

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK
OLARAK İNCELENMESİ**

TUĞÇE ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. HASBİ YAPRAK

EYLÜL - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Tuğçe ÇELİK tarafından hazırlanan “**HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK OLARAK İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **13.09.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Osman GENÇEL Bartın Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ Kastamonu Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Tuğçe ÇELİK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK OLARAK İNCELENMESİ

TUĞÇE ÇELİK

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI DANIŞMAN: PROF. DR. HASBİ YAPRAK

İnşaat sektöründe çimento esaslı malzemelerin kullanımı enerji tüketimine ve CO₂ emisyon artışına katkıda bulunur. Çimentolu kompozitlerin yerine geopolimer (GP) kullanılarak başta enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının azaltılması, inşaat sektörünün iklim değişikliğine katkısının hafifletilmesi ve sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu çerçevede çevre dostu alternatif ürünlerin geliştirilmesi son zamanlarda ön plana çıkmıştır. Alüminosilikat bileşikler bakımından zengin atık ve doğal malzemeler ve hafif agregalar kullanarak hafif geopolimer (HG) ürünlerin üretilmesi ve kullanımı önemli çevresel ve ekonomik faydalar sağlar. HG, üniform ve ince gözenek yapısı ile yapı yüklerinin azaltılması sonucu yapının sismik direncini artırır, düşük ısı iletkenliği ile yapının enerji tüketimini azaltır, ayrıca ses yalıtımı, düşük büzülme, asit ve yangına dayanıklılık, düşük karbon ayak izi özellikleri ile ön plana çıkar. Bu çalışmada hafif agrega olarak pomza (P) ve genleştirilmiş perlit (GP), %0; %50 ve %100 oranlarında hacimsel olarak yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak YFC ve atık tuğla tozu (TT) kullanılmış, TT %10 oranında YFC yerine ikame edilmiştir. Aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₄ tüm karışımlarda aynı oranda yer almıştır. 40x40x160 mm ve 40x40x40 mm boyutunda hazırlanan geopolimer harç numunelerin birim ağırlık, basınç, eğilme, 250; 500°C yüksek sıcaklık, 30 ve 60 gün süreli sülfat ve asit direnci özellikleri test edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin 4,4-23,10 MPa, eğilme dayanımlarının 0,48-1,32 MPa arasında değiştiği, GP'nin numunelerin mekanik, durabilite ve yüksek sıcaklık özelliklerini olumsuz olarak etkilediği gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER:Hafif Geopolimer, Pomza, Genleştirilmiş Perlit, YFC, Basınç-Eğilme Dayanımı

Eylül 2024, 61 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

PHYSICAL AND CHEMICAL INVESTIGATION OF LIGHTWEIGHT GEOPOLYMER MORTARS

TUĞÇE ÇELİK

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. DR. HASBİ YAPRAK

The use of cement-based materials in the construction industry contributes to increased energy consumption and CO₂ emissions. Using geopolymer (GP) instead of cement composites is important in terms of reducing energy consumption and CO₂ emissions, mitigating the contribution of the construction sector to climate change, and sustainability. In this context, the development of environmentally friendly alternative products has recently come to the fore. The production and use of lightweight geopolymer (HG) products using waste and natural materials rich in aluminosilicate compounds and lightweight aggregates provides significant environmental and economic benefits. HG increases the seismic resistance of the structure as a result of reducing building loads with its uniform and fine pore structure, reduce the energy consumption of the structure with its low thermal conductivity, and also stands out with its sound insulation, low shrinkage, acid and fire resistance, and low carbon footprint properties. In this study, pumice (P) and expanded perlite (GP) were used as lightweight aggregates by volumetric replacement at 0%, 50%, and 100%. YFC and waste brick dust (TT) were used as binders, and TT was replaced by YFC at a rate of 10%. NaOH and Na₂SiO₄ were used as activators at the same rate in all mixtures. The unit weight, pressure, bending, 250, 500 °C high temperature, 30 and 60 day sulfate and acid resistance properties of geopolymer mortar samples prepared in 40x40x160 mm and 40x40x40 mm sizes were tested. It was observed that the 28-day compressive strength values varied between 4.4-23.10 MPa, the flexural strengths varied between 0.48-1.32 MPa, and GP negatively affected the mechanical, durability and high temperature properties of the samples.

KEYWORDS:Light Weight Geopolimer, Pumice, Expanded Perlite, Slag, Compresive-Flexural Strength

September 2024, 61 Page

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında tez konumun belirlenmesinde, yürütülmesinde, laboratuvar çalışmalarında ve tezin yazımı esnasında çalışmalarına ilgiyle yön veren, değerli fikir ve katkılarıyla çalışmamı aydınlatan, bana her türlü desteği sağlayan danışmanım Sayın Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'a ve değerli hocam Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ'e, meslektaşım ve arkadaşım İnş. Yük. Müh. Selma İZBELİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen değerli aileme, minicik kalbiyle gözlerimin içine bakan biricik oğlum Göktuğ'uma ve eğitim hayatımın en önemli yıllarında her zaman yanımda olan ve beni yalnız bırakmayan sevgili eşime minnettarım.

TUĞÇE ÇELİK

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Geopolimerin Tanımı.....	4
2.2 Geopolimerin Tarihçesi	5
2.3 Geopolimerizasyon	6
2.4 Geopolimerin Avantaj ve Dezavantajları.....	8
2.5 Geopolimer Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler	9
2.5.1 Agregalar	9
2.5.1.1 Genleştirilmiş perlit (GP).....	10
2.5.1.2 Pomza.....	11
2.5.2 Bağlayıcılar	11
2.5.2.1 Yüksek fırın cürufu (YFC).....	12
2.5.2.2 Tuğla tozu (TT)	12
2.5.3 Aktivatör	12
2.5.4 Köpük.....	13
2.6 Literatüre Ait Bazı Çalışmalar	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1 Materyal	20
3.1.1 Agregalar	20
3.1.2 Bağlayıcılar	22
3.1.3 Aktivatörler	24
3.1.4 Köpük.....	26
3.1.5 Kullanılan Aletler ve Yardımcı Ekipmanlar	27
3.1.5.1 Elek	27
3.1.5.2 Harç mikseri	28
3.1.5.3 Bilyalı değirmen.....	28
3.1.5.4 Kalıplar.....	28
3.1.5.5 Etüv	29
3.1.5.6 Eğilme-basınç dayanım test cihazı.....	29
3.1.5.7 Yüksek sıcaklık deney cihazı	30
3.1.6 Numune Üretim Prosesi.....	30
3.1.7 Numune Örnekleri	31
3.2 Yöntem.....	31
3.2.1 Yayılma Deneyi	31
3.2.2 Basınç Dayanımı Deneyi	33

3.2.3	Eğilme Dayanımı Deneyi.....	33
3.2.4	Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	35
3.2.5	Sülfat Testi.....	36
3.2.6	Asit Testi.....	37
4.	TARTIŞMA VE BULGULAR	38
4.1	İşlenebilirlik Testi Sonuçları.....	38
4.2	Birim Hacim Ağırlık Testi Sonuçları.....	39
4.3	Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları.....	39
4.4	Basınç Dayanımı Test Sonuçları.....	40
4.5	Yüksek Sıcaklık Testi Sonuçları.....	44
4.6	Sülfat Testi Sonuçları.....	46
4.7	Asit Testi.....	47
5.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	49
5.1	Sonuçlar	49
5.2	Öneriler	49
	KAYNAKLAR	50
	ÖZGEÇMİŞ.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Geopolimerizasyon denklemi	6
Şekil 2.2 Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları	7
Şekil 3.1 Kullanılan malzemeler	20
Şekil 3.2 Geopolimer harç yapımında kullanılan agregalar a) Pomza b) GP	21
Şekil 3.3 Pomza agregasının SEM görüntüsü	22
Şekil 3.4 Atık tuğlanın SEM görüntüsü	22
Şekil 3.5 Geopolimer harç yapımında kullanılan bağlayıcılar	23
Şekil 3.6 Karışımında kullanılan sıvı malzemeler	26
Şekil 3.7 a)Elektrikli mikserle hazırlanmış köpük b)Köpük eklenirken oluşan görüntü	27
Şekil 3.8 Elek (1,18mm)	27
Şekil 3.9 Harç mikseri (Karıştırıcı)	28
Şekil 3.10 Bilyalı değirmen.....	28
Şekil 3.11 Etüv	29
Şekil 3.12 Test cihazı	29
Şekil 3.13 Numune örnekleri	31
Şekil 3.14 Yayılma deneyi görüntüleri	32
Şekil 3.15 Basınç dayanımı deneyine tabi tutulan numunenin görünümü.....	33
Şekil 3.16 Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan numunenin görünümü	34
Şekil 3.17 Eğilme deneyine tabi tutulan numune görüntüleri.....	35
Şekil 3.18 250 derece sıcaklığa tabi tutulan numunelerin toplu görüntüleri.....	36
Şekil 3.19 500 derece sıcaklığa tabi tutulan numunelerin toplu görüntüleri.....	36
Şekil 3.20 Sülfat etkisindeki numune örnekleri	37
Şekil 3.21 Asit etkisindeki numune örnekleri	37
Şekil 4.1 HG harçların yayılma çapları.....	39
Şekil 4.2 Kuru birim hacim ağırlıkları	39
Şekil 4.3 HG numunelerin eğilme dayanımı.....	40
Şekil 4.4 HG numunelerin 3 günlük basınç dayanımları	41
Şekil 4.5 HG numunelerin 7 günlük basınç dayanımları	41
Şekil 4.6 HG numunelerin 28 günlük basınç dayanımları	42
Şekil 4.7 HG numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım kayıpları	44
Şekil 4.8 HG numunelerin sülfat testi sonrası basınç dayanım kayıpları	47
Şekil 4.9 HG numunelerin asit testi sonrası basınç dayanım kayıpları.....	48

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Genleştirilmiş perlitin inşaat sektöründeki kullanım alanları	10
Tablo 2.2 Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	11
Tablo 3.1 Pomzanın fiziksel özellikleri	21
Tablo 3.2 Pomza elek analizi	21
Tablo 3.3 YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	23
Tablo 3.4 TT'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Tablo 3.5 TT elek analizi	24
Tablo 3.6 Köpüğün özellikleri	26
Tablo 3.7 Karışım tasarım verileri (1dm ³)	30

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
K₂SiO₃	: Potasyum Silikat
Na₂SiO₄	: Sodyum Silikat
NaCl	: Sodyum Klorür
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na-PS	: Hidrosodalit
SiO₂	: Silisyum Dioksit (Silika)

Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society for Testing and Materials
HG	: Hafif Geopolimer
GP	: Genleştirilmiş Perlit
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapascal
NŞA	: Normal Şartlar Altında
OPC	: Geleneksel Portland Çimentosu
PC	: Portland Çimentosu
TS EN 206	: Beton Standardı
TS EN 934-2	: Su Azaltıcı / Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkılar Standardı
TS EN 206-1	: Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk
TS EN 12390-7	: Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini
TS EN 12390-3	: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini
TS EN 12390-5	: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini
TSE CEN/TS 12390-9	: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 9: Buz çözücü tuz içinde donma-çözülme direncinin tayini - Yüzeysel hasar tespiti
TSE CEN/TR 15177	: Betonun donma çözülme direncinin tayini- Yapısal iç hasar
TS EN 196-2	: Çimento deney yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi
TT	: Atık Tuğla Tozu
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

İnsanların günümüzde yaşam alanlarını oluşturan binalar ağırlıklı olarak betonarme ve çelik yapılardan oluştuğu, bu yapılardan betonarmenin geniş bir yer kapladığı görülmektedir. Betonarme yapının tercih edilme sebebi ise diğer yapı malzemelerine göre yüksek mukavemete sahip olması, ekonomik olması, iş gücünü azaltan, kolay şekil verilebilen, yangın ve hava koşullarına daha dayanıklı bir malzeme olması gibi avantajlara sahip olmasıdır. Bu avantajlara sahip olmasına rağmen, geleneksel betonun düşük çekme dayanımı, düşük dayanıklılığı, yüksek karbon ayak izi gibi çeşitli dezavantajları da vardır. 2017 ile 2050 yılları arasında yaklaşık %50'lik talep artışının olacağı (Zhao vd., 2019), mevcut çevresel etkileri ve sürdürülebilirliği dikkate alındığında, bu durum hissedilir bir endişe yaratmaktadır. Bu öngörüler değerlendirildiğinde, çimentonun, küresel ısınma ve iklim değişikliği üzerindeki olumsuzlukları arttırdığı gözlemlenmektedir. Portland çimentosunun termal enerjisini elde etmek için fosil yakıtların kullanılması ve kalsinasyon sürecinde büyük miktarda CO₂'nin atmosfere salınması söz konusudur. 1 ton klinker üretimi sırasında fosil yakıtların yakılmasıyla 0,46 ton, kalsinasyon aşamasında ise 0,54 ton CO₂ salınımı gerçekleşmekte, toplamda 1 ton çimentonun üretimi için 1 ton CO₂ salımı gerçekleşmekte, mevcut üretim süreci ciddi bir çevre kirliliğine neden olmaktadır (John vd., 2021).

21. yüzyılda doğal kaynakların tüketiminin artması ve büyüme sorunları nedeniyle dünya çapında daha az doğal hammadde ve enerjiye ihtiyaç duyan, sürdürülebilir, yeşil inşaat malzemeleri arayışı ve bu malzemelerin üretimine yönelik araştırmalar artarak devam etmektedir. Bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde, endüstriyel atıkların daha yoğun olarak kullanılması, sürdürülebilirliğe önemli bir katkıda bulunacaktır (Priyanka vd., 2022).

Çimento üretiminin neden olduğu yüksek enerji ve kaynak tüketimi ve sera gazı emisyonu artışı sonucu çevreye verdiği zararlar, araştırmacıları, çimento yerine kullanılabilecek çevre dostu, alternatif, inovatif yapı malzemelerini araştırmaya yöneltmişlerdir (Zhang vd., 2018; Zhao vd., 2019). Bu çerçevede yürütülen çalışmalar

da, çimento yerine bağlayıcı olarak beton üretiminde, uçucu kül, YFC, silis dumanı vb. endüstriyel atıkların kullanımı yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır (Jaarsveld vd., 2003). Atık malzemelerin ürün içerisinde yoğun olarak kullanıldığı sürdürülebilir hafif yapı kompozitleri yapı sektörünün birçok uygulamasında kullanılmaktadır. Sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak geopolimer beton, hafif kompozit bir malzeme olarak da kullanılabilir (Bhogayata vd., 2020). Bu beton türü son yıllarda alkaliyle aktive edilmiş atık malzemelerin sağladığı çevresel faydalar nedeniyle araştırmalarda ön plana çıkmıştır. (John vd., 2021). Araştırmalar neticesinde günümüzde PÇ'ye en güzel alternatif beton ve araştırmacıların ilgisini en çok çeken, çevreye uyumlu ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer betondur.

Geopolimer beton ilk olarak 1970'li yıllarda Fransız araştırmacı Joseph Davidovits tarafından keşfedilmiş ve geliştirilmesi için çalışmalarda bulunmuştur. Davidovits, eski uygarlıkların yüzyıllar boyunca dayanabilen sağlam yapılar elde etmek amacıyla doğal malzemeler kullandığına dikkat çekmektedir (Davidovits, 1984; Davidovits, 2017; Davidovits, 2019).

Geopolimer beton PÇ'ye göre daha yüksek erken dayanım, daha iyi yangın dayanımı, kimyasal ve donma ve çözülme dayanımı gibi daha iyi özellik göstermektedir. Aynı basınç dayanımına sahip PÇ ile karşılaştırıldığında, daha yüksek bir aderansa sahiptir (Castel vd., 2015; Fu vd., 2011; Kürklü, 2016; Shaikh vd., 2018; Wu vd., 2020). Birçok araştırmacı, geopolimer bağlayıcıların sıradan Portland çimentosunun küresel CO₂ emisyonlarının %5-7'sine neden olduğunu belirterek, bu malzemelerin %80-90 oranında CO₂ emisyonunu azaltma potansiyeline sahip olduğunu ifade etmiştir (Malkawi vd., 2016).

Geopolimer beton uygulaması, yoğunluğunu ve yapının kendi ağırlığını azaltabilen hafif beton üretmek ilgi çekici hale gelmiştir. Hafif betonun, normal betona göre birçok avantajı vardır (Gao vd., 1997; Kayalı ve Haque, 2000; Swamy ve Lixian, 1995). Yapıların işlevi, ağırlık azaldığında genellikle iyileştiğinden, beton endüstrisi, yapı ağırlığını azaltan ve sonuç olarak yapı elemanlarının boyutunu küçülten hafif agrega betonunun artan kullanımıdır (Setvati vd., 2014). Aynı zamanda düşük ısı iletkenliği, iyi yangın direnci, ses yalıtımı, daha az öz ağırlık, yüksek mukavemet/ağırlık oranı,

daha küçük temel boyutları sağlaması (Duan vd., 2017) gibi diğer özelliklere de sahiptir ve sürdürülebilir yapı endüstrisi standartlarına katkıda bulunur.

Hafif beton üretmek için kullanılan metotlardan biride köpük beton/gaz betondur (Demirboğa vd., 2001; Narayanan ve Ramamurthy, 2000). Köpük beton 1920’li yıllarda üzerinde çalışmalar başlamış olup, agregalı ve agregasız olarak uygulamalar yapılmıştır. Köpük betonun amacı içerdiği yüksek gözenek yapısı sayesinde ısı ve ses yalıtımı sağlayarak, binalardaki enerji verimliliğini korumaktır (Dhasindrakrishna vd., 2021; Zhang vd., 2014). Ancak, geopolimer köpük beton gelişimi teknolojik olgunlukta değildir ve sınırlı araştırma yapılmıştır.

Bu çalışmanın hedefi doğaya en az zararı verecek yapı malzemeleri üretmeye odaklanmaktadır. Bu sebeple kullanılan yapı malzemelerinin daha sürdürülebilir, yaşam döngüsü içinde daha az enerji kullanımına teşvik eden ürünler olması gerekmektedir. Bu sebeple yapılan çalışmada çimento yerine bağlayıcı olarak YFC ve tuğla tozu, hafif agrega olarak da geliştirilmiş perlit ve pomza kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_4 kullanılarak YFC, TT, perlit, pomza içerisindeki silisli ve alüminli bileşiklerin çözünerek daha sonradan bunların kendi aralarında yeni reaksiyonlar oluşturarak geopolimerizasyon sürecini başlatması amaçlanmıştır. Üretilen harç numuneleri üzerinde kuru birim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yüksek sıcaklık dayanıklılığı ve yayılma testleri yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Geopolimerin Tanımı

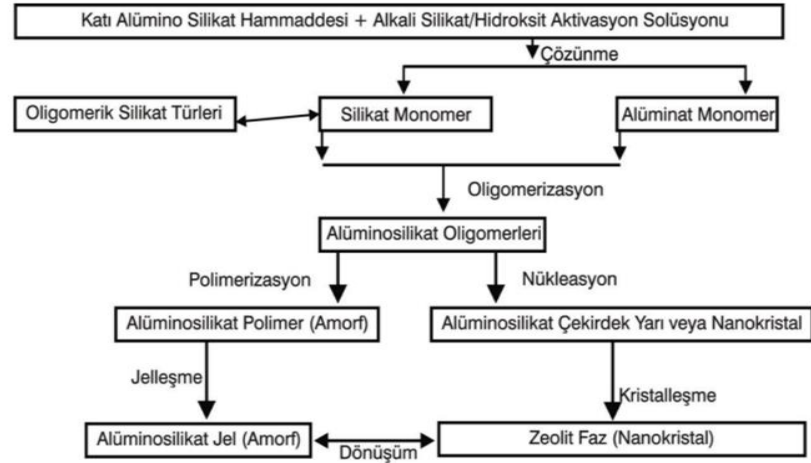
Geopolimer son zamanlarda akademik çalışma yapan araştırmacıların ilgisini çeken karmaşık bir malzeme olmuştur. İlgi çekmesinin sebepleri arasında çevreye yararlı olması, yüksek dayanımlı olması ve uzun ömürlü olması sayılabilmektedir. Hammadde seçimi ve işleme koşullarına bağlı olarak geopolimerler, yüksek basınç değerleri, asit direnci, hızlı veya yavaş sertleşme, yüksek sıcaklık direnci ve düşük ısıl iletkenlik gibi önemli özellikler sunar. Ayrıca yüksek sıcaklıklara dayanıklı, aderansı daha yüksek ve genellikle daha düşük malzeme maliyetine sahiptir, daha düşük kuruma büzülmesi ve daha yüksek sodyum sülfat direnci gösterir (Duxson vd., 2007; Feng vd., 2015; Kankia vd., 2021).

Geopolimerlerin inorganik yapısı, ısıya dayanıklı olması 700-800°C'ye kadar jel yapılarında yalnızca hafif bir bozulma meydana gelir. Bu durum, geopolimerlerin yüksek sıcaklıklara karşı değerlerini gösterir. Ayrıca geopolimer betonların oldukça iyi bir alkali-silika reaksiyonuna (ASR) ve asit direncine sahip olduğu da gözlemlenmiştir (Tayeh vd., 2018). İçerisinde alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) açısından yüksek olan bazı malzemelerin, çeşitli alkali çözeltilerle etkili hale getirilmesiyle üretilen, bir bağlayıcı türüdür (Olivia ve Nikraz, 2012; Zhang vd., 2018). Kullanılan toz malzemelerin (YFC, uçucu kül vb. alüminosilikat maddeler) yüksek konsantrasyonlu bir alkali hidroksit veya silikat çözeltisiyle tepkimeye girmesi sonucunda, geopolimer denilen sentetik alkali alüminosilikat malzeme üretilir (Duxson vd., 2007). Kimyasal yapı, alüminyum-silika miktarları, tane boyutları ve dağılımı gibi malzeme özellikleri, geopolimerlerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Zhang vd., 2018). Uçucu kül ve YFC hammadde temininde önemli miktarda bulunur ve yüksek alümina-silika içeriğine sahip olmaları nedeniyle en çok tercih edilen kaynak özellikleri haline gelmiştir (Olivia ve Nikraz, 2012). Geopolimer hazırlamak için genellikle sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) alkali çözeltileri kullanılır (Zhang vd., 2018).

2.2 Geopolimerin Tarihçesi

1940-1950’li yıllarda Glukhovsky, inorganik malzemelerle ilgili ilk araştırmalarını gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, yüksek kalsiyum içeren cürüfları alkali çözeltilerle karıştırarak elde ettiği dayanıklı betonları bina inşasında kullanmıştır. Glukhovsky, bu tür geopolimer kompozitlere genel olarak alkali ile aktifleştirilmiş çimentolar ismini vermiştir (Duxson vd., 2005). 1950’li yıllarda Portland çimentosunun çevreye zararlarının anlaşılmasıyla, Glukhovsky vd., alüminyum ve silisyum içeren malzemelerin alkali aktivatörlerle etkileşimleri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda, elde ettikleri malzemelerin yüksek mukavemete sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Duxon vd., 2008). Deneysel çalışmalar neticesinde, güncel, temel ve etkili yöntemler sayesinde bilimsel araştırmaların geleceğe yönelik yapılabilmesini sağlayacak önemli adımlar atılmıştır. 1970’li yıllarda J. Davidovits, alkali çözeltilerle etkinleştirilen alüminosilikat bağlayıcıları tanımlamak üzere geopolimer ifadesini kullanmıştır (Zhang vd., 2014). Geopolimer üretiminde, J. Davidovits’in kullandığı temel hammadde, alkali çözeltilerle aktive edilen metakaolinitir. Ancak, daha sonra Van Deventer ve ekibi tarafından yapılan çalışmalar, geopolimer üretiminde Si-Al oranı yüksek olan yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, kaolin, inşaat atıkları ve maden cevherleri gibi farklı malzemelerin de kullanılabileceğini göstermiştir (Wu ve Sun, 2007).

“Geopolimer” terimi, ilk kez 1979 yılında Fransız bilim insanı Davidovits tarafından ortaya atılmıştır (Davidovits, 1989). Davidovits, geopolimer bağlayıcıları sınıflandırarak tanımlamıştır. Bilimsel çalışmalarında, geopolimerlerin geçmiş dönemlerde Mısır’daki piramitlerin inşasında kullanıldığını yaptığı çalışmalar sonucunda ortaya koymuştur (Davidovits, 2015). Davidovits, üretilen betonun geopolimer beton olduğunu vurgulayarak, bu betonun günümüzde de kullanılabileceğine dair çalışmalarında bilgi sunmuştur. Ayrıca, geopolimer betonun mühendislik alanında da uygulama potansiyelini göstermiştir (Davidovits, 1989).



Şekil 2.2 Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları (Ryu vd., 2013)

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere geopolimerizasyon alüminosilikat içeren uçucu kül, YFC gibi hammaddelerin alkali bir çözelti içerisinde çözündürülmesi sonucu alüminat ve silikat monomerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu monomerler bir sonraki aşamada oligomerlere ve geopolimerlere dönüşmektedir (Singh ve Middendorf, 2020). Geopolimerizasyon işlemi çözünme, yeniden düzenlenme ya da organize olma, yoğunlaşma ve polimerizasyon süreçlerini içermektedir. Çözünme ve yeniden örgütlenme birçok oligomer formu oluşturmaktadır. Oligomerler bağlanarak büyük polimer zincirlerini oluştururlar. Oligomerler bağlandığında OH grupları ile bir O atomunu paylaşarak suyu serbest bırakmaktadırlar.

Geopolimerleşme aşamaları özellikle silisyum, alüminyum, magnezyum, kalsiyum, fosfat, potasyum, sodyum gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondenzasyonu sonucu meydana gelen kovalent kompleks zincir bağlı polimerler kurmasıyla oluşmaktadır.

Geopolimerizasyon aşamaları uçucu kül, YFC, silis dumanı gibi endüstriyel atık, volkanik tüf, ufalanmış doğal başkalaşım kayalar ya da 750°C’de fırınlanmış kaolinit kili (metakaolinit) gibi dehidrasyona uğramış alümino–silikat yapıdaki toprak katılarıyla alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkimeye girmesiyle başlamaktadır (Davidovits, 2008). Geopolimerizasyon yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondenzasyon (çoklu yoğunlaşma) hareketlerini kapsayan bir dışarıya ısı veren kimyasal süreçtir (Davidovits, 1999). Geopolimer sentezi için temel olarak iki bileşen grubu bulunmaktadır. Bunlardan birincisi alkali aktivatörler, ikincisi

ise alüminosilikat kaynaklarıdır. Bu iki bileşen grubuna örnek vermek gerekirse alüminosilikat kaynakları; uçucu kül, YFC, metakaolin, kırmızı çamur, silis dumanı, palm yağı külü, pirinç çeltiği külü olarak sıralanmaktadır. Alkali aktivatörler ise; sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat (K_2SiO_3), kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), diğer silikatlar olarak sıralanmaktadır (Amran vd., 2020; Singh ve Middendorf, 2020).

2.4 Geopolimerin Avantaj ve Dezavantajları

Geopolimerler, geleneksel beton içeriğinde kullanılan PÇ'ye duyulan gereksinimi ortadan kaldıran, PÇ'ye oranla daha az enerjiye ihtiyaç duyan ve karbondioksit emisyonunu azaltan, çevreye duyarlı, sürdürülebilir bir malzeme olarak değerlendirilmektedir (Amran vd., 2021; Zhang vd, 2014). GP'lerin çimentolu kompozitlere göre olumlu özellikleri aşağıda özet olarak tanımlanmıştır (Liv vd., 2004; Thamilselvi vd., 2017).

- Yüksek mekanik dayanım
- Hızlı priz
- Yangın direnci
- Asitlere karşı direnç
- Alkali-silika reaksiyonlarına direnç
- Düşük büzülme ve termal iletkenlik
- Aşınma direnci
- Daha az hammadde kullanımı
- Düşük enerji sarfıyatı
- CO_2 emisyonlarında azalma
- Yüksek oranda geri dönüştürülmüş malzeme içeriği

GP'lerin hızlı ve yüksek erken dayanım kazanımı, yüksek durabilite, hızlı sertleşme oranı, korozyon direnci ve termal kararlılık gibi özellikler GP betonun tercih edilme nedenleri arasında gösterilebilir. GP betonun tanımlanan olumlu performans göstergeleri nedeniyle, kullanımı giderek yaygınlık göstermekte, yakın gelecekte yeni bir çimentosuz malzeme olması beklenmektedir. Olumlu özellikleri yanında GP'ler

öz lemeyen bazı problemler oluşturmaktadır. GP'lerin hızlı priz alması uygulamada önemli bir problem oluşturmakta, alkaliler maliyetin artışına neden olmakta, gevrek kırılma davranışı göstermekte, hızlı reaksiyona girmesi ve kontrol edilemeyen priz işlenebilirliğini azalttığından GP'lerle ilgili çalışmaları zorlaştırmakta, ayrıca belirli bir standartı bulunmamaktadır (Yazıcı vd., 2022; Zerfu ve Ekaputri, 2016)

2.5 Geopolimer Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler

Geopolimer betonların ana bileşenlerini oluşturan alüminosilikat içeren malzemeler ve alkali aktivat rlerdir. Bağlayıcı olarak kullanılan toz malzemeler, alümina silikat ve Al ve Si elementlerince zengin içeriğe sahiptirler. Bağlayıcı olarak uçucu kül, metakaolin, silis dumanı, YFC, kırmızı çamur, seramik, beton, cam ve tuğla atığı gibi endüstriyel atıklar, farklı kabukların külleri, pirinç kabuğu külü gibi tarımsal atıklar GP beton tasarımlarında yoğun olarak kullanılmaktadır (Aleem ve Arumairaj, 2012). Potasyum hidroksit, potasyum silikat, kalsiyum hidroksit, sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatör olarak olarak kullanılır. Alkali aktivatörler, geopolimerizasyon sürecinde polimerik yapının oluşabilmesi için, alkali ortam oluşturarak, reaksiyon sürecini hızlandır, tasarımına bağlı olarak, çeşitli kombinasyon ve molaritelerde kullanılır (Grela vd., 2016).

2.5.1 Agregalar

Agreganın genel tanımını harç vb. karışımların yapımında imento ve su ile birlikte kullanılan kum, kırma taş, çakıl gibi farklı yapılara sahip inorganik malzemelere verilen isim olarak geçmektedir. Agregalar karışıma taşıyıcı özellik kazandıran en temel malzemedir. Karışımda kullanılacak olan agregaların TS 760 EN 12620'ye uygun olması gerekmektedir. Agregalar boyutları bakımından iri, ince ve tüvenan agregalar olarak  e ayrılmaktadır. İnce ve iri agregalar önemli beton bileşenleri olup geleneksel beton hacminin %60-75'ini oluşturur (Erdoğan, 2016), GP'lerde ince agreganın %35-45 oranında karışımda kullanılması önerilir (Amran vd., 2020).

Hafif agregalar birim ağırlığı gözenekli yapısı sayesinde düşük olan agregalar sınıfıdır. İçerisinde barınan boşluk yapısı sayesinde normal bir agregalar sınıfına göre %5 ile %25 oranında değişen daha fazla su emme kapasitesine sahiptir. Hafif agregalar doğal

(Pomza-ponza, volkanik tüf, lav, diatome toprağı vb.) ve yapay (Genleştirilmiş şist, kil, arduaz, termik santral külleri genişletilmiş letye, genleştirilmiş perlit vb.) olarak ikiye ayrılır (Erdoğan ve Erdoğan, 2020).

2.5.1.1 Genleştirilmiş perlit (GP)

Perlit, doğal bir şekilde oluşan kökeninde silis bulunan asidik özellik içeren volkanik bir kayaç türü olarak tanımlanmaktadır. Perlitin en önemli özelliklerinden birisi belirli sıcaklıklara maruz bırakıldığında genleşerek gözenekli ve hafif bir yapıya sahip olmasıdır. Hafif bir malzeme olduğu için ve ısı yalıtımında iyi bir özellik gösterdiği için inşaat piyasasında kullanımı olan bir malzemedir. Bu saydığımız özellikler malzemeye endüstri alanında değer kazandırmaktadır (şapcı ve Ceylan, 2021). Perlitin yüksek sıcaklıklarda (900-1100 C) aleve maruz bırakılması sonucu yapısındaki suyunu kaybetmesiyle patlaması sonucunda tane hacminin büyümesi haline ‘‘genleştirilmiş perlit’’ denilmektedir. GP kullanım alanlarına ve isteklere göre çeşitli tane boyutlarında  retilabilmektedir. İstenilen tane boyutlarındaki eleklerden geçirilerek boyutlandırılmaktadır (Gökçe vd., 2018).

Tablo 2.1 Genleştirilmiş perlitin inşaat sektöründeki kullanım alanları

Kullanım Alanları	Kullanım Yerleri
Yalıtım malzemelerinde	çatı ve zemin işlerinde
Perlitli sıvalarda	Yapı işlerinde
Perlitli hafif betonda	Bağlayıcı olarak
Perlitli hafif yapı malzemelerinde	çatı kiremitleri, boru izolasyonu vs
Seyrek dolgu �r�nlerinde	Zemin, duvar boşlukları ve tavan aralarında köpük yalıtım malzemesi
Yüzey döşemelerinde	Isı ve ses yalıtım malzemesi
Özel amaçlı olarak	�imento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan perlit betonlarında

Tablo 2.2 Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel	Özellik ve Miktar	Kimyasal Bileşim	%
Dış görünümü	beyaz kuru toz	SiO ₂	60-80
Tane boyutu	0-1,20 mm	Al ₂ O ₃	12-16
Kütle Yoğunluğu	40-60 kg/m ³	Na ₂ O	3-10
		K ₂ O	2-5
		CaO	0-2
		MgO	0-1
		Fe ₂ O ₃	0-1
		S ve SO ₃	yok
		Serbest Nem	max 1

2.5.1.2 Pomza

Pomza; volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, fiziksel, kimyasal ve atmosferik şartlara karşı dirençli camsı volkanik bir kayaç türüdür. Gözenekli bir yapısının olması, hafifliği, yüksek puzolanik aktivitesi, ısı yalıtımındaki olumlu etkileri sebebiyle kullanımda olan en eski yapı malzemeleri arasında yer almaktadır (MTA.GM., 2023). Endüstriyel ham maddeleri arasında farklı avantajlara sahip olan pomzanın kullanım alanları giderek artmaktadır. Son zamanlarda yapılan faaliyetler ve araştırmalarda hafif yapı malzemelerine verilen önem sebebiyle pomzanın birim hacim ağırlığının düşük olması, yüksek ses ve ısı yalıtımına sahip olması, çevre dostu olması gibi nedenlerden ötürü kullanımı yaygınlaşmaktadır.

2.5.2 Bağlayıcılar

Bağlayıcının genel tanımı ince tanecikler halinde bulunan toz haldeki malzemenin su ile karıştırılıp hamur haline gelmesi ve zamanla sertleşip, plastikliğini kaybederek bağlayıcı özellik kazanması olarak geçmektedir. Bağlayıcılar toz ve sıvı bağlayıcılar olarak ikiye ayrılabilir. Toz bağlayıcılara örnek olarak kireç, alçı, çimento; sıvı bağlayıcılara örnek olarak genellikle yol yapımında kullanılan hidrokarbonlu bağlayıcılar olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.5.2.1 Yüksek fırın cürufu (YFC)

YFC, metaller eritildikten sonra ortaya çıkan, metalden daha hafif oksitler ve silikatlar karışımı olan ve yoğunluk farkı nedeniyle yüzeyde biriken ürün olarak tanımlanmaktadır (Uysal ve Bahar, 2018; Ünal vd., 2014). Demirin işlenmesi sonucunda yan ürün olarak ortaya çıkan, ana bileşeni alüminyum silikatlar ve kalsiyum olan, ani soğutulma sonunda puzolanik aktivite kazanan bağlayıcı bir malzemedir.

YFC genellikle çimento üretiminde, alternatif bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. YFC'nin ayrıca betonda agrega olarak kullanımı sürdürülebilirlik bakımından önemli kabul edilmektedir. Bu sayede atıkların geri dönüştürülmesi mümkün kılınır ve hammadde rezervi korunmakta ve enerji verimliliği sağlanabilmektedir (Václavík vd., 2012).

2.5.2.2 Tuğla tozu (TT)

Tuğla atıklarının öğütülmesi sonucu ortaya çıkan tuğla atığının puzolanik aktivitesi yıllar öncesinden itibaren bilinmektedir. Duvar malzemesi olarak tuğla kullanılması, duvar için kullanılan diğer malzemelere oranla daha fazladır. Bu sebeple üretimde fazla olmaktadır. Tuğlanın hammaddesinin kolay üretilebilir ve ekonomik olması sebebiyle fabrikaların çoğu tuğla atıklarını geri dönüşüm için değerlendirmemektedir. Tuğla atığı/tozu karışımının basınç dayanımını, kompasitesini (doluluk oranı), donma-çözülme ve durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir.

2.5.3 Aktivatör

Geopolimerlerde geopolimerizasyon evresinde aktivatörler (sıvı ve/veya katı fazlar), alkali oranının yüksekliği, Al-Si çözelti modülü (aktivatör çözeltisinin silika ve alkali oranı) ve reaksiyon oluşumundaki gerekli sıcaklık her malzeme grubunda farklı etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir (Yoa, 2009). Aktivatörün içerdiği alkali konsantrasyonu reaksiyonun hızını belirleyen ve ürünün özelliğini belirleyen önemli bir faktördür bu yüzden optimum oranların belirlenmesi önemlidir (De Vargas vd. 2011; Hounsi vd., 2014; Temuujin vd., 2009). Geopolimerizasyon prosesindeki çözünme aşaması için uygun alkali konsantrasyonu gerekmektedir. Genellikle kullanılan aktivatör türleri

sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit, potasyum silikat ve kalsiyum hidroksittir fakat sodyum sülfat (Na_2SO_4), sodyum karbonat (Na_2CO_3), potasyum karbonat (K_2CO_3) ve potasyum sülfat (K_2SO_4) gibi ürünlerde aktivatör olarak kullanılan malzemelerdir (Komnitsas vd. 2007).

Sodyum hidroksit (NaOH) yaygın olarak kullanılan kimyasalların başında yer almaktadır. Kostik ismi ile bilinen NaOH , ucuz olması, kolay ulaşılabilirliği ve arzu edilen miktarda kolayca bulunabilmesi sodyum hidroksit avantajlarındandır. Renk olarak beyaz renkte, katı ve akkor derecede uçucudur, su içinde ısı yayılımı sayesinde çözünme gerçekleşir ve eğer nem kaparsa hidroksit bozulur. Özellik olarak potasyum hidroksite benzer fakat potasyum hidroksitten kısmen daha az yakıcı özelliği olan güçlü bir bazdır (Elibol, 2012). Kullanılan sektörlerde küçük taneli, katı, sıvı ya da farklı boyutlarda kullanılabilir. Sodyum silikat, Na_2SiO_4 olarak gösterilmektedir. Genel formülü " $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ " olarak literatürde geçmektedir. "n" bir sayıdır ve bu sayının değerine göre özellikler farklılık göstermektedir. Na_2SiO_3 , mineraller grupları içinde en geniş silikatlar grubu arasında yer almaktadır. Silikatlar var olan mineraller bakımından %30'luk bir kısmı içermekte olup, yeryüzündeki toplam mineral hacminin %90'ını oluştururlar. Normalde yeryüzünde en çok silikat mineralleri bulunmaktadır. Bu sebeple yeryüzünde en çok bulunan 2 element O ve Si elementleridir. Bu elementlerle beraber silisyum-oksijen bileşikleri yeryüzünün yaklaşık olarak %95'ini oluştururlar. Yeryüzünde yaklaşık olarak 600 civarında silikat minerali bilinmektedir. Bunların arasında yalnızca amfiboller, feldispatlar, mikalar, piroksenler, fedispatoitler, olivinler ve zeolitler kayaçların oluşmasına büyük rol oynarlar. Doğada var olan silikat mineralinin temel yapısı, merkezde bir silisyum (Si) atomu ve köşelerde ise silisyum (Si) atomuna bağlanmış dört adet oksijen atomu bulunan elementtir (Kantarcı, 2013). Metal sanayisi, kağıt üretimi, tekstil işlemleri, temizlik ürünleri ve inşaat alanında priz hızlandırıcı olarak kullanılmaktadır (Kurtuluş, 2019).

2.5.4 Köpük

Köpük beton, hafif beton ailesinin bir üyesi olup, genel olarak, ince agrega eklenmiş veya eklenmemiş, yüksek derecede boşluk alanına (%75'e varan) sahip çimentolu bir

bağlayıcıdan oluşan bir hafif beton türü olarak tanımlanır. Beton matrisine hava boşluklarının verilmesinde genellikle mekanik ve kimyasal köpürtme yöntemleri kullanılmaktadır. Mekanik köpürtme yönteminde yüzey aktif maddeler genellikle karıştırma işlemi sırasında eklenirken, kimyasal köpürtme yönteminde kimyasallar eklenir. Gaz boşlukları, bağlayıcı iskelet içinde hapsedilir ve betonun priz alma aşamalarında matrisin yoğunluğunu düşürür (Singh, 2018-b). Köpük beton kolayca pompa yardımıyla taşınabilir, kendiliğinden yerleşme özelliği sayesinde vibrasyon işlemi gerektirmeyerek işçilik ve harcanan enerji bakımından üretimde avantaj sağlar. Basınç dayanımları 1-15 MPa arasında değişiklik gösterir. Kuru yoğunluğu ise 400-1600 kg/m³'tür. Köpük betonun içerisindeki boşluk yapı sayesinde ses ve ısı yalıtımı sağlarken, yangın direnci yüksek kapasitededir. Çatı yalıtımı, zemin işlemleri, dolgu malzemeleri, yangın yalıtımı gibi birçok yerde kullanım alanı mevcuttur (Kaya, 2018).

Yeni bir alternatif olan geopolimer köpük beton, geopolimer teknolojisine dayalıdır ve inşaat sektöründe çevre kirliliğini ve işletme enerjisini azaltır. Geopolimer köpük beton, gözenekli bir yapıya sahiptir ve bir geopolimere köpürtücü ajanların eklenmesiyle oluşturulur. Reaksiyondaki bu maddeler, jelin sertleşmesinden önce gözenekler oluşturan gazları serbest bırakır. Gözenekler jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve hava boşluklarından oluşur (Zhang vd., 2014). Gözenek boyutları nanometre ölçeğinden milimetre ölçeğine kadar uzanır ve bu aralığın daha büyük kısmı esas olarak hava boşluklarına atfedilir. Sertleştirilmiş yapılar, akustik paneller ve ısı yalıtımı amaçlı kullanılabilir. Ancak, geopolimer köpük beton gelişimi teknolojik olgunlukta değildir ve sınırlı araştırma yapılmıştır.

Köpük beton genel olarak, ince agrega eklenmiş veya eklenmemiş, yüksek derecede boşluk alanına sahip çimentolu bir bağlayıcıdan oluşan bir hafif beton türü olarak tanımlanır. Beton matrisine hava boşluklarının verilmesinde genellikle mekanik ve kimyasal köpürtme yöntemleri kullanılmaktadır. Mekanik köpürtme yönteminde yüzey aktif maddeler genellikle karıştırma işlemi sırasında eklenirken, kimyasal köpürtme yönteminde kimyasallar eklenir. Gaz boşlukları, bağlayıcı iskelet içinde hapsedilir ve betonun priz alma aşamalarında matrisin yoğunluğunu düşürür. Geopolimer köpük betonda mekanik köpürtme yöntemiyle ince boşlukların düzgün dağılımı üretilir. Ancak yoğunluk belli bir değerin altına düşürülemez. Köpük ajanı

denilen malzeme, karışıma ilave edilerek yararlı özellikler sağlayan köpüğün oluşum sürecini su ile karıştırılarak başlatan bir kimyasaldır. Köpük ajanı köpüğün her bir zerreciğine dayanım kazandırmaktadır ve bu nedenle kısa süre içinde kaybolmamasını sağlamaktadır. Köpük ajanı kullanılarak oluşturulan köpüğün karışımlara katılması sonucu oluşturulan beton veya harçlarda boşluk oranı ve malzemenin boşluk oluşumuna bağlı değerleri genellikle köpüğün stabilizesine, boşluk oranına, su/çimento oranına bağlıdır. Köpük etkisiyle oluşan boşluğun parametreleri, yapısı ve bileşimi oluşan malzemenin özelliklerini ve kullanımı doğrudan etkilemektedir (Atabey, 2018). Kimyasal köpürtme yönteminde yoğunluk azaltılabilir ancak büyük boşluklar oluşur (Hajimohammadi vd., 2017).

Köpük oluşturu maddeler (köpük ajanları), çimento bulamacında keşfedilen hava kabarcıkları ile yoğunluğu kontrol eden sentetik veya protein bazlı (en yaygın kullanılan), deterjanlar vb.'dir (Bing vd., 2011). Eklenen köpük oluşturu maddenin miktarı betonun özellikleri üzerinde bir miktar etkiye sahiptir ve ayrıca akış, karıştırma için gereken zamandan etkilenir. Köpük hacmi ve akış davranışı birbirleriyle ters orantılıdır, yani köpük hacmi azaldıkça akış artar ve belirtilen bir yoğunluk değeri için uçucu kül içeren köpüklü beton yüksek akış değerleri göstermiştir (Narayanan ve Ramamurthy, 2006) ve bu betonun tokluğu, protein bazlı köpük veya sentetik bazlı köpük vb. eklediğimiz köpüğün kategorisine büyük ölçüde bağlıdır (Jones ve McCarthy, 2005).

2.6 Literatüre Ait Bazı Çalışmalar

Karakas vd. (2023), yaptıkları çalışmada hafif geopolimer harç üretimi yaparken ham ve geliştirilmiş perlit agregası kullanmışlardır. GP agregasını, ham perlit agregası ve ırnak kumuyla yer değiştirilerek hafif harç elde edilmiştir. Üretilen harçların fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri ve iç yapı özellikleri incelenmiştir. Geopolimer hafif harçların ısı geçirgenlik özellikleri ham ve geliştirilmiş agregalarda, özellikle geliştirilmiş agregalarda iyileştirme yapmıştır. Gözenekli yapıda olan doğal malzeme olan perlit agregasının geopolimer yapılarda çevreye faydalı ısı yalıtımı sağlayan malzemelerin üretiminde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Örücü vd. (2022), yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak uçucu kül kullanmışlardır. Agregası olarak hafif agregalardan geliştirilmiş kil ve geliştirilmiş perlit kullanmışlardır. Alkaliler kullanarak geopolimer hafif harç üretmişlerdir. Karışım tasarımı yaparken Taguchi metodu kullanmışlardır. GP agregası kullanarak birim ağırlığı $0,83 \text{ g/cm}^3$ seviyelerinde hafif harç üretilmiştir. Isı yalıtım özellikleri iyileştirilmiş ve $4,6 \text{ MPa}$ seviyesinde basınç dayanımına sahip geopolimer hafif harçlarıyla sürdürülebilir malzeme üretimini göstermişlerdir.

Allahverdi vd. (2011), pomza içeren doğal puzolan içerikli geopolimer harçlara YFC eklenmesinin etkisini araştırmıştır. %5 YFC eklemesi yapılan örneklerin çiçeklenmeye karşı dirençli olduğu ve en yüksek basınç dayanımı değerini aldığı yapılan çalışmada ortaya çıkmıştır. 28 günlük basınç dayanımı değeri yaklaşık 40 MPa düzeyinde ölçülmüştür.

Ekmen vd. (2021), pomza agregalarıyla üretilen uçucu kül bazlı geopolimer harçların mekanik özelliklerini incelemiş ve karışımlarda farklı miktarlarda Na(OH) ve Na_2SiO_3 solüsyonları kullanmıştır. Bu harçlarda, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Na(OH)}$ ve NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltilerinin uçucu kül kütle oranlarının akmaya karşı direnç davranışını etkilediğini ve mekanik özelliklerin oksit bileşimleriyle güçlü bir ortaklığa sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Wongsa vd. (2018), pomza ve kil tuğla agregalarıyla üretilen hafif yüksek kalsiyumlu uçucu küllü geopolimer betonların işlenebilirliği, yoğunluğu, ultrasonik darbe hızı, f_c , yarmada çekme dayanımı, yüzey aşınma direnci, termal iletkenlik ve yangın direncini incelemiştir. Pomza ve kil tuğla agregaları ile üretilen hafif, yüksek kalsiyumlu uçucu küllü geopolimer betonlarının, doğal agregası içeren geopolimer betonlara göre daha düşük yoğunluk, Ultrasonik darbe hızı, f_c , yarma çekme dayanımı, yüzey aşınma direnci ve ısı iletkenlik gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bununla beraber, pomza ve kil tuğla agregalarıyla üretilen hafif, yüksek kalsiyumlu uçucu küllü geopolimer betonlarının, doğal agregası içeren geopolimer betonlara kıyasla daha iyi yangın direnci ve ısı yalıtım özellikleri gösterdiğini belirtmişlerdir.

Xu vd. (2014), yapmış oldukları araştırmada uçucu kül içerikli geopolimerin mekanik davranışlarını iyi duruma getirebilme amacıyla karışıma YFC ilave edip o şekilde bir inceleme yapmışlardır. Karışıma yalnızca YFC eklenmesiyle geopolimer katılaşma süresinin veya geopolimer mekanik özelliklerinin iyileşmesi her koşulda gerçekleşmeyebilir sonucuna ulaşmışlardır. Karışıma eklenen YFC'nin yapacağı olumlu etkiler amorf silika kaynağının var olup olmadığı ile yakından ilgili olmaktadır diyerek öneride bulunmuşlardır.

Chindaprasirt vd. (2004), yapmış oldukları çalışmada YFC inceliğinin ve YFC kimyasal bileşiminin geopolimer harçlarda reaksiyon süresini hızlandırdığını ve hızlı dayanım kazanmasına olumlu etkisi olduğunu tespit etmişlerdir.

Mehta ve Siddique (2018), yapmış oldukları çalışmada YFC ve pirinç kabuğu külünü toz bağlayıcı olarak kullanmışlardır. YFC içeriği temel alınarak hazırlanan geopolimer beton karışımına pirinç kabuğu külünü %5; %10; %15; %20; %25 ve %30 oranlarında YFC yerine ekleyerek karışımlar hazırlamışlardır. 3; 7; 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinde en yüksek dayanım YFC yerine %15 pirinç kabuğu külü içeriğine sahip numuneden elde edilmiştir. 3 günlük basınç dayanımı yaklaşık 60 MPa olarak elde edilirken 90 günlük kür süresi sonunda aynı karışım örneğinden elde edilen basınç dayanımı yaklaşık 70 MPa olarak ölçülmüştür. Pirinç kabuğu külü ikamesiyle geopolimer betonun daha yoğun olduğu belirtilmiştir.

Toprak vd. (2022), yaptıkları araştırmada geopolimer harçlarda alümina silikat esaslı malzeme olarak tuğla atığı ve mermer tozunu farklı oranlarda kullanmışlardır. Numunelerin hazırlanması sürecinde NaOH miktarı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı aynı miktarda kullanılmıştır. Geopolimer harçlar 24 saat 60°C ve 80°C sıcaklıkta kürlenmesinin ardından 7 ve 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Hazırlanan numunelere işlenebilirlik, ultra ses geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı testleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda geopolimer harçlarda tuğla atığı ekleme miktarının artması sonucunda; işlenebilirlik özelliği azalmış ancak basınç dayanımı ve ultra ses geçiş hızları artmıştır. Tuğla atığı ve mermer tozuyla üretilen geopolimer harçlarda mermer tozunun mekanik özellikleri olumsuz etkilerinden dolayı %25 oranının üzerinde karışımlara katılmaması önerilmiştir.

Reig vd. (2013), yaptıkları çalışmalarda kırmızı killi tuğla kullanarak alkaliyle aktive edilmiş harçlar üretmişlerdir. Değişik miktarlarda; NaOH molaritesi, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ve su/bağlayıcı oranı kullanarak 14 farklı karışım elde etmişlerdir. Elde edilen numunelere 3 ve 7 gün boyunca %90-%95 nem aralığında 65°C 'de kürleme işlemi yapılmıştır. Karışımlarda NaOH molarite etkisini araştırmak için su/bağlayıcı oranı ve $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ sabit tutulmuş, kür süreleri ve NaOH molaritesi için farklı değerler kullanılmıştır. Deneyler sonucunda maximum basınç dayanımı değerini NaOH molaritesinin 5 ve kür süresinin 7 gün olduğu tespit edilmiştir.

Allahverdi vd. (2009), yaptıkları çalışmada inşaatlarda kullanılan malzemelerin atıklarını NaOH ve Na_2SiO_3 ile reaksiyona sokarak geopolimer harçlar üretmişlerdir. İnşaat atığı molar olarak tuğla ve beton kullanmışlardır. Numuneleri normal şartlar altında ve %95 yüksek nemde kürlemişlerdir. 28 günlük basınç dayanımları sonuçlarına bakıldığı zaman; %8 Na_2O içeriğine sahip %100 atık tuğla ile üretilmiş geopolimer harcın basınç dayanımının 40MPa olduğu tespit edilmiş ayrıca atık beton tozunun katılma miktarının artmasıyla basınç dayanım değerlerinde azalma olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Yakupoğlu (2010), yaptığı çalışmada Na(OH), Na_2CO_3 , sodyum silikat ve sodyum metasilikat aktivatörleri kullanarak YFC'li harçlar elde etmiştir. Elde edilen harçları 28 gün boyunca su kürü uygulamıştır. Harçların işlenebilirlik, birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yangın dayanımı ve aşınma dayanımı gibi özelliklerini incelemiştir. Sodyum karbonatın işlenebilirliği olumsuz etkilediğini, sodyum silikat ve sodyum metasilikatın işlenebilirliği olumlu etkilediğini tespit etmiştir. Yangına karşı dayanım için en iyi sonucu, Na(OH) ile aktifleştirilen cürufllu harçlarda, aşınmaya karşı dayanım için en iyi sonucu Na_2SiO_3 ve sodyum metasilikat ile aktifleştirilen cürufllu harçlarda tespit etmiştir.

Elibol (2012), yaptığı çalışmada su/bağlayıcı oranını sabit tutarak alkalilerle aktive edilmiş YFC'li karışımların basınç dayanımlarını incelemiştir. Karışımlarda, alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3 , NaOH ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) kullanmıştır. NaOH ile aktifleştirilen %100 YFC'li harç numunelerinin eğilme dayanımı ve basınç dayanım değerlerinin bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılan kontrol

numunelerinin dayanım değerlerine yakın olduğunu tespit etmiştir. 4 farklı grupta %2,5; %5; %7,5 ve %10 Na/YFC oranlarıyla üretilen numunelerde ise max basınç dayanımını ve eğilme dayanımı değerlerinin %5 Na/YFC oranından elde edildiğini açıklamıştır. YFC'li harçların dayanımı değerlerinin düşük olmasından dolayı, bu değerleri yükseltmek için 3 ve 7 gün sıcak kür uygulamasına tabi tutmuştur. 40°C, 60°C ve 80°C'ye sahip sıcak kür havuzlarında bekletilen numunelerin basınç dayanımı değerlerini, 20°C sıcaklıktaki kür havuzundaki numunelerin basınç dayanımı değerleriyle karşılaştırıldığında, kür ve sıcaklık süresinin artmasıyla numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığını saptamıştır.

Canbaz (2007), yaptığı çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH, Na₂CO₃ ve Na₂SiO₃ ile %0; %25; %50; %75; %85; %90; %95 % 100 oranlarında YFC'yi çimento yerine kullanarak harç numuneleri elde etmiştir. 28; 56 ve 90 gün boyunca sabit kür uygulanan numunelerin mekanik özelliklerini ve olumsuz etkilere karşı dirençlerini belirlemeye çalışmıştır. Deneysel sonuçlara göre en etkili aktivatör uyumlarının NaOH+Na₂CO₃ ve NaOH+Na₂SiO₃ olduğunu belirtmiştir. Üstelik istenilen mekanik özellikleri ve olumsuz etkilere karşı direnci arttırmak için çimento yerine %75 ile %100 aralığında yüksek fırın cürufunun çimento yerine kullanılabileceği önerisinde bulunmuştur.

Zhang vd. (2010), önceden oluşturulmuş bir köpük mekanik karıştırma yoluyla ana alüminosilikat öncüsü olarak uçucu kül kullanan bir dizi geopolimer köpük beton üretti. Uçucu kül bazlı betonlar, alkali aktivatörün türüne ve dozajına bağlı olarak 850 ile 950 kg/m³ kuru yoğunluğa ve 4-9 MPa basınç dayanımına sahip olduğunu göstermişlerdir (Zhang vd., 2010).

Al Bakri Abdullah vd. (2012), önceden oluşturulmuş köpüğü geopolimer macununa 2:1 hacim oranında karıştırarak uçucu küllü geopolimer köpük beton üretmişlerdir. Elde edilen betonlar, oda sıcaklığında kürleme koşulları altında 1660 kg/m³ yoğunlukta 18 MPa'ya ulaştığını rapor etmişlerdir (Al Bakri Abdullah vd., 2012).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu bölümde, bağlayıcı olarak öğütülmüş YFC ve TT, agrega olarak genişletilmiş perlit (GP) ve pomza, aktivatör olarak da sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_4) ve köpük kullanılmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden bahsedilmiştir. Şekil 3.1’de kullanılan malzemelerin görselleri yer almaktadır.



Şekil 3.1 Kullanılan malzemeler

3.1.1 Agregalar

Agregalar boyutlarına göre ince agrega (kum), iri agrega (çakıl) ve tüvenan agrega (karışık) olarak gruplandırılmıştır. Agregalar sert ve dayanıklı malzemeler olduğu için karışımın dayanımının yüksek olmasına katkıda bulunurlar. Çimentolu bileşiklerde büzülmeden dolayı oluşabilecek hacim değişikliğini engellemek yani oluşabilecek çatlakları engellemek amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada pomza ve GP olmak üzere iki tip agregaya yer verilmiştir. Pomza, Nevşehir’den temin edilmiş olup, malzeme önce bilyalı öğütme makinesinde istenilen boyutta öğütüldükten sonra eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. 1,18 mm’lik pomza ince agregasından oluşmaktadır. Tablo 3.1 ve 3.2’de pomzanın özellikleri yer almaktadır.

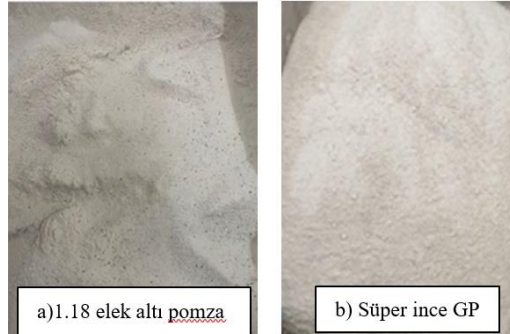
Tablo 3.1 Pomzanın fiziksel özellikleri

Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	2,08
Su Emme Kapasitesi	14,03

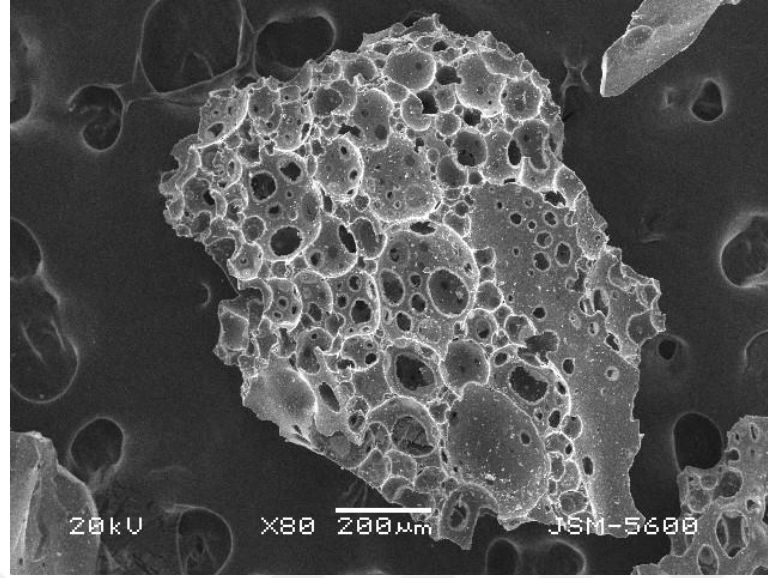
Tablo 3.2 Pomza elek analizi

Pomza	
#8 (2,36)	1,18
#16 (1,18)	129,02
#30 (600μ)	159,54
#50 (300μ)	206,64
#100 (150μ)	129,17
#200 (75μ)	46
Pan	69,91
Toplam	741,46
750 g	

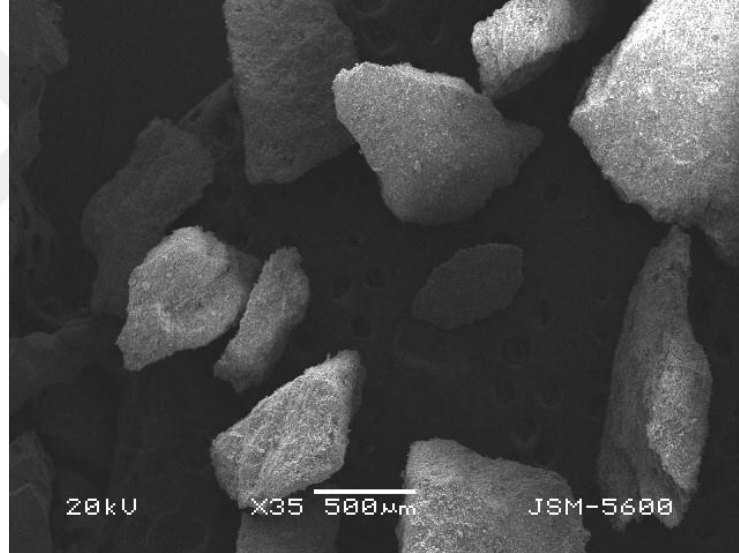
GP, Çankırı Akper Perlit Madencilik İnş. San. Ltd. Şti. den temin edilmiştir. Şekil 3.2’de kullanılan agregaların görselleri yer almaktadır.



Şekil 3.2 Geopolimer harç yapımında kullanılan agregalar a) Pomza b) GP



Şekil 3.3 Pomza agregasının SEM görüntüsü



Şekil 3.4 Atık tuğlanın SEM görüntüsü

3.1.2 Bağlayıcılar

Bağlayıcı maddelerin kireç, toprak gibi malzemelere göre dayanımı yüksek ve yapışma özelliği olan malzemelerdir. İnce toz halinde olan ve su eklenmesiyle hamur haline gelen, plastikliğini zamanla kaybedip sertleşen, yapışma özelliği olan maddeler bağlayıcı olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada YFC, TT olmak üzere iki tip bağlayıcı kullanılmıştır (Şekil 3.3). YFC, Zonguldak Ereğli Demir Çelik (Erdemir-Oyak Çimento) Fabrikasından temin edilmiştir. YFC'nin kimyasal kompozisyonu Tablo 3.3'de yer verilmiştir. TT, yerel bir firmadan temin edilmiştir. TT'nin fiziksel

ve kimyasal kompozisyonu Tablo 3.4’de gösterilmektedir. Tablo 3.5’te TT’nin elek analizi yer almaktadır.



Şekil 3.5 Geopolimer harç yapımında kullanılan bağlayıcılar

Tablo 3.3 YFC’nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler		Değerler	TS EN 197-1
Magnezyum Oksit (MgO)	%	5,75	Max. 18
Sülfür (S ²⁻)	%	0,54	Max. 2,0
Kükürt Trioksit (SO ₃)	%	0,19	Max. 2,5
Kızdırma Kaybı	%	0,03	Max. 3,0
Klorür (Cl ⁻)	%	0,0185	Max. 0,10
Rutubet	%	0,06	Max. 1,0
Sodyum Oksit (Na ₂ O)*	%	0,56	-
Potasyum Oksit (K ₂ O)*	%	0,28	-
Toplam Alkali	%	0,74	-
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık	gr/cm ³	2,95	-
Özgül Yüzey	cm ² /g	4989	Min. 2750

Tablo 3.4 TT'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	Değerler
SiO₂	53,96
Al₂O₃	14,29
Fe₂O₃	9,78
CaO	8,68
MgO	4,49
Na₂O	1,19
K₂O	0,74
SO₃	0,13
Özgül Yüzey BET (cm²/g)	5200
Özgül Ağırlık (g/cm³)	2,34
Su Emme Kapasitesi	13,05

Tablo 3.5 TT elek analizi

Tuğla	
#8 (2,36)	1,16
#16 (1,18)	239,93
#30 (600µ)	169,87
#50 (300µ)	122,76
#100 (150µ)	86,72
#200 (75µ)	39,29
Pan	85,11
Toplam 750 g	744,84

3.1.3 Aktivatörler

Alkali aktivasyon ile üretilen ürünler çevre zarar vermeyen, OPC ile üretilenlere göre; düşük hidrasyon ısı, düşük porozite, daha güçlü agrega-çimento ara yüzey geçiş bölgesi gibi avantajlar sağlamaktadır.

Bu çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₄) olmak üzere iki tip aktivatör kullanılmıştır (Şekil 3.4). NaOH çözeltisi 15 M'ye göre laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Molalite (M) (3.1) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M = n / v \quad (3.1)$$

- Hacim = 1 litre
- $M = n / V$ (1 lt çözücü) = $15 / 1 = 15 \text{ mol / litre} = 15 \text{ molalite (M)}$

Denklem (3.1)'e göre, NaOH çözeltisinin molalitesi (M) ile çözünecek maddenin mol sayısı (n) arasındaki bağlantı hesaplanmaktadır ve çözeltinin toplam hacmi (V) 1 litre olarak hesaplarda kullanılmaktadır. Denklemde yer alan molarite (M), bir çözeltideki çözünen maddenin mol sayısının, çözeltinin hacmine oranıdır. Molarite ile, çözeltinin molalitesi ve yoğunluğu (ρ) arasındaki ilişkiyle hesaplanabilir (Denklem 3.2).

$$M = m / \rho \quad (3.2)$$

Denklem (3.2) m, hesaplanacak olan çözeltinin molalitesini, n çözünen maddenin mol sayısını ifade etmektedir. Çözeltinin molalitesi:

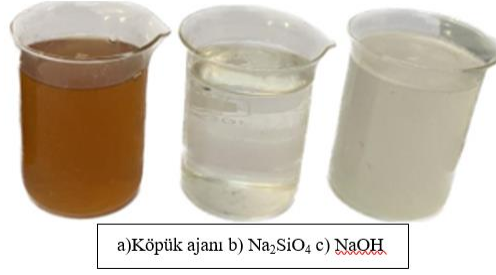
- Mol sayısı = gram cinsinden kütle / molekül ağırlığı

Yukarıdaki formül uygulandığında;

NaOH: 40 gram

- $15 \text{ mol} \cdot 40 = 600 \text{ g}$ malzeme 1 litre suda çözdürülmesi gereklidir.

Literatürde ifade edildiği üzere NaOH ve Na₂SiO₄ çözeltilerinin, diğer malzemelerle karıştırılmadan 24 saat önce hazırlanması önerilmiştir. Bu karışımlarda da NaOH çözeltisi hazırlanırken bu öneri dikkate alınmıştır (Kamseu vd., 2017; Kaur vd., 2018).



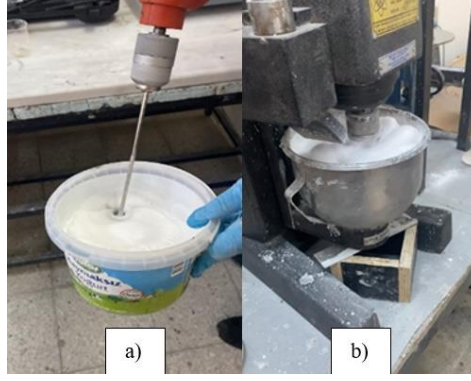
Şekil 3.6 Karışımda kullanılan sıvı malzemeler

3.1.4 Köpük

Bu çalışmayı yaparken Genfil marka reçine esaslı organik köpük kullanılmıştır. Belirtilen dozaj aralığında suya köpük ajanı ilave edilip, elektrikli mikser ile çırpılarak uygun kıvamlı köpük elde edildikten sonra en son malzeme olarak köpük karışıma ilave edilmiştir. Mekanik köpürtme yöntemi ile hazırlanan harçlar her karışım için aynı şekilde üretilmiştir. Hafif beton köpük ajanı (Şekil 3.4), organik reçine bazlıdır ve köpürme işlemini başlatan bir kimyasaldır. Köpüğün her bir kabarcığına dayanım kazandıran bu sebeple sınırlı bir süre de olsa stabilizasyonunu sağlayan kimyasal katkıdır. Köpüğün stabilizesi sağlandıktan sonra içerdiği hava boşlukları ile güçlü bir yapı elde edilir.

Tablo 3.6 Köpüğün özellikleri

Tabi Hali	Sıvı
Renk	Koyu Kahve
pH Değeri	6-7
Raf Ömrü	2 yıl
Yoğunluk	1,05 kg/litre
Saklama	Direk güneş ışığı almayan yerde
Kullanım Miktarı	%2-2,5 oranında temiz suya eklenir



Şekil 3.7 a)Elektrikli mikserle hazırlanmış köpük b)Köpük eklenirken oluşan görüntü

3.1.5 Kullanılan Aletler ve Yardımcı Ekipmanlar

Kastamonu Üniversitesi, Hazır Beton Laboratuvarı'nda bulunan ekipmanların görsellerine ve ayrıntılı özelliklerine bu bölümde yer verilmiştir. TS-3530-EN-933-1; TS-EN 12390-7; TS-EN 12390-3; TS-EN 12390-5; TS-EN 196-2 gibi standartların gereklerine uyularak çalışma yürütülmüştür.

3.1.5.1 Elek

TS-3530-EN-933-1 standardına uygun olarak elek analizi yapılmıştır. Deney için uygun olan ebatta olan elekler kullanılarak deney tamamlanmıştır. Boyutsal ayrıştırma için kullanılan en yaygın ekipman eleklerdir. Bu deneyde kullanılan agreganın pomzanın tanecik boyutu Şekil 3.6'da görseli bulunan elek yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.8 Elek (1,18mm)

3.1.5.2 Harç mikseri

Karışım giren malzemelerin homojen dağılımını elde etmeye yarayan karıştırıcı türüdür. Malzemelerin karıştırma işlemi LTC 320 model 1100 W gücünde ve 10 litre kazana sahip ÖZAK markalı mikserde yapılmıştır. (Şekil 3.7)



Şekil 3.9 Harç mikseri (Karıştırıcı)

3.1.5.3 Bilyalı değirmen

Agregaların parçalanma direncinin belirlenmesinde kullanılan cihazdır. Silindirik şeklinde çelik tambur ve elektronik kontrol etme panelinden oluşmaktadır.



Şekil 3.10 Bilyalı değirmen

3.1.5.4 Kalıplar

Bu çalışmada 40*40*160 mm, 50*50*50 mm ve 25*25*285 mm'lik kalıplar kullanılmıştır. Mekanik ve durabilite testleri için TS-EN 12390-7'ye göre 40*40*160 mm ve 50*50*50 mm boyutlarında numuneler elde edilebilmesi için prizma ve küp kalıplar kullanılmıştır.

3.1.5.5 Etüv

Ayarlanabilir sıcaklıklarda ısıtma ve kurutma amaçlı kullanılan bir laboratuvar fırınıdır. Farklı ebatlarda ve hacimlerde etüvler mevcuttur. İki kat sac levhadan oluşur ve hava geçirmeyen bir yapısı vardır.



Şekil 3.11 Etüv

3.1.5.6 Eğilme-basınç dayanım test cihazı

Çimento basınç deney gövdesi ve çimento basınç/eğilme deney gövdesi çimento harcı prizma ve küp numunelerine ait basınç-eğilme deneyleri için tasarlanmıştır. Her makinede yük ölçümü için yüksek hassasiyetle çalışır. Oynar başlık sistemli üst basınç plakası ve alt basınç plakası; numuneye ve boyutuna uygun, gerekli standardı sağlayan basınç ve eğilme deney aparatları ile birlikte kullanılır. Numuneler uygun kesiti üzerinde paralel ve ortalı şekilde yerleştirilerek deneye başlanır. Cihaz hem kN hem MPa da değerler vermektedir.



Şekil 3.12 Test cihazı

3.1.5.7 Yüksek sıcaklık deney cihazı

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan beton ve bileşenlerinin yapılarında değişimler meydana gelmektedir. Performans açısından yüksek sıcaklık sonrası betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler oldukça önem taşımaktadır. Yüksek sıcaklık deneyi meydana gelen değişimleri anlayabilmek için yapılmaktadır.

3.1.6 Numune Üretim Prosesi

TS-EN196-1 ile uyumlu olarak ince agrega (pomza ve GP), YFC, TT, su, NaOH, Na_2SiO_4 kullanılmıştır. Her karışım için su, aktivatör ve köpük miktarı sabit tutulmuştur (Tablo 3.6). Karışım tasarımı hacim esasına göre hesaplanmıştır.

Tablo 3.7 Karışım tasarım verileri (1dm^3)

Kod	P (gr)	GP (gr)	YFC (gr)	TT (gr)	SS (gr)	SH (gr)	Köpük (gr)	Su (gr)
P0GP100Y	0	110	430	0	160	160	72	130
P100GP0Y	430	0	430	0	160	160	72	130
P50GP50Y	215	55	430	0	160	160	72	130
P0GP100YT	0	110	385	43	160	160	72	130
P100GP0YT	430	0	385	43	160	160	72	130
P50GP50YT	215	55	385	43	160	160	72	130

Geopolimer üretiminde tüm malzemelerin karışım sırası ve süresi, üretilen bütün numunelerin yapısal olarak homojen olması için önemli bir unsurdur. Harçlardaki homojenliğin sağlanmasında Şekil 3.7'deki hobart karıştırıcıdan yardım alınmıştır. Bu proses sırasıyla;

- Bütün malzemelerin tartılması,
- Kuru malzemelerin homojen karışımı (yaklaşık 2 dakika),
- Su ve aktivatörlerin eklenmesi (yaklaşık 1,5 dakika normal devir, 30 saniye hızlı devirde karıştırma işleminin uygulanması),
- Bu işlem esnasında mekanik köpük üretiminin hazırlanması ve ideal yoğunluğa ulaştıktan sonra istenilen miktarda köpüğün harca ilave edilmesi (köpük

eklendikten sonra köpüğün sönmemesi için 15 saniye karışım normal devirde devam eder),

- Harcın kalıplara yerleştirilmesi ve etüv kürü.

Gerekli etüv ve kür koşullarını sağlanıp, sürelerini tamamladıktan sonra dikkatli bir şekilde kalıptan sökümü yapılmış ve tekrar kür odasına gruplandırılarak yerleştirilmiştir. Kür süresi biten numuneler 3 günlük, 7 günlük ve 28 günlük eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. 28 gün sonunda numunelere durabilite testleri uygulanmıştır. Bu test TS-EN standartlarına uygun olarak izlenmiştir. Basınç Dayanımı (TS-EN 12390-3), Eğilme Dayanımı (TS-EN 12390-5), sülfat etkisi (TS-EN 196-2), yüksek sıcaklık, asit aşınma vb. gibi durabilite testlerine tabii tutulmuştur.

3.1.7 Numune Örnekleri

Karışım sonrası uygun kür süresi biten 6 grubun numune görselleri Şekil 3.11’de yer verilmiştir.



Şekil 3.13 Numune örnekleri

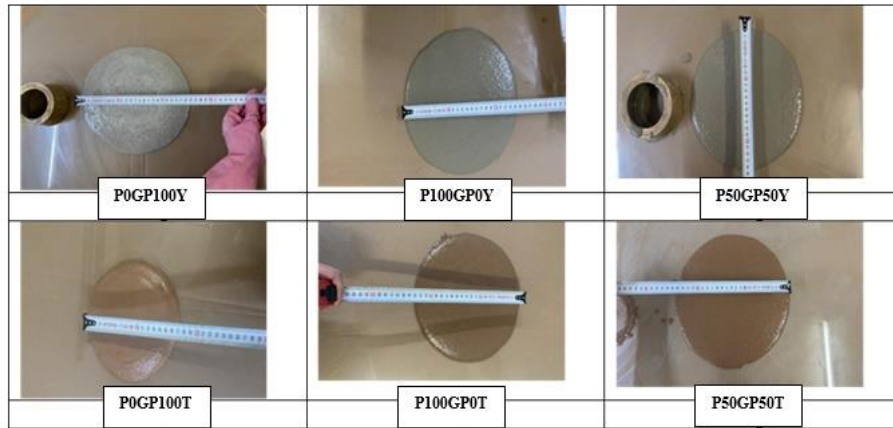
3.2 Yöntem

3.2.1 Yayılma Deneyi

Geopolimer betonda yayılma deneyi, taze haldeki karışımın optimum işlenebilirliğini ve yayılma özelliklerini tayin etmek için kullanılır. TS EN 12350-5 ve/veya ASTM C143 standartlarınca uygulanmaktadır. ASTM-C230-BS-455:1-EN-459/2-DIN-1060 standardına uygun olan yayılma deney aparatı, 270*270*290 mm ölçülerine sahiptir.

Bu aparatın bünyesinde yayılma gövdesi, yayılma tablası, yayılma kalıbı ve mekanik tokmak mevcuttur. Deneyde kaydedilen sonuçlar, hazırlanan karışımın istenilen özelliklerde olmasını ve uygulanabilirliğini değerlendirmek için bilgi sağlar. Yüksek yayılma çapı daha akışkan bir harç elde edildiğini, düşük yayılma çapı ise daha katı fazda bir harç elde edildiğinin göstergesidir. Deney sonuçlarının analizini yaparken önceden hedeflenen bir yayılma çapı aralığı belirlemek, üretilen beton çeşidinin gerekliliklerine ve kullanılacak amaca hizmet etmesi bakımında değişiklik gösterebilmektedir.

Deney için, belirlenen karışımın prosedürlerini gerçekleştirdikten sonra taze haldeki harç kalıba TS EN 12350-5 standartlarının belirlediği yöntemlerce yayılma tablasının ortasına yerleştirilen konik ya da silindirik metal kalıba doldurulur. Doldurma işlemi üç aşamada kontrollü bir şekilde gerçekleştirilir ve her aşamada sıkıştırma işlemi yapılır. Yayılma tablasının önceden temizlenmesi ve deneye başlamadan önce hafifçe nemlendirilmesi önemlidir. Yayılma tablasının sabit hızla yukarı doğru çekilmesi harcın işlenebilirliği hakkında yorum yapılmasına olanak sağlayacaktır. Bu işlemten sonra yayılma tablasındaki harcın çapı (genellikle milimetre olarak) iki yönden ölçülür ve sonuçlar kaydedilir (Şekil 3.12). Ölçüm işlemi cetvel ya da ölçüm cihazlarından yardım alarak yapılabilir.



Şekil 3.14 Yayılma deneyi görüntüleri

3.2.2 Basınç Dayanımı Deneyi

Geopolimer betonda basınç dayanımı deneyi, normal betonda da yapıldığı gibi numunenin dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılan bir deneydir. TS EN 12390-3, TS EN 1015-11 veya ASTM C39 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen bu deneyde hazırlanan numuneler silindirik (boyut ölçüsü R:100 mm, h: 200mm), küp (boyut ölçüsü 50*50*50 mm) ya da prizmatik (40*40*160 mm) olabilir. Standartlara uygun şekilde karıştırılıp hazırlanan numunelere optimum kür işlemi uygulanır. Bu çalışmada deneyde kullanılan numuneler prizmatik boyutta olup 3; 7 ve 28 günlük kür süresi dolan numuneler Şekil 3.13’de gösterildiği üzere basınç dayanımı test cihazı yardımıyla dayanıklılık testi uygulanmış ve sonuçlar kaydedilmiştir.



Şekil 3.15 Basınç dayanımı deneyine tabi tutulan numunenin görünümü

Basınç dayanım testi Denklem (3.3)’e göre hesaplanmaktadır. Deney sonucu ve denklem hesapları MPa cinsinden kaydedilir.

$$\sigma = P/A \quad (3.3)$$

- P: Uygulanan kuvvet (N)
- A: Kesit alanı (mm²)
- σ : Basınç dayanımı (MPa)

3.2.3 Eğilme Dayanımı Deneyi

Normal betonda olduğu gibi geopolimer betonda da üretilen numunenin bükülme stresine karşı gösterdiği direnci ölçmek için eğilme dayanımı testi uygulanır. Bu deney için TS EN 12390-3; TS EN 1015-11 veya ASTM C39 standartlarını takip etmek

gerekmektedir. Üç nokta eğilme deneyi ya da bend testi olarak da adlandırılan bu deneyde, bir numuneye üç noktadan yük uygulanır ve sonuca ulaşılan veriler kaydedilir. Deney sonucunda numunenin eğilme dayanımı, elastisite modülü ve diğer mekanik özellikleri belirlenebilir. Deneyde cihazın standartlarına uygun bir geometrik şekle sahip numune kullanılır. Deney yapılış aşamaları şu şekilde izlenmelidir; geometrik şekli uygun numune eğilme dayanımı testine yerleştirilir. Numunenin cihazın içindeki konumu, yük uygulanacak noktalara eşit mesafede olmasına dikkat edilmelidir. Bu çalışmada Şekil 3.14'te gösterildiği üzere 3; 7 ve 28 günlük kür süresini tamamlamış 40*40*160 mm numuneler kullanılmıştır. Şekil 3.15'te numunelerin kırım sonrası ara kesitlerinin görüntüleri mevcuttur. Ara kesitlerinde görünen koyu renkler ürünlerdeki geopolimerizasyonu göstermektedir. Bir numunenin eğilme dayanımının (gerilmesinin) hesabı için aşağıdaki denklem (3.4)'ten yararlanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3.16 Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan numunenin görünümü

$$\sigma = 1,5 PL/bd \quad (3.4)$$

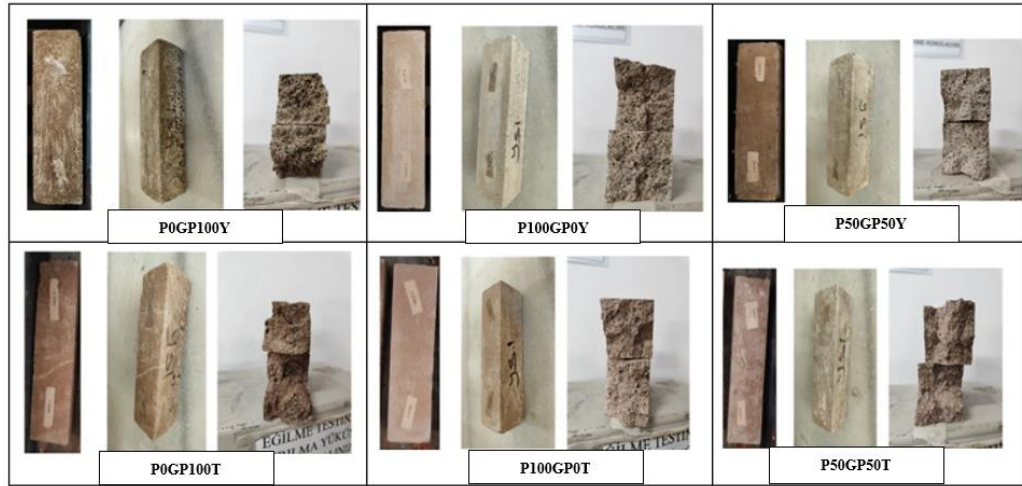
- σ : Malzemenin eğilme gerilmesi (MPa)
- P: Uygulanan yük (kN)
- L: Numunenin mesnet arasındaki uzunluğu (100 mm)
- b: Numunenin genişliği (40 mm)
- d: Numunenin kalınlığı (40 mm)



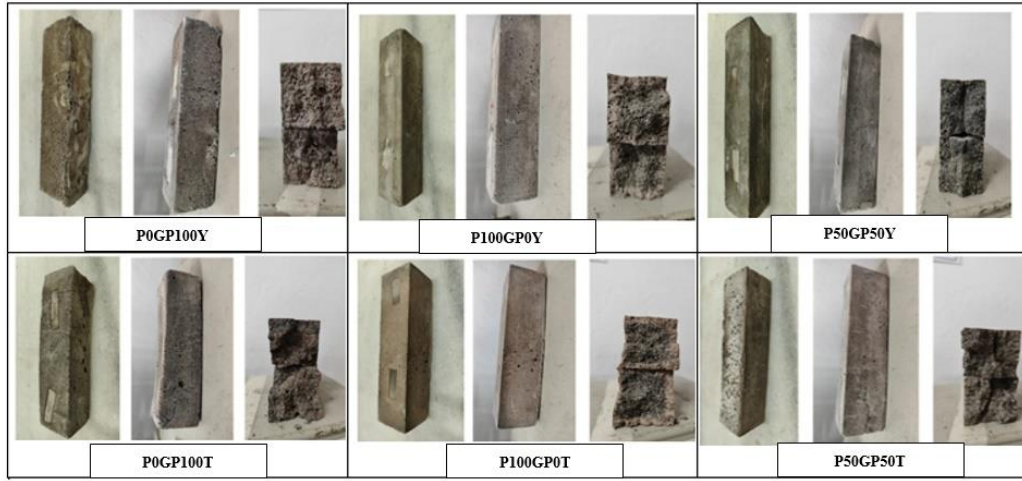
Şekil 3.17 Eğilme deneyine tabi tutulan numune görünümleri

3.2.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Betonlarda yüksek sıcaklık deneylerinin amacı, herhangi bir yangın anında betonun maruz kalacağı yüksek sıcaklığa karşı davranışsal performansını ve yapısal bütünlüğünün ne derecede koruduğunu tayin etmek için uygulanır. Farklı sıcaklık uygulamalarına maruz kalan numunelerden minimum düzeyde etkilenmeleri betonun yüksek sıcaklıklara karşı dirençli bir malzeme olduğunu göstermektedir. Geopolimer bağlayıcılar, inorganik yapıları sayesinde yüksek sıcaklıklara karşı güçlü bir direnç sergiler. 700–800°C'ye kadar olan sıcaklıklarda jel yapılarında sadece minimal bir bozulma olur ve yüksek termal stabilite sunarlar. Bu özellikleri gereği yangına karşı dirençlidirler ve ısıya dayanıklılık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Özellikle geleneksel çimento bazlı malzemelere kıyasla çok daha yüksek bir termal dayanıklılığa sahip oldukları için, yüksek sıcaklıkla temas eden yapı elemanlarında ve endüstriyel kaplamalarda sıkça tercih edilirler (Amin vd, 2020; Duxson vd., 2006; Tobbala vd, 2020). Bu çalışma kapsamında 250 ve 500°C olarak iki farklı sıcaklık belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık tayin cihazında belirlenen sıcaklığa 2 saat süreyle maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında yavaş şekilde soğumaya bırakılmışlardır. Şekil 3.16'te 250°C ve Şekil 3.17'da 500°C'ye maruz kalan numunelerin ilk ve son hallerinin görselleri mevcuttur. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin ağırlık kaybı, basınç dayanımı değişiklikleri ve görsel görünüm özellikleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.18 250 derece sıcaklığa tabi tutulan numunelerin toplu görünüşleri



Şekil 3.19 500 derece sıcaklığa tabi tutulan numunelerin toplu görünüşleri

3.2.5 Sülfat Testi

Üretilen numunelerin aside karşı direnç göstermesi asit testi ile ölçülebilmektedir. 60 gün kür süresini tamamlayan numuneler %2,5 $MgSO_4$ çözeltisine 30 ve 60 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Numunelerin asit direncini saptayabilmek için; ağırlık değişimi, basınç dayanımı ve görsel değişimler karşılaştırılmıştır. Şekil 3.18’de karışım gruplarının görselleri yer almaktadır.



Şekil 3.20 Sülfat etkisindeki numune örnekleri

3.2.6 Asit Testi

Üretilen numunelerin aside karşı direnç göstermesi asit testi ile ölçülebilmektedir. 60 gün kür süresini tamamlayan numuneler %2,5 HCl çözeltisine 30 ve 60 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Numunelerin asit direncini saptayabilmek için; ağırlık değişimi, basınç dayanımı ve görsel değişimler karşılaştırılmıştır. Şekil 3.19’de karışım gruplarının görselleri yer almaktadır.



Şekil 3.21 Asit etkisindeki numune örnekleri

4. TARTIŞMA VE BULGULAR

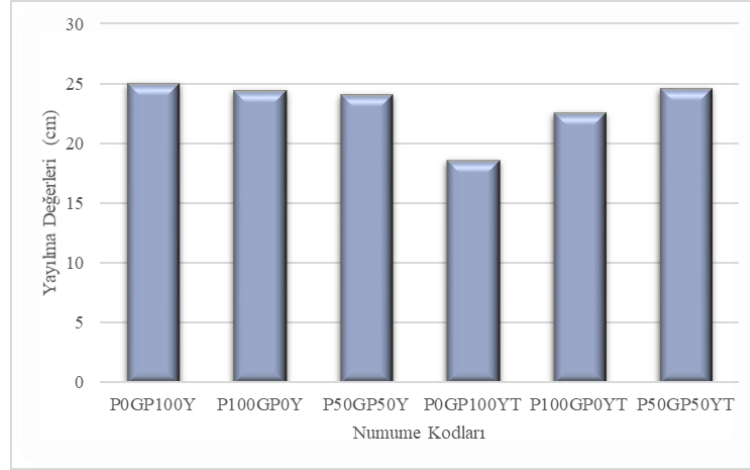
4.1 İşlenebilirlik Testi Sonuçları

P; GP; YFC ve TT içeren HG numunelerin işlenebilirliğini test etmek için yapılan mini çökme testi sonuçlarının hafif agrega, bağlayıcı türü ve oranlarına bağlı olarak değişkenlikleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

%100 YFC kullanılan HG harçların daha yüksek yayılma değerleri gösterdiği, TT ikamesinin harçların yayılma değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. Alkhateeb, (2022) ve Madallah vd., (2020) YFC’nin malzemelerin homojen olarak dağılmasını sağlayarak, işlenebilirliği iyileştirerek yayılmayı artırdığını ifade etmişlerdir.

Özcan ve Koç (2018), %10; %15; %20 ve %25 oranlarında pomza (1–70 µm) ikamesinin yayılma çaplarını sırasıyla %6,25; %14,58; %12,5 ve %27,1 oranında azalttığını, Zeyad vd. (2019), %10; %20 ve %30 pomza tozunun, çökmeyi sırasıyla %11,12; %16,67 ve %27,78 oranında artırdığını, Hedayatinia vd. (2019), 350 m²/kg incelikteki %10-30 oranında pomza ikamesinin kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının çökmesinde sınırlı bir artış oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

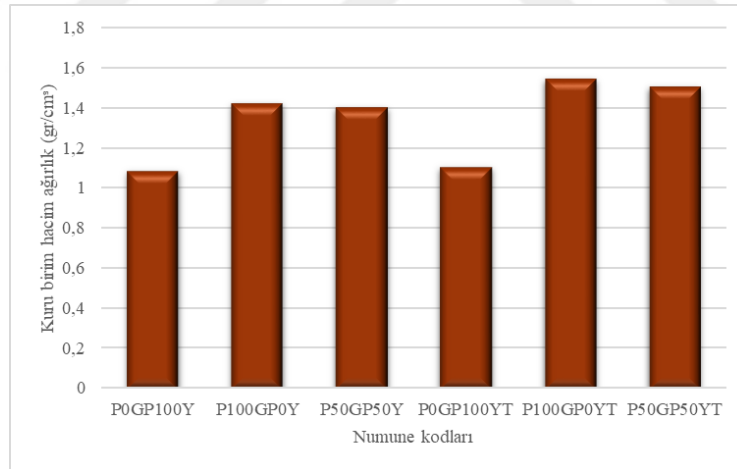
Sharmin, vd., (2024), %10; %20 ve %30 oranında atık TT ikamesinin yayılma değerlerini azalttığını, bunun, sahip olduğu yüksek özgül yüzey ve parçacıkların pürüzlü ve amorf şekilleri nedeniyle oluşan yüksek içsel sürtünmeden kaynaklandığını, Wong vd., (2020), yapmış oldukları çalışmada TT katılma oranındaki artışın geopolimer harçlarda işlenebilirliği azalttığını ifade etmişlerdir.



Şekil 4.1 HG harçların yayılma çapları

4.2 Birim Hacim Ağırlık Testi Sonuçları

P; GP; YFC ve TT içeren HG numunelerin BHA değerlerinin hafif agrega, bağlayıcı türü ve oranlarına bağlı olarak değişkenlikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. GP’nin BHA değerlerini düşürdüğü, P agregasının BHA değerlerini arttırdığı görülmektedir.

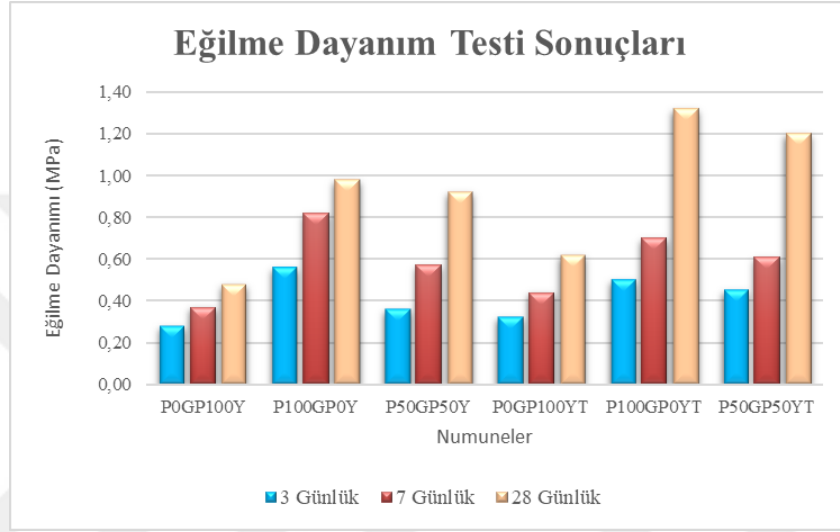


Şekil 4.2 Kuru birim hacim ağırlıkları

4.3 Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları

P; GP; YFC ve TT içeren HG numunelerin 3; 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinin hafif agrega, bağlayıcı türü ve oranlarına bağlı olarak değişkenlikleri Şekil 4.3’de verilmiştir.

HG numunelerin 3 günlük eğilme dayanımlarının 0,28 MPa ile 0,56 MPa arasında, 7 günlük eğilme dayanımlarının 0,37 MPa ile 0,82 MPa arasında ve 28 günlük değerlerinin 0,48 MPa ile 1,32 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. 3; 7 ve 28 günlük numunelerin en yüksek eğilme dayanımları sırasıyla, P100GP0Y; P100GP0Y ve P100GP0YT kodlu numunelerde elde edilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımları üzerinde P agregası ve YFC-TT'nin etkili olduğu görülmüştür.

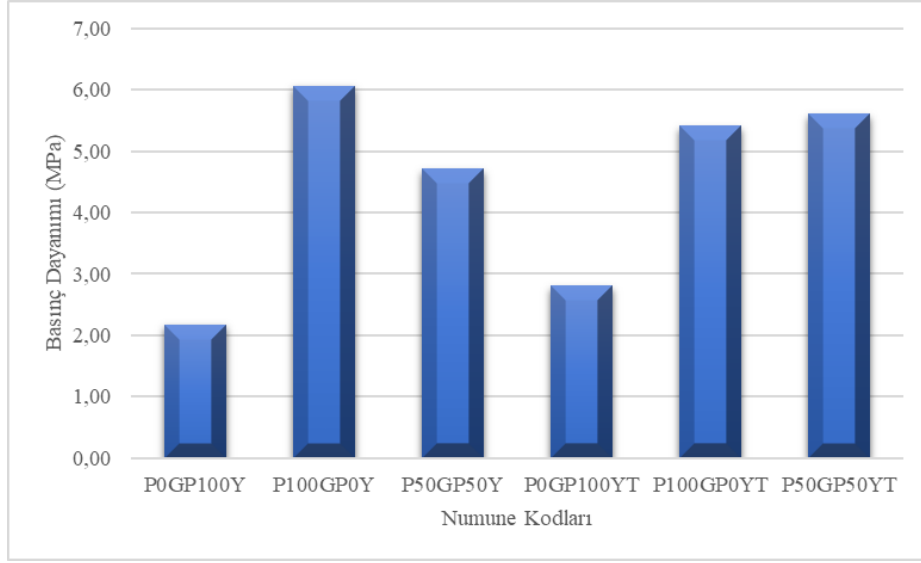


Şekil 4.3 HG numunelerin eğilme dayanımı

4.4 Basınç Dayanımı Test Sonuçları

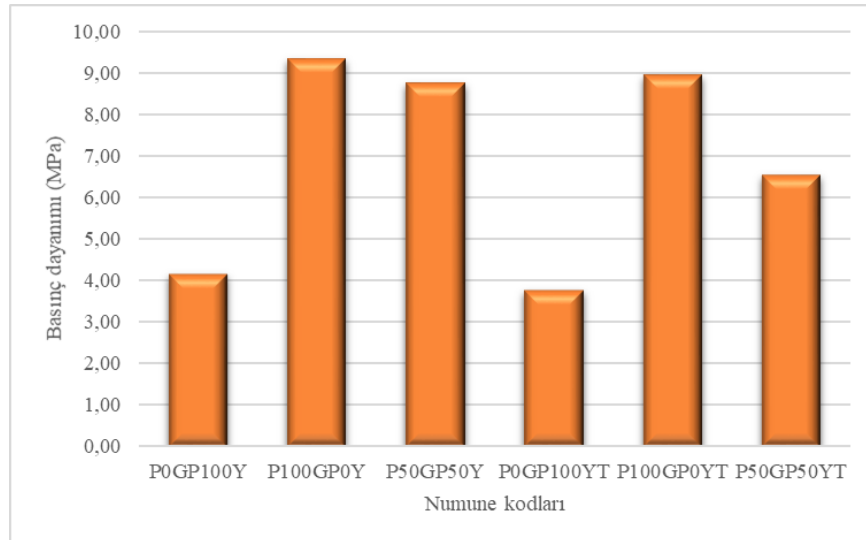
P; GP; YFC ve TT içeren HG numunelerin 3; 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin hafif agrega, bağlayıcı türü ve oranlarına bağlı olarak değişkenlikleri Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’da verilmiştir.

3 günlük basınç dayanımları 2,17 MPa ile 6,05 MPa arasında değişkenlik göstermiş, en yüksek basınç dayanımı P100GP0Y kodlu, %100 pomza ve YFC katkılı karışımlarda gerçekleşmiştir. Dayanım artışında P agregasının etkili olduğu, P100GP0YT kodlu %100 P ve YFC-TT katkılı numunelerin daha düşük basınç dayanımı sergilediği belirlenmiş, dayanım kaybında TT ikamesi etkili olmuştur. GP agregalı numunelerin basınç dayanımlarının daha düşük değerler aldığı, dayanım kaybında GP agregasının etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4 HG numunelerin 3 günlük basınç dayanımları

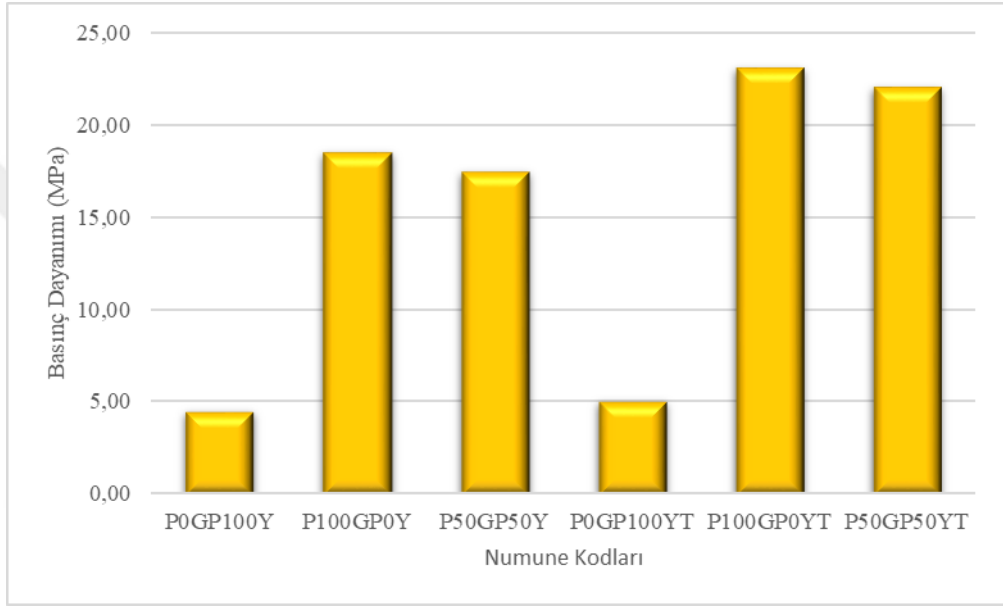
HG numunelerin 7 günlük basınç dayanımları 4,10 MPa ile 9,30 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. %100 P ve YFC katkılı P100GP0Y kodlu numunenin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu, P100GP0YT ve P50GP50Y kodlu numunelerin basınç dayanımlarının benzerlik gösterdiği, en düşük basınç dayanımının P0GP100YT kodlu numunede olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde; P agregası ve YFC-TT katkısının dayanım artışında etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5 HG numunelerin 7 günlük basınç dayanımları

HG numunelerin 28 günlük dayanımları Şekil 4.7’de tanımlanmıştır. 28 günlük basınç dayanımlarının 4,40 MPa ile 23,10 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En düşük

basınç dayanımı P0GP100Y kodlu numunede, en yüksek basınç dayanımı P100GP0YT kodlu numunede elde edilmiş, P50GP50YT kodlu numunenin de P100GP0YT kodlu numuneye yakın basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. %100 YFC ve YFC-TT katkılı harçlarda %100 P agregalı harçların daha yüksek basınç dayanımları sergilediği görülmüştür. GP agregasının tek başına kullanılması numunelerin basınç dayanımlarını düşürmüştür. YFC ve TT'nin birlikte bağlayıcı olarak kullanılması 28 günlük basınç dayanımı artışlarında etkili olmuştur.



Şekil 4.6 HG numunelerin 28 günlük basınç dayanımları

Pomza tozunun matrise eklenmesi akustik ve termal yalıtım, yangın direnci, aşınma direnci, birim ağırlık, hidrasyon ısısı, kuruma büzülmesi, otoklav genişlemesi, sülfat direnci, deniz suyu direnci, asit direnci, elektriksel direnç, ASR genişlemesi ve taşıma özellikleri gibi özellikler üzerinde olumlu bir etki, ancak işlenebilirlik, dayanım (özellikle erken yaşlarda) ve karbonatlaşma direnci üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır (Rashad, 2021).

Wong vd. (2020), TT ve uçucu kül (yüksek kalsiyumlu) kullanarak geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişler, TT'nin bağlayıcı olarak karışıma katılma oranının artması ile düzensiz mikro yapıların ortaya çıktığını ve basınç dayanımlarını düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

Rovnaník vd. (2018), yaptıkları çalışmada TT ve metakoalin içeren geopolimer betonların özelliklerini araştırmışlar, TT'nin metakaoline göre daha düşük reaktif bir malzeme olması nedeniyle, karışıma katılma oranının artması ile GP'lerin mekanik özelliklerini negatif olarak etkilediğini belirtmişlerdir.

P ve GP, betonun dayanımını ve performansını etkileyen iki hafif agrega türüdür. P, paketlenme yoğunluğu ve tane aderansı açısından, GP'ye göre daha tutarlı bir tane boyutu ve morfolojiye sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, P taneleri beton matrisine daha iyi oturarak dayanımı artırabilir. Ayrıca, P; GP'ye göre daha pürüzlü bir yüzey dokusu ve daha yüksek poroziteye sahip olduğundan, geopolimer matrise daha iyi tutunmasını sağlayarak bağlayıcı ile aderansı ve dayanımı artırır. Kimyasal kompozisyonları açısından da P ve GP farklılıklar gösterir; P genellikle daha fazla silika ve alümina içerir, bu farklılık geopolimer matris içindeki bağlanma ve kimyasal süreçleri etkileyerek betonun dayanımını da etkileyebilir. P, puzolanik reaksiyon aşamasında da GP'den daha etkili bir reaksiyon sağlayabilir ve daha yüksek basınç dayanımı ile sergileyebilir (Sharmin, vd., 2024).

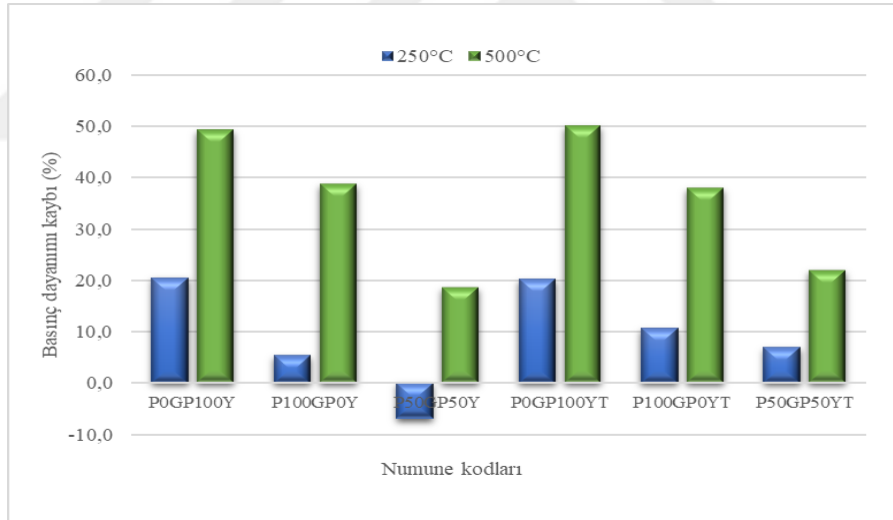
Tuğla 900°C'de üretildikleri için kalsine kilin bir formudur, Al_2O_3 ve SiO_2 bakımından zengindir, ancak, bu bileşenlerin büyük bir kısmı kristal formda ve kalan miktarlar amorf fazda olduğundan dolayı geopolimerler tasarımlar için puzolanik aktivitesi düşük bir bağlayıcı malzeme olarak sınıflandırılmaktadır (Rovnaník vd., 2018). Rovnaník vd., (2018), ortam sıcaklığında kürlenmiş TT bazlı geopolimerin 14 günde 10,2 MPa basınç dayanımı gösterdiğini, azalan basınç dayanımının düşük reaksiyon oranlarından kaynaklandığını, düşük oranlardaki amorf Al_2O_3 ve SiO_2 'i aktive etmek için yüksek sıcaklıkta kürleme yapılmasını önermişler, Reig vd., (2013) 7 gün 65°C'de yapılan kürleme ile 30 MPa basınç dayanımı, Wong vd., (2020), 5 gün 90°C kür sonucu 36,2 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir.

Gultekin ve Ramyar (2023), yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklığın mikrodalga ve etüvde kürlenmiş ponza, perlit, pişmiş kil ve uçucu kül bazlı geopolimer harçlar üzerindeki etkisini araştırılmışlar, kürlenme türünden bağımsız olarak, 450; 600; 750 ve 900°C'ye maruz bırakılan GP harçların basınç dayanımı kaybının, eşdeğer basınç dayanımına sahip çimento harçlarına göre daha az olduğunu belirtmişlerdir.

4.5 Yüksek Sıcaklık Testi Sonuçları

P; GP; YFC ve TT içeren 28 gün süreyle kür uygulanan HG numunelerin 250°C, 500°C sıcaklık testi sonrası oluşan basınç dayanımı kaybı değerlerinin hafif agrega, bağlayıcı türü ve oranlarına bağlı olarak değişkenlikleri Şekil 4.8’de verilmiştir.

250°C sıcaklık testi sonucu basınç dayanımı kayıplarının %-6,9-20,5 arasında değiştiği, P50GP50Y kodlu numunede %6,9 dayanım artışı olduğu, en yüksek dayanım kaybının P0GP100Y kodlu %100 YFC ve GP agregalı numunelerde olduğu, GP’nin daha yüksek dayanım kaybı oluşturduğu gözlenmiştir. 500°C sıcaklık testi sonrası dayanım kayıplarının %18,5-50,0 arasında olduğu belirlenmiştir. GP agregalı numunelerin daha fazla dayanım kaybına uğradığı, P-GP agregalı numunelerde ve YFC-TT katkılı numunelerin yüksek sıcaklık dirençlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7 HG numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım kayıpları

Geleneksel PC ile karşılaştırıldığında, geopolimer, daha yüksek ısı transfer oranı ve daha düşük sıcaklık gradyanı nedeniyle, yangına karşı daha yüksek yangın direnci göstermiştir (Łach, 2021). Köpük GP, gözenek yapısı sayesinde iç hasarı telafi edecek bir alan sağladığı için jeopolimerlerden daha iyi yangın direncine sahiptir (Cheng-Yong vd., 2017). Yüksek sıcaklıkta, köpük GP’nin dayanım kaybı esas olarak serbest su, adsorbe su ve kimyasal reaksiyonda birleşik su dahil olmak üzere suyun buharlaşmasından kaynaklanır. Bu suyun buharlaşma süreci iki boyutludur: (i) serbest

suyun ve adsorbe suyun buharlaşması köpük GP içindeki basıncı artırarak çok sayıda çatlak oluşumuna yol açar; (ii) bağlı suyun buharlaşması matrise zarar verir (Mataalkah vd., 2023) ve oluşan bu mekanizmalar FG'nin yüksek sıcaklıktaki performansını etkiler.

Zhang vd. (2020), GP betonun yüksek sıcaklıklardaki mühendislik özelliklerinin iki faza ayrılabilirliğini belirtmiş, sıcaklık artışına bağlı olarak dayanımın önemli ölçüde arttığını, 200°C'de ise nihai dayanıma ulaştığını, ikinci aşamada, 200 ila 1000°C arasındaki sıcaklıklarda, dayanımın farklı oranlarda düştüğünü belirtmişlerdir.

Bilim (2016); Yaptığı çalışmada YFC bazlı geopolimerlerde 300°C yüksek sıcaklığa maruz bıraktığı numunelerde eğilme dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin merkezi ile yüzeyi arasındaki sıcaklık ölçümlerinin değişimi termal çatlaklara neden olmuştur.

Kürklü (2016); yaptığı araştırmada YFC bazlı geopolimerlerin 200°C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığı numunelerde yaklaşık %30 eğilme dayanımı azalması ve daha yüksek sıcaklıklarda ise eğilme dayanımlarının ciddi miktarlarda kayıplar verdiğini tespit etmiştir.

Termal genleşme geopolimerlerin en önemli özelliklerden biridir, yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan genleşme veya büzülmenin oluşturacağı iç ve dış gerilmeler geopolimerlerin iç yapısına zarar verebileceğinden, yapı bütünlüğünü korumak için hafif termal genleşme tercih edilmelidir (Lemougna vd., 2011).

Günel, (2023); Luo vd., (2022), yaptıkları çalışmada %5 YFC katkılı ve UK esaslı geopolimer betonu 200°C; 400°C; 600°C ve 800°C'de sıcaklık testi uygulamış, 100°C'ye kadar numunelerin dayanımının arttığını ancak 200-600°C arasında belli bir düzeyde düzenli olarak dayanımın düştüğünü ifade etmişlerdir.

Gultekin ve Ramyar (2023), yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklığın mikrodalga ve etüvde kürlenmiş ponza, perlit, pişmiş kil ve uçucu kül bazlı geopolimer harçlar üzerindeki etkisini araştırılmışlar, kürlenme türünden bağımsız olarak, 450; 600; 750

ve 900°C'ye maruz bırakılan GP harçların basınç dayanımı kaybının, eşdeğer basınç dayanımına sahip çimento harçlarına göre daha az olduğunu belirtmişlerdir.

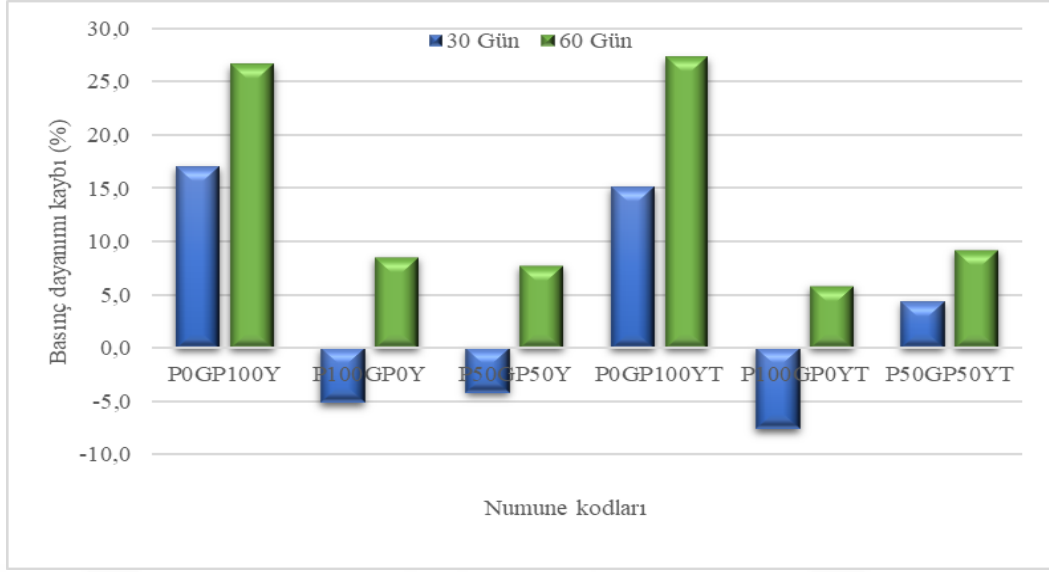
Kürleme yöntemi ve aluminosilikat türünden bağımsız olarak, tüm matrisler 900°C'ye maruz kaldığında cam benzeri bir görünüm kazanmıştır. Matris eriyerek birçok çatlağı onarmış ve önceden mevcut gözeneklerin çoğunu doldurmuştur.

4.6 Sülfat Testi Sonuçları

P; GP; YFC ve TT içeren 28 gün süreyle kür uygulanan HG numunelerin 30 ve 60 günlük sülfat testi sonrası oluşan basınç dayanımı kaybı değerlerinin hafif agrega, bağlayıcı türü ve oranlarına bağlı olarak değişkenlikleri Şekil 4.11'de verilmiştir.

30 günlük sülfat etkisi dikkate alındığında, basınç dayanımlarında oluşan kayıpların %4,4-17,0 arasında gerçekleştiği, P50GP50Y; P100GP0Y ve P100GP0YT kodlu numunelerde sırasıyla %4,2; 5,1 ve 7,6 oranında dayanım artışlarının olduğu, literatürde benzer test sonuçlarının gerçekleştiği görülmüştür. 60 günlük sülfat etkisi sonucu, %5,8-27,3 oranında dayanım kayıpları meydana gelmiş, dayanım kayıpları GP agregalı numunelerde daha yüksek oranda gözlemlenmiştir.

Vilaplana vd., (2016), GP betonun 6 ay süreyle %3 Na₂SO₄ ve %3 H₂SO₄ etkisine maruz kalmasının etkilerini araştırmışlar, asit içinde bekletilen numunelerde sülfat ortamında bekletilenden yüksek derecede fiziksel bozulma, ağırlık ve dayanım kaybı gözlemişlerdir.



Şekil 4.8 HG numunelerin sülfat testi sonrası basınç dayanım kayıpları

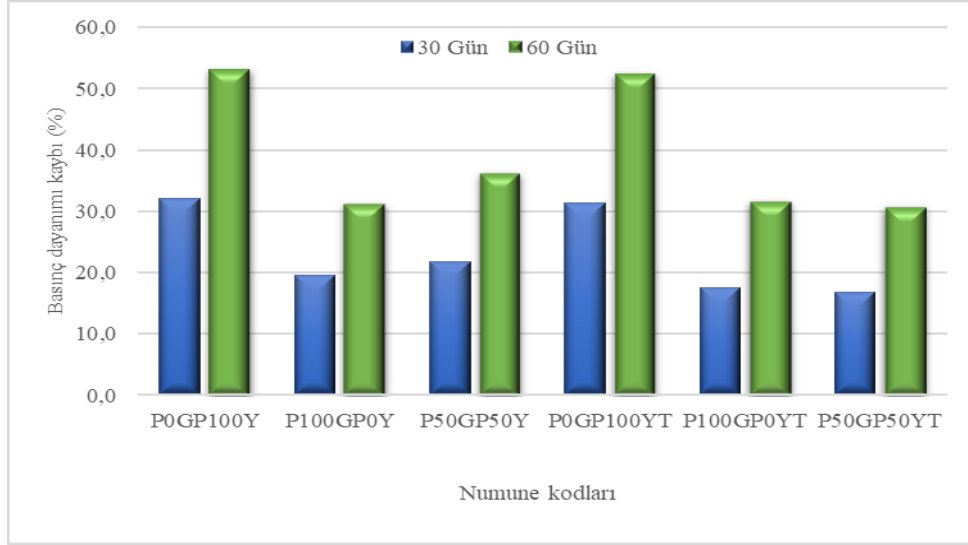
Wang vd., (2018), %3; %5 ve %7 oranlarında $MgSO_4$ çözeltisi kullanılarak yapılan daldırma testlerinde, $MgSO_4$ konsantrasyonu arttıkça GP betonlarda dayanımın azaldığını belirtmişlerdir.

Rashad (2021), PP eklenmesi, pozzolanik aktivitesi sayesinde daha yüksek sülfat direnci, deniz suyu direnci ve asit direnci sağlamıştır. Diğer yandan, PP eklenmesi, pozzolanik reaksiyon nedeniyle portlandit içeriğinin azalmasıyla karbonatlaşma direncini düşürmüştür.

4.7 Asit Testi

P; GP; YFC ve TT içeren 28 gün süreyle kür uygulanan HG numunelerin 30 ve 60 gün süreli asit testi sonrası oluşan basınç dayanımı kaybı değerlerinin hafif agrega, bağlayıcı türü ve oranlarına bağlı olarak değişkenlikleri Şekil 4.12’de verilmiştir.

30 günlük asit etkisi dikkate alındığında, basınç dayanımlarında oluşan kayıpların %16,8-32,0 arasında 60 günlük asit etkisi sonucu ise %31,4-53,2 değerleri aralığında olduğu, GP agregalı HG numunelerde daha yüksek oranlarda dayanım kayıplarının olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.9 HG numunelerin asit testi sonrası basınç dayanım kayıpları

Martinez-Lopez ve Escalante-Garcia (2016), 18 ay süreyle %2 H_2SO_4 etkisi altında bırakılan UK ve palmye yağı külü bazlı GP beton ile PC'li beton özelliklerinin değişimini incelemiş, çimentolu kompozitin kütle ve dayanım kaybının GP betondan daha fazla olduğunu, GP betonun, geleneksel betondan iki katı dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir. Nuaklong vd., (2016), %3 H_2SO_4 içinde 28 gün boyunca bekletilen UK esaslı GP betonda %3 kütle kaybı gözlemlendiğini, ağırlık kaybının önemli ölçüde arttığını ve aktivatör konsantrasyonu arttısının asit direnci de arttırdığını belirtmişlerdir. Vilaplana vd., (2016), GP betonun 6 ay süreyle %3 Na_2SO_4 ve %3 H_2SO_4 etkisine maruz kalmasının etkilerini araştırmışlar, asit içinde bekletilen numunelerde sülfat ortamında bekletilenden yüksek derecede fiziksel bozulma, ağırlık ve dayanım kaybı gözlemişlerdir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

P; GP; YFC ve TT içeren HG numunelerin 3; 7 ve 28 günlük basınç dayanımı testi, 250°C; 500°C yüksek sıcaklık testi, 30 ve 60 gün süreli sülfat ve asit testleri sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. %100 P agregası ve P-GP'nin YFC ve YFC-TT'nin birlikte kullanımı ile hafif ve yeterli dayanıma sahip, çevreci HG bir malzeme üretilmiştir.
2. GP tek başına agrega olarak kullanıldığında dayanım kayıplarına neden olmuştur.
3. Yüksek enerji tüketimi, düşük yangı direnci nedeniyle risk oluşturan geleneksel ısı yalıtım malzemeleri yerine, P; GP gibi doğal agrega, YFC gibi endüstriyel atık malzemeler kullanılarak, düşük CO₂ emisyonuna sahip, enerji verimliliği yüksek, daha çevreci yapı malzemelerinin üretiminin yapılabileceği görülmüştür.
4. P ve GP'nin birlikte kullanımı yüksek sıcaklık direnci artışı sağlamıştır.
5. P, GP ve YFC-TT bileşenleri numunelerin sülfat ve asit dirençlerini iyileştirmiştir.

5.2 Öneriler

1. P ve GP optimize edilerek, farklı bağlayıcılar, farklı alkalilerle aktive edilerek, daha yüksek performansta HG malzemeler üretilir.
2. P; GP ve YFC esaslı karışımların gömülü enerji, gömülü CO₂ ve maliyet analizlerinin değişkenlikleri farklı bir araştırma konu başlığı olabilir.
3. HG malzemelerin ısıl iletkenlik katsayılarının iyileştirilmesi kapsamında spesifik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

Abbas, W., Khalil, W. & Nasser, I. (2018). Production of lightweight Geopolymer concrete using artificial local lightweight aggregate, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences.

Abdullah, M.M.A.B., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K.N., Yahya, Z. & Razak, R.A. (2012). Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent, *Int J Mol Sci* 13 (6), 7186–7198.

Akça, U. (2022). Yüksek Fırın Cürufu ile Birlikte Bazik Pomza Kullanılan Alkali ile Aktive Edilmiş Harçların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Niğde.

Aleem, M.A., & Arumairaj, P. (2012). Geopolymer concrete—a review. *Int. J. Eng. Sci. Emerging Technol*, 1 (2), 118–122.

Alkhateeb, R.S.A. (2022). Effect Of Blast Furnace Slag And Pumice On The Properties Of Cement Mortar. MSc Thesis, *The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Çankırı Karatekin University*. Çankırı.

Allahverdi, A., & NajafiKani, E. (2009). Construction wastes as raw materials for geopolymer binders.

Allahverdi, A., Kani, E. N. & Yazdanipour, M. (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikaty*, 55(1), 68-78.

Amin, M., Tayeh, B. A., & Agwa, I. S. (2020). Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123073.

Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H. & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119679

ASTM: American Society for Testing and Materials (Veri Tabanı Erişim Platformu)

Atabey, V. (2018), Mermer atıklarından köpük beton blok üretimi. Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Afyon.

Barkhadle, A.N. (2023). Pomza Agregası Kullanılarak Üretilen Hafif Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kayseri.

Bhogayata, A., Dave, S. V., & Arora, N. K. (2020). Utilization of expanded clay aggregates in sustainable lightweight geopolymer concrete. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 1780-1792.

- Bhogayata, A., Dave, S.V., & Arora, N.K. (2020). Utilization of expanded clay aggregates in sustainable lightweight geopolymer concrete. *J. Mater. Cycles Waste Manag*, 22 (6),1780–1792.
- Bilim, C. (2016). Alkali ile Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarının Yangın Direnci. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 67-76.
- Bing, C., Zhen, W., & Ning, L. (2011). Experimental research on properties of highstrength foamed concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (1),113–118.
- Canbaz, M. (2007). Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu harçların özellikleri. Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Eskişehir.
- Castel, A., & Foster, S. J. (2015). Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 72, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.016>.
- Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillasa, X., & Campoc, J. (2004). Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research* 34, 1633–1644.
- Cheng-Yong, H., Yun-Ming, L., Abdullah, M.M.A.B., & Hussin, K., (2017). Thermal resistance variations of fly ash geopolymers: foaming responses. *Sci. Rep-Uk* 7.
- Chindaprasirt, P. Homwuttiwong, S. & Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1087-1092.
- Çınar, M., & Erbaşı, B. (2022). Geoteknik Uygulamalarda Geopolimerlerin Kullanılabilirliğinin İncelenmesi: Literatür Çalışması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25 (4), 774-789.
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements on alkaline cements and concretes. *International conference*, 131–149.
- Davidovits, J. (1999), Jeopolimerik sistemlerin kimyası, terminolojisi, *Geopolimer* 99 (292), 9-39.
- Davidovits, J. (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. *Market Trends and Potential Breakthroughs Geopolymer 2002 Conference*, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia.
- Davidovits, J. (2008). Jeopolimer, Kimya ve Uygulamaları. *Jeopolimer Enstitüsü*, Saint-Quentin, Fransa.
- Davidovits, J. (2011). Application of Ca-based geopolymer with blast furnace slag, a review *2nd International Slag Valorisation Symposium*, 33-49.
- De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., Da Silva, F.J., Pavao, B. & Veit, H. (2011). The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on

- compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cem. Concr. Compos.* 33(6), 653–660.
- Dembovska, L., Bajare, D., Ducman, V., Korat, L., & Bumanis, G. (2017). The use of different by-products in the production of lightweight alkali activated building materials. *Constr. Build. Mater.* 135, 315–322.
- Demirboğa, R., Orung, I., & Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cem. Concr. Res.* 31, 1627–1632.
- Demirel, M. (2024). Bazalt Lif İçeren Hafif Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Erzurum.
- Dhasindrakrishna, K., Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2021). Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology. *Cem Concr Compos* 116.
- Duan, P., Song, L., Yan, C., Ren, D., & Li, Z. (2017). Novel thermal insulating and lightweight composites from metakaolin geopolymer and polystyrene particles. *Ceram. Int.* 43, 5115–5120.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. & Van Deventer, J.S.J. (2007) Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917–2933.
- Duxson, P., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2006). Thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 1–Physical evolution. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(52-54), 5541-5555.
- Ekmen, Ş., Mermerdas, K., & Algın, Z. (2021). Effect of oxide composition and ingredient proportions on the rheological and mechanical properties of geopolymer mortar incorporating pumice aggregate. *J. Build. Eng.*, 34, 101893.
- Elibol, C. (2012). Alkalilerle aktive edilen çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Erdoğan, S.T., & Erdoğan, T.Y. (2020). Basic Materials of Construction. ODTÜ Yayıncılık.
- Erdoğan, T.Y. (2016). Beton Kitabı. (4. Baskı). ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları, 62-64.
- Feng, J., Zhang, R., Gong, L., Li, Y., Cao, W., & Cheng, X. (2015). Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity. *Mater. Des.* 65, 529–533.

- Fu, Y., Cai, L., & Yonggen, W. (2011). Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3144–3148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.006>.
- Gao, J., Sun, W., & Morino, K. (1997). Mechanical properties of steel fiber reinforced, high strength, lightweight concrete. *Cem. Concr. Compos.* 19 (4), 307–313.
- Gibsons, P. (1997). Pozzolans for Lime Mortars. www.buildingconservation.com
- Gopalakrishna, B. & Pasla, D. (2024). Durability performance of recycled aggregate geopolymer concrete incorporating fly ash and ground granulated blast furnace slag, *J. of Mater. in Civ.Engi.*
- Gökçe, H.S., Şimşek, O., Durmuş, G. & Demir, İ. (2018). Ham Perlit Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Alternatif Genleştirilmiş Perlit Kullanımının Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 13(2), 159-163.
- Grela, A., Hebda, M., Lach, M. & Mikula, J., (2016). Thermal Behavior And Physical Characteristics Of Synthetic Zeolite From CFB-Coal Fly Ash. *Microporous And Mesoporous Materials*, 220,155-162.
- Gultekin, A. & Ramyar, K. (2023). Investigation of high-temperature resistance of natural pozzolan-based geopolymers produced with oven and microwave curing, *Construction and Building Materials* 365, 130059
- Günel, G. (2023). Cam Tozu, Tuğla Tozu ve Fayans Tozu Katkılı Geopolimer Harçlarda Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kırıkkale.
- Hajimohammadi, A., Ngo, T., Mendis, P., & Sanjayan. J. (2017). Regulating the chemical foaming reaction to control the porosity of geopolymer foams. *Materials and Design* 120, 255–265.
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M. & Wang, Y. (2019). Comparison of CO2 emissions from OPC and recycled cement production. *Construction and Building Materials*, 211, 965-973.
- Hossain, K. M. A. (2004). Development of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 56(2): 99-109.
- Hounsi, A.D., Lecomte-Nana, G., Djeteli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., Napo, K., Tchangbedji, G. & Praisler M., (2014), How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers, *Ceramics International*, 40,8953–8962.
- John, S. K., Nadir, Y., & Girija, K. (2021). Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review. *Construction and Building Materials*, 280, 122443.
- Jones, M.R. & McCarthy, A. (2005). *Behaviour and Assessment of Foamed Concrete for Construction Applications*, Thomas Telford, London, UK.

- Kamseu, E., à Moungam, L. B., Cannio, M., Billong, N., Chaysuwan, D., Melo, U. C., & Leonelli, C. (2017). Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. *Journal of cleaner production*, 142, 3050-3060.
- Kankia, M. U., Baloo, L., Mohammed, B. S., Hassan, S. B., Haruna, S., Danlami, N. & Samahani, W. N. (2021). Effects of petroleum sludge ash in fly ash-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 272, 121939.
- Kantarcı, F. (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Malatya.
- Karakaş, H., İlkentapar, S., Durak, U., Örklemmez, E., Özuzun, S., Karahan, O., & Atış, C. D. (2023). Properties of fly ash-based lightweight-geopolymer mortars containing perlite aggregates: Mechanical, microstructure, and thermal conductivity coefficient. *Construction and Building Materials*, 362, 129717.
- Kaur, K., Singh, J., & Kaur, M. (2018). Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 169, 188-192.
- Kaw-Sai, L., & Soon-Ching, Ng. (2010). Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel. *Energy and Buildings* 42, 2452-2456.
- Kayalı, O., & Haque, M. (2000). Status of structural lightweight concrete in Australia as the new millennium dawns. *Concr. Australia* 25 (4), 22–25.
- Khoury, G.A. (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of Concrete Research* 44 (161), 291–309.
- Korkmaz, S. (2024). Hibrit Yüksek Fırın Cürufu ve Toz Perlit Bağlayıcılı Hafif Geopolimer Kompozitlerde Manyetize Suyun Etkisi. Doktora Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kırıkkale.
- Kul, A., Özel, B.F., Özçelikci, E., Gunal, M.F., Ulugöl, H., Yıldırım, G. & Şahmaran, M. (2023). Characterization and life cycle assessment of geopolymer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste, *J. Build. Eng.* 78.
- Kunhanandan Nambiar, E.K. & Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cem. Concr. Compos.* 28 (5), 475–480.
- Kuranlı, Ö.F., Uysal, M., Abbas, M.T., Cosgun, T., Niş, A., Aygörmez, Y., Canpolat, O., & Al-mashhadani, M.M. (2022). Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. *Construction and Building Materials*, 325, 126747.

- Kurtuluş, M. (2019). Yüksek Fırın Cürufunun Aktifleştirilmesinde Aktivatör Tipinin ve Aktivatör Ekleme Zamanının Macun Dolgu Özelliklerine Etkisi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Trabzon.
- Kürklü, G. (2016). The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar. *Composites part b: Engineering*, 92, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.043>.
- Łach, M., (2021). Geopolymer foams—will they ever become a viable alternative to popular insulation materials? - A Critical Opinion. *Materials* 14, 3568.
- Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., & Melo, U. F. C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, 37, 3011–3018.
- Liu, M.Y.J., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., & Mo, K.H. (2014). Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. *Energy Build.* 72, 238–245.
- Luo, Y., Li, S.H., Klima, K.M., Brouwers, H.J.H., & Yu, Q. (2022). Degradation mechanism of hybrid fly ash/slag based geopolymers exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 151, 106649.
- Madallah, A., Sabah, D. & Al-Hadithi, A. I. (2020). Experimental and statistical evaluation of rheological properties of self-compacting concrete containing fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Available online 5 January 2021, In press.
- Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S. (2016). Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. *Procedia engineering*, 148, 710-717.
- Martinez-Lopez, R., & Escalante-Garcia, J.I. (2016). Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition. *Construction and Building Materials*, 119.
- Matalkah, F., Ababneh, A., & Aqel, R. (2023). Synthesis of calcined kaolin-based geopolymer foam: assessment of mechanical properties, thermal insulation, and elevated temperature stability. *Ceram. Int.* 49, 9967–9977.
- Mehta, A. & Siddique, R. (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties. *Journal of cleaner production*, 205, 49-57.
- MTAGM (2023), MTA Genel Müdürlüğü Ankara, Türkiye <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-yataklari>
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Microstructural investigations on aerated concrete. *concrete, Cem. Concr. Res.* 30 (3), 457–464.

- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement Concr. Compos.* 22(5), 321–329.
- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on FA geopolymer concrete properties, *J. Clean. Prod.* 112, 2300–2307, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.109>.
- Olivia, M. & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design* (1980- 2015), 36, 191–198. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.10.036>.
- Örücü, B. (2022). Genleştirilmiş Perlit ve Genleştirilmiş Kil Agregalı Hafif Geopolimer Harcın Üretimi ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kocaeli
- Palmo, A., Grutzeck, M.W., & Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated fly ashes A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, Spain.
- Piasta, J. (1989). Heat deformation of cement phases and microstructure of cement paste. *Materials and Structures*, 17 (102), 415–420.
- Priyanka, M., Muniraj, K., & Madduru, S. R. C. (2022). Influence of geopolymer aggregates on microstructural and strength characteristics of OPC concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 1-10.
- Provis, J.L., & Van Deventer, J.S.J. (2009). *Geopolymers, Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.
- Rashad, A.M. (2021). An Overview of Pumice Stone as a Cementitious Material – the Best Manual for Civil Engineer, *Silicon* 13, 551–572.
- Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R., & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106.
- Reig, L., Tashima, M.M., Soriano, L., Borrachero, M.V., Monzó, J. & Payá J. (2013) Alkaline activation of ceramic waste materials *Waste and Biomass Valorization*, 4, 729-736.
- Rovnaník, P., Rovnanikova, P., Vyšvařil, M., Grzeszczyk, S., & Janowska-Renkas, E. (2018). Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 188, 924-933.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., & Chung, Y.S. (2013). The mechanical properties of fly ashbased geopolymer concrete with alkaline activators. *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 409–418.

- Samimi, K., Kamali-bernard, S. & Akbar, A. (2018). Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. *Construction and Building Materials*, 165, 247-263.
- Setvati, M.R., Mustaffa, Z., Shafiq, N. & Syed Z.I (2014). A Review on Composite Materials for Offshore Structures. *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Volume 5: Materials Technology; Petroleum Technology. San Francisco, California, USA. June 8–13, V005T03A016. ASME. <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23542>.
- Shaikh, F., & Haque, S. (2018). Behaviour of carbon and basalt fibres reinforced fly ash geopolymer at elevated temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0267-2>.
- Sharmin, S., Sarker, P.K., Biswas, W.K., Abousnina, R.M. & Javed, U. (2024). Characterization of waste clay brick powder and its effect on the mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 412, 134848.
- Singh, N.B. & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237(10),117455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117455.
- Singh, N.B. (2018-a), Fly Ash-Based Geopolymer Binder: A Future Construction Material. *Minerals*, 8(7), 299. <https://doi.org/10.3390/min8070299>.
- Singh, N.B. (2018-b). Foamed geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5 (7), 15243–15252.
- Swamy, R., & Lixian, W. (1995). The ingredients for high performance in structural lightweight aggregate concrete. Sandefjord, Norway, Oslo: The Norwegian Concrete Association.
- Şapcı, N., & Ceylan, H. (2021). Perlit Agregalarının Farklı Sıcaklıklarda Genleştirilmesi Üzerine Teknik Bir Analiz. *Teknik Bilimler Dergisi*, 11 (2), 32-40. DOI: 10.35354/tbed.878187.
- Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., & Âmin, M. (2021). Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00673.
- Temuujin, J., Williams, R.P. & Riessen, A.V., (2009), Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5276– 5280
- Tobbala, D. E., Abdelsalam, B. A., & Agwa, I. S. (2020). Bond performance of a hybrid coating zinc-rich epoxy incorporating nano-ferrite for steel rebars subjected to high temperatures in concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101698.

- Toprak, M. U., Şenol, A. F., Demiral, N. Ç., & Karakurt, C. (2022). Tuğla, Kiremit ve Mermer Atığı Tozları ile Üretilen Jeopolimer Harçların Özellikleri. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 918-930.
- TS EN 12350-5: Taze Beton Deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi
- TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini
- TS EN 12390-5: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini
- TS EN 12390-7: Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini
- TS EN 196-2: Çimento deney yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi
- TS EN 206: Beton Standardı
- TS EN 206-1: Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk
- TS EN 934-2: Su Azaltıcı / Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkılar Standardı
- TS-3530-EN-933-1: Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu Nisan 1999
- Tsaousi, G.M., & Panias, D. (2021). Production, properties and performance of slag-based geopolymers foams. Minerals 11(7), 732.
- TSE CEN/TR 15177: Betonun donma çözülme direncinin tayini- Yapısal iç hasar
- TSE CEN/TS 12390-9:Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 9: Buz çözücü tuz içinde donma-çözülme direncinin tayini - Yüzeysel hasarın tespiti yoluyla
- UNCC (2019), Climate action and support trends; 2019 United Nations: Climate Change.
- Uysal F.F. & Bahar, S. (2018). Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları. Trakya University Journal of Engineering Sciences, 19(1), 37-52.
- Ünal, S., Yücel, O., Kurt, M., & Gül, S. (2014). Atık'tan Ürün'e Demir-Çelik Cürufu, İleri Teknolojiler Çalıştayı, 255-267.
- Václavík, V., Dirner, V., Dvorský, T. & Daxner, J. (2012). The use of blast furnace slag. Metalurgija, 51(4), 461-464.
- Vickers, L., van Riessen, A., & Rickard, W.D.A. (2015). Thermal Properties of Geopolymers, In: Fire-Resistant Geopolymers. SpringerBriefs in Materials. Springer, pp. 77–98. https://doi.org/10.1007/978-981-287-311-8_5.

- Vilaplana, J.L., Baeza, F.J., Galao, O., Alcocel, E.G., Zornoza, E., & Garces, P. (2016). Mechanical properties of alkali-activated blast furnace slag pastes reinforced with carbon fibers. *Construction and Building Materials* 116, 63-71.
- Wallah, S.E., & Rangan, B.V. (2006). Low –calcium fly ash based geopolymer concrete: long-term properties. Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 1-97.
- Wang, D., Wang, Q., Zhuang, S. & Yang, J. (2018). Evaluation of alkali-activated blast furnace ferronickel slag as a cementitious material: Reaction mechanism, engineering properties and leaching behaviors, *Construction and Building Materials* 188, 860-873.
- Wong, C. L., Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Yap, S. P. (2020). Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder. *Journal of Building Engineering*, 32, 101655.
- Wongsa, A., Sata, V., Nuaklong, P., & Chindaprasirt, P. (2018). Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.*, 188, 1025–1034.
- Wu, C., Hwang, H. J., Shi, C., Li, N., & Du, Y. (2020). Shear tests on reinforced slag-based geopolymer concrete beams with transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 219, 110966. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110966>.
- Wu, J., Zhang, Z., Zhang, Y., & Li, D. (2018). Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed geopolymer (UFG) based on fly ash-metakaolin blends. *Constr. Build. Mater.*, 168, 771–779.
- Xu, H., Gong, W., Syltebo, L., Izzo, K., Lutze, W. & Pegg, I. L. (2014). Effect of blast furnace slag grades on fly ash based geopolymer waste forms. *Fuel*, 133, 332-340.
- Yakupoğlu, A. (2010). Alkalilerle aktive edilmiş cürüflü harçların özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.
- Yang, K.H., Lee, K.H., Song, J.K., & Gong, M.H. (2014). Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete. *J. Clean. Prod.*, 68, 226–233.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54.
- Yazıcı, N. & Karagöl, F. (2022). Uçucu Kül Esaslı ve Cüruf Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(3): 1592 - 1606, 2022
- Zaidi, S.F.A., Haq, E.U., Nur, K., Ejaz, N., Anis-ur-Rehman, M., Zubair, M., & Naveed, M. (2017). Synthesis & characterization of natural soil based inorganic polymer foam for thermal insulations. *Constr. Build. Mater.* 157, 994–1000.

- Zerfu, K., & Ekaputri, J. J. (2016). Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. *Materials Science Forum*, 841, 162-169.
- Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K., & Shi, X. (2020). Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. *Construction and Building Materials*, 262, 120924
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K. & Zhang, J. (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79-95.
- Zhang, S., Hou, J. O. (2018). Smart aggregates for monitoring stress in structural lightweight concrete Measurement, 122.
- Zhang, Z., Provis, J. L., A.Reid, & Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials* 65, 113-127.
- Zhang, Z., Wang, H., Reid, A., & Aravinthan, T. (2010). Effects of fly ash source and curing procedure on strength development of geopolymers, in: *Incorporating sustainable practice in mechanics of structures and materials*, ACMSM 21, CRC Press, Taylor & Francis Group, Melbourne (Australia).
- Zhao, R., Yuan, Y., Cheng, Z., Wen, T., Li, J., Li, F., & Ma, Z. J. (2019). Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 474-483.