

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

BAYBURT TAŞI ATIKLARININ GEOPOLİMER TUĞLA ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cemil AYKUT

Şubat- 2017
BAYBURT



**BAYBURT TAŞI ATIKLARININ GEOPOLİMER TUĞLA ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Cemil AYKUT

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

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

BAYBURT TAŞI ATIKLARININ GEOPOLİMER TUĞLA ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cemil AYKUT

2017

BAYBURT

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAY SAYFASI

BAYBURT TAŞI ATIKLARININ GEOPOLİMER TUĞLA ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

İlker Tekin danışmanlığında, Cemil AYKUT tarafından hazırlanan bu tez çalışması ..13../.01../2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

İmza :

Üye: Yrd.Doç.Dr. İlker TEKİN

İmza :

Üye: Yrd.Doç.Dr.Ertekin ÖZTEKİN

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

(imza)
Doç. Dr. Metin UÇURUM

Enstitü Müdür V.

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.



Cemil AYKUT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BAYBURT TAŞI ATIKLARININ GEOPOLİMER TUĞLA ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Cemil AYKUT

Bayburt Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İlker TEKİN

Doğal taşlar estetikliği, dayanıklılığından dolayı binalarda ve anıtlarda kullanılmıştır. Son yıllarda özellikle kaplama taşı, mezar taşı, süs eşyası olarak kullanıldığı gibi heykel yapımında ve porselen üretiminde de doğal taşlar kullanılmaktadır. Bu yüzden endüstriyelmiş ya da endüstriyelşmekte olan doğal taş üretimi bir çok bölgede gerçekleştirilmektedir. Bu süreç hem ocak hem de atölyede atık ürün oluşturmaktadır. Bu atıklar inşaat sektörü ve birçok sektörde değerlendirildiği gibi atık sahalarında depolanmakta ya da direk çevreye bırakılmaktadır. Rüzgar ve yağmur erozyonu ile taşınan partiküller tarım arazilerini kirletmekte, içme sularını tahrip etmekte ve tozlaşma sonucunda doğa kirliliği oluşturmaktadır.

Bu çalışmada dış duvar kaplaması, denizlik ve yüzey kaplamaları yanında çeşitli restorasyon işlerinde, köprü, cami ve çeşme gibi imalatlarda kullanılan Bayburt Taşı (BT) atıkları, alkali aktivatör olan Sodyum Hidroksit (NaOH) ve geopolimerizasyon yöntemi birlikte kullanılmıştır. Böylece yüksek dayanıma sahip yapı tuğlası üretimi amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmada Bayburt bölgesindeki traverten atıkları ve Bayburt taşı atıkları kullanılarak tuğla üretilmiştir. Bu kapsamda BT ve traverten atıklarını hamur haline getirebilmek için öğütüldükten hemen sonra 5 mol ve 10 mol konsantrasyonlarındaki NaOH çözeltisiyle belli oranlarda karıştırılmıştır. Hamur numuneler laboratuvar şartlarında küre bırakıldıktan sonra 20 °C, 40 °C ve 80 °C sıcaklıkları uygulamak yoluyla sertleştirilmiştir. Priz başlangıcı ve bitişi, eğilme ve basınç dayanımı, aşınma dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme, yüksek sıcaklık gibi deneyler katılmış örnekler üzerinde yapılmıştır. Bayburt taşı ve traverten atıklarından üretilmiş geopolimer tuğlaların özellikleri geleneksel tuğla malzeme standartları ile karşılaştırılmıştır. Üretilen tuğla yeşil malzeme olarak tanımlanan sıfır CO₂ salınımına sahip, daha yüksek dayanımlı, daha ekonomiktir. Bu yüzden üretilen bu tuğlaya çevre dostu malzeme olduğuda söylenebilir.

2017, 92 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tuğla, Geopolimer, Bayburt Taşı, Kil, Traverten Atığı

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF USABILITY OF BAYBURT STONE WASTES IN GEOPOLYMER BRICK PRODUCTION

Cemil AYKUT

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

Supervisor : Assist. Prof. Dr. İlker TEKİN

Natural stones were used in monument and buildings by mankind because of durability and esthetics. Recently, especially, stones have been used as construction material, cladding stone, gravestone, decorative furniture, sculpture, and in porcelain production. Therefore, industrialized or industrializing natural stone production has been carry out in many regions. This process is occur waste product for both in quarry and in workshop. These wastes have been usually used in construction sector, have been stored or thrown out directly in environment. Particles moved by erosion of rain and wind from the waste fields affect domestic water and agricultural areas dramatically, and also nature pollution make up due to dusting.

In this study, Bayburt Stone (BS) production wastes which has been used as cladding stone, window ledge and some restoration works such as bridge, mosque and fountain was used in geopolymerization method with an alkali activator like NaOH. Hence, it was aimed that has produced highly strength construction brick.

In the experimental study, brick was produced using travertine and BS wastes in Bayburt region. In this scope, as soon as BS and travertine wastes were grinded, they were mixed in certain ratios with 5M and 10M concentrations of NaOH solution to make paste form. After the paste specimens were cured in laboratory condition, firstly

they were hardened by 20, 40 and 80 °C heating process for 24 hours in incubator. The end of this process the maximum strength of 2 and 28 days were chosen to manufacture main specimen group to do some other tests. Curing temperature of 20°C had the best strength development values. Setting time, standard consistency tests were done on fresh pastes specimens, flexural and compressive strength, abrasion resistance, unit weight, water absorption, thermal conductivity constant and resistance of elevated temperature tests were done on hardened specimens. Properties of geopolymer brick produced with BS waste and travertine wastes was compared with traditional bricks. Produced brick as known green material has higher compressive strength, more eco-efficiency, and it has zero CO₂ emission, and so it could be said it is eco-friendly material.

2017, 92 pages

Keywords: Brick, Geopolymer, Bayburt Stone, Clay, Travertine Waste,

TEŞEKKÜR

Bu araştırma iin beni ynlemdiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrbesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Yrd. Do. Dr. İlker TEKİN'e teőekkrlerimi sunarım. Literatr araştırmalarımnda ve deney yapımlarında yardımcı olan Arş. Gr. Nurullah KSZER 'e teőekkr ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Cemil AYKUT

Şubat/2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Duvar elemanları	3
2.1. Duvar elemanlarının çeşitleri	3
2.1.1.1. Tuğla	3
2.1.1.2. BimsBlok.....	6
2.1.1.3. Gazbeton.....	11
2.2. Geopolimerizasyon.....	14
2.2.1. Geopolimerizasyon Kimyası.....	17
2.2.2. Geopolimerizasyon Çeşitleri.....	20
2.2.2.1. Alkali silikatlar (siloksanat-cam suyu).....	20
2.2.2.2. Kaolinit/hidrosodalit esaslı geopolimerler.....	21
2.2.2.3. Metakaolinit esaslı geopolimerler.....	22
2.2.2.4. Kalsiyum esaslı geopolimerler.....	23
2.2.2.5. Kayaç esaslı geopolimerler.....	23
2.2.2.6. Silis ve silika dumanı esaslı geopolimerler.....	24
2.2.2.7. Uçucu kül esaslı geopolimerler.....	24

2.2.2.8. Fosfat esaslı geopolimer.....	25
2.2.3. Geopolimer Bağlayıcılar.....	26
2.2.4. Geopolimer Betonlar.....	27
2.2.5. Geopolimer Tuğlalar.....	28
2.3. Doğal Taşlar.....	29
2.3.1. Magmatik (püskürük) kökenli doğal taşlar.....	30
2.3.1.1. Volkanik Tüfler.....	31
2.3.2. Metamorfik (başkalaşım) kökenli doğal taşlar.....	33
2.3.2.1. Traverten.....	34
2.3.3. Sedimanter (tortul) kökenli doğal taşlar.....	35
2.4. Literatür Araştırması.....	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	41
3.1. Materyal.....	41
3.1.1. Bayburt taşı.....	41
3.1.2. Traverten.....	46
3.1.3. Sodyum Hidroksit.....	49
3.2. Yöntem.....	50
3.2.1. Taze hamur deneyleri.....	50
3.2.1.1. Kıvam ve priz sürelerinin belirlenmesi deneyi.....	51
3.2.2. Sertleşmiş hamur deneyleri.....	52
3.2.2.1. Basınç ve eğilme deneyleri.....	52
3.2.2.2. Su emme ve kapiler su emme deneyleri.....	54
3.2.2.3. Aşınma deneyi.....	56
3.2.2.4. Yüksek sıcaklık etkisi deneyi.....	57

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	58
4.1. Fiziksel özellikler.....	58
4.1.1. Taze GHH'lerin standart kıvam ve priz süreleri deney sonuçları.....	58
4.1.2. Yayılma deneyi sonuçları.....	59
4.1.3. Su emme ve kapiler su emme deneyi.....	60
4.2. Mekanik Özellikler.....	63
4.2.1. Eğilme ve basınç dayanımı.....	63
4.2.2. Aşınma Dayanımı.....	66
4.3. Termik Özellikler.....	67
4.3.1. Sıcaklık Etkisi.....	67
4.3.2. Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	70
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	73
5.1. Sonuçlar.....	73
5.2. Öneriler.....	74
KAYNAKLAR.....	76
EKLER.....	81
EK 1.....	82
EK 2.....	84
EK 3.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	93

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
F	Kılcal su emme yüzey alanı
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
Ac	Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı
σ_e	Eğilme dayanımı
δ	Özgül ağırlık

Kısaltmalar

UK	Uçucu kül
YFC	Yüksek fırın cürufu
BHA	Birim hacim ağırlık
BT	Bayburt taşı
Ç/B	Çözelti/Bağlayıcı
Ç/T	Çözelti/Toz malzeme
GH	Geopolimer hamur
KSEK	Kapiler su emme katsayısı
MIP	Mercury Intrusion Porosimetry (Cıvalı Porozimetre Deneyi)
TA	Traverten Atığı
MTA	Maden Tetkik ve Arama

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Çeşitli tuğlalar.....	4
Şekil 2.2 Asidik Karakterli Bims	6
Şekil 2.3 Bazik Karakterli Bims	6
Şekil 2.4 Panteon Tapınağı ve Ayasofya Müzesi.....	8
Şekil 2.5 Bimsblok Hafif Yapı Elemanları	8
Şekil 2.6 Bims Blok Üretim Şeması (Çevre Şehircilik,2011)	10
Şekil 2.7 Gazbeton Yapı Elemanları.....	11
Şekil 2.8 Gaz Beton Üretim Şeması	12
Şekil 2.9 Gazbeton Gözenekli yapısı.....	12
Şekil 2.10 Zeolitlerin kristal yapısı (Köktürk, 1995)	33
Şekil 3.1 Bayburt ili maden haritası (MTA, 2005).	42
Şekil 3.2 Öğütmeden önceki BT'nin SEM görüntüleri	43
Şekil 3.3a) 1. bölgenin büyütülmüş görüntüsü b)2.Bölgenin büyütülmüş görüntüsü	43
Şekil 3.4 Şekil 3.3a görüntüsünün EDS analizi.....	44
Şekil 3.5 BT'nin XRD (mineralojik) analiz sonucu	44
Şekil 3.6 a) TA 'nin SEM görüntüleri b) 1 nolu bölmenin yakın görüntüsü	46
Şekil 3.7 Traverten XRD analizi.....	47
Şekil 3.8 a) BT'nin laboratuvar ortamına getirilmesi b) BT'nin konkasörde 0-2 mm boyutlarına indirgenmesi c) BT'nin Los Angeles cihazına yerleştirilmesi.....	48
Şekil 3.9 Bayburt Taşının Los Angeles Öğütme Sonucu	48
Şekil 0.10 Öğütmeden sonraki BT'nin SEM görüntüleri.....	48
Şekil 3.11 a) Vicat cihazında kıvam belirlenmesi b) Priz başlangıcı ve priz sonu belirlenmesi	52
Şekil 3.12 a) Kalıpların yarıya kadar doldurulması b) Kalıpların tamamının doldurulması.....	53
Şekil 3.13 a)Eğilme dayanım aleti b) Basınç dayanım aleti	54
Şekil 3.14 7 ve 28 günlük su emme deneyi	55
Şekil 3.15 7 ve 28 günlük kapiler su emme deneyi	56
Şekil 3.16 Aşınma deneyi	56
Şekil 3.17 Yüksek sıcaklık uygulama süreci	57

Şekil 3.18 300-500-700 °C etüv içerisinde numuneler	57
Şekil 4.1 Yayılma deneyi sonucu.....	60
Şekil 4.2 Su emme deneyi 120. dk görüntüsü.....	62
Şekil 4.3 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı.....	63
Şekil 4.4 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	65
Şekil 4.5 Aşınma deneyi sonuçları	67
Şekil 4.6 a) GH1 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu b) GH2 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu.....	68
Şekil 4.7 a) GH4 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu b) GH5 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu.....	68
Şekil 4.8 Yüksek sıcaklık basınç deney sonuçları	71
Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık sonrası BHA değerleri.....	72
Şekil 4.10 Yüksek sıcaklık etüv sonrası numune görüntüleri.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Üretilen tuğlaların bazı özellikleri (TS 705).....	5
Çizelge 2.2 Asidik ve bazik karakterli bims kimyasal bileşimi(Gündüz,1998).....	7
Çizelge 2.3 Bims blok üretiminde kullanılan karışım oranları	9
Çizelge 2.4 Bimsin teknik özellikleri (Gündüz, 1998)	9
Çizelge 2.5 Gaz Betonun teknik özellikleri(TS EN 771-4)	13
Çizelge 2.6 Bazı bölgelere ait volkanik tüflerin kimyasal analiz sonuçları (Ören, 1996)	31
Çizelge 2.7 Doğal zeolitlerin fiziksel özellikleri (Doğan, 2003).....	33
Çizelge 2.8 Doğal taşların kökenlerine göre sınıflandırılması (Ünal, 2003)	35
Çizelge 3.1 Bayburt beyaz taşının kimyasal özellikleri (Aşkale Çim. Fab. XRF analizi).....	45
Çizelge 3.2 Bayburt beyaz taşının fiziksel ve mekanik özellikleri (MTA, 2005)	46
Çizelge 3.3 Traverten tozunun kimyasal analiz sonuçları	47
Çizelge 3.4 Bayburt taşı ve Traverten öğütme tablosu.....	48
Çizelge 3.5 1 dm ³ için karışım oranları	50
Çizelge 3.6 Deneysel çalışmada kullanılan alkaninin kimyasal kompozisyonu	49
Çizelge 4.1 Taze haldeki hamurların standart deney sonuçları	58
Çizelge 4.2 Yayılma deneyi sonuçları	59
Çizelge 4.3 Su emme, görünür porozite ve kuru birim hacim ağırlık değerleri	61
Çizelge 4.4 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları	63

1. GİRİŞ

Türkiye doğal taş bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Endüstriyelmiş ya da endüstriyelleşmekte olan doğal taş üretimi birçok ilimizde gerçekleştirilmektedir. Doğal taş üretimi ülkemizin ekonomik kalkınmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Bu üretimler hem ocak hem de işletme kapsamında yaklaşık %30 – 70 oranında atık ürün oluşturmaktadır. Bu atıklar başta inşaat sektörü olmak üzere birçok alanda değerlendirilmesine rağmen çok büyük bir kısmı atık sahalarında depolanmaktadır. Bu atık sahalarından rüzgâr ve yağmur erozyonu ile taşınan partiküller tarım arazilerini kirlettiği gibi içme sularını da tahrip etmekte ve tozlaşma sonucunda doğa kirliliği oluşturmaktadır(Tekin,2016).

Doğu Karadeniz bölgesi sahip olduğu jeolojik yapısı nedeniyle çeşitli maden kaynaklarını bulundurmaktadır. Bu maden yatakları ve rezervleri daha çok Bayburt ve Gümüşhane gibi bölgenin güney kısımlarında mevcuttur. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA) 2005 yılında hazırladığı “Bayburt ili Maden ve Enerji Kaynakları” raporuna göre; Merkez-Helvaköy ve Anzarya bakır sahasında yaklaşık 200.000 ton civarında bakır rezervi olduğu tespit edilmiştir. Bunların dışında Bayburt Taşı” olarak bilinen ve bu bölge civarında bulunan Bayburt tuf ve tüfitleri yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği sayesinde Bayburt ekonomisi için önem arz etmektedir. Bayburt ilinde 2005 yılında yapılan etütler neticesinde Toptepe, Sırataşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüşdamla maden sahalarında yaklaşık 2.535.700. ton rezerv Bayburt taşı yatağı olduğu tespit edilmiştir(Tanyolu E,1988).

Bayburt Taşı (BT) orijin olarak tuf/tüfit taşlar grubundadır. Yapısında bulunduğu yüksek oranda silis ve zeolit minerallerinden meydana gelmektedir. Yaklaşık rezerv miktarı 180 milyon metreküp olduğu yapılan araştırmalarda belirtilmiştir. Bayburt Taşı yapılarında özellikle dış duvar kaplaması, denizlik ve yüzey kaplamalarında kullanıldığı gibi köprü, anıt, mezar gibi imalatlarda kullanılabilir. Bayburt taşının işletmeciliği mevcut yöntemlerle yapıldığında % 70'e varan kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıp tarım arazilerini ve havayı kirletmekte çevre ve sağlık

problemlerine sebep olmaktadır. BT'nin fazla miktarda atığı depolama sorunlarını da beraberinde getirmektedir.

Yapı malzemesi biliminin son zamanlarda ilgi gören konularından olan sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu sağlayan malzemelerden geopolimer tuğla üretimi yöntemidir. Geopolimerizasyon işlemi puzolanik aktivitesi olan uçucu kül, tuf, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atık malzemelerin sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerle aktifleştirilmesi işlemidir.

Geleneksel tuğla üretiminde yaklaşık 1000 °C sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır. Bu sıcaklıkları üretebilmek için yüksek oranda fosil yakıtlar kullanılması gerekmektedir. Sonuçta CO₂ emisyonları yükselmekte ve hava kirliliğini artmaktadır. Diğer bir taraftan endüstriyel atıklar da her geçen gün artan çevre kirliliği oluşturmakta, tarım arazilerinin verimini düşürmekte ve tozuma yaparak sağlık sorunlarına sebep olmaktadır.

Bu tez çalışmasında Bayburt Taşı ve Traverten üretim sonucu oluşan atık malzemeler kullanılarak yüksek dayanımlı ve kaliteli geopolimer tuğla üretmek amaçlanmıştır. Böylece bu atıklar yapı malzemesi üretiminde değerlendirilecek ve sebep olduğu bazı çevresel sorunların minimize edilecektir. İlaveten elde edilecek yeni malzeme kente ekonomik fayda sağlayacak ve istihdam alanı oluşturacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Duvar elemanları

Duvar elemanları kullanıldığı yere göre, özellikle kâgir yapılarda üzerine gelen yükü yapının temeline ulaştıran, yapılarda bina bölümlerini birbirinden ayıran, onları çevreleyen ve binayı dış tesirlere karşı koruyan yapı elemanlarıdır. Duvar elemanları çeşitli bağlayıcı malzeme kullanılarak örülebildiği gibi bağlayıcı malzeme kullanılmadan da direk kullanılabilirler.

2.1.1 Duvar elemanlarının çeşitleri

Bina duvarları işlev, fonksiyon ve amaçlarına göre birçok malzemeden yapılabilir. Bunlar arasında en yaygın olarak üretilenleri kil esaslı olmakta ancak günümüzde hafif beton, cam, alçı esaslı ve bunların yanı sıra süreç ürünler de bulunmaktadır. Yapılarda duvar elemanlarından beklenen bazı özellikler vardır. Duvar elemanlarının en önemli özellikleri ekonomiklik, düşük ısı iletkenlik, hafiflik ve dayanıklılıktır.

2.1.1.1 Tuğla

Tuğla, dünya tarihinde yapı malzemeleri arasında ilk ürünlerden birisidir. Bu pişmiş toprak malzemeler geliştirilmiş özelliklerle halen kullanılmaktadır. Kil esaslı tuğlalar ekonomik olup, temini ve yapıda kullanımının kolay olması sebebiyle günümüzde oldukça yaygındır. Tuğla imalatı, yapı sanayii ve ülke ekonomisinde önemli bir yere sahiptir. Suya, dona ve ateşe karşı oldukça dayanıklı ve ayrıca doğal malzemeden üretildiği için duvar elemanları içinde özel bir yere sahiptir.

Tuğla, killi yapıdaki toprak malzemesinin su ile karıştırılarak harç şekline getirildikten sonra kurutulup yüksek sıcaklıklardaki (900-1300 °C) fırınlarda pişirilmesi ile elde edilen bir yapı malzemesidir (Yüksel ve Şişman, 2003).

Genellikle İllit ve Kaolinit killeri tuğla üretiminde tercih edilmektedir. Tuğla yapımında kullanılan kilin mekanik özellikleri kimyasal özelliklerinden daha önemlidir. Tuğla yapımında kullanılacak malzeme su ile yoğrulduğunda kolayca şekil alabilmeli ve kurumaya bırakıldığında bu halini koruyabilmelidir. Kalıplarda şekil verilerek kurutulan malzeme pişirilmeden önce mevcut fiziksel yapısını koruyacak

miktarda dayanıklı ve pişirme işleminden sonra hacminin küçülmesi %5 gibi düşük oranlarda olmalıdır. Elde edilen tuğla yürürlükte bulunan TS 705 standartlarına sahip olmalıdır (Tokyay, 1993).



Şekil 2.1 : Çeşitli tuğlalar(Çağlartuğla,2016)

Tuğlanın üretim aşamaları hammaddenin öğütülmesi, şekillendirme, kurutma ve pişirme evrelerinden oluşmaktadır. Tuğla hammaddesinin hazırlanması bir dizi adımdan oluşmaktadır. Hammaddenin işlenebilirlik özelliği kazanabilmesi için önce öğütme işlemi yapılmaktadır. Hammaddenin homojen bir malzeme olması, plastiklik ve kohezyon özelliklerinin gerçekleşebilmesi için iyice ufalanması ve ince partiküller halini alması gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli makinalarla içindeki iri taşlar, çöpler ayıklanmakta (taş ayırıcı, vals, kollergang vb.) ve istenilen dane çapına kadar öğütülmektedir (Dönmez,1993).

Hammadde hazırlandıktan sonra kazandığı işlenebilirlik sayesinde çeşitli yöntemlerle kolayca şekillendirilerek, çeşitli biçim ve boyutlarda yarı mamul tuğla elde edilmektedir. Bu aşamada oluşan tuğla malzemesine şekil vermek için makine kullanılmaktadır. Mekanik üretim yapılan tuğlada presleme ve kesme yöntemleri kullanılmaktadır (Dönmez, 1993).

Üretilen tuğlaların pişirme öncesi belirli bir mukavemet kazanmaları ve pişirme sırasında şekil değiştirme (rötre) ve çatlamayı engellemek için kurutulması gerekir. Kurutma işlemi normal atmosferik şartlarda doğal olarak yapılabileceği gibi, sıcaklığın ve nemin kontrol altında tutulabildiği özel kurutma odalarında da yapılabilir (Öneş, 1988).

Tuğla üretim sürecinde son olarak pişirme işlemi uygulanır. Bu esnada kil yapısında kimyasal tepkimeler meydana gelir. Sıcaklık 300 °C ulaştığında kilin içerisinde bulunan organik maddeler tamamen yanar. Sıcaklık 550 °C ulaştığında su molekülü kilin yapısından ayrılır ve kil silis ve alümin yapıdaki haline kavuşur. Sıcaklık 550–900 °C arasında silis ve alümin tepkimeye girerek metakaolin silikatı ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) meydana getirir. Bu metakaolin silikat sert yapıda şeklini koruyan, renkli ve bir dayanıma sahip bir tuğlanın ilk formunu oluşturur. Sıcaklık arttıkça tuğlanın mekanik dayanımı artacak böylelikle su emme kapasiteside azalacaktır. Yüksek sıcaklıklar tuğlanın yapısındaki camlaşma oranının artırdığı gibi harcı bir arada tutan yapışma özelliğinin bozulmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı tuğla pişirme sıcaklığın 900–980 °C arasında olması istenir (Ekmekyapar ve Örüng, 1993).

Çizelge 2.1 : Üretilen tuğlaların bazı özellikleri (TS 705)

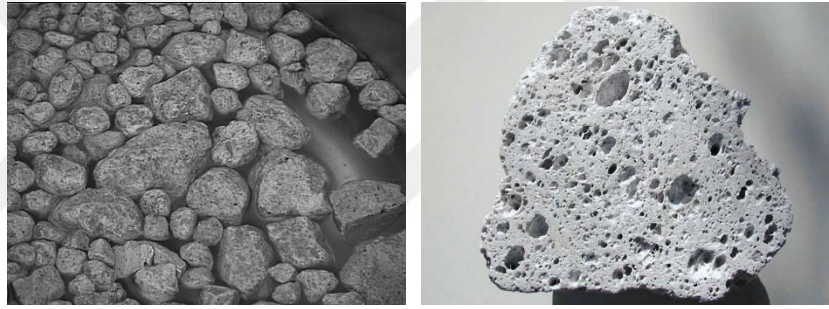
Tuğla Sınıfı	Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç Dayanımı			Hacim Ağırlığı kg/m ³		Delik Oranı %
		Tuğla Sembolü	Aritmetik Ort. N/mm ² (MPa)	Min. Değer N/mm ² (MPa)	Maks.	Min.	
Dolu Tuğla	2000	2.0/240	240 (23.5)	190 (18.6)	2000	1801	15
		2.0/180	180 (17.6)	145 (14.2)			
		2.0/120	120 (11.8)	95 (9.3)			
	1800	1.8/220	220 (21.6)	175(17.2)	1800	1601	
		1.8/150	150 (14.7)	120 (11.8)			
		1.8/100	100 (9.8)	80 (7.8)			
Seyrek Delikli Tuğla	1600	1.6/220	220 (21.6)	175 (17.2)	1600	1401	20
		1.6/150	150 (14.7)	120 (11.8)			
		1.6/100	100 (9.8)	80 (7.8)			
	1400	1.4/200	200 (19.6)	160 (15.7)	1400	1201	
		1.4/120	120 (11.8)	95 (9.3)			
		1.4/80	80 (7.8)	65 (6.4)			
Az Delikli Tuğla	1200	1.2/150	150 (14.7)	120 (11.8)	1200	1001	35
		1.2/100	100 (9.8)	80 (7.8)			
		1.2/60	60 (5.9)	45 (4.4)			

2.1.1.2 Bimsblok

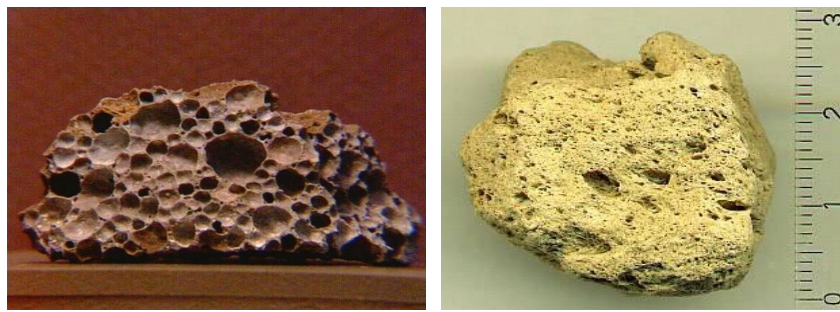
Bims, volkanik patlamanın oluşunu takip eden hızlı bir soğuma neticesinde yapısında bulunan gazların buharlaşması ile meydana gelen oldukça hafif yapıdaki bir malzemedir. Gözenekli yapıda, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, ısı ve ses yalıtım özelliği sağlayan, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, camsı yapıya sahip bir yapıya sahip kayadır. Meydana gelişimi sırasındaki yapısındaki gazların bünyesini

hızlı bir şekilde terk etmesi ve nedeniyle çeşitli ölçeklerde birçok gözenek bulundurur. Gözeneklerin arası genellikle bağlantısız ve boşluklu olduğundan permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir(DPT, 2001)

Volkanizmanın oluşum sürecine ve volkanik oluşum şartlarına bağlı olarak asidik ve bazik olmak üzere iki ayrı karakteristik yapıya sahip bims meydana gelmektedir. Asidik özellikteki bims, açık gri-beyaz renk tonlarında olup, silisyum oranındaki artış asidik özelliği artırdığı için renk de beyaza doğru yaklaşır. Bu karakterdeki bims oluşumlarının beyaz, kirli beyaz ve gri renklerde olduğu Şekil 2.2’de görülmektedir. Bazik bimsin porozitesi daha düşük olup, birim hacim ağırlığı 1000-2000 kg/m³ civarında değişmektedir. Bazik bims uluslararası literatürde “Scoria” olarak bilinir ve kahve-siyah arası koyu tonlarda Şekil 2.3’te gibi görülmektedir.



Şekil 2.2 : Asidik Karakterli Bims (Gündüz, 1998)



Şekil 2.3 : Bazik Karakterli Bims (Gündüz, 1998)

İnşaat sektöründe silis oranı ve porozitesi yüksek, demir oranı düşük olan asidik bimsler tercih edilmektedir. Bazik bimsler ise alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranda bulunması nedeniyle diğer endüstriyel alanlarda (örneğin gübre sanayinde kek maddesi olarak, toprak ıslahı amacıyla tarımda

vs.) kullanım alanı bulabilmektedir. Çizelge 2.2’de asidik ve bazik karakterli bimsin kimyasal bileşimi verilmiştir (Gündüz, 2005).

Çizelge 2.2 : Asidik ve bazik karakterli bims kimyasal bileşimi(Gündüz,1998)

Bileşim	Asidik	Bazik
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2.5	7
CaO	0.9	1.1
MgO	0.6	7
Na ₂ O+K ₂ O	9	8
A.K.	3	1

Yapısında bulundurduğu gözenekler sayesinde bims teknik tanımlarda genellikle “doğal yapıdaki hafif agrega” olarak tanımlandığı gibi halk dilinde de pomza taşı olarak da tanımlanmaktadır. Hafif agrega tanımı; meydana gelişleri sırasında gözenekli bir yapı kazanmış bulunan tuf, bims (pomza), sünger taşı, lav cürufu, diatomit vb. kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak nitelendirilmiştir (TS 1114, 2004)

Ülkemizde 1972 yılından bu yana bims üretimi yapılmaktadır. Türkiye bims rezervleri bakımından oldukça zengindir. Araştırılmış alanlarda yaklaşık 7 milyar metreküp potansiyele sahiptir (Serin, 1999).

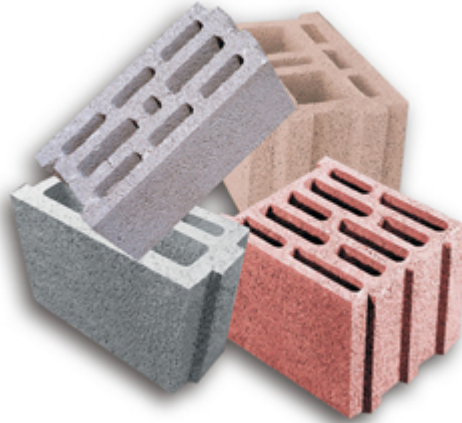
Bims Roma duvarlarının inşaatında, su kanalları, amfi tiyatrolar, tapınaklar, su kemerleri, hamamlar, mahzenler ve konut inşaatlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bunlardan en belirgin örnekler Roma Panteon ve Ayasofya Müzesidir (Şekil 2.4). Bu yapıların kubbelerinde hafiflik, dış ortam koşullarına ve depreme dayanım gibi avantajları sebebiyle bims kullanılmıştır (Andrew ve William, 1978).



Şekil 2.4 : Panteon Tapınağı ve Ayasofya Müzesi(<http://ayasofyamuzesi.gov.tr/>)

Bims taşından elde edilen malzemelerin en iyi örnek bims blok olarak adlandırdığımız yapı malzemeleridir. Birçok boyutta üretilen Bimsbloklar yüksek ısı ve ses yalıtımı sağlamaları yanısıra mukavemeti yüksek bir malzemedir. Aynı zamanda hem depreme dayanıklı yapıların öneminin artması hem de malzemenin ucuz olması yönünden büyük bir kullanım alanına sahip olmuştur (Gündüz vd, 1998).

Bimsbloğun örnek fotoğraf görünümü şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5 Bimsblok Hafif Yapı Elemanları (Bimsader,2012)

Pomza(Bims) taşı agrega olarak kullanılabilmesi için kırma, eleme ve boyutlandırma işlemleri uygulanır. Pomza maden ocağından bir lastik yükleyici ile kazılarak, kamyonlara yüklenir. Endüstriyel önem taşıyan yataklardan açık işletme metodu ile elde edilen pomza madeni, kamyonlar ile Bimsblok üretim işlemi için fabrikalara sevk edilir. Fabrikada uygun kırma eleme sistemlerinde boyut küçülterek sınıflandırılır ve Bimsblok agregası haline dönüştürülür. Boyutlandırılmış pomza agregası ayrı ayrı

silolara istif edilir. Bimsblok üretim sistemi, tamamen bilgisayar otomasyonlu robot teknolojisi ile donatılmış olan mekanize bir sistemle, silolarda toplanan bims agregası ve bağlayıcı olarak çimentonun su ile homojen olarak karıştırılması için mikse atılır.

Oluşturulan karışım, yüksek basınç ve vibrasyon altında kalıplara preslenir. Kalıp içerisinde istenen sekle giren pomza, paletler, elevatör ve taşıyıcı robot vasıtasıyla priz kazanmak üzere kamaralara yerleştirilir. Bims bloklar istenilen dayanıma eriştikten sonra, yine taşıyıcı ve istifleyici robot vasıtası ile stok alanına sevk edilir. Bims blok üretim şeması Şekil 2.6 'da gösterilmiştir. Bims blok üretiminde kullanılan standart karışım oranları Çizelge 2.3 'de verilmiştir.

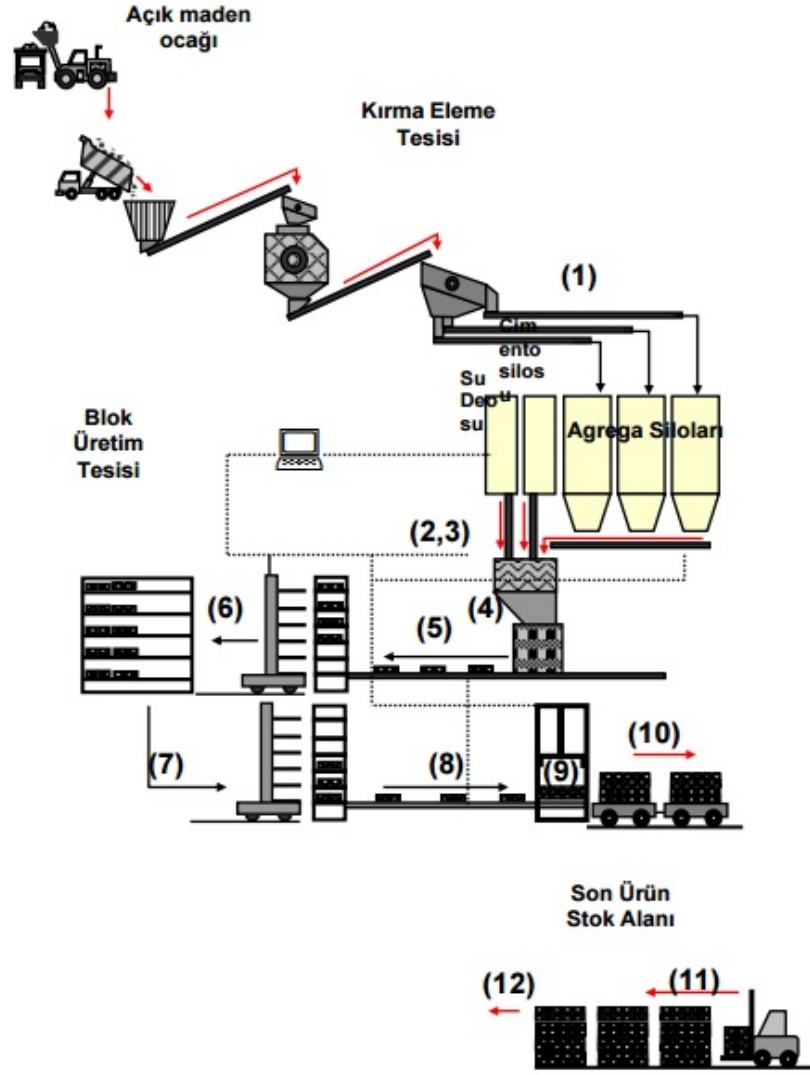
Çizelge 2.3 : Bims blok üretiminde kullanılan karışım oranları

Karışım ölçüleri	Gri CEM I 42,5 Çimentosu ile Yapılan Karışım
Çimento (kg/m ³)	100
Bims agregası (kg/m ³)	815
Kum agregası (kg/m ³)	120
Ortam sıcaklığı (°C)	25,0

Üretilen bimsin teknik özellikleri Çizelge 2.4 verilmiştir.

Çizelge 2.4 Bimsin teknik özellikleri (Gündüz, 1998)

Brüt Kuru Birim Hacim Kütlesi (kg/m ³)	611
Net Kuru Birim Hacim Kütlesi (kg/m ³)	861
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	2,30
Isıl Davranış Özelliği (W/mk)	0,156
Su Buharı Geçirgenliği (Kg/m ² Spa)	7,42
Ses Yutuculuk (Db)	35
Yangına Direnç	A1



Şekil 2.6 Bims Blok Üretim Şeması(Gündüz,1998)

2.1.1.3 Gazbeton

Gazbeton kum, çimento, sönmemiş kireç, çok düşük konsantrasyonlarda alçıtaşı ve su karışımına alüminyum tozu katılarak elde edilir. Bu karışım sonucunda kimyasal reaksiyon meydana gelir ve bunun neticesinde gözenekli bir yapıda malzeme elde edilir. Üretilen gazbeton yapı malzemesi şekil 2.7’de gösterilmektedir.

Milimetrik olarak kesilerek otoklavda yüksek basınçlı buhar altında sertleştirilerek nihai kristal yapısına ulaşan Gazbeton bu gözenekli yapısı sayesinde ısı yalıtımın oranı yüksek, hafif, yeterli basınç dayanımına sahip, yangına ve depreme dayanıklı hafif beton grubuna giren bir yapı malzemesidir.



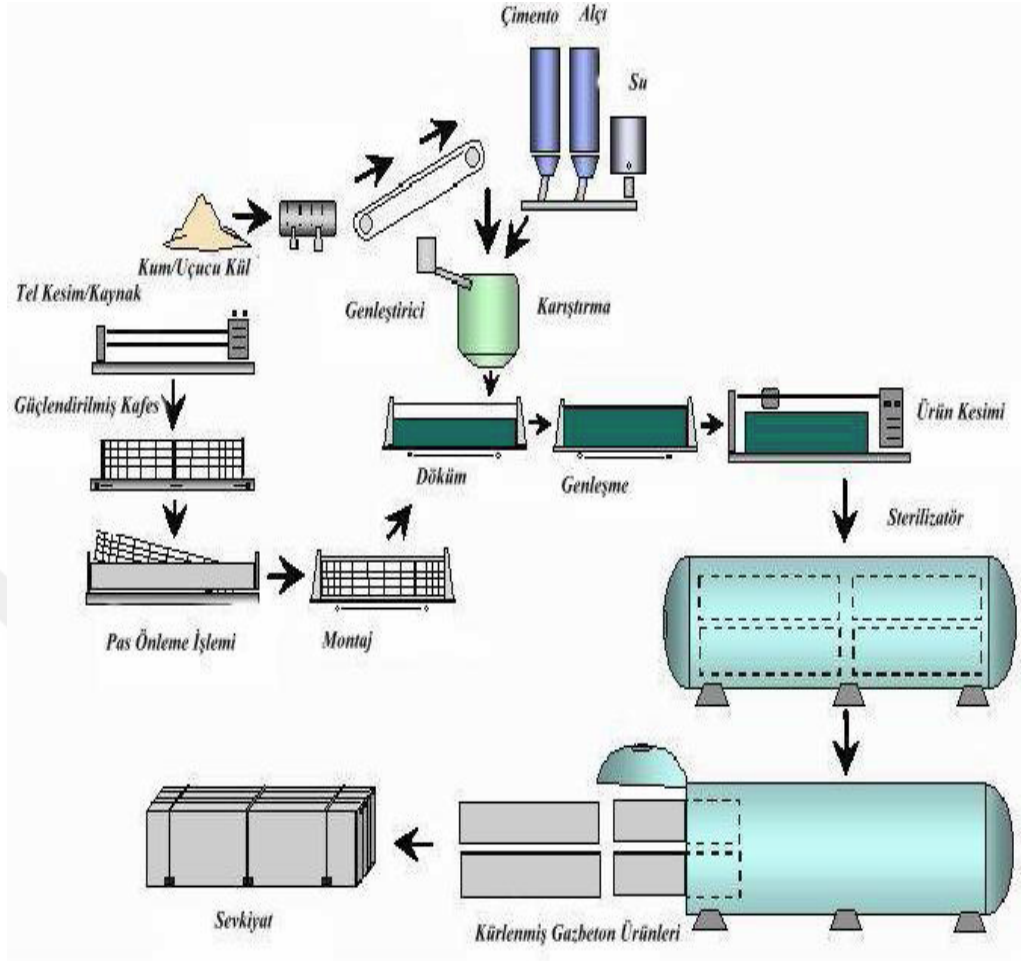
Şekil 2.7 Gazbeton Yapı Elemanları(Hititgrup,2016)

Gazbetonun endüstrileşmiş üretiminde, genellikle silisli agrega olarak silisçe zengin olan kum, kuvarsit veya uçucu kül, gözenek oluşturucu olarak ise alüminyum tozu veya macunu kullanılmaktadır (Kömürlü 2007).

Gaz beton üretiminde kullanılanlar malzemeler aşağıda sıralanmıştır.

- Silisli Kum veya Kuvarsit
- Kireç
- Çimento
- Alçı Taşı
- Su
- Alüminyum Tozu

Alüminyum tozu, CaOH ve H₂O ile reaksiyona girer. Hidrojen çıkışı olur. Çıkan hidrojen sulu betonun içinde kabarcıklar oluşturarak hacminin artmasını sağlar. Beton kabarıyor ve boşluklu bir yapı kazanır. Kalıpların sadece %40'ı doldurulur. Katılan beton kalıpları kesilerek 12 bar basınç ve 190 °C sıcaklıkta 10-12 saat buhar kürüne tabi tutulur. Bu işlemler sonucunda hafif, gözenekli ve yüksek basınca dayanım özelliği olan gaz beton oluşur. Gaz betonun üretim şeması Şekil 2.8 'de gösterilmiştir. Gazbetonun gözenekli yapısı Şekil 2.9 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Gaz Beton Üretim Şeması (Ünverdi,2006)



Şekil 2.9 Gazbeton Gözenekli yapısı (Ytong,2016)

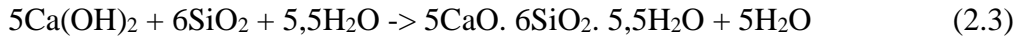
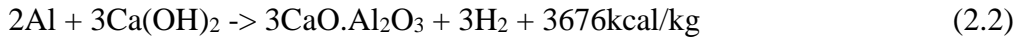
Gazbetonun yüksek ısı ve buhar basıncı altında fabrikada yapılan otoklavlı türü olduğu gibi, yapı yerinde yapılan türü de bulunmaktadır.

Yapı yerinde yapılan türünün fiziksel nitelikleri, fabrikada yapılan Otaklavlı türünden daha düşüktür. Gaz betonun teknik özellikleri çizelge 2.5 te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Gazbetonun teknik özellikleri (TS EN 771-4)

Sınıfı	G2/0,35	G3/0,45	G3/0,50
Basınc Dayanımı(N/mm ²)	2,3	2,5	5
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (Kg/m ²)	350	400	500
Rötre(mm/m)	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2
Gözenek(%)	86	84	80
Isı İletkenlik(W/mK)	0,09	0,77	0,13

Gaz betonun geçirdiği kimyasal reaksiyonlar bazik yapıda olup pH değeri 9.5 - 10 arasında değişir. Bu nedenle asidik ortamlardan olumsuz etkilenir. Aşağıda gazbetonun oluşumdaki kimyasal reaksiyonlar verilmiştir(Çiçek, 2002).



Gazbeton, silika hidratlardan oluşan alkali bir yapıya sahiptir. pH değeri 9,5- 11,0 arasında değişir. Bu bakımdan asidik ortamlardan olumsuz yönde etkilenir. Sülfirik asit, hidroklorid asit, asetik asit malzeme yapısını, kloridler, sülfatlar ve nitratlar ise donatıyı hasara uğrattırır. Bu bakımdan da gazbeton, deniz suyuna karşı korunmalıdır. Ortamda yoğun ve devamlı kimyasal agresif maddelerin bulunması halinde, gazbeton malzeme, bu maddelere dayanıklı yüzey kaplamaları ile korunmalıdır(Çiçek 2002)..

Gazbetonun mukavemetini sağlayan hidro silikatlar suda çözülmezler. Ancak üretime giren diğer maddeler (kum, kireç, çimento veya su) suda çözülebilen tuzlar içerirlerse, ortam şartlarına göre bu tuzlar malzeme yüzeyinde kristalleşerek çiçeklenme yaratabilirler. Çiçeklenme, öncelikle eriyik tuz miktarına bağlı olmayıp gazbeton

bünyesindeki kılcal su hareketinin hızına ve yüzeydeki kuruma hızına bağlıdır(Çiçek, 2002).

2.2 Geopolimerizasyon

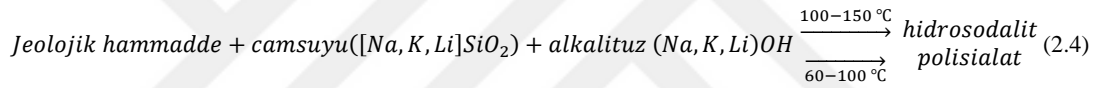
Silika moleküllerinin zincir bağlarından oluşmuş siloksan ya da silikat moleküllerinin (AlO_4) alüminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile elde edilen polisialatların keşfi ile geopolimer kimyasının temelleri atılmıştır. Kil, oksit mineraller içeren önemli bir malzemedir. Kaolin, 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 hamur 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 işlemine “Siliface” ismini vermişlerdir. Ayrıca aynı ekip erken dayanımı yüksek beton, ateşe dayanıklı malzemeler 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 hamuru, 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). 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 hamurun, 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, 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, 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, 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).

2.2.1 Geopolimer Kimyası

Geopolimerizasyon işlemi uçucu kül (UK), kömür cürufu, yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD) gibi endüstriyel atıklar, volkanik tuf, ufalanmış doğal başkalaşım kayalar 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 ısı veren bir kimyasal süreçtir. 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 J. , 2008).

Geopolimerizasyon ile üretilen malzemelerin molekölün 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 üretilebilmektedir. Oran 3 olduğunda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta fırın kaplamaları, fiberglas, yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için 1000°C dayanabilen malzemeler üretilebilmektedir. Oran 3'den fazla olduğunda dolgu malzemesi köpükler üretilebilmektedir. Si:Al>15 olduğunda 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer hamur 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 küçük moleküllerin büyük molekülleri oluşturması için birleşirken su açığa çıkarması 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, 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, D., & Mackenzie, K., 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

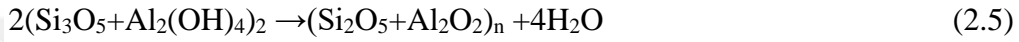
bağlanma reaksiyonları gerçekleşmektedir. Ancak sadece yüksek alüminat içeren kaolinitli bir karışım daha zayıf malzeme özellikleri verir (Van Deventer, 1989)

Geopolimer reaksiyonları oda sıcaklığında başlatılabilir ve istenen karışım sağlandıktan sonra 40-100 °C sıcaklıklarda etüv ya da buhar odasında ısıl işleme bırakılır. Böylece oluşturulmak istenilen 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-amorfün 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, 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 J. , 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 yapı 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 (what is geopolymer, 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 ısıtma işlemlerinin, geopolimer reaksiyonlarını hızlandırdığını ve reaksiyona giren alümino silikat miktarını arttırdığını göstermektedir (Ivanova, 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 (Na₂SiO₃) veya gibbsit [sodyum alüminat] (Na₂-Al₂O₃) ilave edilmektedir (Ivanova, 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 ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe hamurun pH düzeyi düşer. 85°C de pH 10,5 iken 700 °C'lik ısıtma işlem gördüğünde geopolimer hamuru pH'ı 7,5'e düşmektedir. K₂O/SiO₂ molar oranı ısıtma sıcaklığının yüksek olduğu işlemlerde pH düzeyini dengelemek için artırılmaktadır. Geopolimer hamurunun genel pH düzeyi 10–12 arasındadır (Davidovits J. , 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 < Si:Al < 5)
- Silika-esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağı poly(siloxonate) (Si:Al > 5)
- Uçucu kül esaslı geopolimer
- Fosfat esaslı geopolimer
- Organik maden esaslı geopolimer (what is geopolymer, 2012)

2.2.2 Geopolimer Çeşitleri

2.2.2.1. Alkali silikatlar (siloksanat-cam suyu)

Geopolimer hamurunun işlenebilirliğini ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan en önemli bileşen alkali silikat ya da siloksonat olarak da isimlendirilen, kum içerisindeki kuartz mineralini oluşturan silikat moleküllerinin alkali tuzlar ile ergitilmesi ve suda çözünmesi ile elde edilen cam suyudur (Zeybek, 2009).

Cam suyunun basitçe eldesini veren kimyasal denklem aşağıdaki gibidir.



Ekonomik olmakla birlikte üretimi aşamasında atmosfere bırakılan SO₂ gazının sülfirikasit oluşumuna neden olmasından dolayı günümüzde terk edilen bir diğer üretim formülü ise aşağıda verilmiştir.



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

hammadelerdir. Ürün sınıflandırmasında $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranı belirleyicidir. Molar oranın 0,5 olduğu sodyum ortosilikat Na_4SiO_4 formülüne sahip iken, molar oranın 2 olduğu sodyumdisilikat ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) genellikle yoğun üretilen ticari bileşiktir. Geopolimer çalışmalarında kullanılan sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) molar oranı 1-3'dür (Davidovits J. , 2008)

Na veya K bazlı olması alkali silikatların suda çözünürlüğünü farklı etkilemektedir. Suda çözünürlük geopolimer sentezi için önemlidir. Yapılan NMR çalışmaları sodyum bazlı ve $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranının 3 olduğu camın suda çözünürlüğü $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'da %50 iken potasyum bazlı 2,5 molar oranlı camın 48 saat içinde %100'ünün suda çözündüğünü göstermektedir. Çünkü potasyum bazlı sistemde kuvarın tamamı alkali silikata dönüşür. Alkali silikatların kullanımının geopolimer hamurun özelliklerini iyileştireceği gözlenmektedir (Davidovits J. , 2008)

2.2.2.2. Kaolinit/hidrosodalit esaslı geopolimerler

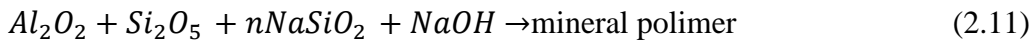
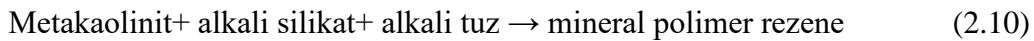
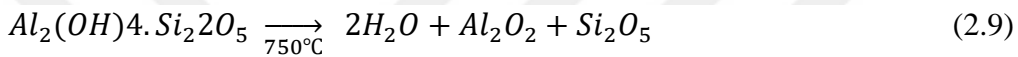
Malzemedeki Al ve Si oksitli bileşiklerde geopolimer oluşabilmesi için Al^{+3} ve Si^{+4} olması ve oksijen bağlarının kovalent ya da iyonik olması durumu kimyasal analizle gözlenmelidir. Ardından seçilecek malzemenin karışım oranları ve uygulanacak ısıl işlemler buna göre belirlenmelidir. Kaolinit kilinin mineral kompozisyonu zeolit kristallerini elde etmek için oldukça uygundur. Ancak $100\text{ }^\circ\text{C}$ 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 SiO_2 ve %45 düzeyindeki Al_2O_3 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 $150\text{ }^\circ\text{C}$ ısıda 30 MPa buhar presi ile üretilmiş panellerde sağlanmıştır. $150\text{ }^\circ\text{C}$ 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 kayaçları 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).

2.2.2.3. 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 tanecik büyüklüğü kaolin killerinden 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, ısıl dayanımı yüksek malzemeler, yüzey pürüzsüzlüğünün önemli olduğu sanatsal seramik ürünler elde edilebilmektedir. Metakaolinit ile üretilen geopolimerin priz alma süresi SiO₂/K₂O 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)

2.2.2.4. Kalsiyum esaslı geopolimerler

Kalsiyum esaslı geopolimerlerde gehlenit adlı yapı oluşmaktadır. Gehlenit kalsiyum alumino-sialat (Ca₂(Al₂SiO₇,nH₂O)=Ca-(Al-O-Si-O-Al-O)-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).

Yüksek Fırın Cürufu(YFC) ve polisialatların 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).

2.2.2.5. Kayaç esaslı geopolimerler

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 olundukları 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 esasları olan feldispatoitler ve kumu oluşturan kuartz yeryüzünde en çok bulunan toprak madenler 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, radyoaktif atıkların zaptedilmesinde geopolimer kayaç yapısı gelecek vaat etmektedir. Geopolimit 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).

2.2.2.6. Silis ve silika dumanı esaslı geopolimerler

Silis ve silika dumanı esaslı geopolimerlerde si ve al oranı 5 'ten büyüktür. Silis esaslı fayanslar M.Ö. 3000 yıllarında Mısır piramitlerinde kullanılmıştır. Emaye kaplama fayans teknolojisi 1000 °C sıcaklık gerektirmekle birlikte emayeleşmenin vereceği parlaklık silis esaslı jeopolimer ile 200 °C'de gerçekleşmektedir. Bu şekilde bir uygulamanın eski Mısırlılar tarafından keşfedildiği düşünülmektedir. Silis esaslı malzemelerin kullanıldığı başka bir tarihi örnekte M.Ö 200'lü yıllarda inşa edilen Çin Seddi'dir (Davidovits J. , 2008).

Günümüzdeki SiO₂ kaynağı ise kuvarsın 3–10 µm aralığında öğütülmesi ile üretilen silis dumanı ve ferrosilikon çelik üretiminde açığa çıkan 0.05–1 µm silis dumanıdır.

Silis tozu 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 aktifleştirilebilen 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 de üretilebilir (Davidovits J. , 2008)

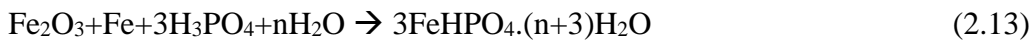
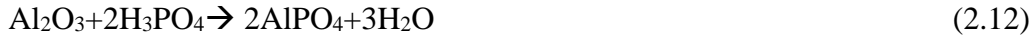
2.2.2.7. Uçucu kül esaslı geopolimerler

UK termik santral bacalarından elde edilmiş, içi boş, küresel tanecik yapılı 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 ısıtma işlemi uygulandığında ise Uçucu Kül (UK) taneciklerinin genleştiği 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. , Geopolymer Chemistry and applications, 2008)

2.2.2.8. Fosfat esaslı geopolimer

Diğer geopolimer sentezlerinden farklı olarak fosfat esaslı geopolimer düşük pH'lı ortamda iki veya üç değerlikli bir metal oksitin H_3PO_4 (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. Vollaştonit ($CaSiO_3$) molekül yapısı fosfat ile reaksiyon vermektedir. Mikro yapısı iğne yığını andıran vollaştonit seramik üretiminde önemli bir kaynaktır. Yapay vollaştonit üretiminde fosfat kullanımı 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. , Geopolymer Chemistry and applications, 2008)

2.2.3 Geopolimer Bağlayıcılar

Kalsiyum esaslı, kayaç esaslı ve uçucu kül esaslı geopolimer sentezleri ile geopolimer çimento bağlayıcılar üretilmekte ve oda sıcaklığında priz alması sağlanmaktadır. Portland çimentosu klinkeri 3 mol CaO molekülüne 1 mol SiO_4 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. Bu yönüyle bakıldığında geopolimer hamurun bağlayıcılık özelliğinin daha az alkali aktivasyon ile gerçekleştiği söylenilebilir. Bu da birim ürün için daha az entalpi enerjisi gerektirecektir.

Günümüzde çimentolu beton üretimi yüksek düzeyli CO_2 emisyonuna neden olması yönüyle çevreciler tarafından sorgulanan bir konudur. 1 ton çimento üretilirken çimento fırını ısıtmak için 0.55 ton, klinker oluşum reaksiyonu ile de 0,4 ton CO_2

salınımı olmaktadır. 1990 yılında dünyada bir milyar tonluk dünya çimento tüketimi sonucu atmosfere 1 milyar ton CO₂ 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 CO₂ oluşumuna neden olacaktır.

Metakaolinit esaslı geopolimerin ana hammaddeleri olan camsuyunu (Na veya K silikat) elde etmede kullanılan 1200 °C lik füzyon sıcaklığını sağlayacak enerji ve 750 °C demetakaolinit sinterleme işlemi için gerekli enerji hesaba katıldığında dahi; Portland çimentosu klinkeri kalsinasyonu için gerekli olan 1400 °C lik fırın sıcaklığını sağlayacak enerji ile kıyaslandığında geopolimer çimentosu 3 kat daha fazla enerji verimliliğine sahiptir. Ayrıca klinkerin kalsinasyonunda yan ürün olarak açığa çıkan CO₂ ve fırını ısıtmak için kullanılan fosil yakıtlardan ayrılan CO₂ değerlendirildiğinde aynı verimlilikte geopolimer bağlayıcı üretilirken yayılan CO₂ çimento fabrikalarının yaydığına 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 gereklidir.

Uçucu kül esaslı geopolimer çimentosu ve portland çimentosunu enerji verimliliği yönü ile kıyaslarsak çok daha şaşırtıcı bir gerçeğe karşılaşıyoruz termik santrallerin elektrik enerjisi üretirken açığa çıkardığı atık geopolimer hammaddesi olarak kullanılabilir uçucu küldür. Uçucu kül ayrıca bir sinterleme işlemi gerektirmez, böylece termik santraller aynı zamanda bir düşük CO₂ yayımlı çimento fabrikalarına dönüşmektedir.

2.2.4 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, rötre ve yangın dayanımı özellikleri

çimentolu betona göre çok üstün olmakla birlikte fiziksel dayanıklılık (durabilite) özelliklerini zaman gösterecektir (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).

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 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).

2.2.5 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. , 2008). 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, 2004).

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 doğrudan veya işlenerek çeşitli amaçlarla yapılarda kullanılan taşlara doğal taş denilmektedir. Doğada bulunan kayaçların hemen hemen tümü bu tanıma göre doğal taş kapsamına girmektedir. (DPT, 2001).

Yerkabuğunu meydana getiren elementler %46 oksijen, %28 silisyum, %8 alüminyum, %5 demir, %3 kalsiyum; oksitler ise %56 SiO₂, %15 Al₂O₃, %5 CaO ve %3,7 FeO'tir. Bu elementlerden doğal taşları meydana getiren bileşikler ise kalsiyum esaslı (Karbonat-CaCO₃, Sülfat-CaSO₄.2H₂O) ve silisyum esaslı (Kuars SiO₂, Feldispat-KAlSi₃O₈, Mika, Anfibol, Piroksen, v.s.) olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır (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 yer kabuğunun 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 riyolit 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., 1955)

Volkanik tüfler, volkanik patlamalar sonucunda atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarının hava tepkimesi sonucun tüfün camsı yapısının zeolitleşmesine neden olarak puzolanik özelliğini artırır. Tüflerin camsı yapısı ve içinde bulunan amorf silis miktarı puzolanik aktivitesi ile doğru orantılıdır. Doğal puzolanların hemen hemen tamamı volkanik kökenlidir. Tüflerin kimyasal yapısı yöresel olarak farklılık gösterse de yakın kimyasal içeriklere sahiptir (Liebig, 1998)..

Çizelge 2.6 Bazı bölgelere ait volkanik tüflerin kimyasal analiz sonuçları (Ören, 1996)

Oksitler	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

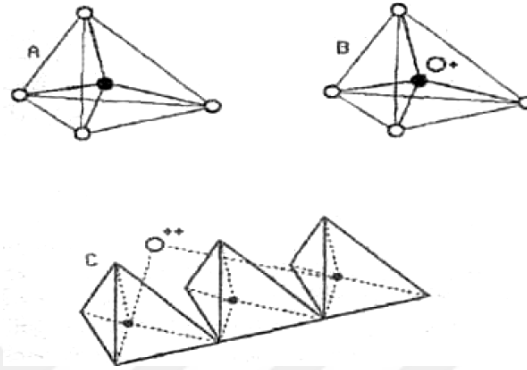
Traslı tüfler; ince parçaları kızgın halde iken su veya su buharı vasıtası ile ani olarak soğumuş proklastik malzemelerdir. Ani soğuma nedeni ile bu çeşit tüflerde camısı kısımlar diğerlerinden fazladır. Bu tüfler ince olarak öğütüldüklerinde aktiviteleri artar, bunların karıştırıldığı beton harcının işlenebilirliği artmaktadır, bunlar kireç veya çimento ile karıştırıldıklarında su ve hava tesiri ile çözülmeyen bileşikler meydana getiriler. Traslı tüfler arazide genellikle yeraltı su seviyesinin altındaki kısımlarda bulunurlar. Taneli veya bloklaşmış bir malzeme halinde de bulunabilirler (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 şeklinden 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).

Ayrıca pomza taşı veya sünger taşı adında bir tüf çeşidi daha vardır. Pomza taşları magmatik parçaların çok çabuk soğuması ile meydana gelirler. Erimiş kütlemin emdiği gazların ani soğuma ile kütleyle terk etmesi sonucunda bu tüfler süngerimsi bol boşluklu bir yapıya sahip olurlar (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 zeolitlenme 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 yapısı şekil 2.10 gösterilmiştir (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. Çizelge 2.7’de doğal zeolitlerin fiziksel özellikleri verilmiştir. Zeolit minerallerinin en belirgin özelliği; bu boşluklara rahatça girebilen ve yer değiştirebilen sıvı ve gaz molekülleri ile toprak alkali iyonlar vasıtasıyla "moleküler elek" olmasıdır (Doğan, 2003).



Şekil 2.10 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, 2012).

Çizelge 2.7 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
Klinoptiloli	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).

2.3.3 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. Bu tip kayaçlara örnek olarak dolomit, alker, traverten, alçı taşı gösterilebilir (Ünsal, 2001).

2.3.3.1 Traverten

Travertenler, yer altı sularının geçtikleri ortamlarda bulunan kalsiyum karbonatın CaCO₃ eritir ve bünyesine alırlar. Yer altı suyu açık hava ile buluştuğunda üzerindeki hidrostatik basınç kalkar. Böylece içerisinde bulundurduğu CO₂ sudan ayrılarak havaya karışır. Bu esnada ise suyun içerisinde eriyik halde bulunan CaCO₃ bulunduğu yerde katmanlar halinde çökelirken su akmaya devam eder. Bu katı formdaki katman tabakaları traverten olarak adlandırılır (Şentürk, 1996).

Travertenler yapısında aragonit, opal, kil ve kuvars mineralleri bulunduğu gibi ana mineral olarak kalsit bulunmaktadır. Travertenler atmosferik durumların altında bünyelerine karbondioksit(CO₂) alır. Karbonik asit yönünden doygun bir hale gelir.



Karbonik asit bakımında zengin yeraltı suları akışları esnasında CaCO₃ bileşimli olan yer altı kayaçlarıyla karşılaştığında CaCO₃ bünyesine alır ve Ca(HCO₃)₂ oluşturur



Genellikle tektonik bölgelerdeki fay ve çatlaklar arasından yeryüzüne ulaşan kalsiyum bikarbonat bakımından zengin bu suların üzerindeki basınç düşmesi neticesinde su bünyesindeki CaCO_2 atmosfere uçar. Su içerisindeki CO_2 'nin uçarak ayrılması sonucunda bikarbonat bileşimi parçalanır ve traverten çökelişi gerçekleşir. Biyokimyasal yolla travertenler oluşurken CO_2 'in bir kısmı atmosfere karışırken bir kısmı da algerce alınır. Karbondioksit alger tarafından harcanırken CaCO_3 'tan oluşan zar şeklinde bir çökelim gelişir. Alg öldükten sonra içi boş silindirik yapıdaki travertenler oluşur. Travertenlerin çökmesini basınç, ısı ve CO_2 'in fiziksel olarak, fotosentezin de biyokimyasal olarak kontrol ettiğini belirtmektedir. Travertenlerin sınıflandırılmasına ilişkin çok fazla çalışma bulunmamasına karşın bazı araştırmacılar travertenleri bitki içerikleri, çökme ortamları, porozite ve morfoloji gibi unsurları esas alarak sınıflamışlardır (Julia, 1983).

Çizelge 2.8 Doğal taşların kökenlerine göre sınıflandırılması (Ünal, 2003)

Tortul Kayaçlar (Sedimenter 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"> ○ Olitik Kalker ○ Tebeşir ○ Kalker tüf ○ 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 uçucu kül ve yüksek fırın cürufu 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. 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. Deney 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 granülometreler 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 diatomit agregası uygun olmadığı belirlenmiştir.

Akın (Akın E., 2007) yaptığı çalışmada matris malzeme olarak polyester, 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 polyester 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 tabii 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 oC) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ortam şartının ve karışım özelliklerinin aynı olduğu karışımlarda agrega boyutu 10mm üzerinde daha iyi dayanım göstermiştir. Geopolimer matris ve agregadaki termal uyumsuzlıktan 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 spreyle 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 doygun 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 oC de önemli bir artış görülmüştür. Bu büyük olasılıkla hidratasyon 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 oC sonrasında ortam sıcaklığında alkali aktive edilmiş harçların basınç dayanımlar keskin bir biçimde düşmüştür, basınç dayanımındaki azalma oranları 600 oC ve 800 oC sıcaklıkları için sırasıyla %60.9 ve %79.7 değerinde olduğu belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

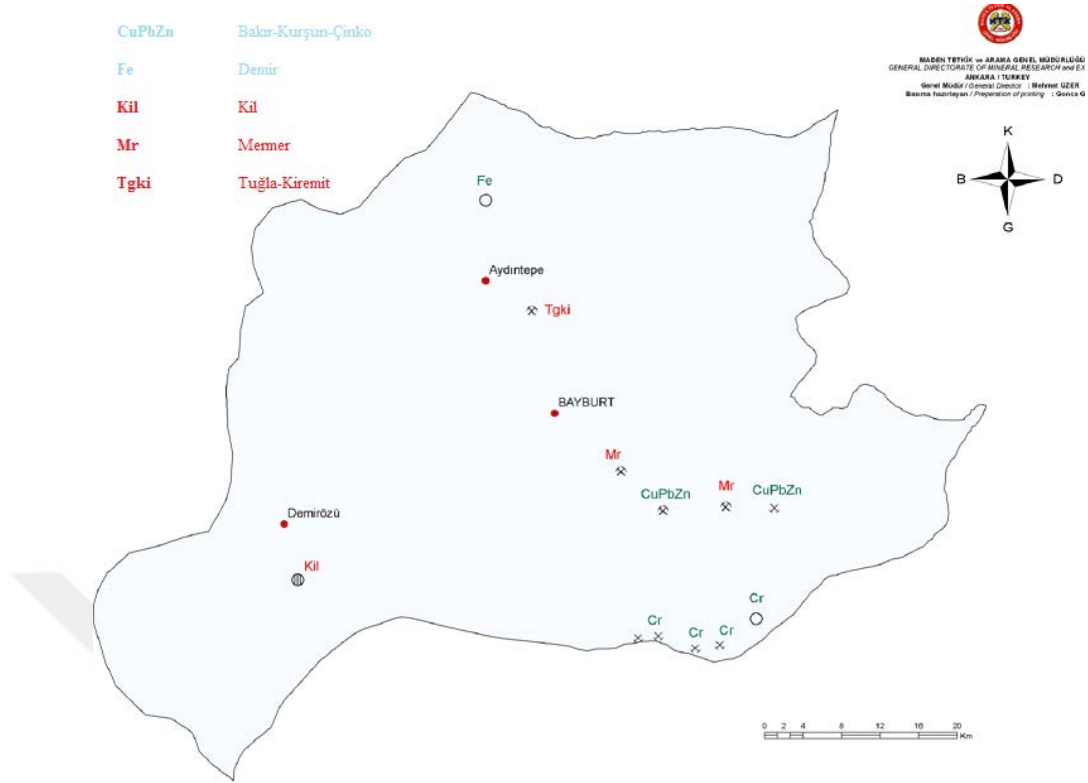
3.1 Materyal

Deneysel çalışmalarda Bayburt ili çevresinde bulunan taş kesme atölyelerinin atıkları olan beyaz renkli Bayburt Taşı (BT), Koral Madencilik atık depo sahasından temin edilen traverten ve alkali aktivatör olarak da NaOH %99 saflıkta, pelet şeklinde olup Solvay İstanbul Kimya Tic. ve San. Ltd. Şti ' den temin edilmiştir. Malzemeler detaylı olarak alt başlıklarda açıklanmıştır.

3.1.1 Bayburt taşı

Bayburt'un çevresinde bulunmasına istinaden Bayburt taşı olarak adlandırılan volkanik patlama sonucu ortaya çıkan volkanik küllerden oluşan tüf ve bu küllerin adi taşlarla karışımı olan tüfitler yapı malzemesi olarak kullanılabilmelerinden ötürü şehrin ekonomisinde önemli bir etkiye sahiptir. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından 2005 yılında Bayburt ve çevresinde bulunabilecek madenlerin araştırılması için detaylı etütler yaptırılmıştır. Bu etütler neticesinde Toptepe, Sırataşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüşdamla maden sahalarında toplam 2.535.700 ton görünür rezerv Bayburt Taşı tespit edilmiştir. Ayrıca Bayburt ilinde bulunan çeşitli maden sahalarında traverten yatakları, açık, koyu bej renkli ve resifal içerikli Jura kireçtaşları ile oniks ve granitleri de ilin ekonomik değere sahip bir başka doğal taşlarıdır. Bu madenlerin yanısıra, ilde bulunan ve sanayide kullanılabilecek diğer bir hammadde ise Demirözü ilçesindeki Edire ve Gümüşgöze sahalarında bulunan kil sahalarıdır. % 22 ile 31 arasında değişen Al_2O_3 içeriklerine sahip sahaların toplam görünür muhtemel kil rezervi 386.100 ton olarak belirlenmiştir. Bayburt ili maden haritası şekil 3.1 de verilmiştir. (MTA, 2005)

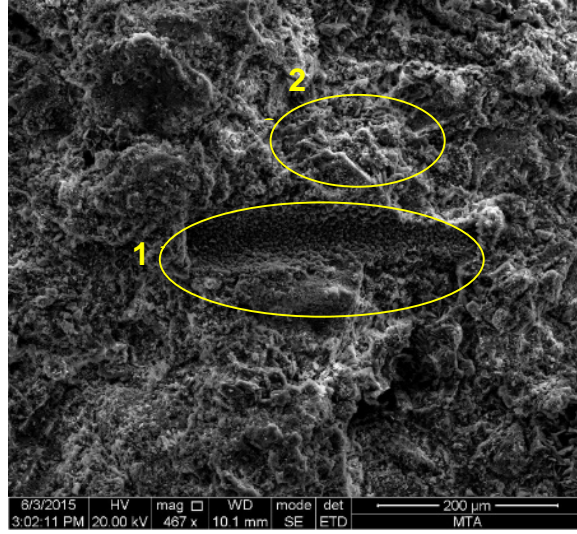
Bayburt taşı Riyo-dasitik bileşimli vitrik tüf olarak tanımlanmaktadır. Kayaç içinde volkanik malzemelerden meydana gelen kuvars-plajiolklaz-biyotit ve kayaç parçaları bulunmaktadır. Ayrıca kuvars ve feldispat mikrolitleri ile demiroksit ve alterasyon ürünü minerallerin de oluşumu belirlenmiştir (MTA, 2005).



Şekil 3.1 : Bayburt ili maden haritası (MTA, 2005).

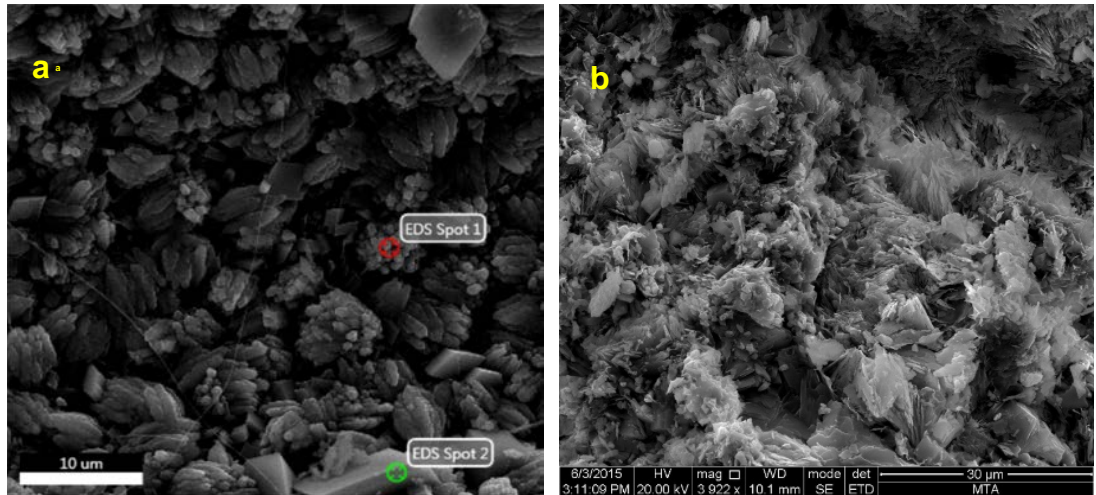
BT bölgede yeşil, sarı ve beyaz renklerde bulunmakta ve yapılarda dış cephe ve iç cephe kaplama taşı olarak kullanılmaktadır (Öneç, 2002). Kalınlıkları 10 cm, uzunlukları 30-40 cm ve genişliği 20 cm boyutlarında duvar elemanı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yapıların dışında dekoratif amaçlı ve mezar, 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.

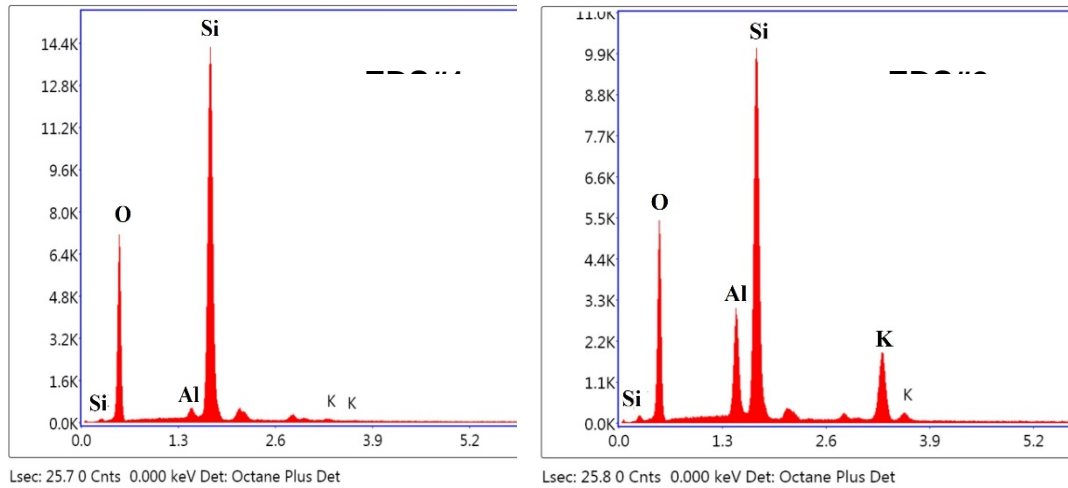


Şekil 3.2 Öğütmeden önceki BT'nin SEM görüntüleri

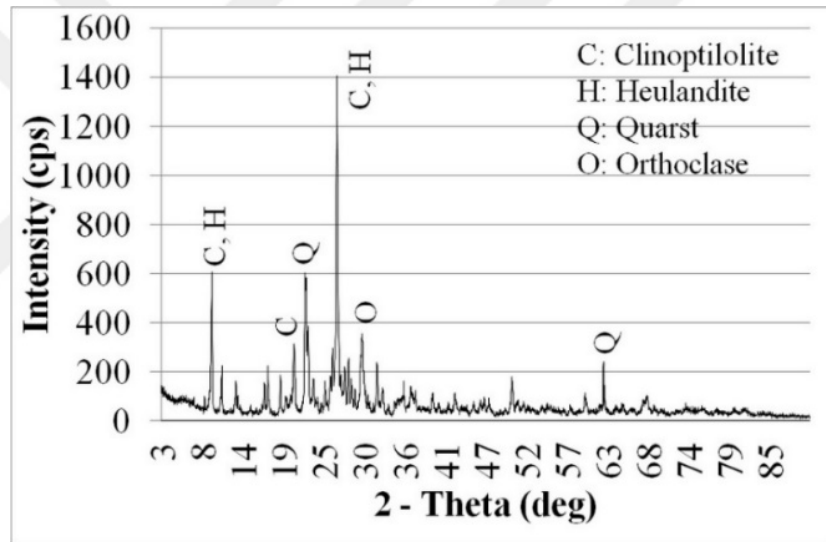
Şekil 3.2'den büyütülmüş SEM görüntüsü olan Şekil 3.3a'da kübik ve rombohedral kristal yapılarda kuvars (SiO_2) ve zeolit mineralleri ($\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}$) görülmektedir. Bunlar Şekil 3.4'te EDS noktasal analizlerinde de görülmektedir. Şekil 3.3b'de görüldüğü gibi BT'de ayrıca 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, 2013).



Şekil 3.3 : a) Şekil 3.2 deki 1. bölgenin büyütülmüş görüntüsü b) Şekil 3.2 deki 2. Bölgenin büyütülmüş görüntüsü



Şekil 3.4 Şekil 3.3a görüntüsünün EDS analizi



Şekil 3.5 BT'nin XRD (minerolojik) 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.

Bayburt taşının kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir. Bayburt taşının fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bayburt taşının minerolojik analizine baktığımızda Klinoptilite ve hoylandit yapısında olduğu görülmektedir.

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

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 SiO₂+Al₂O₃+CaO>70% olmalıdır.

Bayburt Taşında SiO₂+Al₂O₃+CaO=84.7% ve dayanım aktivite indeksi %75'den büyük olduğu için puzolanik bir malzemedir(Tekin,2016).

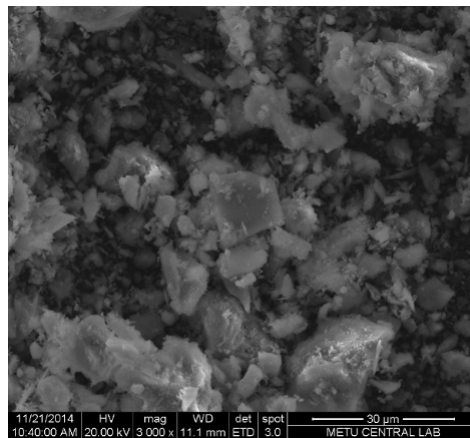
Bayburt Taşının silica/alümina oranı (SiO₂/Al₂O₃) 5.76'dır. Sİ: AL=5,76

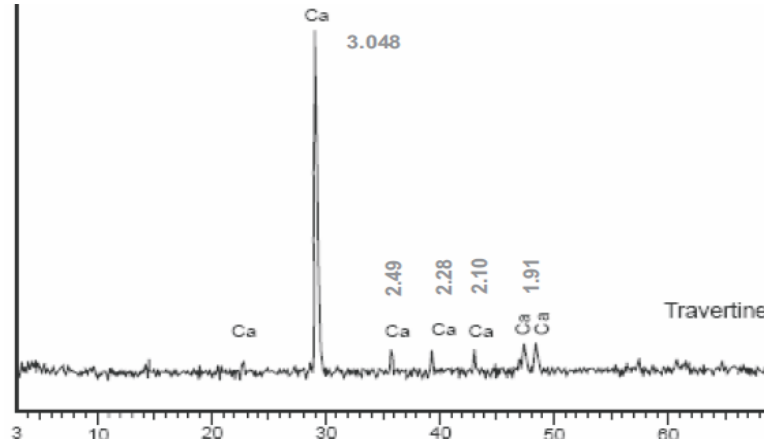
Çizelge 3.2 Bayburt beyaz taşının fiziksel ve mekanik özellikleri (MTA, 2005)

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
Porozite Oranı	(%)	20.6
Basınç direnci	(kgf/cm ²)	605
Don sonrası basınç direnci	(kgf/cm ²)	480
Don kaybı	%	0.22
Darbe direnci	(kgf/cm ²)	13.0
Eğilme dayanımı	(kgf/cm ²)	100
Doluluk oranı	%	70.1
Gözeneklilik derecesi	%	29.9
Ortalama aşınma	(cm ³ /50cm ²)	25.6

3.1.2 Traverten

Deneysel çalışmalarda öğütülmüş traverten atıkları (TA) kullanılmıştır. TA öğütülmüş halde Bayburt ilinde faaliyette bulunan KORAL madencilik firmasından temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan TA'nin mikroskobik yapısı Şekil 3.6'da, mineralojik yapısı Şekil 3.7'de, kimyasal ve fiziksel analizleri Çizelge 3.3 'te, verilmiştir.

**Şekil 3.6** T.A 'nın SEM görüntüsü



Şekil 3.7 Traverten XRD analizi

Çizelge 3.3 Traverten tozunun kimyasal analiz sonuçları

Oksitler	Oranı(%)
MgO	0,3 ±0,1
CaO	55 ± 1
SiO ₂	0,7 ±0,1
Fe ₂ O ₃	0,2 ±0,1
Kızdırma Kaybı	43 ± 1
Sertlik	3 (Mohs)
pH	8,0 ±0,5

Bayburt taşı ve traverten öncelikle konkasör ile dane çapı en büyük 25 mm olacak şekilde kırma işlemi gerçekleştirildi. Konkasörden çıkan malzeme 105°C deki etüve konularak 24 saat bekletilip nemin uzaklaşması sağlanmıştır. Çıkarılan sıcak haldeki malzeme Los Angeles cihazına koyularak çizelge 3.5'te verilen miktarlarda çevrilerek öğütme işlemi tamamlandı. Bu işlem sırasında cihaz yaklaşık 30 tur/dk döndürülmüştür. Kullanılan bilye çapları 20,3 mm, 16 mm, 9,5 mm'lik bilyeler olup sırasıyla 415adet, 228 adet ve 230 adet'dir. (14,18 kg/20,3 mm, 3,81 kg/16 mm, 8,05 kg/9,5mm)

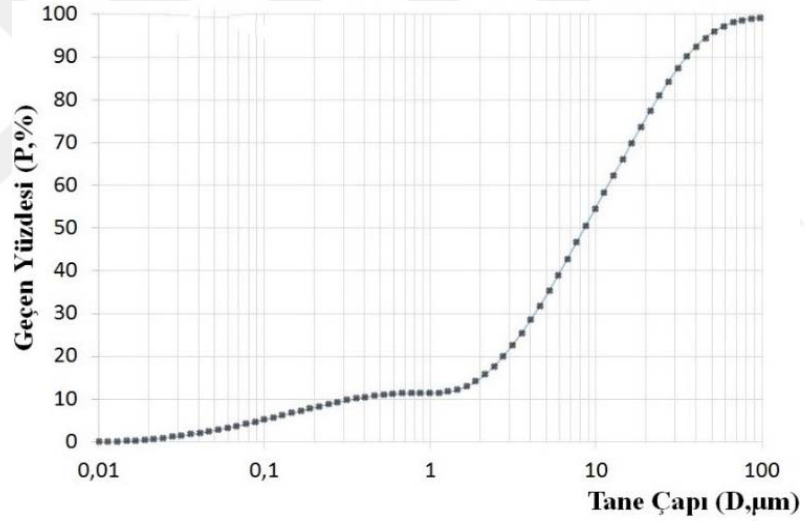
Çizelge 3.4 Bayburt taşı ve Traverten öğütme tablosu

	Tur (tur/dk)	Malzeme Ağırlığı (kg)	Bilye Ağırlığı (kg)	Geçen (%)			
				250µ	125µ	75µ	45µ
Bayburt taşı atığı	10000	10	26,04	99	98,1	95,4	91,2
Traverten atığı	10000	10	26,04	100	99,1	96,4	92,2

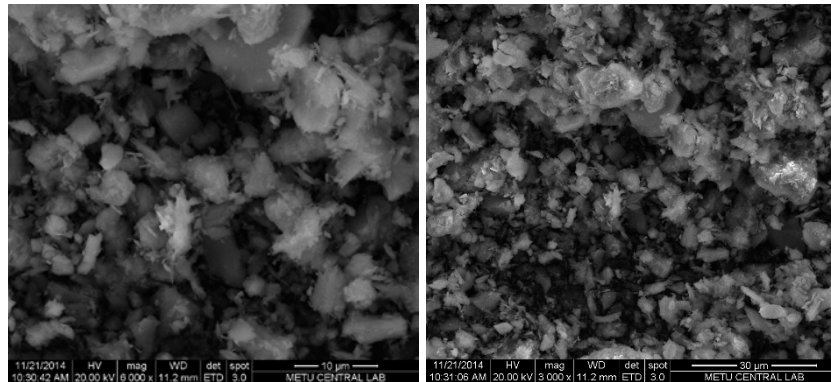


Şekil 3.8 a) BT'nin laboratuvar ortamına getirilmesi b) BT'nin konkasörde 0-2 mm boyutlarına indirgenmesi c) BT'nin Los Angeles cihazına yerleştirilmesi

Öğütme işlemi 45μ elekten geçen malzeme miktarı $\%90 <$ olduğunda öğütme çevrimi her bir malzeme için en az tur olan sayı kabul edilmiştir. Bu miktarlar Bayburt Taşı ve traverten için 10000 Los Angeles cihaz turudur.



Şekil 3.9 Bayburt Taşının Los Angeles Öğütme Sonucu



Şekil 3.10 Öğütmeden sonraki B.T 'nin SEM görüntüleri

3.1.3 Sodyum Hidroksit

Sodyum Hidroksit (NaOH) sanayide ve kimya alanında kullanılan başlıca çözeltilerden biridir. Kostik adıyla da anılan Sodyum Hidroksit, beyaz renkli ve nemi tutabilen bir maddedir. Suda kolaylıkla çözülebilen ve kaygan bir sabun hissini veren bir kimyasaldır. Çok kuvvetli bir baz olup $\text{pH}=12$ 'dir. Bu nedenle insan dokusuna teması halinde kaşıntıdırıcı ve delici bir etkisi bulunmaktadır. NaOH kokusu yoktur, sıvı formda yada katı formda bulunur. Katı olarak payet/flakes, boncuk/prills-pearls gibi şekillere sahiptir. Sıvı formda ise genelde sulu çözelti şeklindedir. Sodyum hidroksit İngiltere'de 1807 yılında Humphrey Day tarafından keşfedilmiştir. Bu keşif için kullanılan bir olay veya deney bilinmemektedir. Sodyum Hidroksit doğal olarak meydana gelmez ama üretmek çok kolaydır. Genellikle Sodyum Klorür'ün elektrolizi sonucu %50' lik çözelti şeklinde üretilir.

Deneyisel çalışmada Çizelge 3.6 'da kullanılan NaOH'in kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 3.6 Deneyisel çalışmada kullanılan alkalinin 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)

Deneyisel çalışmalarda alkali-aktivatör olarak kullanılan pelet haldeki NaOH ile 5 mol ve 10 mol konsantrasyona sahip çözelti halinde hazırlanmıştır. 10 mol konsantrasyona sahip NaOH çözeltisinin hazırlanması işleminde, 400 gr pelet haldeki NaOH 1 lt kapasiteli cam bir beher içine konulmuş daha sonra beherin 1 lt çizgisine kadar artırılmış saf su ekleyerek NaOH taneciklerinin su içerisinde çözülmesi sağlanmıştır.

Bayburt taşı ve travertenden Los Angeles cihazıyla elde ettiğimiz 45 mikron inceliğindeki malzemeler belirli oranlarda karıştırılmışlardır. Karışıma giren BT ve TA hacimce oranları çizelge 3.7 da verilmiştir. Karışımın kalıba yerleştirilmesinde TS EN 196-1'e göre yapılmıştır. (TS EN196-1, 2009)

Deneyde kullanılan karışım oranları çizelge 3.7 'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 1 dm³ için karışım oranları

Numune Kodu	Hacimce Oran (%)			Hacim (dm ³)
	BT	TA	Çözelti	
GH1	0,29	0,56	0,15	1
GH2	0,45	0,39	0,16	1
GH3	0,62	0,2	0,18	1
GH4	0,28	0,53	0,19	1
GH5	0,42	0,36	0,22	1
GH6	0,58	0,18	0,24	1

3.2 Yöntem

Bayburt taşının standart kıvam ve priz süreleri bulmak için TS EN 196-3'e taze hamur deneyleri yapılmıştır. Bu aşamada Şekil 3.10 'da gösterilen Vicat aleti kullanılmıştır. Bu işlemin sonucunda standart kıvam için gerekli çözelti miktarları artırılarak sertleşmiş hamur deneylerinin yapılacağı numuneler üretilmiştir.

Bu aşamada BT ve TA atıkları mikser cihazında homojen bir karışım elde etmek için 60 sn süresince karıştırıldı. Ardından çözelti (NaOH) piset ile yavaş bir şekilde eklenerek 90 sn tozuma düşük hızda karıştırıldı.

Daha sonra 90 sn yüksek hızda karıştırıp karıştırma işlemini tamamlandı. Elde edilen karışım daha önce yağlanan 5x5x5 cm'lik kalıplara dökülerek şoklama ile 60 vuruş yapılarak sıkıştırma işlemi yapıldı. Bir taraftan da yayılma deneyleri yapıldı.

5 ve 10 mol numuneler üretildikten sonra önce havada 24 saat priz alması beklendi. Prizini alan numuneler numaralandırılıp kalıplardan çıkartılıp 20°C, 40°ve 80°C etüvlerde 24 saat bekletildi.

Çizelge 3.7 Deney sonuçlarını tablosunda kullanılan karışım tasarımları

Numune Kodu	BT (%)	TA (%)	NaOH (Mol)
GH1	40	60	5
GH2	60	40	
GH3	80	20	
GH4	40	60	10
GH5	60	40	
GH6	80	20	

3.2.1 Taze hamur deneyleri

Geopolimer malzemenin taze halde yayılma deneyi ve standart kıvam priz başlangıç ve bitiş deneyleri yapılmıştır.

3.2.1.1 Kıvam ve priz sürelerinin belirlenmesi deneyi

Çalışmada öncelikle geopolimer malzemelerin TS EN 196-3'e göre taze hamur deneyleri (kıvam ve priz süreleri) Vikat aleti kullanılarak 22 ± 2 °C sıcaklık ve $\%40 \pm 5$ bağıl neme sahip laboratuvarında yapılmıştır. Bu amaçla çizelge 3.6 'deki malzeme miktarları kullanılarak GH'lar üretilmiştir. Standart kıvamı belirleyebilmek için 10 mol 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 dk 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. Deneysel çalışmalar Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.11 a) Vicat cihazında kıvam belirlenmesi b) Priz başlangıcı ve priz sonu belirlenmesi

3.2.1.2 Yayılma tablası deneyi

İşlenebilirlik kaybı ölçümlerinde, ASTM C230/C230M’de belirtilen yayılma tablası metodundan yararlanılmıştır. Deneysel her bir hamur karışımı mikser ile karıştırmanın bittiği anda yayılma deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, yayılma tablasının konisi içerisine yerleştirilen GH 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

Sertleşmiş hamur numunelerinin üzerinde basınç, eğilme, su emme, aşınma, yüksek sıcaklık etkisi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2.2.1 Basınç ve eğilme deneyleri

TS EN 196-1’e göre presli 50/100 mm silindir ve 40x40x160 mm boyutlu presli/pressiz kalıplara dökülen numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri 20 ton kapasiteli basınç ve 2 ton kapasiteli eğilme presinde gerçekleştirilmiştir. Mekanik mukavemet deneyleri GH 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.

Deneyel çalışmada TS EN 196-1'e göre hazırlanan GH karışımlar üç gözlü çelik kalıp bölmesinin her birinin içine Şekil 3.11a'da görüldüğü gibi kalıpların yarısına kadar doldurulmuştur. Şekil 3.11b '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.



Şekil 3.12 a) Kalıpların yarıya kadar doldurulması b) Kalıpların tamamının doldurulması

Çalışmada 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde öncelikle eğilmede çekme dayanımı deneyi ile 2 eşit parçaya bölünmüştür. Bu iki eşit parça üzerinde ayrı ayrı basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır.

Deneyde 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.



Şekil 3.13 a) Eğilme dayanım aleti b) Basınç dayanım aleti

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

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

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

Burada f_c Basınç dayanımı (kgf/cm^2), P Preste kırılma anında okunan en büyük yük (kgf), A_c Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı (cm^2), σ_e Eğilme dayanımı (kgf/cm^2), L Mesnetler arası uzaklık(cm), b En kesit uzunluğu (cm), d Boy kesit uzunluğu(cm)

3.2.2.2 Su emme ve kapiler su emme deneyleri

Deneysel çalışmalar TS EN 1097'ye göre sertleşmiş GH numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 gün yaşlarında gerçekleştirilmiştir. Buna göre sertleşmiş GH numuneler öncelikle $24 \pm 0,5$ saat su içerisinde bekletildikten sonra üstü bir kuru bezle kurulanıp suya doymun haldeki ağırlığı tartılmıştır (M_1). Ardından özgül ağırlık sehпасı 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:

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

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

$$P_g = \delta \times W \quad (3.5)$$

Burada **W** Su emme oranı (%), **P_g** Görünür porozite (%), **Δ** Özgül ağırlık (gr/cm³), **M₀** Etüv kurusu ağırlığı(gr), **M₁** Suya doymun kuru yüzey ağırlığı (gr), **M₂** Su içerisindeki ağırlığı(gr) temsil etmektedir.



Şekil 3.14 7 ve 28 günlük su emme deneyi

Kapiler su emme deneyleri TS EN 1925 'e göre 7 gün süreyle dik halde 4x4x16 cm boyutlu numuneler üzerinde Şekil 3.13'deki düzenek ile her bir gruptan iki adet numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneyler 7, 28 ve 90 gün yaşlarındaki sertleşmiş GH 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 dk 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:

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

Burada m t zaman aralığında emilen su miktarı (cm^3/sn), c Kılcal su emme katsayısı (cm^2/sn), F Kılcal su emme yüzey alanı (cm^2), t Ölçüm zaman aralığı (dk), temsil etmektedir.



Şekil 3.8 7 ve 28 günlük kapiler su emme deneyi

3.2.2.3 Aşınma deneyi

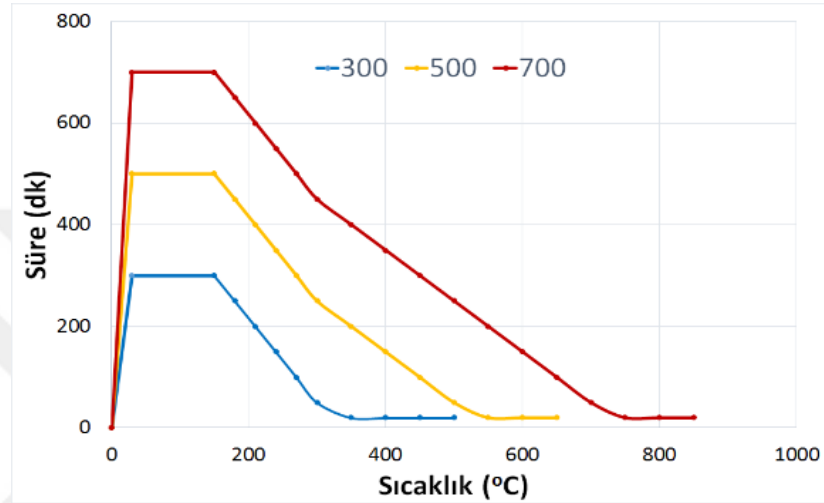
Aşınma dayanımı deneyi 28 gün yaşındaki 150x150 mm alana sahip GH numuneler üzerinde ASTM C 944-99 'a göre Şekil 3.15'de görüldüğü gibi gerçekleşmiştir. Bu amaçla numuneler 10 kg'lık ağırlık altında 200 devir/dk hızında dönen aşındırıcılara 6 dk süre boyunca maruz bırakılmıştır. Deney sonunda numunelerdeki kütlece ağırlık kayıpları ölçülmüştür.



Şekil 3.16 Aşınma deney cihazı

3.2.2.4 Yüksek sıcaklık etkisi deneyi

Üretilen GH numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında dayanım kayıplarını belirlemek için 28 gün yaşını tamamlamış numuneler üzerinde 1400 °C kapasiteli yüksek sıcaklık fırınında Şekil 3.16'daki işlem uygulanarak ağırlık ve basınç dayanım kayıpları ölçülmüştür.



Şekil 3.17 Yüksek sıcaklık uygulama süreci



Şekil 3.18 300-500-700 °C etüv içerisinde numuneler

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1 Fiziksel özellikler

4.1.1 Taze GH'lerin standart kıvam ve priz süreleri deney sonuçları

Taze haldeki geopolimer hamurların standart kıvam (çözelti ihtiyacı) ile priz süreleri deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. çizelgede verilen Ç: Çözelti(NaOH), T:Traverten, BT:Bayburt Taşı'dır.

Çizelge 4.1 Taze haldeki hamurların standart deney sonuçları

Numune Kodu	BT (%)	TA (%)	NaOH (Mol)	Ç/T %	Ç/BT %	Priz Başlangıcı (dk)	Priz Bitişi (dk)
GH1	40	60	5	41,31	112	215	555
GH2	60	40		43,25	76	180	515
GH3	80	20		49,27	63,33	130	480
GH4	40	60	10	49,23	78,13	240	395
GH5	60	40		55,38	97,5	235	285
GH6	80	20		60,77	133,54	120	200

Çizelge 4.1'e göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- %40 BT içerikli GH1 hamurların standart kıvamı için gerekli olan çözelti oranı diğer numune gruplarına göre en azdır. %80 BT içerikli 10 mol çözeltili GH6 standart kıvam için gerekli olan çözelti oranı en yüksektir. %40 BT içerikli
- 5 mol NaOH kullanılan numunelerde GH1 geopolimeri BT oranı %40 ve %60 olan priz başlangıçlarından sırasıyla 115 dk ve 120 dk daha erken başlamıştır. Priz bitişlerinde ise %40 BT içeren 10 mol GH4 numunenin BT oranı %60 ve %80 olan numunelerden sırasıyla 85 dk ve 195 dk daha önce bitmektedir.
- Taze haldeki geopolimer hamurların standart kıvam için yapılan deney sonucunda BT oranı artışıyla oluşan priz başlangıç ve bitişleri azaldığı

görülmüştür. BT karışım içinde çözelti ihtiyacını artıran en önemli bileşendir. BT bağlayıcılık özelliği veren poroz yapılı, kohezif özelliktedir. BT'nin volkanik yapısından kaynaklanan su emme özelliğinin fazla olması çözelti ihtiyacını artırmıştır.

Artan BT oranı artışına bağlı olarak standart kıvamın elde edilebilmesi için gereken NaOH miktarında artış meydana gelmiştir. Dolayısıyla bağlayıcılığı sağlayan daha fazla Na reaksiyona girmesine böylece daha çok bağ oluşturmuş ve standart kıvam oluşum sürecini kısaltmıştır.

4.1.2 Yayılma deneyi sonuçları

Geopolimer taze hamurlar üzerinde, BT'nin işlenebilirliğe etkisini ölçmek amacıyla yapılmış olan yayılma deneyi sonuçları çizelge 4.2'de verilmiştir. Yayılma deneyi sonucunda azalmalar Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Yayılma deneyi sonuçları

Numune Kodu	BT (%)	TA (%)	NaOH (Mol)	Ç/T %	Ç/BT %	Yayılma (cm)
GH1	40	60	5	41,31	112	19,2
GH2	60	40		43,25	76	17,9
GH3	80	20		49,27	63,33	16,5
GH4	40	60	10	49,23	133,54	15,9
GH5	60	40		55,38	97,5	15,25
GH6	80	20		60,77	78,13	14,75

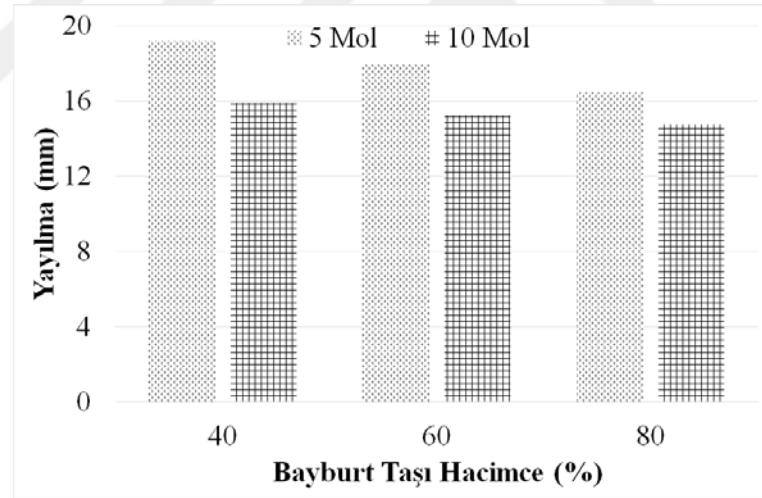
Çizelge 4.2'e göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- En fazla yayılma %40 BT içerikli ve 5 mol NaOH kullanıldığı GH1 numesinde görülmüştür. En az yayılma %80 BT içerikli ve 10 mol NaOH kullanıldığı GH6 numunesinde görülmüştür.
- BT oranı %40 olan 5 mol NaOH kullanıldığı GH1, %60 içerikli GH2 numunesinden 1.3 cm, %80 BT içerikli GH3 numunesinden 2,7 cm daha fazla yayılmıştır.

- BT oranı %40 olan 10 mol NaOH kullanıldığı GH4, %60 içerikli GH5 numunesinden 0,65 cm, %80 BT içerikli GH6 numunesinden 1,25 cm daha fazla yayılmıştır.

BT oranı arttıkça yayılma ve dolayısıyla işlenebilirlik azalmıştır. Artan BT oranı sonucu bağlayıcılık özelliği sağlayan BT'nin kohezif özelliği taze geopolimer hamurunu birada tutan bağları artırarak yapışkanlığı artırmış ve yayılmayı azaltmıştır.

Çözelti miktarı artıkça yayılma azalma göstermiştir. Artan çözelti kimyasal reaksiyonun oluşumunu artırarak daha fazla bağ oluşturmuş böylece 10 mol NaOH kullanıldığı numuneler 5 mol NaOH kullanıldığı numulere göre daha az yayılma göstermiştir.



Şekil 4.1 Yayılma deneyi sonucu

4.1.3 Su emme ve kapiler su emme deneyi

Deney numuneleri 7, 28 ve 90 gün sonunda su emme ve kapiler su emme deneylerine ayrı ayrı tabi tutulmuştur. Kapiler su emme deneyinin tamamlanması için geçmesi gereken süre sonunda numuneler parçalandığından 3 süreç, 3 farklı oran ve 2 farklı NaOH molaritesinin hiç birinden sonuç alınamamıştır.

Çizelge 4.3 Su emme, görünür porozite ve kuru birim hacim ağırlık değerleri

Yaş (gün)	No	NaOH (Mol)	BT (%)	TA (%)	Su Emme Oranı (%)	Görünür Porozite (%)	Kuru BHA (g/cm ³)
7	GH1	5	40	60	-	-	-
	GH2	5	60	40	33,80	44,54	1,30
	GH3	5	80	20	37,14	43,02	1,20
	GH4	10	40	60	27,72	39,01	1,43
	GH5	10	60	40	33,55	43,56	1,36
	GH6	10	80	20	35,92	45,23	1,28
28	GH1	5	40	60	-	-	-
	GH2	5	60	40	31,54	42,22	1,30
	GH3	5	80	20	35,49	42,12	1,17
	GH4	10	40	60	25,39	36,49	1,48
	GH5	10	60	40	28,02	38,00	1,40
	GH6	10	80	20	36,85	45,91	1,26
90	GH1	5	40	60	-	-	-
	GH2	5	60	40	-	-	-
	GH3	5	80	20	-	-	-
	GH4	10	40	60	25,67	36,62	1,45
	GH5	10	60	40	22,67	31,62	1,43
	GH6	10	80	20	31,35	39,87	1,29

Çizelge 4.3'deki veriler incelendiğinde şu yorumlar yapılabilir:

- Numuneler içerisinde en düşük su emme oranı 28 gün sonunda 10 Mol NaOH %40 BT içerikli numunelerde %25.39 çıkarken, en yüksek su emme oranı 5 Mol NaOH %80 BT içerikli numunelerde %37.14 olarak görülmüştür.
- 7 günlük su emme deneyi sonucunda GH5 ve GH6 nolu numunelerin su emme oranı GH2 ve GH3 nolu numunelerden sırasıyla %0.74 ve %3.28 oranında daha fazla çıkmıştır,

- 28 günlük su emme deneyi sonucunda GH5 nolu numunelerin su emme oranı GH2 nolu numunelerden sırasıyla %11.16 oranında fazla çıkarken GH6 nolu numuneler GH3 nolu numunelerden %3.83 oranında daha az çıkmıştır,
- GH2, GH3, GH4 ve GH5 nolu numunelerin 7 günlük su emme değerlerine göre 28 günlük su emme değerleri sırasıyla %6.69, %4.44, %8.41 ve %16.48 daha az çıkarken, GH6 nolu numune değerleri %2.59 oranında daha fazla çıkmıştır,
- GH4 nolu numunenin 28 günlük su emme değerlerine göre 90 günlük su emme değeri %1.11 daha fazla çıkarken, GH5 ve GH6 nolu numunelerin sırasıyla %19.09 ve %14.93 oranında daha az çıktığı gözlemlenmiştir.
- Numunelerin BT oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak BT'nin yoğunluğunun TA'nın yoğunluğundan yaklaşık olarak %20 oranında daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

BT oranı arttıkça su emme oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak BT'nin poroz yapısı gösterilebilir. 5 mol NaOH ile üretilen geopolimer hamurların durabilite özelliklerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Su emme deneyi sırasında su ile temas başladıktan yaklaşık 120 dk sonra numunelerde parçalanmalar görülmüştür. Kapiler su emme deneyinde ise 10 mol NaOH ile üretilen numunelere göre parçalanmaların daha hızlı meydana geldiği görülmüştür. Numunenin yaşı arttıkça genel olarak numunelerin su emme oranların azalmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2 Su emme deneyi 120. dk görüntüsü

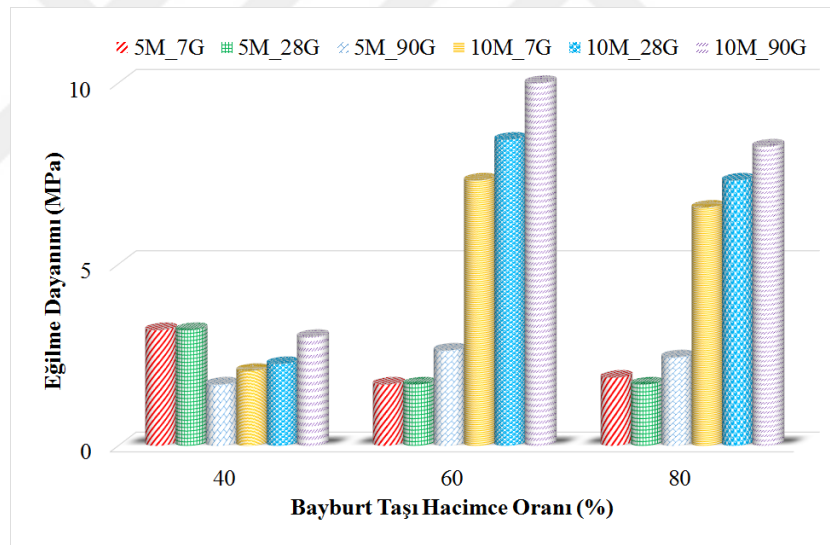
4.2 Mekanik Özellikler

4.2.1 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.4 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 7, 28ve 90 günlük eğilme dayanım sonuçları

No	NaOH (Mol)	BT Oranı (%)	TA Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)		
				7 Gün	28 Gün	90 Gün
GH1	5	40	60	3,19	3,19	1,69
GH2		60	40	1,69	1,69	2,63
GH3		80	20	1,88	1,69	2,44
GH4	10	40	60	2,06	2,25	3,00
GH5		60	40	7,31	8,44	10,31
GH6		80	20	6,56	7,31	8,25



Şekil 4.3 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı

Şekil 4.5 ve Çizelge 4.4’deki eğilme dayanımı sonuçları göz önüne alınarak şu sonuçlar çıkarabilir:

- 7 günlük eğilme dayanımı sonucunda GH1 nolu numunelere göre GH2 ve GH3 nolu numuneler sırasıyla %47.06 ve %41.18 oranında daha az çıkarken, GH4 numunelerine göre GH5 ve GH6 nolu numuneler sırasıyla %254.55 ve %218.18 oranında daha fazla çıkmıştır,

- 28 günlük eğilme dayanımı sonucunda GH1 nolu numunelere göre GH2 ve GH3 nolu numuneler sırasıyla %47.06 ve %47.06 oranında daha az çıkarken, GH4 numunelerine göre GH5 ve GH6 nolu numuneler sırasıyla %275 ve %275 oranında daha fazla çıkmıştır,
- 90 günlük eğilme dayanımı sonucunda GH1 nolu numunelere göre GH2 ve GH3 nolu numuneler sırasıyla %55.56 ve %44.44 oranında daha fazla, GH4 numunelerine göre GH5 ve GH6 nolu numuneler sırasıyla %243.75 ve %175 oranında daha fazla çıkmıştır,
- GH1 nolu numunenin 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre 28 günlük dayanımı %12.67 fazla çıkarken, 90 günlük dayanım %43.75 oranında daha az çıkmıştır,
- GH2 nolu numunenin 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre 28 günlük dayanımı aynı çıkarken, 90 günlük dayanım %55.56 oranında daha fazla çıkmıştır,
- GH3 nolu numunenin 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre 28 günlük dayanımı %10 daha az çıkarken, 90 günlük dayanım %30 oranında daha fazla çıkmıştır,
- GH4 nolu numunenin 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla %9.09 ve %45.46 oranında daha fazla çıkmıştır,
- GH5 nolu numunenin 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla %15.39 ve %41.03 oranında daha fazla çıkmıştır,
- GH6 nolu numunenin 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla %11.43 ve %25.71 oranında daha fazla çıktığı gözlemlenmiştir.

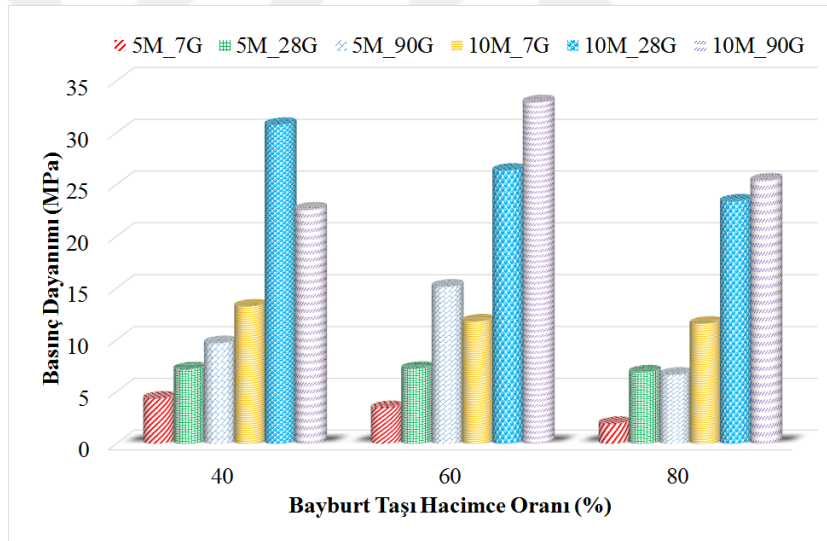
Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde numuneler arasında genel olarak bir korelasyon oluşmadığı gözlemlenmiştir. Eğilme dayanım deneylerinde numune üzerinde bulunan küçük bir hatadan bile dayanım değerlerinin önemli ölçüde değiştiği bilinmektedir. Bu sebepten dolayı sonuçlarda değişiklikler meydana gelmiştir. 10 mol ve 5 mol numuneler kıyaslandığında ise 10 mol numunelerde süreç ilerledikçe eğilme dayanımlarının arttığı, 5 mol numunelerde düzensiz bir şekilde ilerlediği görülmüştür. Bunun sebebi 10 mol numunelerin durabilite özelliklerinin 5 mol numunelere göre daha iyi olduğu söylenebilir.

4.2.2 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 7, 28 ve 90 basınç dayanım sonuçları

No	NaOH (Mol)	BT Oranı (%)	TA Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)		
				7 Gün	28 Gün	90 Gün
GH1	5	40	60	4,34	7,17	9,70
GH2		60	40	3,42	7,22	15,16
GH3		80	20	1,91	6,88	6,66
GH4	10	40	60	13,23	30,77	22,61
GH5		60	40	11,80	26,34	32,95
GH6		80	20	11,58	23,38	25,41



Şekil 4.4 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Basınç deneyleri sonucunda maksimum dayanıma GH5 nolu numunelerde 90 gün sonunda 32.95 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük dayanım GH4 nolu numunelerde 6.66 MPa olarak 90 gün sonunda görülmüştür.

Şekil 4.4 ve Çizelge 4.3 deki sonuçlar göz önüne alındığında şu sonuçlar çıkarılabilmektedir:

- 7 günlük basınç dayanımı sonucunda GH1 nolu numunelere göre; GH2 ve GH3 nolu numuneler sırasıyla %21.22 ve %56.12 oranında daha az, GH4

numunelerine göre GH5 ve GH6 nolu numuneler sırasıyla %10.86 ve %12.52 oranında daha az çıkmıştır,

- 28 günlük basınç dayanımı sonucunda GH1 nolu numunelere göre; GH2 aynı, GH3 nolu numune %56.12 oranında daha az, GH4 numunelerine göre GH5 ve GH6 nolu numuneler sırasıyla %14.37 ve %24.02 oranında daha az çıkmıştır,
- 90 günlük basınç dayanımı sonucunda GH1 nolu numunelere göre; GH2 nolu numune %56.20 daha fazla, GH3 nolu numune %31.40 oranında daha az çıkarken, GH4 numunelerine göre GH5 ve GH6 nolu numuneler sırasıyla %45.75 ve %12.37 oranında daha fazla çıkmıştır,
- GH1 nolu numunenin 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımı sırasıyla %65.11 ve %123.38 daha fazla çıkmıştır,
- GH2 nolu numunenin 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımı sırasıyla %110.96 ve %342.92 daha fazla çıkmıştır,
- GH3 nolu numunenin 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımı sırasıyla %260.66 ve %249.18 daha fazla çıkmıştır,
- GH4 nolu numunenin 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımı sırasıyla %132.47 ve %70.84 daha fazla çıkmıştır,
- GH5 nolu numunenin 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımı sırasıyla %123.31 ve %179.34 daha fazla çıkmıştır,
- GH6 nolu numunenin 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre 28 ve 90 günlük dayanımı sırasıyla %101.89 ve %119.43 daha fazla çıktığı görülmüştür.

Basınç dayanım deneyleri sonucunda 5 mol %80 BT oranı dışındaki bütün numunelerde basınç dayanımının zamanla arttığı görülmüştür. 5 mol numunelerde zaman geçtikçe karbonatlaşma (tuzlanma) ve kılcal çatlaklar meydana gelerek basınç dayanımında azalmalar meydana gelmiştir.

4.2.3 Aşınma Dayanımı

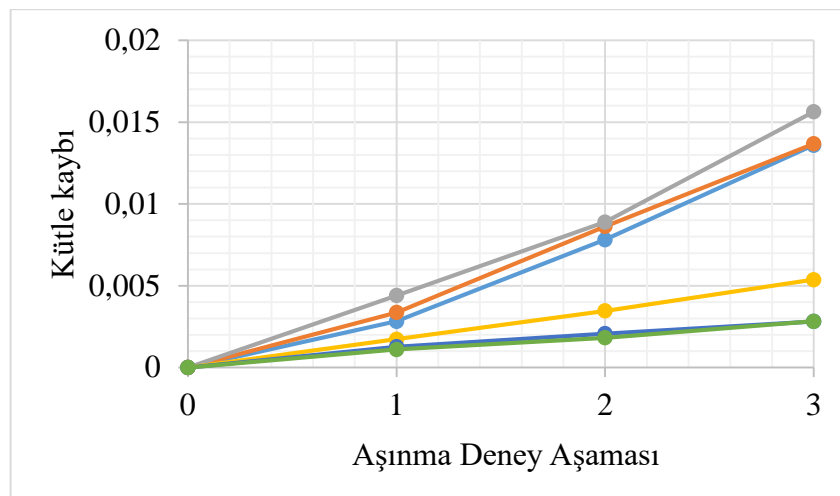
5 Mol ve 10 Mol numunelere 28 gün sonunda rotating cutter metodu ile 3 aşamada yapılan aşınma deneyi sonuçları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekilv4.5 te numunelerin her aşamada ağırlık kayıpları yüzde (%) olarak belirtilmiştir.

Çizelge 4.6 Aşınma Kaybı Sonuçları

No	NaOH (Mol)	BT Oranı (%)	Kütle Kaybı			
			İlk Ağırlık (gr)	1. Aşınma (gr)	2. Aşınma (gr)	Son Ağırlık (gr)
GH1	5	40	1766,1	1761,1	1752,3	1742,1
GH2		60	1959,3	1952,7	1942,4	1932,5
GH3		80	2181	2171,4	2161,6	2146,9
GH4	10	40	1675,1	1672,2	1669,3	1666,1
GH5		60	1491,1	1489,2	1488	1486,9
GH6		80	989,3	988,2	987,5	986,5

Çizelge 4.6 'daki sonuçlar göz önüne alındığında şu sonuçlar çıkarılabilmektedir.

- İlk aşınma sonuçlarına göre 5 mol NaOH kullanılan GH1 numunesinde 4gr GH2 numunesinde 6,8 gr GH3 numunesinde 9,6 gr kütle kaybı yaşanırken 5 mol NaOH kullanılan GH4 numunesinde 2,9 gr GH5 numunesinde 1,9 gr GH6 numunesinde 1,1 gr kütle kaybı yaşanmıştır.
- En fazla aşınma 5 Mol %80 BT içerikli GH3 numunesinde görülürken, en düşük aşınma değeri GH6 yani 10 %80 BT içerikli numunede görülmüştür.
- BT oranı doğal olarak boşluklu bir yapı olması nedeniyle aşınmada mukavemet azalacaktır. Böylece aşınma oranı kullanılan BT oranı artmasına dayalı olarak artacaktır.

**Şekil 4.5** Aşınma deneyi sonuçları

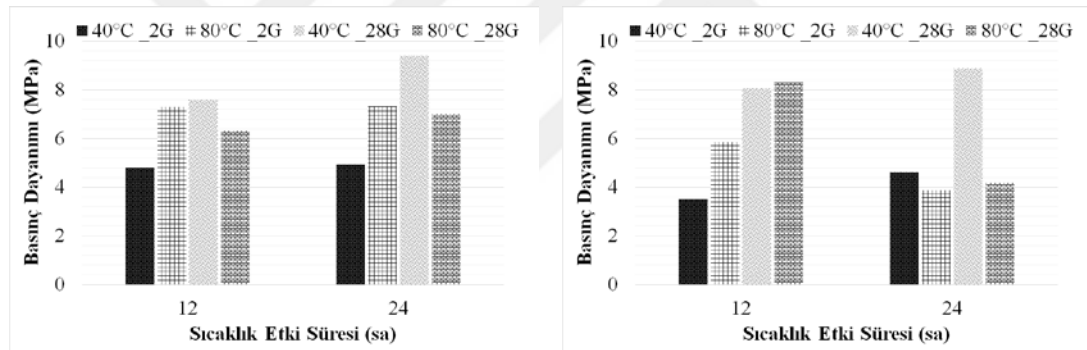
NaOH oranı artması oluşan geopolimerin yapısındaki bir arada tutan bağların artmasına ve boşluk yapısının azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum kohezif mukavemetin artmasına ve böylece aşınmanın 5 mol NaOH kullanılan numunelere göre azalmasına neden olmaktadır.

4.3 Termik Özellikler

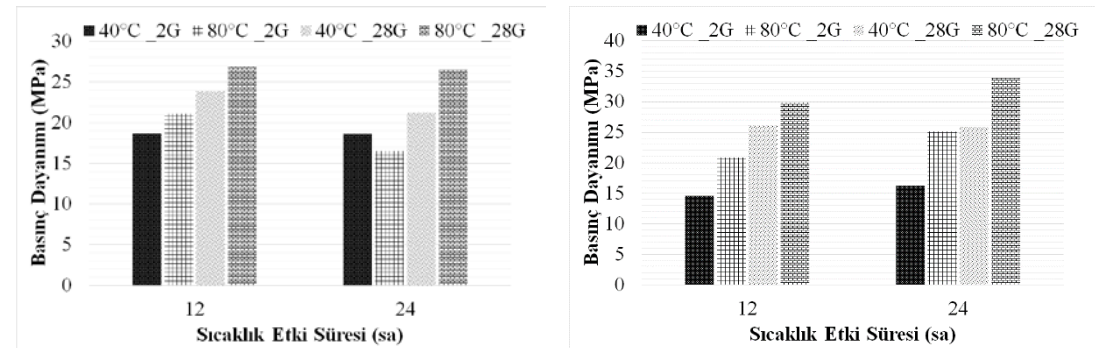
4.3.1 Sıcaklık Etkisi

Üretilen Geopolimer hamur numuneleri 2 ve 28 gün sonunda 12 ve 24 süreyle 40 °C ve 80 °C sıcaklıkta bekletildikten sonra basınç dayanımına tabi tutulmuştur.

%80 BT içerikli numunelerin dayanım değerlerindeki düşüklükten dolayı sıcaklık deneyine tabi tutulmamıştır. Deney sonuçları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 a) GH1 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu b) GH2 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu



Şekil 4.7 a) GH4 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu b) GH5 nolu numuneler üzerinde sıcaklık etkisi deneyi sonucu

Yapılan sıcaklık etkisi deneyi sonucunda şu yorumlar yapılabilir:

- 2 gün sonundaki GH1, GH2, GH4 ve GH5 örneklerinden 12 saat süreyle 40 °C de bekletilen numunelere göre, 24 saat 40 °C de bekletilen numuneler sırasıyla %2.92, %30.68, %0.01 ve %11.68 oranında daha fazla çıkmış,
- 28 gün sonunda 12 saat süreyle 40 °C de bekletilen numunelere göre, 24 saat 40 °C de bekletilen numunelerden GH1 ve GH2 sırasıyla %23.95 ve %10.17 fazla çıkarken, GH4 ve GH5 numuneleri sırasıyla %11.13 ve %1.00 oranında daha az çıktığı görülmüştür.
- 2 gün sonunda 12 saat süreyle 80 °C de bekletilen numunelere göre, 24 saat 80 °C de bekletilen GH1, GH2, GH4 numuneleri sırasıyla %0, %34.13 ve %21.52 daha az çıkarken GH5 nolu numuneler %20.79 oranında daha fazla çıkmış,
- 28 gün sonunda 12 saat süreyle 80 °C de bekletilen numunelere göre, 24 saat 80 °C de bekletilen numunelerden GH1 ve GH5 sırasıyla %10.76 ve %13.37 oranında fazla çıkarken, GH2 ve GH4 numuneleri sırasıyla %49.64 ve %1.34 oranında daha az çıktığı görülmüştür.
- GH1 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %58.33 ve %90.68 daha fazla çıkmıştır,
- GH1 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %13.42 ve %4.37 daha az çıkmıştır,
- GH2 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %128.98 ve %93.04 daha fazla çıkmıştır,
- GH2 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %41.64 ve %8.29 daha fazla çıkmıştır,
- GH4 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C

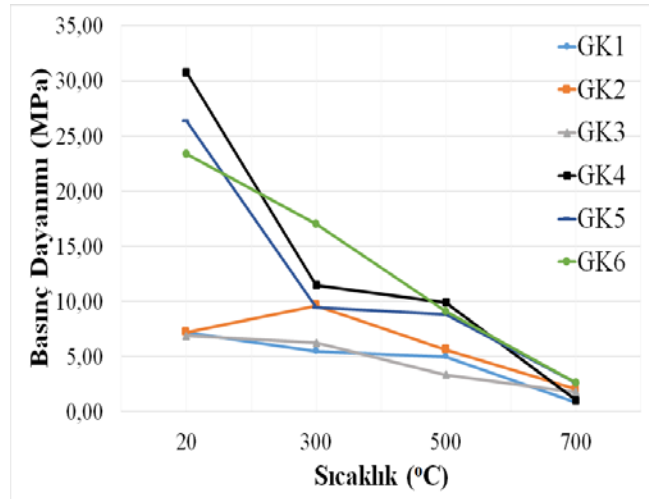
sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %27.94 ve %13.95 daha fazla çıkmıştır,

- GH4 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %27.39 ve %60.15 daha fazla çıkmıştır,
- GH5 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 40 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %79.81 ve %59.41 daha fazla çıkmıştır,
- GH5 nolu, 2 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçlarından, 28 gün sonunda 12 ve 24 saat süreyle 80 °C sıcaklıkta bekletilen numunelerin sonuçları sırasıyla %43.99 ve %35.14 daha fazla çıkmıştır,

Bu sonuçlar göz önüne alındığında, 5 Mol ve 10 Mol numunelerin her ikisinde de erken yaşlarda sıcaklığın etki süresinin numuneler üzerinde büyük bir etki oluşturmadığı görülmüştür. 10 Mol numuneler üzerinde sıcaklık arttıkça dayanım değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak yeterli oranda aktivatör bulunduğu bir ortamda bağlayıcı olan BT'nin sıcaklıkla birlikte daha hızlı tepkimeye girdiği yorumu yapılabilmektedir.

4.3.2 Yüksek Sıcaklık Etkisi

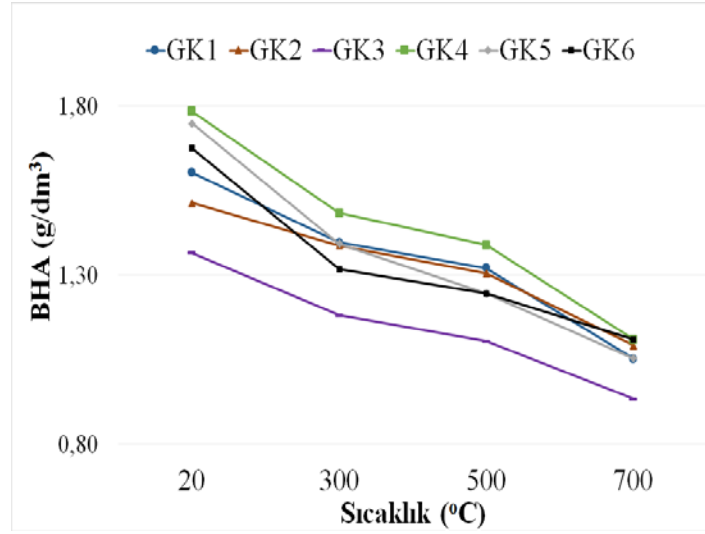
Üretilen geopolimer hamur numulari 28 gün sonunda 300°C, 500°C ve 700°C sıcaklığa 2 saat boyunca maruz bırakılması sonucu elde edilen basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8 Yüksek sıcaklık basınç deneyi sonuçları

45µ inceliğindeki BT ve TA ile üretilen numuneler üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyleri sonucunda şu yorumlar yapılabilir:

- 300°C sıcaklık etkisinden sonra GH2 nolu numunelerin basınç dayanım değerlerinde artışlar görülmüştür. 500°C ve 700°C sıcaklık etkisinden sonra bütün numunelerin basınç dayanım değerleri 5 MPa dayanımın altına düşmüştür.
- 20°C sıcaklığa göre 300°C sıcaklıkta GH1, GH3, GH4, GH5 ve GH6 nolu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %23.03, %9.24, %62.69, %64.17 ve %27.10 oranında azalırken, GH2 nolu numunelerde %33.54 oranında artış görülmüştür,
- 20°C sıcaklığa göre 500°C sıcaklıkta GH1, GH2, GH3, GH4, GH5 ve GH6 nolu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %30.28, %21.87, %51.13, %67.76, %66.44 ve %60.98 oranında azaldığı görülmüştür,
- 20°C sıcaklığa göre 700°C sıcaklıkta GH1, GH2, GH3, GH4, GH5 ve GH6 nolu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %87.73, %71.74, %73.82, %96.62, %89.98 ve %88.71 oranında azaldığı görülmüştür,



Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık sonrası BHA değerleri

Yüksek sıcaklık etkisi deneyleri sonucunda genel olarak numunelerin sıcaklıkla birlikte basınç dayanımlarının azaldığı şekil 4.8 'de görülmüştür.



Şekil 4.10 Yüksek sıcaklık etüv sonrası numune görüntüleri

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, Bayburt Taşının çağdaş üretim teknikleriyle yeni bir yapı malzemesi üretiminde kullanılması hedeflenmiş ve “Bayburt taşı atıklarının geopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliği” araştırılmıştır. Deneysel bulgularından faydalanılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Taze haldeki geopolimer hamurların standart kıvam (çözelti ihtiyacı) ile priz süreleri deney sonuçlarına göre Bayburt Taşı oranı arttıkça çözelti ihtiyacı artmıştır.
- Geopolimer hamurlarda BT taşının işlenebilirliği zorlaştırarak yayılmayı azalttığı görülmüştür. En fazla yayılma 19,2 cm ile GH1 numunesinde olurken en az yayılma 14,75 cm ile GH6 numunesinde olmuştur.
- Geopolimer hamurlarda BT oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlıkları azalmıştır. En düşük birim hacim ağırlığı 90 gün sonunda 1,43 gr/cm³ ile 10 mol NaOH ve %60 BT kullanılan GH5 numunesinde görülmüştür.
- Geopolimer hamurlarda BT oranı artması su emme oranını arttırmıştır. 5 mol NaOH ile üretilen geopolimer hamurların durabilitesinin 10 mol NaOH ile üretilen numunelere göre daha yüksek olmuştur. En düşük porozite oranı 90 gün sonunda %31,62 ile 10 mol NaOH ve %60 BT kullanılan GH5 numunesinde görülmüştür. En düşük su emme oranı 90 gün sonunda %22,67 ile 10 mol NaOH ve %60 BT kullanılan GH5 numunesinde görülmüştür.
- Geopolimer hamurda BT oranının artması görünür porozite yüzdesini arttırmıştır. En düşük porozite oranı 90 gün sonunda %31,62 ile 10 mol NaOH ve %60 BT kullanılan GH5 numunesinde görülmüştür.
- Eğilme dayanımları 10 mol NaOH kullanılan numunelerde 10,31 MPa olurken, 5 mol NaOH kullanıldığı numunelerde 2,63 MPa olmuştur.
- Elde edilen numunelerde 90 gün sonunda en yüksek dayanım 10 mol NaOH %60 BT kullanıldığı GH5 nolu numunede 32,95 MPa olurken, en az dayanım 5mol NaOH %80 BT kullanıldığı GH4 nolu numunede 6,66 MPa dayanım olmuştur.
- Aşınma deneylerinde BT oranının artışının kütle kaybını artırdığını göstermiştir.

- Yüksek sıcaklığın geopolimer tuğlann dayanımına olan etkisi araştırmak için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara bakıldığında sıcaklık artıkça dayanım düştüğü görülmüştür.
- Elde edilen bazı tuğlalarda çiçeklenme(tuzlanma) olduğu görülmüştür.
- Geopolimer hamur numuneler 20 °C, 40 °C ve 80 °C sıcaklıklarda küre tabi tutulmuşlardır. 20 °C sıcaklıktaki kür en iyi dayanımı veren küre sahip olmuştur.

5.2. Öneriler

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar eşiğinde aşağıdaki öneriler verilmektedir.

- Priz başlangıç ve bitiş süreleri karışımdaki BT oranının artışına bağlı olarak kısalmuştur. Böylece kalıptan alma süreleri azalmış ve tuğla üretiminde daha kısa sürelerde daha çok ürün üretilmesi imkânı vermiştir.
- Bazı numunelerde oluşan tuzlanma NaOH alkali aktivatöründen kaynaklanmaktadır. Bu durum tuğlann kullanımında estetik açıdan olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuz durumu diğer bir alkali aktivatör olan KOH kullanılarak çözülebilir.
- BT taşının aşınmaya karşı olan dirençsizliği aşınmaya maruz kalacak yüzeylerde kullanımını kısıtlamaktadır. Dolayısıyla üretilen geopolimer tuğlann bu tür yüzeylerde kullanılması önerilmemektedir.
- TS 2514 standardına göre kurutulmuş numunelerin eğilme dayanımı en az 1 MPa olmalıdır. Bu çalışmada numunelerin test sonuçları incelendiğinde, tüm numuneler için eğilme dayanımlarının 1 MPa 'dan yüksek olduğu görülmüştür.
- Üretilen geopolimer tuğlann 25-32 MPa aralığındaki basınç dayanımını mevcut duvar elemanları bimsblok 2,5 MPa, tuğlada 3-8 MPa ,Gazbeton 5 MPa dayanımlarının üzerinde olması yeni ürünün inşaat sektöründe kullanılması yönünde artı bir değer oluşturacaktır.
- Bayburt taşının yoğunluğunun 1,69 gr/cm³ gibi düşük bir değerde olması üretilen tuğlann birim hacim ağırlığını da düşürmüştür. Bu tuğlann kullanılması ile kullanım kolaylığı sağlandığı gibi yapı yükünün azaltılmasında da önemli bir işlev göreceğinden yapılarda kullanılması önerilmektedir.

- Artan sıcaklıklar neticesinde dayanım değerleri önemli ölçüde düşerken bu haliyle bile mevcut tuğlaların dayanımları olan 3-8 MPa dayanımlarını yakalamaktadır. Böylece üretilen geopolimer tuğlanın yüksek sıcaklıklarda bile şeklini koruduğu gibi mevcut tuğlaların dayanım değerlerini sağlamıştır.
- Bayburt Taşının alkali aktivasyonu ile bağlayıcı özellikler kazanmaları için 20+2 °C kür sıcaklığı yeterli olmaktadır. Bu sıcaklık mevcut tuğla üretimi için gerekli fırın sıcaklıklarını önemli ölçüde düşürmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak; üretilen geopolimer tuğla malzemesi mevcut duvar elamanlarına nispeten daha yüksek dayanım, daha hafif, daha gözenekli oldukları ortaya çıkmaktadır. Bu noktada üretilen tuğla örneklerinde BT atıklarının kullanılması ile bu atığın geri dönüştürülerek bir yapı malzemesinde kullanılması sayesinde çevreye vereceği zararlarda önlenmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- Bayramgil, O. (1959). *Petrografi*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları.
- Bouterrin, C., Davidvits, J. (1982). *LTGS of ceramics fabrication of black surfaced ceramics proceedings of the 22nd archeometry symposium*. University of Bradford.
- Bimsader. (2016). *Bims*, <http://www.bimsader.org.tr/48-Bims-Nedir-> ,20.09.2016.
- 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. *10.1007/s10853-006-0376.*, 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. H. (2004). stabilised foam clay material with high performance thermal insulation properties. **CFI Ceramic Forum International**, (s. 39-42).
- Cinel, M. (2007). *“Doğal Taşların Fiziko-Mekanik Özelliklerine Göre Sınıflandırılması*. Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü **Yüksek Lisans Tezi**.
- Çiçek, Y., E.,(2002), *“Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”*, **Yüksek Lisans Tezi**, İstanbul Teknik Üniversitesi,, İstanbul.
- Çağlar Tuğla,(2016), Çağlar Tuğla Ürünleri, www.caglartugla.com.tr/urunler.htm 07.09.2016.
- Çavdar A., Y. Ş. (2007). *Availability of tuffs from northeast of Turkey as natural pozzolan on cement, some chemical and mechanical relationships*. **Construction and Building Materials**, 21 (12) 2066–2071.
- Çevre Şehircilik Bakanlığı. (2012). *Yapı Malzemelerinde Bims Raporu*. Mardin.
- D.P.T. (2001). *8 .Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Komisyonu Raporu*. Ankara.
- Davidovits, J. (2006). *geopolymer Science Video tutorial*. www.geopolymer.org.

- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and applications*. Saint Quentin, France.
- Davidovits, J. (2008). *They built the pyramids ,published by institute geopolymer. institute geopolymer Saint Quentin France*
- 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., B. M. (2001). *Mermer tozu artıklarının (havuz çökeltisi) hafif yapı blokları üretiminde kullanılması. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (MERSEM 2003) Bildiriler Kitabı 213-220*.
- Deventer, V. (2012). *Zeobond geopolymeric concrete firm web. Zeobond: http://www.zeobond.com*.
- Doğan, H. (2003). *Doğal ve Sentetik Zeolitler ve Uygulama Alanları*. Bor Teknolojileri ve Mineraller Grubu TÜBİTAK.
- DPT. (2001). *Yapı Malzemeleri II (Mermer- Granit-Yapı Taşları-Arduvaz*. Ankara: VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, **Madencilik Özel ihtisas Komisyonu Raporu**.
- Akın,E. (2007). *Mermer tozları ve uçucu kül ile polimer esaslı kompozit malzeme üretimi*. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Yüksek Lisans Tezi**
- Erguvanlı., K. , Sayar, M. (1955). **Mühendislik Jeolojisi**. İstanbul,: İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Kurtulmuş Matbaası.
- Erguvanlı., K. ., (1955). **Türkiye Mermerleri ve İnşaat Taşları**. İstanbul,: İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Kurtulmuş Matbaası.
- Eriç, M. (2002). **Yapı Fiziği ve Malzemesi**. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Ertek, N. (2008). *Kapadokya (Nevşehir-Kayseri) bölgesi kaolinitik tüflerin oluşumu ve hammadde potansiyeli*. Mersin: Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri.
- Felekoğlu, B. (2016). *Geopolimer*. <http://kisi.deu.edu.tr/burak.felekoglu/08.geopolimer.pdf> ,07.09.2016
- Hititgroup.(2016) Gazbeton yapı malzemeleri. <http://hititgrupyapi.com>.07.09.2016
- Gourley, J., Johnson, G. (2005). **proceedings of world congress geopolymer. developments in geopolymer precast concrete**. Fransa.

- Gülen, J. , Zorbay, F., Arslan, S. (2012). Zeolitler ve Kullanım Alanları. **Karaelmas Science and Engineering Journal**, 63-68.
- Gündüz, L. (1998). **Pomza Teknolojisi: Pomza Karakterizasyonu**, Cilt I, Suleyman Demirel Oniversitesi Muhendislik Mimarlık Fakultesi , Isparta .
- Gündüz, L. (2005). *İnşaat Sektöründe Bims Blok*. Isparta: Pomza Araştırma Ve Uygulama Merkezi.
- Ivanova, I. A. (2002). Influence of cations on the physicochemical and structural properties of aluminosilicate gel precursors. *2.multinuclear magneticresonance charecterisation.*, (s. 245-257.).
- 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).
- 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).. *corrosion of metals in fly ash based geopolymers. proceedings of world congress geopolymer*, Fransa.
- MTA. (2005). *Bayburt Doğal Taş Potansiyesi Maden Jeolojisi Raporu*. Ankara: MTA.
- Onargan, T. H. (2006). *Mermer*. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Yayın No: 95.
- Ortega E.A., Cheesemana C., Knighta J., Loizidou M. (2000). *Properties of alkali-activated clinoptilolite*. **Cement and Concrete Research** 30 1641 – 46.
- Outerrin, C. ,Davidvits, J. (1982). proceedings of the 22nd archeometry symposium. LTGS of ceramics fabrication of black surfaced cerami: UK: University of Bradford.
- Ören, B. (1996). *Pomzanın endüstriyel hammadde olarak degerlendirilebilirliigi.*, Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Yüksek Lisans Tezi**.

- Ünverdi, A., 2006, “Yüksek Sıcaklık Altında Gazbeton Kırıklı Betonların Dayanımlarının İncelenmesi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- P., T. (2012). *Manufacturing of building bricks without Portland cement*. **Journal of Cleaner Production**, 361-367.
- Pinto, A. T., Eduardo, V.(2005). *Repairing of damaged stone in monuments and stone buildings*. **Proceedings of world congress geopolymers**. France.
- Rangan, B. H. (2005). Studies on fly ash-based geopolymers concrete. **Proceedings of world congress geopolymers**. France.
- Segui P., A. J. (2013). *Utilization of a natural pozzolan as the main component of hydraulic road binder*. **Construction and Building Materials** 217–223.
- Serin, G. (1999). *Pomzanın Hafif Beton Blok Duvar Elemanı Olarak Kullanılmasının Araştırılması*. Isparta: SDÜ, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, **Yüksek Lisans Tezi**.
- Silverstrim, T., Rotsami, H., Larralde, J., & Samadi Maybodi, H. (1997). *USA Patent No. 601.643*.
- Sullivan, A., & Hill, R. (2001). *inexpensive glass polialkenoate Cement based on waste gasifier slag*. Morella: proceedings of the european union thematic progress workshop.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2011). *Yapı Malzemeleri Piyasa Gözetim Denetim Elemanları Eğitim Notları*. Ankara.
- Şentürk, A. G. (1996). **Mermer Teknolojisi**. Isparta: Tuğra Ofset.
- Tekin,İ. (2016). Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes, Bayburt. *Construction and Building Materials*, **Elsevier Science Direct Minerals Engineering**, 607-617
- TS, 1. (2004). *Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için*. ANKARA: TSE.
- TS, 3. (1975). *Bimsbeton yapım kuralları, karışım hesabı ve deney metotları*. Ankara: TSE.
- TS, 7. (1985). *Fabrika Tuğlaları-Duvarlar için Dolu ve Delikli*. Ankara: TSE.
- Turgut, P. (2010). *Masonry composite material made of limestone powder and fly ash*. **Powder Technology**, 204 (1), 42–47.

- Ünal O., U. T. (2003). *Atık mermer tozu katkılı betonların donma-çözülme etkisinde mekanik özelliklerinin araştırılması*,. **Türkiye IV. Mermer Sempozyumu** (MERSEM'2003) Bildiriler Kitabı 147-157,.
- 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. V. (1989). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolonit based geopolymers. **Chemical engineering journal**,63-73.
- what is geopolymer*. (2012). website of geopolymer institute: www.geopolymer.org
- Willian, S. A. (1978). *Lightweight Concrete, Third Edition, Formerly, Building Research Establishment Garston*. Garston, Watford: **Building Reserach Establishment**.
- Yeşilyurt, E. (2013). *Isıl İşlem Görmüş Ham Perlit ile Yeni Nesil Yapı Malzemesi Geliştirilmesi*. ANKARA.
- Yurdagül E., K. H. (2012). *Usage of bayburt stone in road infrastructures as a improvement material*. **International Conference on Traffic and Transport Engineering** 439-444.
- 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: 45 mikron inceliğindeki numunelerin deney sonuçları

Ek 2: Deney görüntüleri

Ek 3: Üretilen tuğla numuneleri



EK 1

45 inceliğindeki numunenin deney sonuçları

Yaş (gün)	No	NaOH (Mol)	BT (%)	TA (%)	Su Emme Oranı (%)	Görünür Porozite (%)	Kuru BHA (g/cm ³)
7	GH1	5	40	60	-	-	-
	GH2	5	60	40	33,80	44,54	1,30
	GH3	5	80	20	37,14	43,02	1,20
	GH4	10	40	60	27,72	39,01	1,43
	GH5	10	60	40	33,55	43,56	1,36
	GH6	10	80	20	35,92	45,23	1,28
28	GH1	5	40	60	-	-	-
	GH2	5	60	40	31,54	42,22	1,30
	GH3	5	80	20	35,49	42,12	1,17
	GH4	10	40	60	25,39	36,49	1,48
	GH5	10	60	40	28,02	38,00	1,40
	GH6	10	80	20	36,85	45,91	1,26
90	GH1	5	40	60	-	-	-
	GH2	5	60	40	-	-	-
	GH3	5	80	20	-	-	-
	GH4	10	40	60	25,67	36,62	1,45
	GH5	10	60	40	22,67	31,62	1,43
	GH6	10	80	20	31,35	39,87	1,29

Çizelge A.1: Kapiler Su emme ve Kuru Birim Hacim ağırlığı

EK 1-Devam

No	NaOH (Mol)	BT Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımı (MPa)		
			7	28	90	7	28	90
			Gün	Gün	Gün	Gün	Gün	Gün
GH1	5	40	3,19	3,19	1,69	4,34	7,17	9,70
GH2		60	1,69	1,69	2,63	3,42	7,22	15,16
GH3		80	1,88	1,69	2,44	1,91	6,88	6,66
GH4	10	40	2,06	2,25	3,00	13,23	30,77	22,61
GH5		60	7,31	8,44	10,31	11,80	26,34	32,95
GH6		80	6,56	7,31	8,25	11,58	23,38	25,41

Çizelge A.2: Farklı oranlarda BT kullanılan numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanımları sonuçları

EK 2

Deney Görüntüleri



Şekil A.1: NaOH ve Toz Malzemelerin Tartıldığı Cihazlar



Şekil A.2: NaOH ve Toz Malzemelerin Tartılması



Şekil A.3: NaOH çözeltisinin tartım işlemi



Şekil A.4: Harcın Karıştırıldığı Mikser



Şekil A.5: 5 mol NaOH'ın Piset ile Miksere Konulması



9

Şekil A.6: Malzemelerin Mikserde Karıştırılması



Şekil A.7: Kalıpların Yağlanması İşlemi



Şekil A.8: Numunelere Master İşleminin Yapılması



Şekil A.9: Deneyde kullanılan sarsma cihazı



Şekil A.10: Deneyde kullanılan yayılma tablası



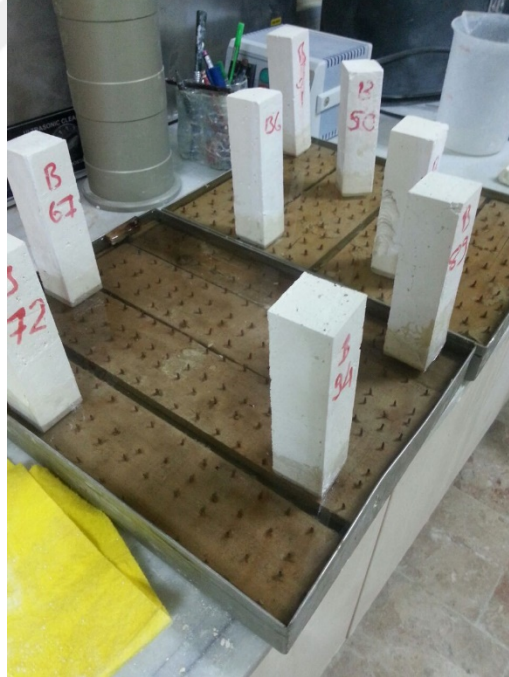
Şekil A.11: Numunelerin Hava Ortamında Bekletilmesi



Şekil A.12: Havada 24 Saat Kür İşlemine Tutulan Numuneler



Şekil A.12: 45°C Etüvde 24 Saat Kür İşlemine Tutulan Numuneler



Şekil A.13: Kapiler su emme işlemi uygulanan numuneler

EK 3
Üretilen Tuğla Numuneleri



Şekil B.1: Renk tozu katılmış geopolimer hamurun kalıplar dökümü



Şekil B.2: Renk tozu katılmış kalıpta master uygulanması işlemi



Şekil B.3: Delikli ve deliksiz üretilen tuğlalar

ÖZGEÇMİŞ



Cemil AYKUT

Cemil AYKUT, 1985 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Köy Okulunda orta öğrenimini Yavuz Selim Yatılı Bölge okulunda tamamladı ve 1997 yılında mezun oldu. Lise öğrenimini Trabzon Çaykara lisesini kazanarak 2001 yılında tamamladı.

2003 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde başladığı lisans öğrenimini 2007 yılında tamamladı. 2009 yılında Bayburt Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında Çevre Mühendisi olarak göreve başladı ve halen aynı birimde Şube Müdürü olarak görevine devam etmektedir. 2012-2013 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Bir yıl bilimsel hazırlık aldıktan sonra Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir.