28	0,18	0,04	1
GiL3	0,50	0,37	0,09	0,04	1
Gk1	0,47	0,21	0,32	0	1
Gk2	0,48	0,31	0,21	0	1
Gk3	0,50	0,40	0,10	0	1
GkL1	0,46	0,20	0,30	0,04	1
GkL2	0,46	0,30	0,20	0,04	1
GkL3	0,48	0,38	0,10	0,04	1

Üretilen Geopolimer Kompozit Hamurların (GKH) üzerinde taze halde kıvam, priz süresi ve yayılma deneyleri ile sertleşmiş halde su emme, kapiler su emme, basınç ve eğilme dayanımları deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yine sertleşmiş haldeki numuneler üzerinde yüksek sıcaklık direnci, MIP, SEM ve XRD analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla mekanik mukavemet deneyleri 4x4x16 cm ve 5x5x5 cm boyutlu pressiz kalıplarda numuneler hazırlanmış olup deneysel çalışmalarda toplam 2 farklı incelikte 6 farklı oranda 2 farklı geometride geopolimer hamur üretilmiştir.

3.2.1. Taze hamur deneyleri

3.2.1.1 Kıvam ve priz sürelerinin belirlenmesi

Çalışmada öncelikle kompozit hamur numunelerin kıvam ve priz sürelerini belirleyebilmek amacıyla TS EN 196-3'e göre taze hamur deneyleri Vicat aleti kullanılarak 22 ± 2 °C sıcaklık ve $\%40\pm 5$ bağıl neme sahip Bayburt Üniversitesi Yapı Malzemesi laboratuvarında yapılmıştır. Bu amaçla Çizelge 3.7'deki malzeme miktarları kullanılarak GKH'lar üretilmiştir. Standart kıvamı belirleyebilmek için 10M konsantrasyona sahip NaOH çözeltisi toz malzeme ağırlığının toplamına oranlanarak Vicat sondası yardımıyla belirlenmiştir. Bu amaçla deneyde sondanın ucu, hazırlanmış olan hamurunu üst yüzeyine dokunacak kadar indirilmiş ve serbest bırakılmıştır. Sonda, kendi ağırlığı ile hamurun içine girdikten sonra sondanın yarım dakika içinde cam levhaya 5 –7 mm mesafeye inişi izlenmiştir. Normal kıvamı sağlayabilmek için gerekli olan çözelti miktarını belirleyebilmek için bu işlem değişik miktarlardaki çözeltiler ile tekrar edilerek hamur için gereken çözelti miktarı belirlenmiştir.

Aynı zamanda kıvamı bulunan karışımlar üzerinde priz başlangıç ve bitiş süresi ölçümleri TS EN 196-3 'a göre Vicat cihazı kullanılarak tayin edilmiştir. Bu kapsamda priz sürelerini belirleyebilmek amacıyla standarda göre Vicat iğnesinin hamur tabanından 3-5 mm yukarıda olduğu süre priz başlangıcı olarak, hamura hiç batmadığı anı belirleyen süre ise priz bitiş olarak kaydedilmiştir.

3.2.1.2 Yayılma tablası deneyi

İşlenebilirlik kaybı ölçümlerinde, ASTM C230/C230M'de belirtilen yayılma tablası metodundan yararlanılmıştır. Deneylerde her bir hamur karışımı mikser ile karıştırmanın bittiği anda yayılma deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, yayılma tablasının konisi içerisine yerleştirilen GKH karışımları tablada 25 vuruş sonrasında yayılması sağlanan harcın 4 farklı yönden yayılma çapı değeri ölçülmüş ve bu ölçülen 4 değer aritmetik ortalaması, "mm" bazında o ana tekabül eden yayılma değeri olarak ifade edilmiştir.

3.2.2 Sertleşmiş hamur deneyleri

3.2.2.1 Basınç ve eğilme deneyleri

TS EN 196-1'e göre 40x40x160 mm boyutlu pressiz kalıplara dökülen numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri 20 ton kapasiteli basınç ve 2 ton kapasiteli eğilme presinde gerçekleştirilmiştir. Mekanik mukavemet deneyleri GKH numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 gün yaşları için gerçekleştirilmiş olup, 28 gün yaşındaki numuneler üzerinde 2 kanallı datalogger ile birim kısalma ölçümleri de kaydedilmiştir.

Deneysel çalışmada TS EN 196-1'e göre hazırlanan GKH karışımlar üç gözlü çelik kalıp bölmesinin her birinin içine Ek 3 Şekil A.3a da görüldüğü gibi kalıpların yarısına kadar doldurulmuştur. Ek 3 Şekil A.3b'de görüldüğü gibi sarsma tablasında 60 kere sarsma yaptıktan sonra geri kalan kısım doldurulmuş ve tekrar 60 kere sarsma yapıldıktan sonra üstleri düzeltilmiştir. Kalıplar etiketlenerek 20 ± 2 °C sıcaklık ve bağıl nemi $\%30 \pm 5$ olan laboratuvarında dökümden 24 ± 1 saat bekletildikten sonra çıkarılmıştır.

Çalışmada 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde öncelikle Ek 3 Şekil A.4'deki gibi eğilmede çekme dayanımı deneyi ile 2 eşit parçaya bölünmüştür. Bu iki eşit parça üzerinde ayrı ayrı basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Yükleme hızı 2,4 MPa/s belirlenmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde eğilmede çekme dayanımı deneyi için iki, basınç dayanımı deneyleri için 4 adet üretilen numunenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Numunelerin basınç dayanımları eşitlik (3.1) ve eğilmede çekme dayanımları eşitlik (3.2) kullanılarak bulunmuştur.

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad \text{Eşitlik (3.1)}$$

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Eşitlik (3.2)}$$

Burada:

- f_c : Basınç dayanımı
 P : Prestes kırılma anında okunan en büyük yük
 A_c : Numunenin basınç yükü uygulanan yüzey alanı
 σ_e : Eğilme dayanımı
 L : Mesnetler arası uzaklık
 b : En kesit kısa kenar uzunluğu
 d : En kesit uzun kenar uzunluğu

3.2.2.2 Su emme ve kapiler su emme deneyleri

Deneysel çalışmalar TS EN 1097'ye göre sertleşmiş GKH numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 gün yaşlarında gerçekleştirilmiştir. Buna göre sertleşmiş GKH numuneler öncelikle $24 \pm 0,5$ saat su içerisinde bekletildikten sonra üstü bir kuru bezle kurularak suya doygun haldeki ağırlığı tartılmıştır (M_1). Ardından özgül ağırlık sehpası deney seti kurularak numunelerin sudaki ağırlıkları ölçülmüştür (M_2). Değerler kaydedilerek numuneler kurutulmak üzere 105 ± 5 °C'de 24 saat bekletildikten sonra tekrar bu sefer kuru ağırlıkları tartılmıştır (M_0). Bu deney sonucunda su emme oranı Eşitlik (3.3), özgül ağırlık eşitlik (3.4) ve görünür porozite eşitlik (3.5) ile hesaplanmıştır:

$$W(\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad \text{Eşitlik (3.3)}$$

$$\delta = \frac{M_0}{M_0 - M_2} \quad \text{Eşitlik (3.4)}$$

$$P_g = \delta \times W \quad \text{Eşitlik (3.5)}$$

- W : Su emme oranı
 P_g : Görünür porozite
 δ : Özgül ağırlık
 M_0 : Etüv kurusu ağırlığı
 M_1 : Suyu doygun kuru yüzey ağırlığı
 M_2 : Su içerisindeki ağırlığı

Kapiler su emme deneyleri TS EN 1925 'e göre 7 gün süreyle dik halde $4 \times 4 \times 16$ cm boyutlu numuneler üzerinde Şekil 4.15'deki düzenek ile her bir gruptan iki adet

numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyle 7, 28 ve 90 gün yaşlarındaki sertleşmiş GKH numuneler üzerinde uygulanmıştır. Bu amaçla her bir seriye ait numuneler öncelikle 24 saat 105 ± 5 °C’de etüvde kurutulmuş alt yüzeylerinden su ile temas ettirilecek şekilde kılcal su emme deneyine tabi tutulmuştur. Kılcal yolla emilen su miktarları 5,10,15, 30,45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 1440, 2160, 2880, 3600, 4320, 5040, 5760, 6480 ve 7200 dakika zamanlarda numuneler kapiler su emme düzeneğinden alınıp suya değen kısımları kurulandıktan sonra ağırlıkları tartılarak kaydedilmiştir. Ölçülen su miktarlarından yola çıkılarak kılcallık katsayıları Eşitlik (3.6) ile hesaplanmıştır:

$$m = \frac{c}{100} x \sqrt{F} x \sqrt{t} \quad \text{Eşitlik (3.6)}$$

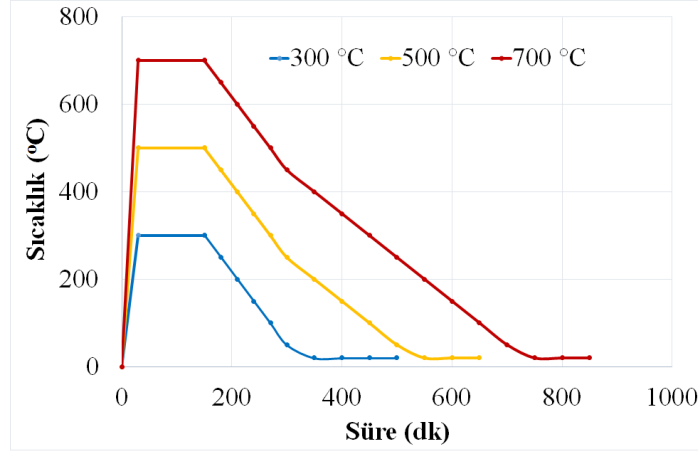
- c : Kılcal su emme katsayısı (cm^2/sn)
t : Ölçüm zaman aralığı (dk)
F : Kılcal su emme yüzey alanı (cm^2)
m : t zaman aralığında emilen su miktarı (cm^3)

3.2.2.3 Aşınma deneyi

Aşınma dayanımı deneyi 28 gün yaşındaki 150x150 mm alana sahip GKH numuneler üzerinde ASTM C 944-99’a göre gerçekleşmiştir. Bu amaçla numuneler 10 kg’lık ağırlık altında 200 devir/dakika hızında dönen aşındırıcılara 6 dakika boyunca maruz bırakılmıştır. Deney sonunda numunelerdeki kütlece ağırlık kayıpları ölçülmüştür.

3.2.2.4 Yüksek sıcaklık etkisi deneyi

Üretilen GKH numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında dayanım kayıplarını belirlemek için 28 gün yaşını tamamlamış numuneler üzerinde Proterm marka 1400 °C kapasiteli yüksek sıcaklık fırınında Şekil 3.10’daki proses uygulanarak ağırlık kayıpları ve basınç dayanım kayıpları ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisinde toplam 12 farklı numune 4 farklı sıcaklık için kullanılmıştır.



Şekil 3.10 : Yüksek sıcaklık uygulama prosesi

3.2.2.5 Cıva Porozimetri (MIP)

Cıva püskürtmeli porozimetre yöntemi, ıslak halde olmayan akışkan bir maddenin yalnızca kapiler kanallardan malzeme içine basınçla emdirilme esasına dayanan bir yöntemdir. Basınç ve kapiler çap arasındaki ilişki Washburn (Washburn, 1921) tarafından tanımlanmış olup Eşitlik 3.7 ile hesaplanmaktadır.

$$P = (-4\gamma\cos\theta)/d \quad (\text{Eşitlik 3.7})$$

P = Basınç;

γ = Akışkanın yüzey gerilimi;

θ = Akışkanın temas açısı;

d = Kapilerin çapı

Deneyde cıva beton veya harç malzemenin boşlukları içine basınçla zerk edilir. Boşlukların boyutsal dağılımı, her bir basınç artışında emdirilen cıvanın hacmi cinsinden belirlenir. Toplam porozite, emdirilen cıvanın toplam hacim miktarı cinsinden bulunur (Jennings vd., 2001). MIP yöntemi kolay uygulanabilir bir teknik olduğu için kullanım alanı geniştir. Ancak ölçülebilen boşluk boyutları 2nm ile 200µm arasında kalan boyutlarla sınırlıdır (Hearn vd., 1994). Bu teknikle, cıva çimento esaslı malzemelerde çok dar boşluklardan geçerek büyük boşluklara ulaşabilir. Böylece boşluklarla ilgili yüzeysel ve genel bilgiye ulaşılabilir. Boşluk çaplarındaki devamlılık

ise civanın malzemedden sızması ile belirlenir. Bu ap, efektif ya da eşik çapı olarak belirtilmiştir.

Civa pŐskürtmeli porozimetre deneyleri ODTŐ Eğitim ve Őlme biriminin Yüzey ve Gözenek Karakterizasyon Laboratuvarında Quantachrome Corporation Marka Poremaster 60 modeli (Ek 3 Şekil A.5) cihazında yapılmıştır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bölüm 3'te bahsedilen deneysel çalışmalara ait 10M NaOH çözeltisi kullanılarak üretilen toz malzeme hacminin yüzde olarak BT:MA oranı 40:60, 60:40 ve 80:20 olan 125 μ ve 10 μ incelikteki toz malzeme ile PP lifsiz ve PP lifli numunelerinin deney sonuçları alt başlıklar halinde sunulmuştur. Buna göre GKH'lerin taze ve sertleşmiş durumlarına ait deneysel sonuçlarda fiziksel, mekanik, termik, kimyasal ve teknolojik özelliklerine ait sonuçlar ayrı ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

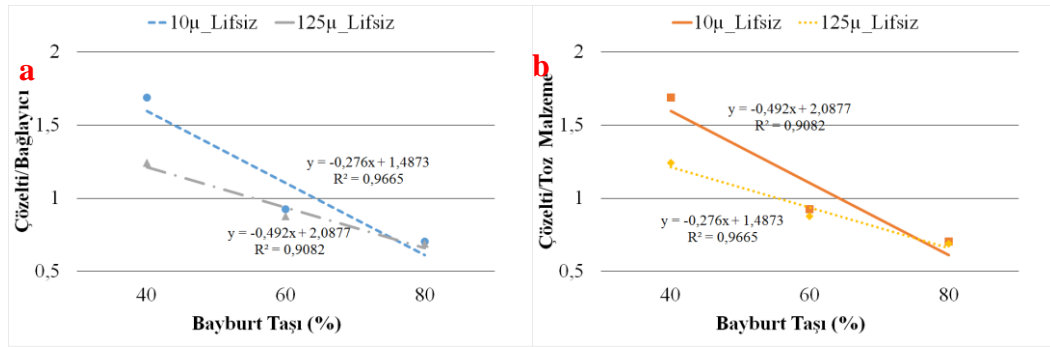
Deneysel çalışmalarda üretilen numunelerin kompozit yapısı içinde Bayburt Taşı puzolanik özelliğinden dolayı bağlayıcı özelliğe, mermer dolgu amaçlı ve alkali-aktivatör olarak kullanılan NaOH çözücü ve jelleştirici olarak yer almaktadır.

4.1. Fiziksel özelliklere ait deney sonuçları

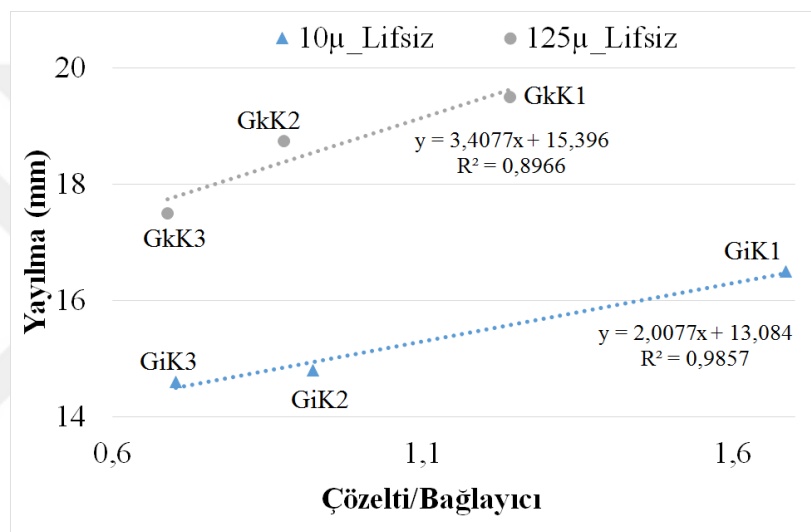
Taze haldeki GKH'lerin kıvam, priz ve yayılma deney sonuçları bu aşamada açıklanmıştır.

4.1.1. Taze GKH'lerin standart kıvam ve priz süreleri deney sonuçları

Taze haldeki GKH'lerin standart kıvam ve priz süreleri deney sonuçları Çizelge 4.1'de, iki farklı inceliğe sahip taze hamurların standart kıvam karşılaştırması için korelasyon eğrileri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de, priz başlangıç ve bitiş süreleri ile ilgili histogram grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir. Deneysel çalışmalardan örnek görüntüler Şekil 4.3'da gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : a) BT oranıyla ç/b oranı korelasyon eğrisi b) BT oranıyla ç/t oranı korelasyon eğrisi



Şekil 4.2 : Yayılma ve ç/b korelasyon eğrisi

Standart kıvamı yakalamak için incelik arttıkça, ç/b oranı BT ile birlikte arttığı görülmüştür. Bununla birlikte aynı ç/b oranıyla üretilen hamurların yayılma değerlerinin incelik arttıkça azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi BT'nin kohezif yapısıdır. İşlenebilirliği artırmak için incelik ve BT oranı arttıkça daha fazla çözeltiliye ihtiyaç duyulduğu görülmüştür.



Şekil 4.3 : a) Vicat cihazında kıvam belirlenmesi b) Priz başlangıcı ve priz sonu belirlenmesi

Çizelge 4.1 : GKH'lerin standart kıvam ve priz süreleri deney sonuçları

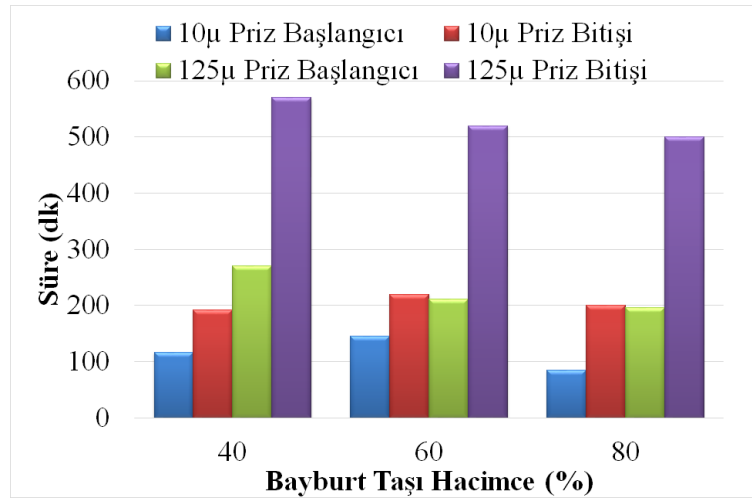
No	İncelik (µm)	Özgül yüzey (cm ² /g)	Hacimce (%)			Çözelti ihtiyacı		Priz süresi (dk)	
			BT	MA	Lif	ç/t	ç/b	Başlama	Bitiş
GiH1	10	24211	40	60	0	0,505	1,686	115	190
GiH2		23010	60	40	0	0,527	0,923	145	220
GiH3		21808	80	20	0	0,548	0,702	85	200
GkH1	125	5221	40	60	0	0,463	1,241	271	571
GkH2		6509	60	40	0	0,508	0,876	211	520
GkH3		7797	80	20	0	0,539	0,689	196	500

*ç: Çözelti, t: Toplam toz malzeme miktarı, b: (Bağlayıcı) Bayburt taşı

Çizelge 4.1'deki sonuçlara göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Taze kompozit hamurlar arasında en az çözelti ihtiyacı 125 µm inceliğe sahip GkH1'de %46,3 oranında, en yüksek çözelti ihtiyacı 10 µm inceliğe sahip GiH3'de %54,8 oranında olmuştur. 125 µm inceliğe sahip karışımlarda GkH1'e göre BT oranı %60 ve %80 için ç/t oranı sırasıyla %4,5 ve %7,3 artarken, 10 µm inceliğe sahip karışımlarda GiH1'e göre BT %60 ve %80 için ç/t oranı sırasıyla oranı %2,2 ve %4,3 artmıştır. Malzemedeki incelik azaldıkça BT oranına bağlı çözelti ihtiyacı diğer inceliğe göre daha az azalmıştır. Bu davranış Şekil 4.1'de daha net görülmektedir. Çözelti ihtiyacındaki BT oranına bağlı artışın sebebi, BT'nin poroz ve zeolitik yapısından kaynaklanan su emme özelliğinin fazla olduğu düşünülmüştür.

- GiH'lerin çözeltili ihtiyacının GkH'lerle hemen hemen aynı olduğu söylenebilir. İnceliklerdeki ve özgül yüzeylerdeki artışlar dikkate alındığında kaba ve ince karışımlarda yaklaşık 3-4 kat özgül yüzey farkı varken bu oranın etkisi çözeltiliye aynı oranda yansımamıştır. Bu durumda malzemedeki çözeltili ihtiyacının özgül yüzeyle bir ilişkisinin olmadığı söylenebilir. GiH1-GkH1, GiH2-GkH2 ve GiH3-GkH3 karışımlarında inceliğin çözeltili oranındaki etkisi kabaya göre sırasıyla %4,2, %1,9 ve %0,9 oranlarında karışımlardaki BT'nin inceliğinin artmasından dolayı artmıştır. Ancak inceliğe bağlı BT oranındaki artışın çözeltili oranını olumlu etkilediği de belirtilebilir.
- Karışımlarda 10 μ inceliğindeki hamurlarda özgül yüzey değerleri BT'nin özgül yüzey değerlerinin MA'ya göre %29,2 daha az olmasından dolayı BT oranı arttıkça özgül yüzey azalmıştır.
- Karışımlarda 125 μ inceliğindeki hamurlarda ise özgül yüzey değerlerinin BT oranı ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi de BT'nin özgül yüzey değerlerinin MA'ya göre %70,9 daha fazla olmasıdır.
- Şekil 4.4'de görüldüğü gibi tüm karışımlar arasında priz başlangıcı en erken 10 μ incelikteki numunelerde %80 BT'li hamurlarda olmuştur. Priz bitişi en geç 125 μ incelikteki numunelerde %40 BT'li hamurlarda olmuştur. Priz süreleri bakımından TS EN 197-1'de belirtilen "çimentoların priz başlangıcı 1 saatten erken, priz bitişi 10 saatten geç olamaz" davranışını desteklemiştir. Bu yaklaşımla işlenebilirlik sınırlamalarına uyumlu bir davranış gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 : BT 'nin priz başlangıç ve bitiş süreleri

Deneysel çalışmaların genel sonuçlarından biri standart kıvamı yakalamak için BT oranı arttıkça kullanılan çözelti ve buna bağlı olarak NaOH miktarı da artmasıdır. Dolayısıyla reaksiyona giren bağlayıcı oranı arttığı için priz başlangıç süresi ve bitiş süreleri BT oranının artışıyla azalmıştır. 10 μ inceliğindeki BT'li numunelerde %60 BT oranına kadar priz başlangıç ve bitiş süresi artarken %80 BT oranında azalma göstermiştir. Bu deneyin sonuçları karıştırma süresi, ortam sıcaklığı, karışımın homojenliği gibi parametrelere bağlıdır. Bu yüzden bu değerlerin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bunun nedeni bağlayıcı olarak kullanılan BT taşının oranının fazla olması gösterilebilir.

4.1.2. Yayılma deneyi sonuçları

Geopolimer kompozit taze hamurlar üzerinde, BT'nin işlenebilirliğe etkisini ölçmek amacıyla yapılmış olan yayılma deneyi sonuçları Çizelge 4.2, Şekil 4.5'de verilmiştir. Kıvam deneyi ile yayılma deneyi sonuçları Şekil 4.2 'de korelasyon eğrisi olarak verilmiştir. Deneysel çalışmalardan örnek görüntüler Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Yayılma deneyi sonuçlarına göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

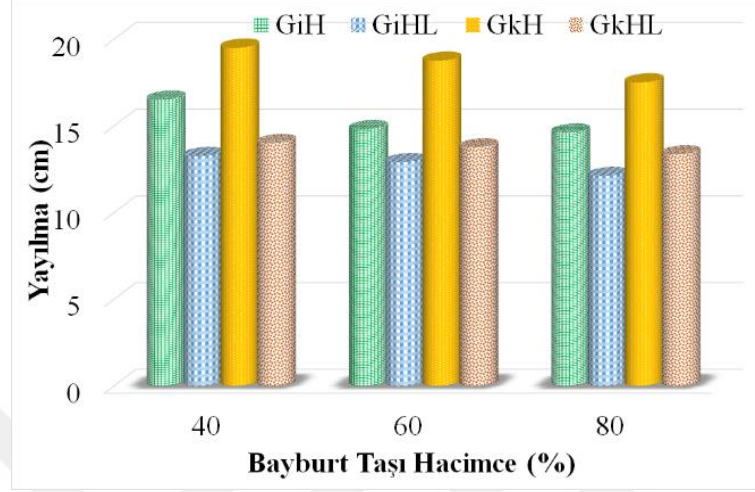
- İşlenebilirliği en yüksek olan GkH1 nolu numunelerde olduğu görülmüştür. BT oranı ve incelik arttıkça bağlayıcılık özelliği sağlayan BT'nin kohezif özelliği ortaya çıkmıştır. İşlenebilirliği en az olan ise GkHL3 numunelerinde görülmüştür. BT oranı arttıkça artan kohezifliğin yanı sıra liflerin tutuculuğunun da etkisiyle işlenebilirlikte büyük kayıplar meydana gelmiştir. Topçu vd. lifin ve bağlayıcının işlenebilirlik ve çökmeye etkilerini incelediklerinde lif oranı arttıkça işlenebilirlik ve kıvamın düştüğünü; bağlayıcı oranı arttıkça işlenebilirliğin iyileştiğini belirtmişlerdir.(Topçu, 2016)

Çizelge 4.2 : Yayılma deney sonuçları

Kod	Hacimce PP Lif (%)	BT (%)	ç/b	MA (%)	Yayılma (cm)
GiH1	%0	40	1,686	60	16,50
GiH2		60	0,923	40	14,80
GiH3		80	0,702	20	14,60
GiHL1	%4	40	1,686	60	13,25
GiHL2		60	0,923	40	12,90
GiHL3		80	0,702	20	12,10
GkH1	%0	40	1,241	60	19,50
GkH2		60	0,876	40	18,75
GkH3		80	0,689	20	17,50
GkHL1	%4	40	1,241	60	14,00
GkHL2		60	0,876	40	13,75
GkHL3		80	0,689	20	13,35

- Kompozit hamurlar içinde en yüksek işlenebilirliğe sahip olan tasarım 125 µ %40 BT içeren karışımlar olmuştur. Yayılma deneyinin sonucunda yaklaşık 20 cm yayılma göstermiştir. Lif katkısı genel olarak işlenebilirliğe olumsuz etki meydana getirirken, incelik arttıkça yayılma çapı azalmış ve bununla birlikte işlenebilirlik azalmıştır.
- GiH3'ün ç/b oranı GiH1'e ve GiH2'ye göre sırasıyla yaklaşık %58 ve %45 oranında azalırken, GiH1'in ve GiH2'nin yayılma değerleri GiH3'e göre sırasıyla %11 ve %10 oranında azalmıştır.
- GkH3'ün ç/b oranı GkH1'e ve GkH2'ye göre sırasıyla yaklaşık %45 ve %30 oranında azalırken, GkH1'in ve GkH2'nin yayılma değerleri GkH3'e göre sırasıyla %2 ve %5 oranında azalmıştır.
- GiH2'lerin ç/b oranı GiH3'lerin oranına göre %31,15 daha fazla çıkarken yayılma değerleri neredeyse aynı çıkmıştır. Bu değerler sonucunda ç/b oranı arttıkça yayılma değerlerinde artış gözlemlenirken, BT oranının da artışıyla kohezif özellik arttığından yayılma değerlerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir.
- GiH1 numuneleri GkH1 numunelerine göre %35,86 daha fazla ç/b oranına sahipken, GkH1 numunelerinin yayılma değerleri %18,18 daha fazla çıkmıştır,
- GiH2 numuneleri GkH2 numunelerine göre %5,36 daha fazla ç/b oranına sahipken, GkH2 numunelerinin yayılma değerleri %26,69 daha fazla çıkmıştır,

- GiH3 numuneleri GkH3 numunelerine göre %1,89 daha fazla ϕ/b oranına sahipken, GkH3 numunelerinin yayılma değerleri %19,86 daha fazla çıkmıştır,



Şekil 4.5 : Taze hamurda yayılma



Şekil 4.6 : a) Lifsiz numunelerde yayılma deneyinin son durumu b) Lifli numunelerde yayılma deneyinin son durumu

Bu deneyler sonucunda ϕ/b ile yayılma değerlerinin doğru orantılı bir gelişim sağladığı belirlenmiştir. Daha ince öğütölmüş olan BT'nin aktivesindeki artış daha yüksek kohezif yüzey oluşmasına sebep olmuştur. Bundan dolayı işlenebilirlik BT oranı arttıkça aynı çözelti ile kaba malzemeye göre önemli derecede azalmıştır.

- GiHL3 numunelerine göre GiHL2 ve GiHL1 numunelerinin yayılma değerleri sırasıyla %9,5 ve %6,61 daha fazla olduğu belirlenmiştir,
- GkHL3 numunelerine göre GkHL2 ve GkHL1 numuneleri sırasıyla %4,87 ve %3 daha fazla çıkmıştır,

- GiH1 numuneleri GiHL1 numunelerine göre yayılma değeri %24,53 oranında artış göstermiştir,
- GkH1 numuneleri GkHL1 numunelerine göre ise yayılma değeri %39,29 oranında artmıştır,
- GiH2 numuneleri GiHL2 numunelerine göre yayılma değeri %14,73 oranında artış gözlemlenmiştir,
- GkH2 numuneleri GkHL2 numunelerine göre ise yayılma değeri %36,36 oranında artmıştır,
- GiH3 numuneleri GiHL3 numunelerine göre yayılma değeri %20,66 oranında artmıştır,
- GkH3 numuneleri GkHL3 numunelerine göre ise yayılma değeri %31,09 oranında artmıştır.

Deneyle sonucunda lif katkısının işlenebilirliğe önemli oranda olumsuz etki gösterdiği belirlenmiştir. Yine BT oranındaki artışın işlenebilirliği olumsuz etkilediği söylenebilir. Bundan dolayı lifli numunelerde yayılma azalırken, BT oranı arttıkça da yapışkanlık ve işlenebilirlik arttığından yayılma değerlerinde de azalma gözlemlenmiştir. Malzeme üretiminde incelik artışı çözelti ihtiyacını artırmaktadır. Aynı zamanda BT oranındaki artış incelik artışı kadar anlamlı sonuçlar üretmemiştir. Aynı işlenebilirliği sağlamak üzere BT oranındaki artışa ve incelik artışına bağımlı çözelti ihtiyacı %60 – 80 BT kullanımı için uygun görülmüştür.

4.1.3. Su emme, kapiler su emme deneyleri ile civa püskürtmeli porozimetre (MIP) deney sonuçları ve değerlendirme

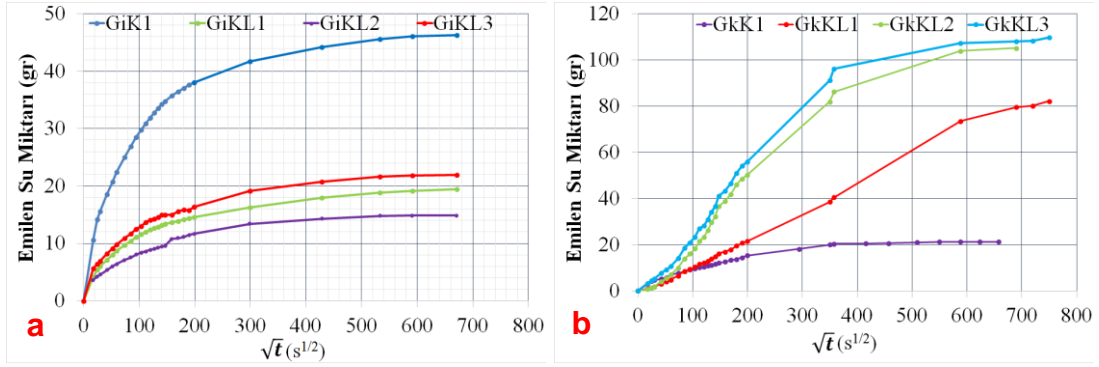
Deneyle numunelerinin 7, 28 ve 90 gün sonrasında elde edilen kapiler su emme deney sonuçları Çizelge 4.3'te 10 mikron inceliğe sahip kompozitler ile Çizelge 4.4'de 125 mikron inceliğe sahip kompozitler için verilmiştir. Şekil 4.7'de verilen grafikler yardımıyla kapiler su emme katsayıları eşitlik 3.6'ya göre belirlenmiştir. Cıva porozimetre (MIP) analiz sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'ün içerisinde verilmiştir. MIP deneyi sonuçları Şekil 4.8 – 4.13 arasında 7, 28 ve 90 gün yaşıdaki numuneler için grafik haline getirilmiştir. Grafikte kümülatif mikro boşlukların dağılımları eğrisel olarak verilmiştir. Şekillerde verilen verilere göre yorumlar yapılmıştır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.13'de görüldüğü gibi 10µ incelikteki lifli ve liffsiz

numunelerinin MIP grafikleri üzerinde kayda değer bir fark görülmediği için 125µ lifli numunelerinin MIP deneyleri yaptırılmamıştır. 7 günlük GkK3 numunesi ve 28-90 günlük lifsiz numunelerin tamamı deney sırasında parçalandığı için KSEK belirlenememiştir.

Deneysel çalışmalar sırasında GiK2 ve GiK3 numunelerinin 7, 28 ve 90 gün sonucunda deney sırasında parçalandığı için su emme ve kapiler su emme deneyleri yapılamamıştır. GiK1 numunesinin ise 28 ve 90 günlük kür süresi sonrasında kapiler su emme deneyi sırasında parçalandığı için sonuçları alınamamıştır. Parçalanmış numunelere ait görüntüler Şekil 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.3 : 10µ numunelerin su emme, kapiler su emme ve MIP analiz sonuçları

Yaş (gün)	No	BT (%)	MA (%)	Lif (%)	Porozite (MIP) (%)	Su emme (%)	Görünür Porozite (%)	Görünür BHA (g/cm ³)	Kuru BHA (g/cm ³)	Kapiler Su Emme Katsayısı (KSEK)	Ort. KSEK
7	GiK1a	40	60	0	2,55	42,81	53,12	1,87	1,34	10,37	9,98
	GiK1b	40	60	0						9,58	
	GiK2a	60	40	0	3,92	-	-	-	-	-	-
	GiK2b	60	40	0							
	GiK3a	80	20	0	9,60	-	-	-	-	-	-
	GiK3b	80	20	0							
	GiKL1a	40	60	4	3,34	22,80	33,61	1,85	1,51	4,32	4,46
	GiKL1b	40	60	4						4,61	
	GiKL2a	60	40	4	5,65	28,26	38,58	1,87	1,46	3,59	3,10
	GiKL2b	60	40	4						2,62	
	GiKL3a	80	20	4	5,57	34,30	43,53	1,74	1,30	4,24	4,40
	GiKL3b	80	20	4						4,55	
28	GiK1	40	60	0	0,56	29,89	42,04	1,85	1,43	-	-
	GiK2	60	40	0	2,45	-	-	-	-	-	-
	GiK3	80	20	0	5,13	-	-	-	-	-	-
	GiKL1	40	60	4	2,52	28,54	40,24	1,86	1,45	7,45	7,45
	GiKL2	60	40	4	4,44	29,91	40,45	1,85	1,42	5,15	5,15
	GiKL3	80	20	4	4,22	34,01	42,66	1,65	1,23	5,26	5,26
90	GiK1	40	60	0	2,99	26,38	37,45	1,83	1,45	-	-
	GiK2	60	40	0	0,28	-	-	-	-	-	-
	GiK3	80	20	0	11,20	-	-	-	-	-	-
	GiKL1	40	60	4	-	27,67	38,48	1,86	1,46	13,31	13,31
	GiKL2	60	40	4	-	27,51	36,73	1,76	1,38	12,18	12,18
	GiKL3	80	20	4	-	29,68	39,05	1,67	1,29	13,88	13,88



Şekil 4.7 : a) 10µ numunelerin kapiler su emme katsayısının belirlenmesi b) 125µ numunelerin kapiler su emme katsayısının belirlenmesi

10 µ inceliğinde numunelere yapılan deney sonuçlarına göre şu yorumlar yapılabilir;

- 90 gün sonundaki numuneler incelendiğinde kuru birim hacim ağırlık değerleri 1.29 ile 1.46 arasında değişmektedir. En düşük kuru birim hacim ağırlık değerleri %80 BT içerikli numunelerde elde edilmiştir. Bu değer beton ve tuğlanın birim hacim ağırlık değerleriyle karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu görülmektedir. Lifsiz numunelerdeki parçalanmadan dolayı kuru birim hacim ağırlık sadece %40 BT içerikli numunelerde ölçülmüştür.
- 90 gün sonundaki numunelerin su emme yüzdeleri karşılaştırıldığında en düşük su emme değeri lifsiz numunelerde %26.38 olarak %40 BT içerikli numunelerden alınmıştır. Lifli numunelerde de en düşük su emme değeri %40 BT içerikli numunelerde %27.67 olarak kaydedilmiştir. BT oranı arttıkça su emme değerinin artarak %80 BT içerikli numunelerde %29.68'e ulaştığı görülmüştür.
- 90 gün sonunda numunelerin görünür porozite değerlerinin %36.73 ile %39.05 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük görünür porozite değerine %60 BT içerikli lifli numunelerde ulaşılırken, en yüksek görünür porozite değerine ise %80 BT içerikli lifli numunede ulaşılmıştır.
- 90 gün sonunda kapiler su emme katsayıları diğer yaşlara göre arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek kapiler su emme katsayılarına 90 gün sonunda ulaşılırken bu değerler 12.18 ile 13.88 arasında değişmektedir. En yüksek

değere %80 BT içerikli lifli numunede ulaşılrken, en düşük kapiler su emme katsayısına %60 BT içerikli numunelerde ulaşılmıştır.

- Çizelge 4.3'e göre GiK1 nolu numunelere göre 7 günlük MIP sonucu GiK2 ve GiK3 nolu numuneler de %53,73 ve %276,47 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre GiKL1 nolu numunelere göre 7 günlük MIP sonucu GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler de %69,16 ve %66,77 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre 7 günlük MIP deneyleri sonucunda; GiK1 numuneleri GiKL1 numunelerine %30,98 oranında artış, GiK2 numuneleri GiKL2 numunelerine göre %44,13 oranında artma, GiK3 numuneleri ise GiKL3 numunelerine göre %41,98 oranında azalma gözlemlenmiştir.
- Çizelge 4.3'e göre GiK1 nolu numunelere göre 28 günlük MIP sonucu GiK2 ve GiK3 nolu numuneler de %337,5 ve %816,07 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre 90 gün sonucunda lifsiz numuneler üzerindeki MIP deneyi sonucunda GiK2 nolu numuneye göre GiK1 nolu numune %965,85 fazla çıkarken, GiK1 nolu numuneye göre GiK3 nolu numune %274,58 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre 7 günlük su emme değerleri sonucunda; GiKL1 numunelerine göre GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler sırasıyla %23,95 ve %50,44 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre 28 günlük su emme değerleri sonucunda; GiKL1 numunelerine göre GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler sırasıyla %4,80 ve %19,17 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre 90 günlük su emme değerleri sonucunda; GiKL1 numunelerine göre GiKL2 numuneleri nerdeyse aynı çıkarken, GiKL3 nolu numuneler %7,26 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre 7 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GiKL1 numunelerine göre GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler sırasıyla %14,79 ve %29,52 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre 28 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GiKL1 numunelerine göre GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler sırasıyla %0,52 ve %6,01 daha fazla çıkmıştır,

- Çizelge 4.3'e göre 90 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GiKL1 numunelerine göre GiKL2 numuneleri %4,55 daha az çıkarken, GiKL3 nolu numuneler %7,26 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3'e göre GiKL1 nolu numunelere göre 28 günlük MIP sonucu GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler de %76,19 ve %67,46 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.3.'e göre 28 günlük MIP deneyleri sonucunda; GiK1 numuneleri GiKL1 numunelerine %350 oranında azalma, GiK2 numuneleri GiKL2 numunelerine göre %81,22 oranında azalış, GiK3 numuneleri ise GiKL3 numunelerine göre %17,74 oranında artış göstermiştir.

Çizelge 4.4 : 125 μ numunelerin su emme, kapiler su emme ve MIP analiz sonuçları

Yaş (gün)	No	BT (%)	MA (%)	Lif (%)	Porozite (MIP) (%)	Su emme (%)	Görünür Porozite (%)	Görünür BHA (g/cm ³)	Kuru BHA (g/cm ³)	Kapiler Su Emme Katsayısı (KSEK)
7	GkK1	40	60	0	3,29	19,45	24,39	1,90	1,59	3,23
	GkK2	60	40	0	0,48	25,26	28,66	1,77	1,41	11,48
	GkK3	80	20	0	5,69	32,56	34,57	1,78	1,34	-
	GkKL1	40	60	4	-	24,15	28,17	1,85	1,49	8,26
	GkKL2	60	40	4	-	30,32	33,49	1,83	1,40	9,68
	GkKL3	80	20	4	-	33,82	40,59	1,72	1,29	11,08
28	GkK1	40	60	0	4,84	31,47	41,55	1,72	1,31	-
	GkK2	60	40	0	3,42	32,82	41,85	1,78	1,34	-
	GkK3	80	20	0	6,37	29,14	38,32	1,71	1,32	-
	GkKL1	40	60	4	-	29,40	38,45	1,83	1,41	5,75
	GkKL2	60	40	4	-	33,09	40,59	1,72	1,29	12,00
	GkKL3	80	20	4	-	37,82	43,35	1,66	1,21	13,35
90	GkK1	40	60	0	10,00	19,36	28,10	1,85	1,55	-
	GkK2	60	40	0	9,73	-	-	-	-	-
	GkK3	80	20	0	9,72	-	-	-	-	-
	GkKL1	40	60	4	-	19,51	27,04	1,77	1,48	8,30
	GkKL2	60	40	4	-	21,41	27,77	1,72	1,42	13,25
	GkKL3	80	20	4	-	26,44	30,40	1,61	1,27	15,25

125 μ inceliğinde BT ile üretilen numuneler üzerinde yapılan deneyi sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir;

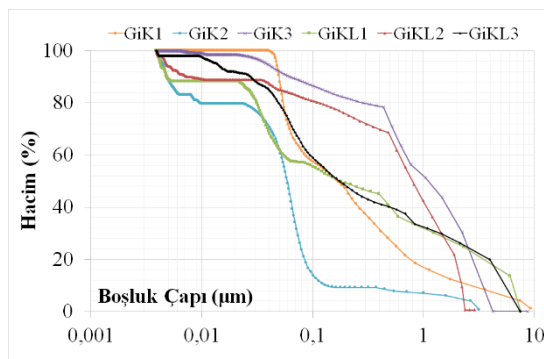
- 90 gün sonundaki numuneler incelendiğinde kuru birim hacim ağırlık değerleri 1.61 ile 1.85 arasında değişmektedir. En düşük kuru birim hacim ağırlık değerleri %80 BT içerikli numunelerde elde edilmiştir. Bu değer beton ve tuğlanın birim hacim ağırlık değerleriyle karşılaştırıldığında düşük olduğu görülmektedir. Lifsiz numunelerdeki parçalanmadan dolayı kuru birim hacim ağırlık sadece %40 BT içerikli numunelerde ölçülmüştür. 10µ numunelerle kıyaslandığında ise 125µ numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları oldukça yüksek çıktığı görülmüştür.
- 90 gün sonundaki numunelerin su emme yüzdeleri karşılaştırıldığında en düşük su emme değeri lifsiz numunelerde %19.36 olarak %40 BT içerikli numunelerden alınmıştır. Lifli numunelerde de en düşük su emme değeri %40 BT içerikli numunelerde %19.51 olarak kaydedilmiştir. BT oranı arttıkça su emme değerinin artarak %80 BT içerikli numunelerde %26.44'e ulaştığı görülmüştür. 10µ numunelerle karşılaştırıldığında su emme yüzdelerinin daha düşük değerlerde çıktığı görülmüştür.
- 90 gün sonunda numunelerin görünür porozite değerlerinin %27.04 ile %30.40 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük görünür porozite değerine %40 BT içerikli lifli numunelerde ulaşılrken, en yüksek görünür porozite değerine ise %80 BT içerikli lifli numunede ulaşılmıştır.
- 90 gün sonunda kapiler su emme katsayıları diğer yaşlara göre arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek kapiler su emme katsayılarına 90 gün sonunda ulaşılrken bu değerler 8.30 ile 15.25 arasında değişmektedir. En yüksek değere %80 BT içerikli lifli numunede ulaşılrken, en düşük kapiler su emme katsayısına %40 BT içerikli numunelerde ulaşılmıştır.
- Çizelge 4.4.'e göre 7 günlük deneyler sonucunda GkK2 nolu numunelerine göre MIP sonucu GkK1 ve GkK3 nolu numuneler de %585,42 ve %1085,42 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4.'e göre 28 günlük deneyler sonucunda GkK2 nolu numunelerine göre MIP sonucu GkK1 ve GkK3 nolu numuneler de %41,52 ve %86,26 daha fazla çıkmıştır,

- Çizelge 4.4.'e göre 90 günlük deneyler sonucunda GkK2 nolu numunelerine göre MIP sonucu GkK1 %2,78 daha fazla çıkarken GkK3 nolu numuneler %0,10 daha az çıkmıştır.
- Çizelge 4.4'e göre 7 günlük su emme değerleri sonucunda; GkK1 numunelerine göre GkK2 ve GkK3 nolu numuneler sırasıyla %29,87 ve %67,40 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 7 günlük su emme değerleri sonucunda; GkKL1 numunelerine göre GkKL2 ve GkKL3 nolu numuneler sırasıyla %25,55 ve %40,04 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 28 günlük su emme değerleri sonucunda; GkK1 numunelerine göre GkK2 ve GkK3 nolu numuneler sırasıyla %4,80 ve %19,17 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 28 günlük su emme değerleri sonucunda; GkKL1 numunelerine göre GkKL2 nolu numuneler %4,29 fazla çıkarken, GkKL3 nolu numuneler %7,40 daha az çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 90 günlük su emme değerleri sonucunda; GkKL1 numunelerine göre GkKL2 ve GkKL3 nolu numuneler sırasıyla %9,74 ve %3,55 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 7 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GkK1 numunelerine göre GkK2 ve GkK3 nolu numuneler sırasıyla %17,50 ve %41,74 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 7 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GkKL1 numunelerine göre GkKL2 ve GkKL3 nolu numuneler sırasıyla %18,89 ve %44,09 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 28 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GkK1 numunelerine göre GkK2 nolu numuneler %0,72 daha fazla çıkarken, GkK3 %7,77 daha az çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 28 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GkKL1 numunelerine göre GkKL2 ve GkKL3 nolu numuneler sırasıyla %5,57 ve %12,74 daha fazla çıkmıştır,
- Çizelge 4.4'e göre 90 günlük görünür porozite değerleri sonucunda; GkKL1 numunelerine göre GkKL2 ve GkKL3 nolu numuneler sırasıyla %2,70 ve %12,43 daha fazla çıkmıştır,

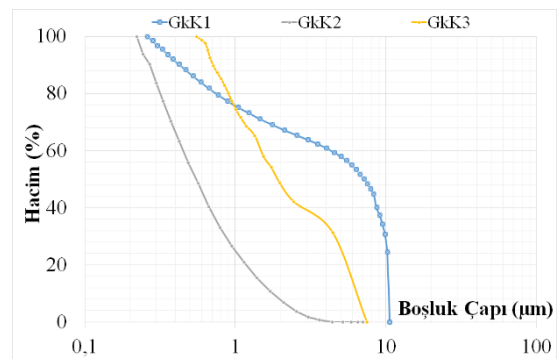
- Yapılan kapiler su emme deneyleri sonucunda 125 μ BT kullanılarak üretilen numunelerin kapiler su emme katsayısı BT oranı arttıkça artmıştır. Bayburt taşının poroz ve mineralojik yapısından kaynaklanan bu artış, %80 BT oranında numunenin parçalanmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir.
- Lifsiz GiK'lerde yapılan su emme ve kapiler su emme deneyi sonucunda BT oranı arttıkça su emme oranının ve KSEK'in arttığı görülmüştür. %40 BT oranından sonra numunelerin su emme deneyinde su içerisinde parçalandığını (Şekil 4.17b), kapiler su emme deneyinde ise etüv içerisinde kurutulduktan sonra kılcal çatlak oluşumu (Şekil 4.17a) gözlemlenmiştir.
- Lifli GiKL ve GkKL'lerde BT oranı arttıkça su emme ve KSEK'in arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak BT'nin poroz yapısı ve su emme oranının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 veriler incelendiğinde MIP toplam porozite değerleri 125 μ numunelerde zamanla artarken, 10 μ numunelerde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. MIP deneyleri küçük bir numune üzerinde ve her deney farklı bir numune üzerinde yapıldığından değerler arasında sapmalar meydana gelmiştir.

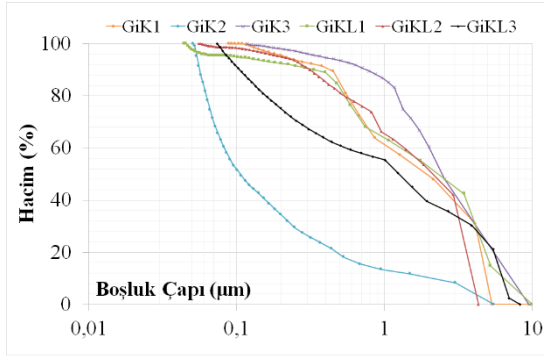
Kapiler su emme ve su emme deneyleri sonucunda numunelerin suya karşı dayanıksız olduğu gözlemlenmiştir. BT oranı arttıkça bu dayanıksızlığında arttığı belirlenmiştir. Bu yüzden lifsiz numunelerde kapiler su emme katsayısı belirlenememiştir. Numune yaşı arttıkça kapiler gözeneklerin artarak kapiler su emme katsayısını artırdığı ortaya çıkmıştır.



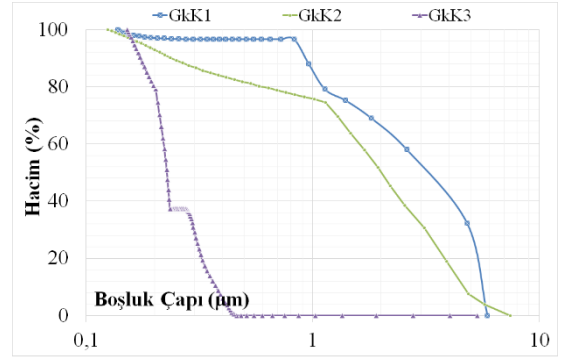
Şekil 4.8 : 7 gün 10 μ MIP sonuçları



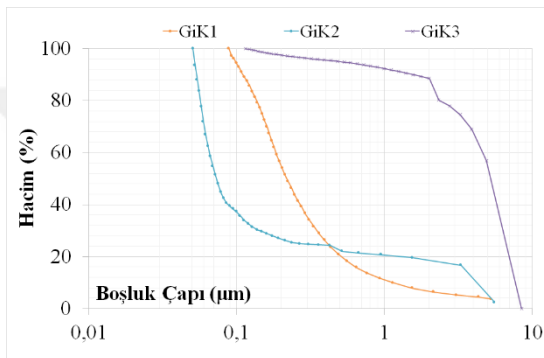
Şekil 4.9 : 7 gün 125 μ MIP sonuçları



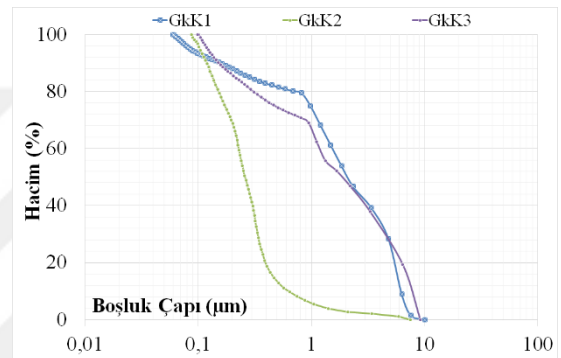
Şekil 4.10 : 28 gün 10µ MIP sonuçları



Şekil 4.11 : 28 gün 125µ MIP sonuçları



Şekil 4.12 : 90 gün 10µ MIP sonuçları



Şekil 4.13 : 90 gün 125µ MIP sonuçları

Kapiler su emme ve görünür porozite ile MIP ve su emme sonuçlarının korelasyon eğrileri çizildiğinde bu veriler arasında herhangi bir korelasyona ulaşılamamıştır. Sonuç göz önüne alındığında bu değerler arasında herhangi bir bağıntı oluşmadığı yorumu yapılabilmektedir.

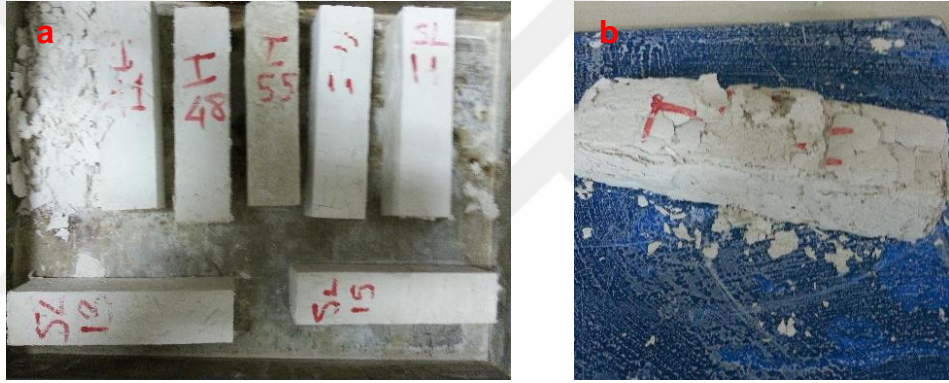


Şekil 4.14 : 7 ve 28 günlük su emme deneyi

Su emme deneylerinde Şekil 4.14 – 4.16’da da görüldüğü gibi numuneler üzerinde çeşitli boyutlarda şişkinlikler görülmektedir. Bu şişkinlikler uzun süre suya maruz kalan numuneler üzerinde ve hatta kapiler su emme numunelerinde çok şiddetli etkilere sebep olmuştur. Bu etkilerden en önemlisi malzemelerin parçalanarak dayanımlarını yitirmeleri olarak söylenebilir. Bunun temel sebeplerinden biri Na^+ iyonunun boşluklar içindeki suyla sulanarak kararlı molekül yapılarından ayrılmaları ile açıklanmaktadır. Bunun sebebi olarak pH gösterilmektedir. Ancak halen temel mekanizması anlaşılamamıştır.



Şekil 4.15 : Kapiler su emme deneyi



Şekil 4.16 : a) Kapiler su emme için etüv sonrası görüntü b) Su emme için suda bekletilen numune

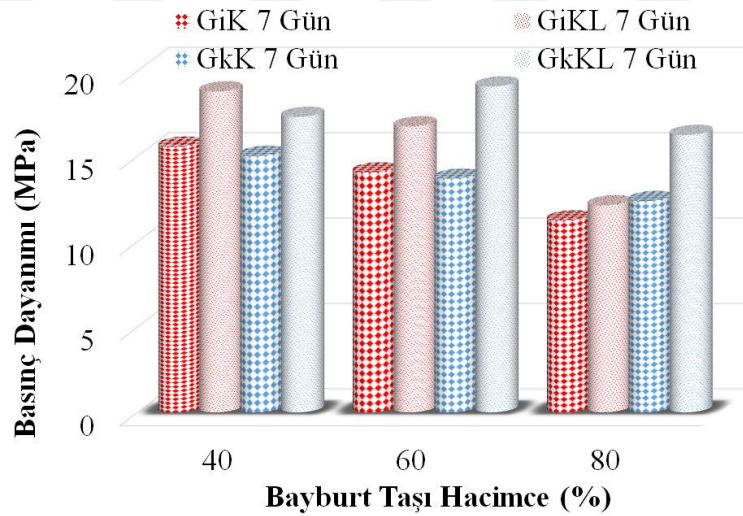
4.2. Mekanik özellikler

4.2.1. Eğilme ve basınç dayanımı

7, 28 ve 90 gün sonunda yapılan eğilmede çekme deneyi sonuçları eşitlik (3.2)'e göre, basınç deneyi sonuçları eşitlik (3.1)'e göre ve basınç deneyinden elde edilen veriler Çizelge 4.5'de, basınç dayanım sonuçlarının histogram eğrileri Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 'da verilmiştir. 28 gün sonundaki gerilme – şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.20'de, iki farklı incelik için korelasyon eğrileri ise Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 de verilmiştir. Eğilme de çekme deneyi sonucu elde edilen verilerin histogram grafikleri Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir.

Çizelge 4.5 : 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları

No	BT Oranı (%)	Lif (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımı (MPa)		
			7 Gün	28 Gün	90 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
GiK1	40	0	2,34	2,34	2,11	15,29	20,44	21,69
GiK2	60		4,92	5,16	7,73	14,56	30,64	34,47
GiK3	80		2,34	3,28	1,88	11,14	13,38	15,14
GiKL1	40	4	7,27	7,27	7,03	18,80	35,09	32,72
GiKL2	60		5,63	6,33	6,80	16,75	32,31	39,28
GiKL3	80		5,16	6,09	6,33	13,75	21,00	25,31
GkK1	40	0	3,28	3,28	5,16	15,03	22,31	21,25
GkK2	60		3,28	3,05	4,21	13,69	18,97	21,88
GkK3	80		2,58	1,88	3,98	12,38	14,34	22,50
GkKL1	40	4	8,20	8,67	6,56	17,31	20,69	21,25
GkKL2	60		8,44	8,67	9,14	19,09	22,19	28,13
GkKL3	80		7,97	8,20	9,14	16,25	20,78	25,28

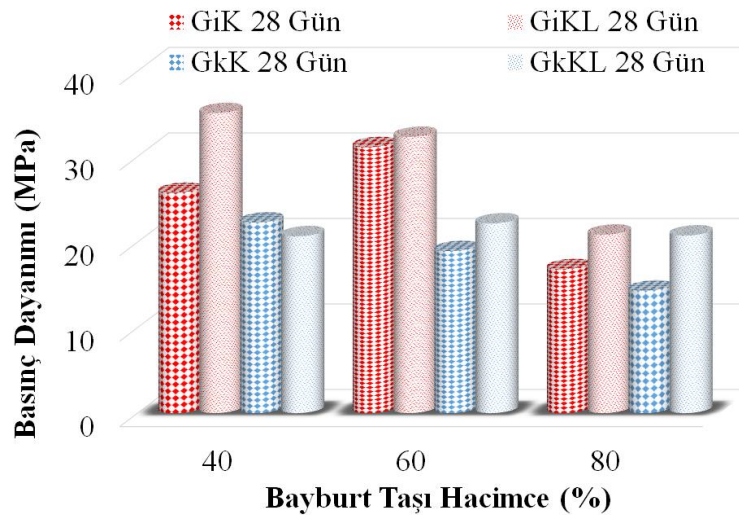


Şekil 4.17 : 7 günlük basınç dayanımı

7 Günlük basınç deneyi ve birim kısalma ölçümleri sonucunda elde edilen dayanımlara göre şu yorumlar yapılabilir:

- 28 günlük kür süresi sonucunda lifli 10 μ ve 125 μ inceliğindeki numunelerde en yüksek dayanım GiKL1'de 35.09 MPa çıkarken, en düşük dayanım GkKL1'de 20.69 MPa olarak çıktığı görülmüştür.

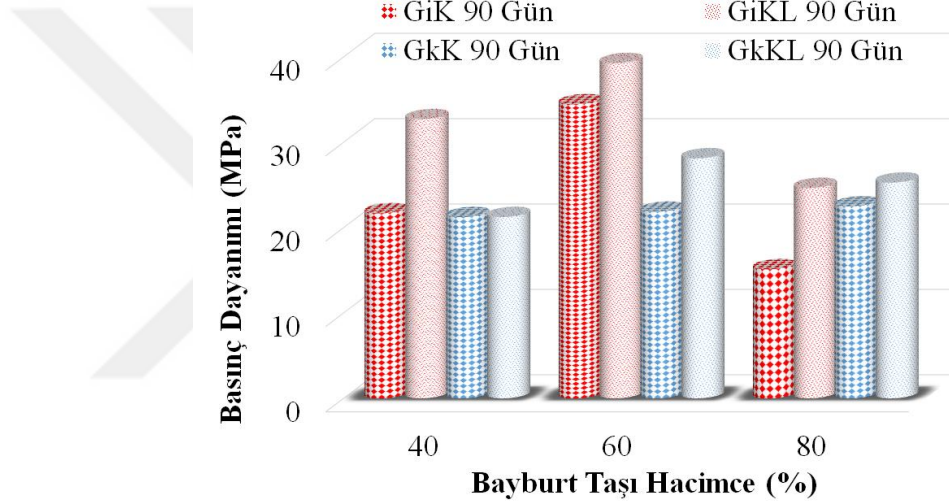
- 28 günlük kür süresi sonucunda lifsiz 10 μ ve 125 μ inceliğindeki numunelerde en yüksek dayanım GiK2'de 30.64 MPa çıkarken, en düşük dayanım GiK3'de 13.38 MPa olarak çıktığı görülmüştür.
- 90 günlük kür süresi sonucunda lifli 10 μ ve 125 μ inceliğindeki numunelerde en yüksek dayanım GiKL2'de 39.28 MPa çıkarken, en düşük dayanım GkKL1'de 21.25 MPa olarak çıktığı görülmüştür.
- 90 günlük kür süresi sonucunda lifsiz 10 μ ve 125 μ inceliğindeki numunelerde en yüksek dayanım GiK2'de 34.47 MPa çıkarken, en düşük dayanım GiK1'de 15.14 MPa olarak çıktığı görülmüştür.
- GiK3 nolu numunelere göre 7 günlük basınç deneyi sonucu GiK1 ve GiK2 nolu numuneler sırasıyla %37.26 ve %30.72 daha fazla çıkmıştır,
- GiKL3 nolu numunelere göre 7 günlük basınç deneyi sonucu GiKL1 ve GiKL2 nolu numuneler sırasıyla %55.03 ve %38.14 daha fazla çıkmıştır.
- GkK3 nolu numunelere göre 7 günlük basınç deneyi sonucu GkK1 ve GkK2 nolu numuneler sırasıyla %21.41 ve %10.58 daha fazla çıkmıştır,
- GkKL3 nolu numunelere göre 7 günlük basınç deneyi sonucu GkKL1 ve GkKL2 nolu numuneler sırasıyla %6.52 ve %17.48 daha fazla çıkmıştır.



Şekil 4.18 : 28 günlük basınç dayanımı

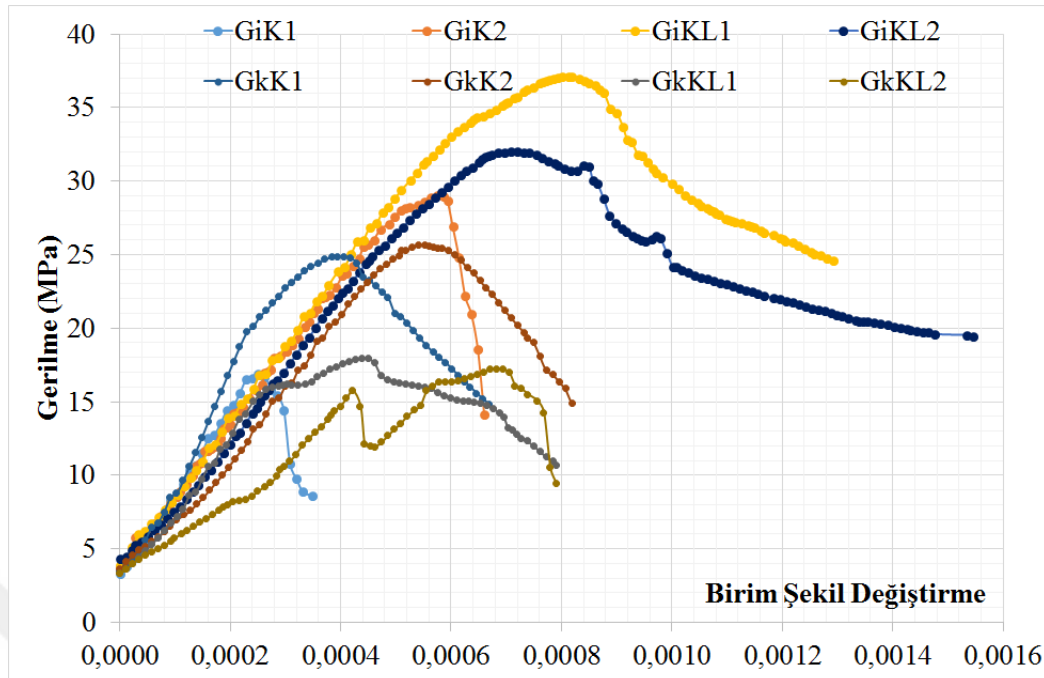
28 günlük basınç deneyi ve birim kısalma ölçümleri sonucunda elde edilen dayanımlara göre şu yorumlar yapılabilir:

- GiK3 nolu numunelere göre 28 günlük basınç deneyi sonucu GiK1ve GiK2 nolu numuneler sırasıyla %37.26 ve %129.09 daha fazla çıkmıştır
- GiKL3 nolu numunelere göre 28 günlük basınç deneyi sonucu GiKL1ve GiKL2 nolu numuneler sırasıyla %68.11 ve %54.79 daha fazla çıkmıştır,
- GkK3 nolu numunelere göre 28 günlük basınç deneyi sonucu GkK1ve GkK2 nolu numuneler sırasıyla %55.58 ve %32.29 daha fazla çıkmıştır,
- GkKL3 nolu numunelere göre 28 günlük basınç deneyi sonucu GkKL1 nolu numune neredeyse aynı çıkarırken, GkKL2 nolu numune % 6.78 daha fazla çıkmıştır.



Şekil 4.19 : 90 günlük basınç dayanımı

Şekil 4.20’de basınç dayanımı gerçekleştirilen tüm numunelerden birer örnek alınarak gerilme – şekil değiştirme diyagramları çizilmiştir. Elde edilen eğrilere göre aşağıdaki yorumlar yapılmıştır. Bilindiği gibi gerilme – şekil değiştirme eğrileri altında kalan alan malzemelerin tokluk direncini (enerji yutma kapasiteleri) tanımlamaktadır. Bu diyagramda üretilen tüm numunelerin en yüksek basınç dayanımı elde edilen eğrileri temel alınarak oluşturulmuş ve eğriler altında kalan alanlar özel bir programla hesaplanarak yorumlara eklenmiştir.



Şekil 4.20 : 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

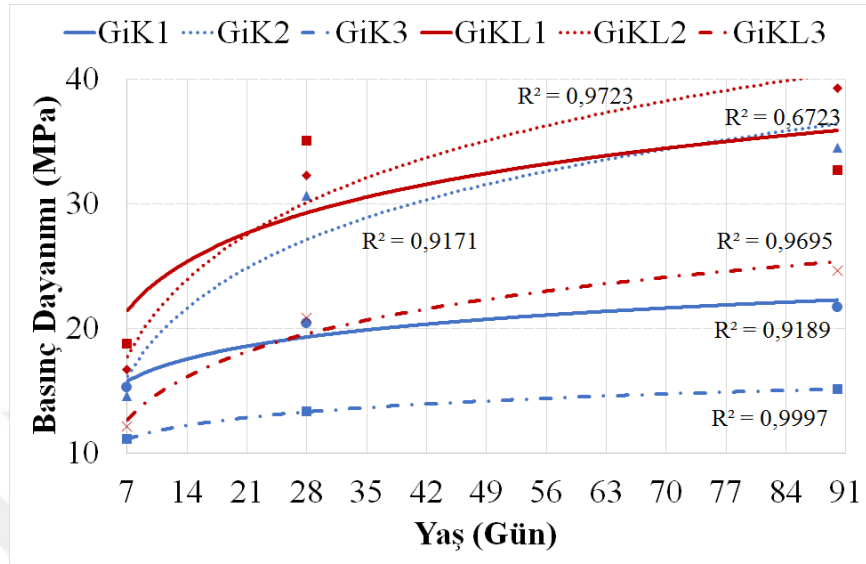
Şekil 4.20'ye göre en fazla enerji yutma kapasitene sahip olan GiKL1 ve GiKL2 numuneleridir. GiKL1'in tokluğu GiKL2 ye göre %8.19 daha fazla olduğu görülmüştür. En yüksek tokluğa sahip GiKL1'in enerji yutma kapasitesi, en düşük tokluğa sahip GiK1'in enerji yutma kapasitesinden %868.08 daha fazla çıkmıştır.

90 günlük basınç deneyi ve birim kısalma ölçümleri sonucunda elde edilen dayanımlara göre şu yorumlar yapılabilir:

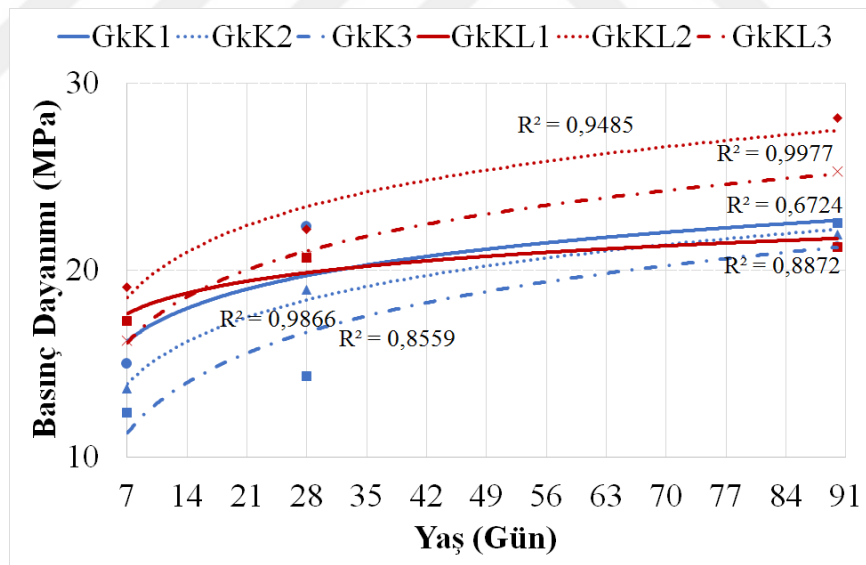
- GiK3 nolu numunelere göre 90 günlük basınç deneyi sonucu GiK1 ve GiK2 nolu numuneler sırasıyla %43.24 ve %127.66 daha fazla çıkmıştır,
- GiKL3 nolu numunelere göre 90 günlük basınç deneyi sonucu GiKL1 ve GiKL2 nolu numuneler sırasıyla %32.70 ve %59.32 daha fazla çıktığı gözlemlenmiştir,
- GkK3 nolu numunelere göre 90 günlük basınç deneyi sonucu GkK1 ve GkK2 nolu numuneler sırasıyla %5.56 ve %2.76 daha az çıkmıştır,
- GkKL3 nolu numunelere göre 90 günlük basınç deneyi sonucu GkKL1 nolu numune %15.94 daha az çıkarken, GkKL2 nolu numune % 11.27 daha fazla çıkmıştır.

Lifli GiKL1, GiKL2 ve GiKL3 numuneleri lifsiz GiK1, GiK2 ve GiK3 numunelerine göre basınç dayanımları sırasıyla, 7 günlük %22.92, %15.02 ve

%8.84, 28 günlük %71.71, %5.46 ve %56.07, 90 günlük %50.86, %13.96 ve %62.85 oranında daha fazla çıkmıştır,



Şekil 4.21 : 10µ numuneler için korelasyon eğrileri



Şekil 4.22 : 125µ numuneler için korelasyon eğrileri

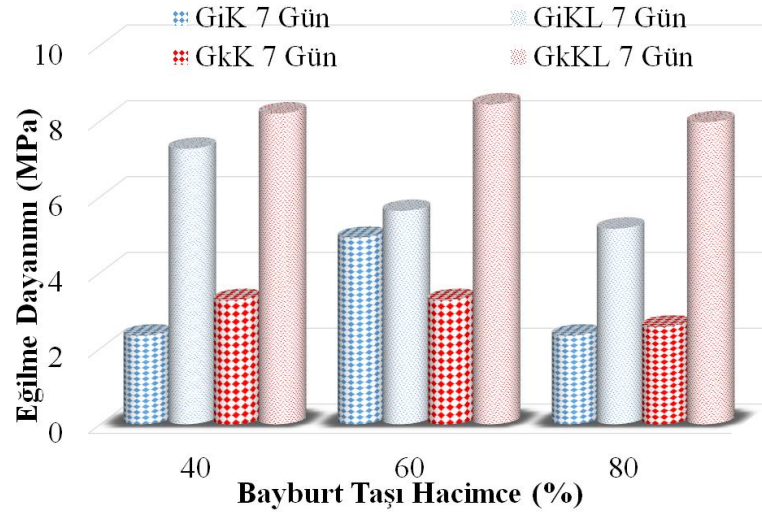
Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de numunelerin zamana dayalı basınç dayanım gelişimleri için regresyon eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen eğrilere göre geopolimer malzemelerin hepsi betona benzer bir dayanım davranışı göstermiştir. Elde edilen

eğrilerin regresyon katsayıları en az 0,67 en çok 0,99 değerindedir ki bu katsayılar eğrilerin istatistiki açıdan doğruluğa yakın üretildiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar göz önün alındığında, BT oranının bağlayıcılık özelliğinden dolayı çimentoda da görüldüğü gibi belirli bir orana kadar basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Belirli bir oranın üzerine çıkıldığında numuneler üzerinde 28 gün sonrasında rötre çatlakları ve kapak atma (Şekil 4.23) olarak adlandırılan kopmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. %80 BT oranındaki basınç dayanımının azalmasının sebebi olarak gösterilebilmektedir.



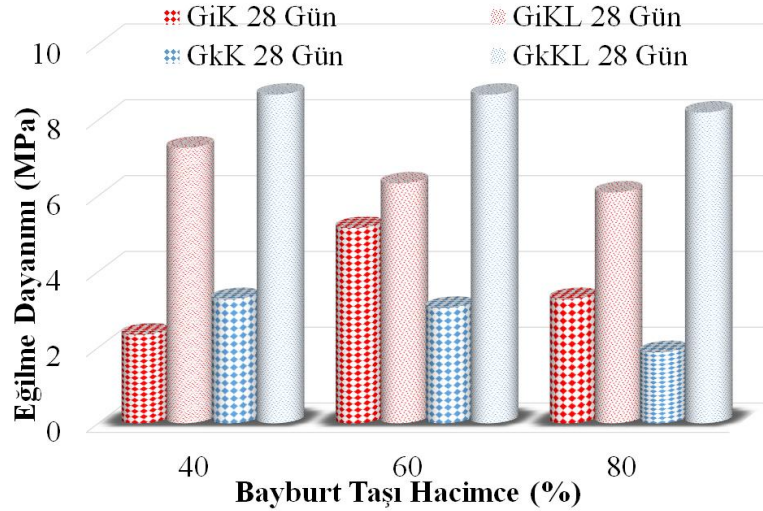
Şekil 4.23 : 28 gün sonrası %80 BT'li numuneler



Şekil 4.24 : 7 günlük eğilme dayanım grafikleri

7 günlük eğilmede çekme deneyi sonucunda elde edilen dayanımlara göre şu yorumlar yapılabilir:

- GiK1 nolu numunelere göre 7 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GiK2 nolu numuneler %110.26 daha fazla çıkarken GiK3 nolu numuneler aynı çıkmıştır,
- GiKL1 nolu numunelere göre 7 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler sırasıyla %22.55 ve %29.02 daha az çıkmıştır,
- GkK1 nolu numunelere göre 7 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GkK3 nolu numuneler %21.13 daha az çıkarken GkK2 nolu numuneler aynı çıkmıştır,
- GkKL1 nolu numunelere göre 7 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GkKL2 %2.83 oranında daha fazla çıkarken GkKL3 nolu numune %2.81 daha az çıkmıştır,

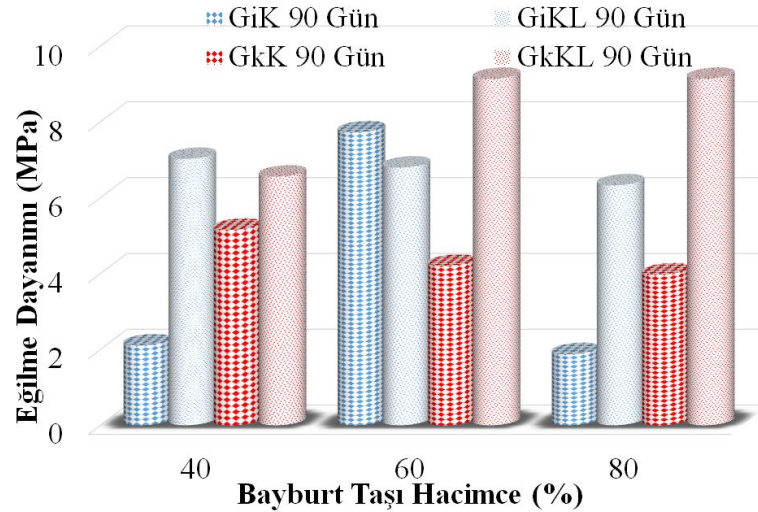


Şekil 4.25 : 28 günlük eğilme dayanım grafikleri

28 günlük eğilmede çekme deneyi sonucunda elde edilen dayanımlara göre şu yorumlar yapılabilir:

- GiK1 nolu numunelere göre 28 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GiK2 ve GiK3 nolu numuneler sırasıyla %120.51 ve %40.17 daha fazla çıkmıştır,
- GiKL1 nolu numunelere göre 28 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler sırasıyla %12.93 ve %16.23 daha az çıkmıştır,

- GkK1 nolu numunelere göre 28 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GkK2 ve GkK3 nolu numuneler sırasıyla %70.12 ve %42.68 daha az çıkmıştır,
- GkKL1 nolu numunelere göre 28 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GkKL2 nolu numuneyle aynı çıkarken GkKL3 nolu numune %5.42 daha az çıkmıştır,



Şekil 4.26 : 90 günlük eğilme dayanım grafikleri

90 günlük eğilmede çekme deneyi sonucunda elde edilen dayanımlara göre şu yorumlar yapılabilir:

- GiK1 nolu numunelere göre 90 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GiK2 numune %266.35 daha fazla çıkarken, GiK3 nolu numune %10.90 daha az çıkmıştır,
- GiKL1 nolu numunelere göre 90 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GiKL2 ve GiKL3 nolu numuneler sırasıyla %3.27 ve %9.95 daha az çıkmıştır.
- GkK1 nolu numunelere göre 90 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GkK2 ve GkK3 nolu numuneler sırasıyla %18.41 ve %22.87 daha az çıkmıştır,
- GkKL1 nolu numunelere göre 90 günlük eğilmede çekme deneyi sonucu GkKL2 ve GkKL3 nolu numuneler sırasıyla %39.33 ve %39.33 daha fazla çıkmıştır

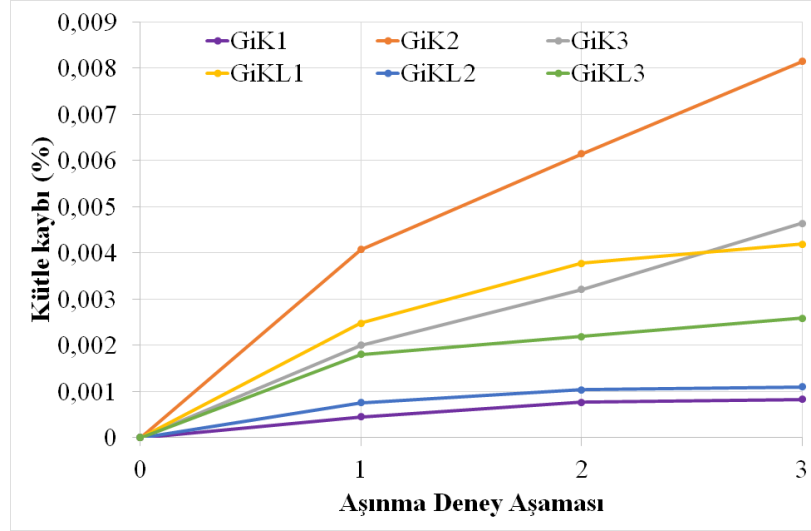
Eğilmede çekme deneyi sonucunda lifsiz numunelerde %60 BT içerikli numunelerde en yüksek dayanıma ulaşılmıştır. Lifli numunelerde ise %40 BT içerikli numunelerde en yüksek dayanıma ulaştığı görülmüştür.

Basınç deneyi sonucunda bütün numunelerde kür süresi dikkate alındığında dayanımlarda artışlar meydana gelmiştir. Lifsiz numunelerde erken yaşlarda en yüksek dayanım GiK1 nolu numunelerde elde edilirken, 90 gün sonucunda en yüksek dayanım GiK2 nolu numunelerde meydana gelmiştir. Lifli numunelerde her iki süreçte de en yüksek dayanımlar GiKL2 nolu numunelerde gözlemlenmiştir. Basınç ve eğilme deneyleri sonucunda 7,28 ve 90 günlük eğilme değerleri farklı numunelerde basınç dayanımının 1/4 'üne ulaşmıştır.

Lifli GKL'lerde lifsizlere göre daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi lifin tutucu özelliğinin ön plana çıkararak numunenin tokluğu artırdığı ve eğilme-basınç dayanımlarında artış gösterdiği bilinmektedir. (Topçu İ. & Uğurlu A., s. 2016)

4.2.2. Aşınma Deneyi

28 gün sonunda rotating cutter metodu ile 3 aşamada yapılan aşınma deneyi sonuçları verilmiştir. Numunelerin her aşamada ağırlık kayıpları % olarak verilmiştir. Aşınma sonucunda elde edilen verilerin 10µ numune için Şekil 4.27'de, 125µ için Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.27 : 10 μ numuneler için aşınma deneyi

10 μ inceliğinde BT ile üretilen numuneler üzerinde yapılan aşınma deneyi sonucunda BT oranının %60 olduğu lifsiz numunelerde aşınma dayanımının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Lif katkısının aşınma dayanımına etkisi %40 BT içerikli GiK1 numunelerinde olumsuz yönde olurken; %60 ve %80 BT içerikli GiK2 ve GiK3 numunelerinde olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.28 : 125 μ numuneler için aşınma deneyi

125 μ inceliğindeki BT ile üretilen numunelerin aşınma deneyi sonucunda en düşük aşınma direnci %80 BT içerikli GkK3 nolu numunelerde görülmüştür. Lifli ve lifsiz numunelerde en yüksek aşınma direnci %60 içerikli GkK2 ve GkKL2 nolu

numunelerde belirlenmiştir. Lif katkısı GkK1, GkK2 ve GkK3 numunelerinin aşınma dayanımını sırasıyla %38,52, %65,13 ve %10,97 oranında iyileştirmiştir.

10 μ ve 125 μ inceliğindeki numunelerin aşınma deney sonuçları karşılaştırıldığında şu yorumlar yapılabilir;

- İki farklı incelik kullanılarak üretilen numunelerin aşınma deneyi sonucunda en fazla aşınma GkK3 nolu numunelerde meydana gelirken, en az aşınma GiK1 nolu numunelerde meydana gelmiştir. %40 BT içerikli numunelerin durabilitesi %80 BT içerikli numunelere göre daha fazla olduğu bilinmektedir. Aşınma deneyi sonucunda da bu hipotezin doğruluğu tekrarlanmıştır.
- GiK1 numunesinin aşınma direnci GkK1 numunesine göre %22,57 daha fazladır,
- GiK2 numunesinin aşınma direnci GkK2 numunesine göre %88,04 daha azdır,
- GiK3 numunesinin aşınma direnci GkK3 numunesine göre %69,23 daha azdır,
- GiKL1 numunelerinin aşınma direnci GkKL1 numunelerine göre %84,96 daha az direnç göstermiştir,
- GiKL2 numunelerinin GkKL2 numunelerine göre aşınma direnci %69,26 daha azdır,
- GiKL3 numunelerinin GkKL3 numunelerine göre aşınma direnci %50,87 daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda BT'nin inceliğinin arttıkça aşınma direncinin azaldığı, aşınma direnci yüzeyin sertliği ile doğrudan ilişkili olduğundan BT oranı arttıkça bu bağlayıcılık oranı arttığından aşınma dirençleri arasında oluşan farkın azaldığı görülmüştür.

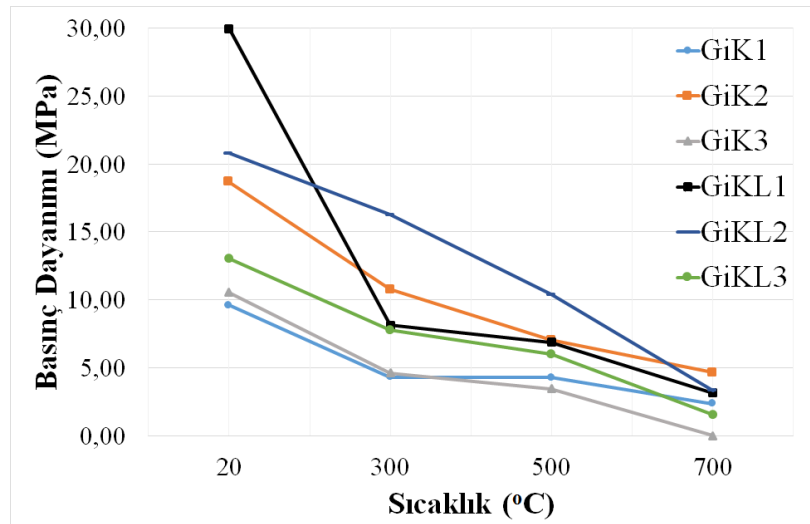


Şekil 4.29 : Aşınma deneyi görüntüleri

4.3. Termik Özellikler

4.3.1. Yüksek Sıcaklık Deneyi

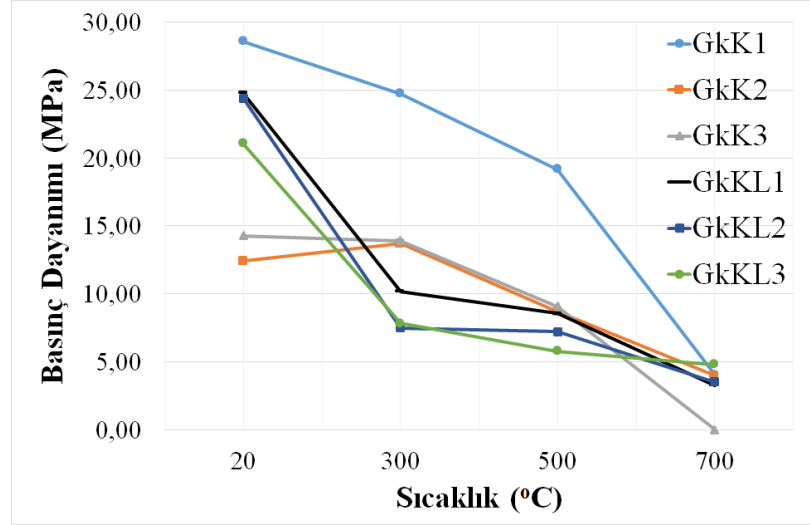
28 gün sonunda küp numuneler 20°C, 300°C, 500°C ve 700°C sıcaklıklarda 120 dk bekletildikten sonra ağırlıkları ölçülerek basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen iki farklı inceliğin dayanım grafikleri ve etüv sonrası birim hacim değişim grafikleri Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de verilmiştir.



Şekil 4.30 : 10µ BT ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklık sonucu

10 μ inceliğindeki BT ve MA ile lifli ve lifsiz numuneler üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyi sonucunda şu yorumlar yapılabilir;

- 10 μ incelikteki BT'ler kullanılarak üretilen numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 700 °C derece sonunda bütün numuneler dayanım kaybetmiştir. 700 °C sıcaklık etkisi sonucunda %80 BT içerikli lifsiz numuneler bütün dayanımlarını kaybetmiştir. 300 °C ve 500 °C sıcaklık etkisinden sonra GiK1 kodlu numuneler en yüksek basınç dayanımını vermiştir.
- 20 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GiK1, GiK2 ve GiK3 sırasıyla %55, %42.40, %56.44 oranında basınç dayanımında azalış,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde ise GiKL1, GiKL2 ve GiKL3 sırasıyla %72.90, %21.73, %40.49 oranında basınç dayanımları azalmıştır,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GiK1, GiK2 ve GiK3 sırasıyla %55.42, %62.31, %67.42 oranında basınç dayanımında azalış,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde ise GiKL1, GiKL2 ve GiKL3 sırasıyla %77.03, %50, %53.99 oranında basınç dayanımları azalmıştır,
- 20 °C sıcaklığa göre 700 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GiK1, GiK2 ve GiK3 sırasıyla %75.42, %75.16, %100 oranında basınç dayanımında azalış,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde ise GiKL1, GiKL2 ve GiKL3 sırasıyla %89.45, %84.04, %88.04 oranında basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür.

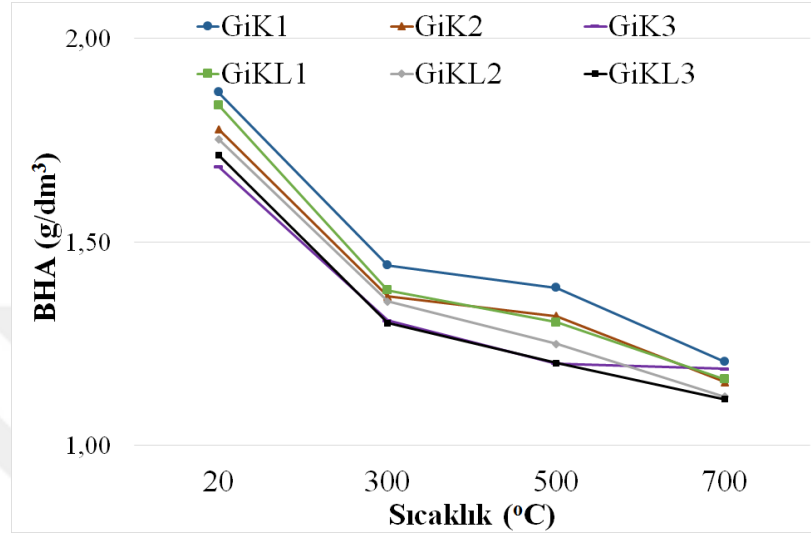


Şekil 4.31 : 125 μ BT ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklık sonucu

125 μ inceliğindeki BT ve MA ile lifli ve lifsiz numuneler üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyi sonucunda şu yorumlar yapılabilir;

- 300 °C sıcaklık etkisinden sonra GkK2 numunelerinde basınç dayanımlarında bir miktar artış meydana gelmiştir. Sıcaklık 500 °C ye çıkarıldığında bütün numunelerde basınç dayanımlarında azalmalar oluşmuştur. Sıcaklık 700 °C olduğunda ise bütün numunelerin basınç dayanımlarındaki düşüşler devam ederken GkK3 nolu numunelerin basınç dayanımları 0 MPa'ya ulaşmıştır.
- 20 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GkK1 ve GkK3 sırasıyla %13.50, %2.66 oranında azalırken, GkK2 %10.31 oranında artış göstermiştir,
- 20 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde ise sırasıyla %72.90, %21.73, %40.49 oranında basınç dayanımları azalmıştır,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GkK1, GkK2 ve GkK3 sırasıyla %55.42, %62.31, %67.42 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde ise GkKL1, GkKL2 ve GkKL3 sırasıyla %77.03, %50, %53.99 oranında basınç dayanımları azalmıştır,
- 20 °C sıcaklığa göre 700 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GkK1, GkK2 ve GkK3 sırasıyla %75.42, %75.16, %100 oranında azalma görülmüştür,

- 20 °C sıcaklığa göre 700 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde ise GkKL1, GkKL2 ve GkKL3 sırasıyla %89.45, %84.04, %88.04 oranında basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür.

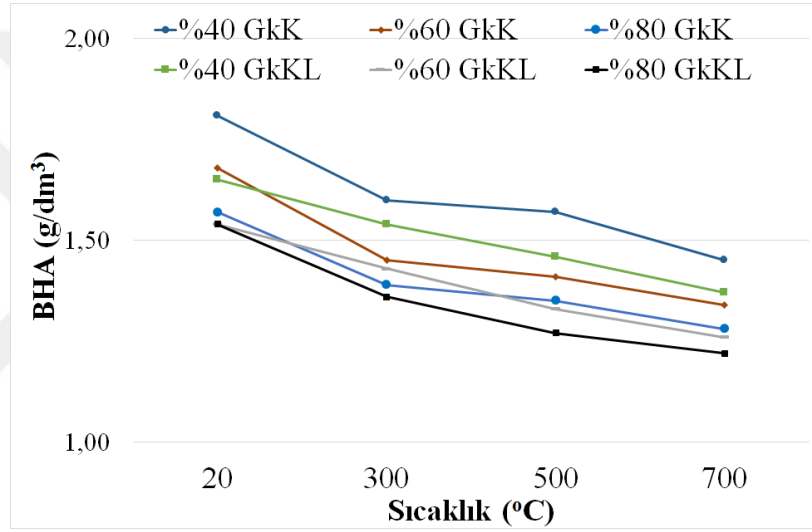


Şekil 4.32 : 10µ numuneler için BHA

Birim hacim ağırlık ölçümleri sonucunda 10µ inceliğindeki numuneler için şu yorumlar yapılabilir:

- Birim hacim ağırlık değerleri karşılaştırıldığında 20 °C de en yüksek birim hacim ağırlığına GiK1 nolu numuneleri sahipken 700 °C sonunda da birim hacim ağırlığı en fazla olan numune olduğu görülmektedir.
- 20 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GiK1, GiK2 ve GiK3 sırasıyla %29.40, %30.07, %28.97 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde GiKL1, GiKL2 ve GiKL3 sırasıyla %32.87, %29.47, %31.76 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GiK1, GiK2 ve GiK3 sırasıyla %34.54, %34.84, %40.26 oranında azalma görülmüştür,

- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde GiKL1, GiKL2 ve GiKL3 sırasıyla %40.84, %40.24, %42.44 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 700 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GiK1, GiK2 ve GiK3 sırasıyla %54.80, %53.71, %41.74 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 700 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde GiKL1, GiKL2 ve GiKL3 sırasıyla %57.87, %56.45, %53.85 oranında azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 4.33 : 125µ numuneler için BHA

Birim hacim ağırlık ölçümleri sonucunda 125µ inceliğindeki numuneler için şu yorumlar yapılabilir:

- 20 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GkK1, GkK2 ve GkK3 sırasıyla %13.13, %15.86, %12.95 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 300 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde GkKL1, GkKL2 ve GkKL3 sırasıyla %7.14, %7.69, %13.24 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GkK1, GkK2 ve GkK3 sırasıyla %15.29, %19.15, %16.30 oranında azalma görülmüştür,

- 20 °C sıcaklığa göre 500 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde GkKL1, GkKL2 ve GkKL3 sırasıyla %13.01, %15.79, %21.26 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 700 °C sıcaklık etkisinden sonra lifsiz numunelerde GkK1, GkK2 ve GkK3 sırasıyla %24.83, %25.37, %22.26 oranında azalma görülmüştür,
- 20 °C sıcaklığa göre 700 °C sıcaklık etkisinden sonra lifli numunelerde GkKL1, GkKL2 ve GkKL3 sırasıyla %20.44, %22.22, %26.23 oranında azalma olduğu görülmüştür.

Yüksek sıcaklığın numuneler üzerindeki etkisi muhakeme edildiğinde, yüksek sıcaklıkla beraber genel olarak basınç dayanımının düşmesine binaen BT oranının %80 olduğu numuneler dışındaki bütün numunelerde lif katkısının basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. İki farklı incelikteki numunelerin birim hacim ağırlığındaki değişimleri mukayese edildiğinde 125µ inceliğindeki numunelerdeki kayıpların daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 4.34 : a)300 °C etüv sonrası b)500 °C etüv sonrası c)700 °C etüv sonrası numune görüntüleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Standart kıvamı yakalamak için BT oranı arttıkça kullanılan çözelti ve buna bağlı olarak NaOH miktarı da artmasıdır. Dolayısıyla reaksiyona giren bağlayıcı oranı arttığı için priz başlangıç süresi ve bitiş süreleri BT oranının artışıyla azalmıştır. 10 μ inceliğindeki BT'li numunelerde %60 BT oranına kadar priz başlangıç ve bitiş süresi artarken %80 BT oranında azalma göstermiştir.
- Priz başlangıç süresi ve bitiş süreleri BT oranının artışıyla azalmıştır. 10 μ inceliğindeki BT'li numunelerde %60 BT oranına kadar priz başlangıç ve bitiş süresi artarken %80 BT oranında azalma göstermiştir.
- Çözelti miktarı artmasına rağmen BT oranı arttıkça yayılma değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Lifli kompozitlerde bu değer lifsiz kompozitlere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Kompozit hamurlar içinde en yüksek işlenebilirliğe sahip olan tasarım 125 μ %40 BT içeren karışımlar olmuştur. Yayılma deneyinin sonucunda yaklaşık 20 cm yayılma göstermiştir. Lif katkısı genel olarak işlenebilirliğe olumsuz etki meydana getirirken, incelik arttıkça yayılma çapı azalmış ve bununla birlikte işlenebilirlik azalmıştır.
- Her iki incelikte de numunelerin nihai kuru birim hacim ağırlık değerleri 1.23 ile 1.51 arasında değişmektedir. En düşük kuru birim hacim ağırlık değerleri %80 BT içerikli numunelerde elde edilmiştir.
- 10 mikron incelikli numunelerin nihai en düşük su emme değeri lifsiz numunelerde %26.38 olarak %40 BT içerikli numunelerde 90. günde alınmıştır. Lifli numunelerde de en düşük su emme değeri 7. günde %40 BT içerikli numunelerde %22.80'dir. BT oranı arttıkça su emme değerinin artarak %80 BT içerikli numunelerde aynı yaşta %34.30'a ulaştığı görülmüştür.

- 10 mikron incelikli numunelerin görünür porozite değeri en çok %43.53'dür. En düşük görünür porozite değeri %40 BT içerikli lifli numunelerde, en yüksek görünür porozite değeri %80 BT içerikli lifli numunede ulaşılmıştır.
- Her iki incelikte numunelerin kapiler su emme katsayıları diğer yaşlara göre artmaktadır. En yüksek kapiler su emme katsayısı 15.25'dir. En yüksek değere %80 BT içerikli lifli numunede, en düşük kapiler su emme katsayısına %60 BT içerikli numunelerde ulaşılmıştır. Kapiler su emme, su emme ve MIP deneylerinin sonuçlarına göre BT oranı arttıkça KSEK, görünür porozite ve su emme oranlarının arttığı belirlenmiştir.
- 125 mikron incelikli numunelerin nihai su emme yüzdeleri en düşük lifsiz numunelerde %19.45 olarak %40 BT içerikli numunelerden, lifli numunelerde en düşük su emme değeri %40 BT içerikli numunelerde %19.51 olmuştur. BT oranı arttıkça su emme değerinin artmaktadır.
- 125 mikron incelikli numunelerin nihai görünür porozite değerleri en çok %43.35'e çıkmıştır. En düşük görünür porozite değerine %40 BT içerikli lifli numunelerde, en yüksek görünür porozite değeri %80 BT içerikli lifli numunededir.
- 125 mikron incelikli Eğilmede çekme deneyi sonuçları göre lifli ve lifsiz GKH'lerde erken yaşlardaki dayanımların en yükseği BT'nin %60 oranında belirlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı %60 BT içerikli lifli numunede 8.44 MPa, en düşük eğilme dayanımı %80 BT içerikli lifsiz numunede 2.58 MPa olarak ölçülmüştür.
- Lifli ve lifsiz GKH'lerin eğilme sonuçlarına göre lif BT'nin bütün oranlarında eğilme dayanımını ve enerji yutma kabiliyetini yaklaşık 3 kat artırdığı belirlenmiştir.
- Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre 28 günlük basınç değerlerinin 7 günlük basınç değerlerine göre daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Lif katkılı GKH'lerin lifsiz GKH'lere göre basınç dayanımlarının genellikle daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. En yüksek dayanım 10 μ %40 BT içerikli lifli numunelerde 35.09 MPa, en düşük dayanım 125 μ %80 BT içerikli lifsiz numunelerde 14.34 MPa olarak belirlenmiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisi altında lifin numuneler üzerindeki etkisinin olumsuz olduğu ortaya çıkmıştır. Sıcaklık arttıkça BHA kayıpların arttığı gözlemlenmiştir.
- BT oranı arttıkça suya karşı durabilitenin azaldığı, su emme, kapiler su emmenin ve gözenekliliğin arttığı gözlemlenmiştir.
- En iyi aşınma direnci 125 μ incelikteki %60 BT içerikli lifli numunelerde yaklaşık ağırlıkça %3 olarak, en kötü aşınma direnci 10 μ incelikteki %60 BT içerikli lifsiz numunelerde yaklaşık ağırlıkça %8 olarak belirlenmiştir.
- 125 μ ve 10 μ incelikte üretilen numuneler incelendiğinde basınç dayanımı, aşınma, yüksek sıcaklık ve durabilite özellikleri incelendiğinde 125 μ numunelerin sonuçlarının daha iyi çıktığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akın E. (2007). *Mermer tozları ve uçucu kül ile polimer esaslı kompozit malzeme üretimi*. Ankara: Gazi Üniversitesi FenBilimleri Enstitüsü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Arıcasoy, O. (2006). **Kompozit Sektör Raporu**. İstanbul: İstanbul Ticaret Odası.
- ASTM, C. (2002). *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. ABD: ASTM.
- ASTM, C. (2002). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method*. USA: ASTM.
- Atis C.D. (2005). *Strength properties of high volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition*. **Cement Concrete Research**, 1112-1121.
- Aydın S., & Baradan B. (2012). *Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars*. **Materials & Design**, 374-383.
- Aydın S., Karatay C., & Baradan B. (2009). *The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars*. **Powder Technology**, 68-72.
- Baradan B., Aydın S., & Yazıcı H. (2012). **Beton**. İzmir: Dokuz Eylül Üniv. Yayınları.
- Bayramgil, O. (1959). **Petrografi**. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları.
- Bouterrin, C., & Davidvits, J. (1982). **proceedings of the 22nd archeometry symposium**. *LTGS of ceramics fabrication of black surfaced ceramics* (s. 213-216). UK: University of Bradford .
- Boutterin , C., & Davidovits, J. (1988). **geopolymer'88proceedings**. *reticulation géopolymérique (ltgs) et materiaoux de construction*, (s. 79-88). Fransa.
- Brew, D., & Mackenzie, K. (2007). Geopolymer synthesis using silica fume and sodium aluminate". **J.Mater Science+Business, Springer** , 10.1007/s10853-006-0376.

- Brough A.R, & Atkinson A. (2002). *Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure*. **Cement and Concrete Research**, 865-879.
- Buchwald, A., Hohman, M., Kaps, C., Bettzieche, H., & Kühnert, J. (2004). *stabilised foam clay material with high performance thermal insulation properties*. **CFI Ceramic Forum International**, 39-42.
- C. Elibol. (2012). *Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi*. İstanbul: İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Cinel, M. (2007). *“Doğal Taşların Fiziko-Mekanik Özelliklerine Göre Sınıflandırılması*. Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü **Yüksek Lisans Tezi**,.
- Clark, E. (2009). *the truth about... concrete*. essay Climate Change Corp.J.
- Colella C., Gennaro M., & Aiello R. (2001). **Use of zeolitic tuff in the building industry**. In: Bish DL, Ming DW, editors. *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications, Reviews in mineralogy and geochemistry*. *Mineralogical Society of America*, 551-588.
- Çavdar A., & Yetgin Ş. (2007). *Availability of tuffs from northeast of Turkey as natural puzzolan on cement some chemical and mechanical relationships*. **Construction and Building Materials**, 2066-2071.
- Çevre ve Şehircilik. (2011). *Yapı Malzemleri Piyasa Gözetim Denetim Elemanları Eğitim Notları*. Ankara.
- Davidovits, J. (2006). *geopolymer Science Video tutorial*. www.geopolymer.org. adresinden alındı
- Davidovits, J. (2008). **Geopolymer Chemistry and applications**. Saint Quantin, France.
- Davidovits, J. (2008). *They built the pyramids ,published by institute geopolymer*. Saint Quentin: France.
- Davidovits, J., & Comrie, D. (2008). *long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals*. **Geopolymer’88 proceedings**, 125-134.
- Davidovits, J., & Legrand, J. (1974). *Fransa Patenti Patent No. 2.324.427*.
- Davidovits, J., & Sawyer, J. (1984). *US Patent No. 4,509,985,1985*.

- Demir İ., & Başpınar M.S. (2001). *Mermer tozu artıklarının(havuz çökeltisi) hafif yapı blokları üretiminde kullanılması. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu* (s. 213-220). Afyon: MERSEM.
- Deventer, V. (2012). *Zeobond geopolymeric concrete firm web. Zeobond: <http://www.zeobond.com> adresinden alındı*
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). *8.Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Komisyonu Raporu*. Ankara.
- Diop M.B., Grutzeck M. W., & Molez L. (2011). *Comparing the performances of bricks made with natural clay and clay activated by. Applied Clay Science*, 172–178.
- Doğan, H. (2003). *Doğal ve Sentetik Zeolitler ve Uygulama Alanları. Bor Teknolojileri ve Mineraller Grubu TÜBİTAK*.
- Erdem, Y. (2010). *Çelik Talaşı / Silikon Kompozit Malzeme Üretimi ve Düşük Darbe Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi*. Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Erguvanlı, K. (1955). **Mühendislik Jeolojisi**. İstanbul,: İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Kurtulmuş Matbaası.
- Eriç, M. (2002). **Yapı Fiziği ve Malzemesi**. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Erkek, D., & Özdemir, S. (2011). *Mermer ve Traverten Sektörüne Küresel ve Bölgesel Yaklaşım*.
- Ersoy, H. Y. (2001). **Kompozit Malzeme**. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Evcimen, A. (2005). *Pim Bağlantılı Kompozitlerde Tabaka Sayısı ve Oryantasyon Açısının Gerilmeye Etkisi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
- Evcin, A., & Kavas, T. (2004). *Sol-jel yöntemiyle mikronaltı alümina toz üretiminde katalizör miktarının etkisinin araştırılması*. İzmir: **6. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi**.
- Gourley, J., & Johnson, G. (2005). **proceedings of world congress geopolymer. developments in geopolymer precast concrete**. Fransa.
- Guo X., Shi H., & Dick W.A. (2010). *Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. Cement Concrete Composites*, 142-147.

- Gupta, R., & Chaudhury, N. K. (2007). *Entrapment of biomolecules in sol-gel matrix for applications in biosensors: Problems and future prospects*. **Biosensors and Bioelectronics**, 2387-2399.
- Gülen, J., Zorbay, F., & Arslan, S. (2012). *Zeolitler ve Kullanım Alanları*. **Karaelmas Science and Engineering Journal**, 63-68.
- Gündüz, L. (2005). *İnşaat Sektöründe Bims Blok*. Isparta: Pomza Araştırma Ve Uygulama Merkezi.
- Güneş, A. (2013). *Üzerinde Yüzey Çatlağı Bulunan Hibrid Tabakalanmış Kompozit levhaların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi*. Konya: Selçuk Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Haque M.N., Langan B.W., & Ward M.A. (1984). *High fly ash concrete*. **ACI Materials**, 54-60.
- Hearn vd. (1994). **Pore structure and permeability**. *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM.
- Huang C.H., Lin S.K., Chang C.S., & Chen H.J. (2013). *Mis proportions and mechanical properties of concrete containing very gih volume of class F fly ash*. **Construction and Building Materials**, 71-78.
- Ivanova, I., Aiello, R., & Nagy, J. (2002). *Influence of cations on the physicochemical and structural properties of aluminosilicate gel precursors. 2.multinuclear magneticresonance charecterisation*. **Microporous Materials**, 245-257.
- Jennings, H., Thomas, J., Rotshein, D., & Chen, J. (2001). **Cements As Porous Material**. USA: Northwestern Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ders Notları.
- Karahan O. (2006). *Liflerler Güçlendirilmiş Uçucu küllü betonların özellikleri*. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Doktora Tezi**.
- Kaya A.İ. (2010). A study on blended bottom ash cement. *The Garaduate School of Natural and Applied Sciences*, Odtü.
- Keunhyeok, Y., Jinkyu, S., Kangseok, L., & Ashraf Fawzy, A. (2009). *Flow and compressive strength of alkali-activated mortars*. **ACI Materials Journal**, 50-58.
- Keyte, L. M., & Deventer, S. V. (2006). *The Effect Of Coal Ash Composition On Properties Of Waste Based Geopolymers*. **Advances in geopolymer science and technology Springer Science**.

- Kısaöz, A., Gürel, K. A., & Karaaslan, A. (2014). *Metal Matris Kompozitlerin İnfiltrasyonla Dereceli Hassas Döküm Kalıplarında Üretimi*. Ankara: Metalurji Mühendisler Odası.
- Kocataşkın F. (1965). **Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz**. Gümüşsuyu: İTÜ Matbaası.
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). *Geopolymerisation: a review and prospects for mineral industry*. **Elsevier Science Direct Minerals Engineering**, 1261-1277.
- Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2010). *Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete*. **Cement and Concrete Research**, 334-339.
- Köktürk, U. (1995). Zeolit Madenciligi ve Çevre Sağlığına Etkileri. *Zeolit Madenciligi ve Çevre Sağlığına Etkileri*, (s. 293-301).
- Kumar, S., Alex, T., & Mehrotra, S. (2005). **Proceedings of world congress geopolymer** . *effect of mechanically activated fly ah on the properties of geopolymeric Cement*. Fransa.
- Kun, N. (2000). **Mermer Jeolojisi Ve Teknolojisi**, . İzmir.
- Li, K., Huang, G., & Chen, J. (2005). **Proceedings of world congress geopolymer**. *early mechanical property and durability of geopolymer*. Fransa.
- Liebig, E. , & Althaus, E. (1998). *Pozzolan activity of volcanic tuff and suevite, effects*. **Cement and Concrete Research**, 28, 567-575.
- Morris, J., & Hodges, S. (2005). **Proceedings of world congress geopolymer**. *corrosion of metals in fly ash based geopolymers*. Fransa.
- MTA. (2005). *Bayburt Doğal Taş Potansiyesi Maden Jeolojisi Raporu*. Ankara: MTA.
- MTA. (2016). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü: www.mta.gov.tr adresinden alındı
- Niederberger, M., & Pinna, N. (2009). *Metal Oxide Nanoparticles in Organic Solvents*. **Springer Dordrecht Heidelberg**, 7-16.
- Onargan T., Köse H. , & Deliormanlı A.H. (2006). *Mermer*. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Yayın No: 95.

- Ortega E.A. , Cheesenana C., Knighta J., & Loizindou M. (2000). *Properties of alkali-activated clinoptilolite*. **Cement and Concrete Research**, 46.
- Ozodabas A., & Yılmaz K. (2013). *Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice*. **Construction and Building Materials**, 26-34.
- Ören B. C., (1996). *Pomzanın endüstriyel hammadde olarak değerlendirilebilirliği*,. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Yüksek Lisans Tezi**.
- Pierre, A. C. (1998). *Introduction to Sol-Gel Processing*. London: **Kluwer Academic Publishers**.
- Pinto, A. T., & Eduardo, V. (2005). *Repairing of damaged stone in monuments and stone buildings*. Fransa: **Proceedings of world congress geopolymer**.
- Rangan, B., Hardjito, D., Wallah, S., & Sumajouw, M. (2005). *Studies on fly ash-based geopolymer concrete*. France: **Proceedings of world congress geopolymer**.
- Ritmann, L. (1976). **Volcanoes** . Londra: Orbis Publishing.
- Sarı, M. K. (2010). *Farklı Birleştirilmiş Kompozit Taşıyıcı Kirişlerin Analizi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Segui P., Aubert J.E., & Husson B. (2013). Measson M., *Utilization of a natural pozzolan as the main component of hydraulic road binder*. **Construction and Building Materials**, 217-223.
- Selçuk, S. (2010). *İletken Zeolit/Polipirol Kompozitinin Hazırlanması Karakterizasyonu Ve Nem İle Sıcaklığa Karşı Sensör Özelliğinin İncelenmesi*. Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Serin G. (1999). *Pomzanın hafif beton blok duvar elamanı olarak kullanılmasının araştırılması*. Isparta: SDÜ, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, **Yüksek Lisans Tezi**.
- Shi C., Krivenko P. V., & Roy, D. (2006). *Alkali activated cements and concretes*. London: **Taylor & Francis**.
- Silverstrim, T., Rotsami, H., Larralde, J., & Samadi Maybodi, H. (1997). *USA Patent No. 601.643*.
- Spence R.J.S. (1980). *Small-Scale production of cementitious materials*. **Intermediate Technology Publications**, 19-35.

- Sullivan, A., & Hill, R. (2001). *Inexpensive glass polialkenoate Cement based on waste gasifier slag*. Morella: **Proceedings of the european union thematic progress workshop**.
- Topçu İ., & Uğurlu A. (2016). *Çelik Lifli Betonlara Farklı Kıvam yöntemlerinin Uygulanması ve Bunlar Arasındaki İlişkiler*. **İMO Teknik Dergi**, 7371-7378.
- Torgal F.P., Gomes J.C., & Jalali S. (2008). *Alkali-activated binders: A review Part 1 Historical background, terminology, reaction machanisms and hydration products*. **Construction and Building Materials**, 1305-1314.
- TS EN 1097. (2002). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- Deval)*. ANKARA: TSE.
- TS EN 1114. (2004). *Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için*. ANKARA: TSE.
- TS EN 1925. (2000). *Doğal taşlar- Deney metotları- Kılcal etkiye bağlı su emme katsayısının tayini*. Ankara: TSE.
- TS EN 196-1. (2009). *Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*. ANKARA: TSE.
- TS EN 196-3. (2002). *Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini*. ANKARA: TSE.
- TS EN 3234. (1975). *Bimsbeton yapım kuralları, karışım hesabı ve deney metotları*. Ankara: TSE.
- Turgut P. (2010). *Masonry composite material made of limestone power and fly ash*. **Powder Technology**, 42-47.
- Turgut P. (2012). *Manufacturing of building bricks without Portland Cement*. **Journal of Cleaner Production**, 361-367.
- Turhan, E. Y. (2013). **Beton**. Ankara: Odtü Yayınevi.
- Türker, H. T., Balçikanli, M., Durmuş, H. İ., Özbay, E., & Erdemir, M. (2016). *Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend*. **Construction and Building Materials**, 169-180.
- Ünal T., & Uygunoğlu O. (2003). *Atık mermer tozu katkılı betonların donma-çözülme etkisinde mekanik özelliklerinin araştırılması*. **Türkiye IV. Mermer Sempozyumu** (s. 147-157). Afyon: Bildiriler Kitabı.

- Ünal, O. (2003). *Yapı Malzemesi Ders Notları*. Afyon: Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayınları.
- Ünsal, N. (2001). **İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji**. Ankara: Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi.
- Van Deventer, J., Van jaarsveld , J., & Lukey, G. (1989). *The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolonit based geopolymers*. **Chemical engineering journal**, 63-73.
- Wasburn, E. (1921). *Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 115-116.
- website of geopolymer institute. (2012). *what is geopolymer*. www.geopolymer.org. adresinden alındı
- Willian, S. A. (1978). *Lightweight Concrete, Third Edition, Formerly, Building Research Establishment Garston*. Garston, Watford: **Building Reserach Establishment**.
- Yurdagül E., Kamiloğlu H.A., & Tekin İ. (2012). *Usage of bayburt stone in road infrastructures as a improvement material*. **International Conference on Traffic and Transport Engineering**, (s. 439-444). Belgrade.
- Zeybek, O. (2009). *Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Zuda L. vd. (2010). *Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to high temperatures: Mechanical and water transport properties*. **Cement and Concrete Composites**, 157-163.

EKLER

Ek 1 : 10 μ inceliğindeki numunelerin deney sonuçları

Ek 2 : 125 μ inceliğindeki numunelerin deney sonuçları

Ek 3 : Deney Görüntüleri

EK 1

10µ numune sonuçları

No	Eğilme Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımı (MPa)			Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
GiK1	4,45	2,34	0,47	20300	24500	15500	15,29	20,44	21,69
				29500	30000	12000			
	2,34	2,34	2,11	23600	47100	37900			
				12700	35400	31500			
GiK2	2,34	5,16	1,41	19400	53100	59900	14,56	30,64	34,47
				25600	46500	55300			
	4,92	2,11	7,73	24100	51900	52900			
				24100	44600	52500			
GiK3	2,34	2,58	1,88	17500	22500	22200	11,14	13,38	15,14
				18500	31400	23500			
	1,88	3,28	1,17	17800	21800	25900			
				17500	19900	25300			
GiKL1	5,39	6,80	3,98	33700	59300	52200	18,80	35,09	32,72
				29800	55300	51900			
	7,27	7,27	7,03	28000	52500	50900			
				28800	57500	54400			
GiKL2	5,16	5,39	5,86	28900	52300	62500	16,75	32,31	39,28
				24500	52600	67500			
	5,63	6,33	6,8	25800	48900	62700			
				28000	53000	58700			
GiKL3	5,16	6,09	5,39	22200	34000	39100	12,13	20,88	24,66
				21800	33200	41900			
	3,28	5,63	6,33	14200	31000	36700			
				11700	35400	40100			

EK 2

125µ numune sonuçları

No	Eğilme Dayanımı (MPa)			Basınc Dayanımı (MPa)			Ortalama Basınc Dayanımı (MPa)		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
GkK1	3,28	3,28	5,16	24100	31700	33500	15,52	24,81	25,08
				24000	39700	34500			
	3,98	2,81		25500	41000	44500			
				25700	38400	48000			
GkK2	3,28	1,88	4,22	21900	30300	34000	13,53	18,78	21,88
				21900	30400	36000			
	5,16	1,88		21900	30700				
				20900	28800				
GkK3	2,58	2,58	3,98	19300	27500	36000	12,38	15,14	22,50
				20300	23500	36000			
	3,05	1,88			22500				
GkKL1	8,44	2,81	6,56	27900	23100	33700	17,47	16,39	21,25
				28500	24000	34300			
	8,2	3,05		27100	29300				
				28300	28500				
GkKL2	8,44	2,11	9,14	30800	22100	43500	18,64	19,75	28,13
				30300	25500	46500			
	8,91	2,34		28900	30300				
				29300	32900				
GkKL3	7,03	2,34	7,73	25000	29000	40000	16,13	19,78	25,31
				26200	31100	41000			
	7,97	1,64		26200	28500				
				25800	38000				

EK 3

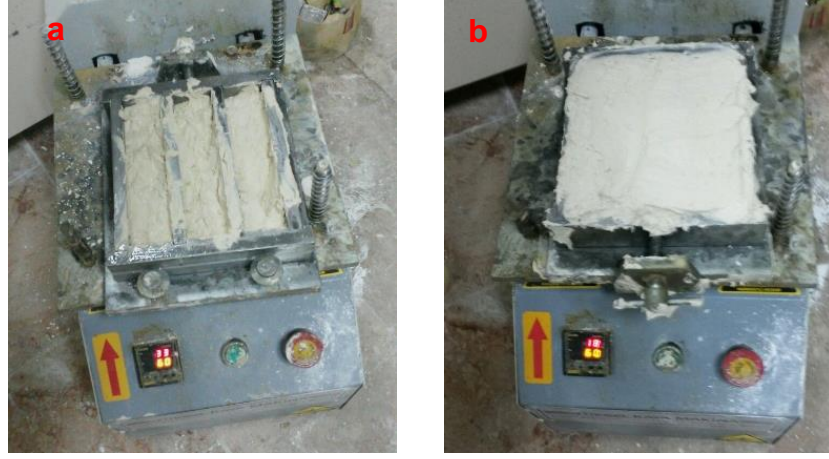
Deney Görüntüleri



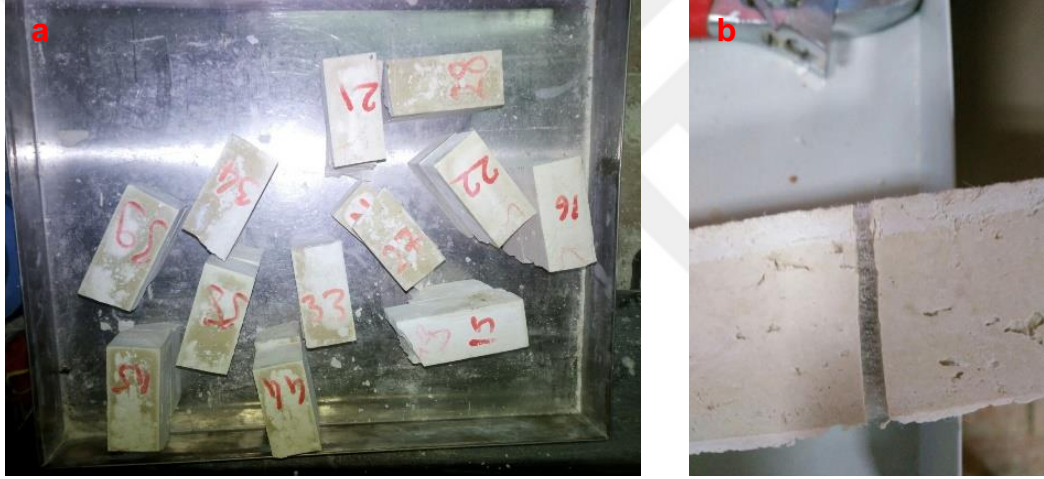
Şekil A.1 a) BT'nin laboratuvar ortamına getirilmesi b) BT'nin konkasörde 0-2 mm boyutlarına indirgenmesi c) BT'nin Los Angeles cihazına yerleştirilmesi



Şekil A.2 : a) Blender tipi öğütücü b) Paletlerin sıyıramadığı kenarlara yapışan BT c) Öğütme sonunda çıkarılan numune ve bilyeler



Şekil A.3 : a) Kalıpların yarıya kadar doldurulması b) Kalıpların tamamının doldurulması



Şekil A.4: a) Lifsiz numunelerin eğilmede çekme deneyi b) Lifli numunelerde eğilme de çekme deneyi sonrası lif görüntüsü



Şekil A.5 : Civa püskürmeli porozimetre

ÖZGEÇMİŞ

Nurullah ÖKSÜZER



Nurullah ÖKSÜZER, 1991 yılında Bayburt'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mahmut Kemal Yanbeğ İlköğretim okulunda tamamladı ve 2005 yılında mezun oldu. Lise öğrenimini 2005 yılında Bayburt Anadolu lisesini kazanarak 2009 yılında tamamladı.

2009 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans eğitimini 2013 yılında tamamladı. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek Lisans eğitimi yaptığı sırada Bayburt Yapı Denetim Ltd. Şti.'nde 2015 yılına kadar İnşaat Mühendisi olarak görev yaptı. İyi derecede İngilizce bilmekte olup, halen Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Tezden bir bölüm 21-23 Eylül 2016 tarihinde yapılacak olan 12. Uluslararası İleri İnşaat Mühendisliği (Advanced in Civil Engineering) Sempozyumu'nda sunulmak ve kongre kitapçığında basılmak üzere kabul edilmiştir.