



**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUF KATKILI
GEOPOLİMER KÖPÜK BETON ÜRETİMİ**

HÜSEYİN ERSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Dr. Öğr. Üyesi MURAT ÇAVUŞ

Aralık - 2020

Her hakkı saklıdır

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUF KATKILI
GEOPOLİMER KÖPÜK BETON ÜRETİMİ

HÜSEYİN ERSOY

TOKAT
Aralık - 2020

Her hakkı saklıdır

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

HÜSEYİN ERSOY

22 Aralık 2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUF KATKILI GEOPOLİMER KÖPÜK BETON ÜRETİMİ

HÜSEYİN ERSOY

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM
ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ MURAT ÇAVUŞ

Geopolimerler, çimento kullanmaksızın uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu (YFC) gibi silis ve alümin içeren malzemelerin sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi alkalilerle aktivasyonu sonucunda elde edilen malzemelerdir. Bu çalışmada ana madde olarak İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın bir atığı olan YFC, NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilerek geopolimer harçlar elde edilmiştir. Geopolimer harçların içerisine köpük solüsyonu ilave edilmesi ile geopolimer köpük beton (GPKB) numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan GPKB numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ön deneme numuneleri yapılarak ideal GPKB üretiminde kullanılacak olan YFC, alkali tipi ve oranları ile köpük solüsyon miktarları belirlenmiştir. GPKB üretiminde köpük solüsyonu/YFC oranı %12.5, %15 ve %17.5 olan 3 farklı numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler laboratuvar ortamında, 40 °C ve 60 °C'de etüvde kür uygulamasına tabi tutulmak üzere 9 seri numune üretilmiştir. Çalışma kapsamında; üretilen numunelere taze birim hacim ağırlık, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, kapilarite, su emme, görünür porozite, ısı iletkenlik ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; kuru birim hacim ağırlıkları 0.52-1.00 gr/cm³, basınç dayanımları 0.95-5.54 MPa, su emme değerleri % 42-53, görünür porozite değerleri % 54-97, ısı iletkenlik katsayıları 0.12-0.28 W/mK ve ultrases geçiş hız değerleri 1600-2300 m/sn aralığında olan GPKB'lar elde edilmiştir. Ayrıca yapılan deneylerin sonuçlarına göre taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü ve X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizleri yapılmıştır.

2020, 79 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Yüksek Fırın Cürufu, Geopolimer Köpük Beton, Alkali Aktivatör, Sodyum Hidroksit, Sodyum Silikat.

ABSTRACT

MASTER THESIS

PRODUCTION OF GEOPOLYMER FOAM CONCRETE CONTAINING BLAST FURNACE SLAG ACTIVATED WITH ALKALI

HÜSEYİN ERSOY

**TOKAT GAZIOSMANPAŞA UNIVERSITY
INSTITUTE GRADUATE STUDIES**

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

ADVISOR: ASIST. PROF. DR. MURAT ÇAVUŞ

Geopolymers are materials obtained by the activation of silica and alumina containing materials such as fly ash, metakaolin and blast furnace slag (YFC) with alkalines such as sodium hydroxide (NaOH), sodium silicate (Na₂SiO₃) and potassium hydroxide (KOH) without using cement. In this study, geopolymer mortars were obtained by activating YFC, a waste of Iskenderun Iron and Steel Factory, NaOH and Na₂SiO₃ as the main material. Geopolymer foam concrete (GPKB) samples were prepared by adding foam solution into the geopolymer mortars. The physical and mechanical properties of the prepared GPKB samples were researched. The amounts of YFC, alkalis and foam solutions to be used in the production of ideal GPKB were determined by making preliminary trial samples. In the production of GPKB, 3 different samples were prepared as foam solution / rate of YFC 12.5%, 15% and 17.5%. 3 different curing conditions (in the laboratory, 40 ° C and 60 ° C) were applied to 3 different prepared samples and 9 different types of samples were produced. Within the scope of the study; fresh unit weight, unit volume weight, compressive strength, capillarity, water absorption, apparent porosity, thermal conductivity and ultrasonic pulse velocity experiments were conducted on the produced samples. As a result of the experiments; dry unit volume weights 0.52-1.00 gr/cm³, compressive strength 0.95-5.54 MPa, water absorption values 42-53%, apparent porosity values 54-97%, thermal conductivity coefficients 0.12-0,28 W/mK and ultrasonic pulse velocity values 1600-2300 m/s GPKBs in range were obtained. In addition, scanning electron microscopy (SEM) image and X-ray diffraction (XRD) analyzes were performed according to the results of the experiments.

2020, 79 PAGE

KEYWORDS: Blast Furnace Slag, Geopolymer Foam Concrete, Alkaline Activator, Sodium Hydroxide, Sodium Silicate.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının başlangıcından tamamlanma süreci boyunca, tüm bilgi ve birikimleri paylaşan ve deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Çavuş'a içtenlikle teşekkür ederim.

Her zaman ve her konuda koşulsuz şartsız yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, eşim Hilal'e ve varlıklarına minnettar olduğum oğullarım Ahmet Kemal ve Yavuz Selim'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dünyayı kirleten tek varlık olan insanoğlunun atık olarak dünyaya bıraktığı endüstriyel ve tarımsal atıkların tekrar değerlendirilebileceğini göstermeyi amaçlayan bu çalışmanın gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakmak için bir nebze de olsa katkı sağlamasını temenni ederim.

HÜSEYİN ERSOY

22 Aralık 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGE VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. GENEL BİLGİLER	15
3.1. Yüksek Fırın Cürufu	15
3.1.1. Yüksek fırın cürufunun üretimi	16
3.1.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri	18
3.1.3. Yüksek fırın cürufunun aktivitesi ve bağlayıcı özellikleri.....	19
3.1.4. Yüksek fırın cürufunun inşaat sektöründe kullanım alanları.....	21
3.2. Alkali Aktivatörler	21
3.2.1. Sodyum hidroksit (NaOH).....	24
3.2.2. Potasyum hidroksit (KOH)	24
3.2.3. Sodyum silikat (Na ₂ SiO ₃)	25
3.2.4. Sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄)	25
3.3. Köpük Ajanı.....	25
3.4. Köpük Beton	26
3.4.1. Köpük betonun özellikleri ve kullanım alanları	27
3.5. Geopolimer	29
3.5.1. Geopolimerlerin kimyası	30
3.5.2. Geopolimer beton	32
3.6. Geopolimer Köpük Beton	33

3.6.1. Geopolimer köpük betonunun üretimi	34
3.6.2. Geopolimer köpük betonun özellikleri	34
3.6.3. Geopolimer köpük betonun kullanım alanları ve avantajları.....	36
4. MATERYAL ve YÖNTEM	37
4.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler	37
4.1.1. Yüksek Fırın Cürufu	37
4.1.2. Su	38
4.1.3. Alkali aktivatörler	38
4.1.4. Köpük ajanı.....	39
4.2. Ön Deneme Numunelerin Üretimi.....	40
4.3. Karışım Oranları Belirlemesi.....	43
4.4. Karışımların Hazırlanması.....	44
4.3. Deneyler.....	46
4.5.1. Köpüklü geopolimer harçların taze birim hacim ağırlık deneyi.....	46
4.5.2. Kuru birim hacim ağırlık deneyi.....	47
4.5.3. Kapiler su emme deneyleri	48
4.5.4. Su emme ve görünür porozite deneyleri	50
4.5.5. Basınç dayanımı deneyleri.....	51
4.5.6. Ultrases geçiş hızı belirleme deneyi	52
4.5.7. Isı iletkenlik deneyi.....	53
4.5.8. GPKB numunelerinin ait mikro yapısal özelliklerine bakılması	53
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	55
5.1. Taze Harç Birim Hacim Ağırlık Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi	55
5.2. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi.....	56
5.3. Kapiler Su Emme Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi.....	57
5.4. Su Emme ve Görünür Porozite Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	59
5.5. Basınç Dayanımı Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi.....	60
5.6. Ultrases Geçiş Hızı Belirleme Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi.....	61
5.7. Isı İletkenlik Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi	63
5.8. Geopolimer Köpük Beton Numunelerinin ait Mikro Yapısal Analizlerinin İrdelenmesi.....	65
5.8.1. SEM görüntüleme analizi	65

5.8.2. XRD analizi	67
6. SONUÇ	69
7. KAYNAKLAR	72
8. ÖZGEÇMİŞ.....	80



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	Numunenin basınç uygulama alanı
Fe	Demir
GP	Görünür Porozite
k	Kapilarite katsayısı
M	Molarite
Mg	Magnezyum
MPa	Megapascal
N	Newton
P	Numuneye uygulanan yük
P1	Numunenin kuru ağırlığı
P2	Suya doymuş numunenin ağırlığı
P3	Numunenin su içerisindeki ağırlığı
Q	Birim zamanda emilen su miktarı
S	Numune ait ölçüm yapılan iki yüzey arasındaki mesafe
S _a	Geopolimer köpük beton su emme oranı
V _{PKH}	Prizmatik kalıbın hacmi
V _{SKH}	Silindirik kalıbın hacmi
V _{ses}	Ultrases geçiş hızı
W _{BHA}	Birim hacim ağırlık
W _{Etüv}	Laboratuvar ortamında ve etüvde bekletilen numunelerin ağırlıkları
W _{Kalıp}	Silindirik kalıbın ağırlığı
W _{Kalıp+Harç}	Köpüklü geopolimer harç ile doldurulmuş silindirik kalıbın ağırlığı
W _{TBHA}	Taze beton birim hacim ağırlık
t	Zaman
°C	Santigrat
µs	Mikrosaniye

Kısaltmalar	Açıklama
AA-YFC	Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu numune
AA-YFC-MK	Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu-metakaolin numune
CH ₄	Metan
CO ₂	Karbondiyoksit
Fe ₂ O ₃	Hematit
Fe ₃ O ₄	Magnetit
FeCO ₃	Siderit
GPKB	Geopolimer köpük beton
GÖYFC	Granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufu
KOH	Potasyum hidroksit
K ₂ Si ₂ O ₅	Potasyum silikat
LWGC	Kırılmış kil tuğla ve ponza agregaları kullanılan hafif geopolimer beton
NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ CO ₃	Sodyum karbonat
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat
Na ₂ SO ₄	Sodyum sülfat
ÖYFC	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu
OPSGPC	Uçucu kül bazlı palmye ağacı kabuğu içeren geopolimer hafif beton
O ₃	Ozon
ÖDKO	Ön deneme karışım oranı
RLCA	Geri dönüştürülmüş hafif beton agregası
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
XRD	X-ışınları difraksiyonu
XRF	X ışını floresans
UPV	Ultrasonik darbe hızı
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılan farklı sektörlerde meydana gelen atıklar.....	3
Şekil 3.1. YFC'in oluşum şeması.....	17
Şekil 3.2. Sialat yapıları ve geopolimer türleri.....	31
Şekil 3.3. Geopolimer beton üretim şeması	32
Şekil 4.1. Yüksek fırın cürufu.....	38
Şekil 4.2. Alkali aktivatörler.....	39
Şekil 4.3. Köpük ajanı.....	40
Şekil 4.4. Geopolimer harç.....	44
Şekil 4.5. Köpük solüsyonu üretimi için kullanılan mekanik düzenek ve köpük solüsyonu.....	45
Şekil 4.6. Geopolimer köpük betonların kalıp içerisine döküm işlemi.....	45
Şekil 4.7. Geopolimer köpük beton numunelerinin etüve konulması.....	46
Şekil 4.8. Köpüklü geopolimer harçların taze harç birim ağırlık deneyi.....	47
Şekil 4.9. GPKB numunelerinde kuru birim hacim ağırlıklarının hesaplanması....	48
Şekil 4.10. GPKB numunelerinde kapilarite katsayısının belirlenmesi	49
Şekil 4.11. GPKB'larda su emme ve görünür porozite deneylerinin yapılması.....	50
Şekil 4.12. GPKB numunelerinde basınç dayanımı değerlerinin hesaplanması.....	51
Şekil 4.13. GPKB numunelerinde ultrases geçiş hızının hesaplanması.....	52
Şekil 4.14. Isı iletkenlik katsayısı belirlemede kullanılan cihaz.....	53
Şekil 4.15. Taramalı elektron mikroskobu.....	54
Şekil 5.1. GPKB numunelerine ait taze harç birim hacim ağırlık grafiği.....	55
Şekil 5.2. GPKB numunelerine ait kuru birim hacim ağırlık grafiği.....	56
Şekil 5.3. GPKB numunelerine ait 16 cm ² alandan emilen su miktarı grafiği.....	58
Şekil 5.4. GPKB numunelerine ait kapilarite katsayı grafiği.....	59
Şekil 5.5. GPKB numunelerine ait su emme ve görünür porozite değerleri.....	60
Şekil 5.6. GPKB numunelerine ait basınç dayanım değerlerini.....	61
Şekil 5.7. GPKB numunelerine ait ultrases geçiş hız değerleri.....	62
Şekil 5.8. GPKB numunelerinde basınç dayanım ultrases geçiş hız ilişkisi.....	63

Şekil 5.9. GPKB numunelerine ait ısı iletkenlik katsayı değerleri.....i.....	63
Şekil 5.10. GPKB numunelerinde kuru birim hacim ağırlık ısı iletkenlik katsayı ilişkisi.....	64
Şekil 5.11. GPKB numunelerinde ultrases geçiş hızı ısı iletkenlik katsayı ilişkisi.	65
Şekil 5.12. GPKB numunelerinde SEM görüntülerinde gözenekler ve çatlak oluşumları.....	66
Şekil 5.13. GPKB numunelerinde SEM görüntülerinde jel oluşumu.....	67
Şekil 5.14. K1-60 GPKB numunesine ait XRD difraktogramı.....	68
Şekil 5.15. K2-60 GPKB numunesine ait XRD difraktogramı.....	69
Şekil 5.16. K3-60 GPKB numunesine ait XRD difraktogramı.....	69

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. YFC'lerin ve Portland Çimentonun Kimyasal İçeriği	19
Çizelge 3.2. YFC'lerin betonun özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri.....	20
Çizelge 3.3. Alkali aktivasyonu ile ilgili önemli gelişmelerin tarihçesi.....	22
Çizelge 3.4. Köpük beton yoğunlukları ve kullanım alanları.....	28
Çizelge 3.5. Geopolimer malzemelerin moleküler yapısı ve kullanım alanları....	31
Çizelge 4.1. Yüksek fırın cürufunun kimyasal analiz sonuçları.....	37
Çizelge 4.2. ÖDKO'ları ve yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar-1.....	41
Çizelge 4.3. ÖDKO'ları ve yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar-2.....	42
Çizelge 4.4. GPKB numunelerinin karışım miktarları.....	43
Çizelge 5.1. Numunelere ait 16 cm ² alandan emilen su miktarları.....	57
Çizelge 5.2. Numunelere ait kapilarite katsayısı.....	58

1.GİRİŞ

Ekonomik faaliyetler açısından önemli bir konuma sahip olan inşaat sektörünün küresel ekonomideki payı son birkaç yıla göre %10-12 seviyesindedir. Sektörün Türkiye'deki ekonomik payı dünya ortalamasının bir miktar altında olup %8-9 seviyesindedir. Ayrıca, payı 2025 yılı itibariyle gelişmekte olan ülkelerde %16-17, gelişmiş ülkelerde ise %9-10 seviyelerinde olabileceği tahmin edilmektedir. Bu durumun öngörülmesinde teknolojik gelişmeler, iklim değişiklikleri ve insanların talepleri vb. sebepler rol oynamaktadır. İnsanoğlu yaşamının büyük bir kısmını geçirdiği binaların birçok ihtiyacına ve isteğine cevap verecek şekilde yapılmasını beklemektedir. Bu ihtiyaçlar ve isteklerden biri de ses ve ısı kontrollü binaların oluşturulmasıdır.

Günümüz insanının tüketim alışkanlıklarının değişmesi ile birçok endüstriyel, tarımsal ve çevresel atıklar meydana gelmektedir. Ayrıca, günümüz ürünlerinin üretiminde oldukça yüksek seviyelerde enerji kullanılmaktadır. Enerjinin hem verimli bir şekilde kullanılması hem de yaşanabilir bir çevre alanının azalmasını engellemek amacıyla bu atıkların birçok sektörde geri dönüşüm amacıyla kullanılması, dünyamız için birçok fayda ve avantaj sağlayacaktır. Bu amaçla inşaat sektörünün yapı taşı olan beton üretiminde endüstriyel, tarımsal ve çevresel atıkların kullanımını sağlamak için son yarım asırdır birçok çalışma yapılmış olmakla birlikte çalışmalar hala yapılmaya devam edilmektedir.

Beton, üretiminin başladığı günden günümüze kadar içerisinde bulunan bileşenlerin temin edilebilme kolaylığı ve ekonomik oluşu açısından tüm dünyada inşaat sektöründe kullanım yüzdesi en fazla olan malzemelerin başında gelmektedir (Meyer, 2009). İnsanoğlunun, yaşamı boyunca sudan sonra en fazla kullandığı ikinci malzeme betondur (Luga, 2015; Mehta ve Paulo, 2006). Beton, agrega, su ve bağlayıcı olarak nitelendirilen çimentonun belirli oranlarda birleşimi sonucu oluşmaktadır. İnşaat sektöründe dünya genelinde beton üretimi amacıyla en fazla kullanılan malzeme portland çimentosudur (Luga, 2015; Criado ve ark., 2005). Portland çimento üretimi sırasında atmosfere ciddi miktarlarda karbondioksit (CO₂) salınımı yapılmaktadır. Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), ozon (O₃) vb. gazlar atmosfer içerisinde kızılötesi ışınları tutarak atmosferin ısınmasına neden olan sera gazı oluşturmaktadır. Çimento üretiminde ortaya çıkan CO₂,

atmosferde yaklaşık % 5 oranında sera gazı oluşumuna neden olmaktadır. Son yıllarda çimentosuz beton çalışmaları yaygınlaşmaktadır. Bunlardan en önemlilerinden biri de alkali bir çözeltide aktive edilen silika ve alümina içeren malzemeler kullanılarak beton üretiminde kullanılmasıdır. Alkali ile aktive edilerek elde edilen betonlara 'Geopolimer Beton' adı verilmiştir. Mekanik ve fiziksel özelliklerine göre farklı türlerde geopolimer beton üretimi yapılmaktadır (Posi ve ark., 2015).

Geopolimerin tarihsel gelişim süreci 1980'lerin başlarında Joseph Davidovits tarafından alkalilerin dolomit, kireç taşı ve kaolinitin karıştırılması ile elde edilerek çevre dostu beton olarak sunulmaya başlanmıştır (Sanjayan ve ark., 2015). Alkali aktifleştirme yöntemiyle üretilen geopolimer betonlar, portland çimentosuyla üretilen betonların yerine alternatif bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır.

Geopolimer, uçucu kül, yüksek fırın cürufu (YFC) ve metakoalin gibi serbest silis ve alümin içeren malzemelerin NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri gibi alkali aktivatörlerle aktivasyonu sonucu elde edilen bir malzemedir (Wongkeo ve ark., 2019). Geopolimerizasyon reaksiyonu katı alüminasilikat oksitler (YFC, uçucu kül ve metakoalin) ve alkali metal silikat çözeltileri (NaOH, Na₂SiO₃ vb.) arasında, 20-150 °C aralıkta bulunan sıcaklıkta ve yüksek bazik kondüsyonlarda, Si- O-Si ve Si-O-Al sistemlerini içeren polimerik amorf veya yarı kristalin yapıları kurulmasıyla oluşmaktadır (Yun-ming ve ark., 2016). Ayrıca geopolimer, hızlı bir şekilde basınç dayanımı kazanması, yanmaya karşı direnci, kısa sürede priz alma ve donma-çözölmeye karşı yeterli dirence sahip olması gibi birçok yönden faydalı özelliklere sahip olduğu görölmüştür (Luukkaonen ve ark., 2016).

İnşaat sektöründe beton imalatlarında kullanılan portland çimentolu beton, taşıyıcı özelliği açısından iyi bir malzeme olmasına karşın yüksek birim ağırlığa sahip olması ve ısı ve ses iletkenlik katsayı değerleri istenilen düzeyde olmamasından dolayı duvar malzemesi olarak kullanıma uygun değildir (Serin ve ark., 2007). Portland çimentolu betondaki bu olumsuz özelliklerden dolayı günümüzde hafif beton veya köpük beton olarak adlandırılan beton kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Hafif beton veya köpük beton kum, hafif agrega, su, çimento ve köpük solüsyonu kullanılarak üretilmektedir.

Üretimi yapılan hafif beton veya köpük beton inşaat sektöründe bims, blok ve gaz beton gibi taşıyıcı özelliği bulunmayan duvar malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler portland çimentosu kullanılarak üretilmektedir. Son yıllarda yapılan hafif beton veya köpük beton üretim çalışmalarında YFC ve uçucu kül gibi atık malzemeler, alkalilerle aktive edilerek portland çimentosu yerine kullanılmaktadır. Bu sayede hem portland çimentosu kullanımını azaltılarak hem de atık malzemeler kullanılarak çevre dostu bims, blok ve gaz beton üretimi yapılması hedeflenmektedir.

Dünyada gelişen teknoloji ile birlikte tüketim hızındaki artıştan dolayı şekil 1.1’de verilmiş olan atıklar meydana gelmektedir. Bu atıklar, son birkaç yüzyıldır NaOH ve Na_2SiO_3 gibi alkalilerle aktive edilerek geopolimer harç üretiminde kullanılmaktadır. Üretim esnasında geopolimer harç içerisine belli oranda köpük solüsyonu ilave edilerek üretilen betonlar ‘Geopolimer Köpük Betonu’ adını almaktadır. Geopolimer köpük betonun (GPKB) iyi dayanım özelliklerine sahip olmamasına rağmen ısı ve ses iletkenlik katsayı değerlerinin istenilen düzeyde olması nedeniyle duvar malzemesi olarak kullanılması hedeflenmektedir.



Şekil 1.1. Çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılan farklı sektörlerde meydana gelen atıklar

Bu çalışmada, hem CO_2 salınımı ile oluşan sera gazı etkisini azaltmak hem de insanların alternatifsiz tek yaşam yeri olan dünyada bulunan endüstriyel, tarımsal ve çevresel atıklar kullanarak gelecek nesillere yaşanabilir bir çevre bırakmak hedeflenmiştir. Bu hedefle, çimento yerine bağlayıcı olarak YFC kullanılmıştır. YFC, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkalilerle aktive edilerek geopolimer harç elde edilmiştir. Elde edilen geopolimer harç içerisine köpük ajanı ilave edilerek duvar malzemesi (bims, blok gaz beton vb.) olarak kullanılmak üzere GPKB üretimi amaçlanmıştır. GPKB numuneleri üzerinde kuru birim hacim ağırlık, su emme ve görünür porozite değerleri,

basınç dayanımı, ısı ve ses iletkenlik katsayısı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X ışını floresans (XRF) gibi birçok deneysel çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada altı bölüm bulunmaktadır. İlk bölümde tez konusu ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde yerli ve yabancı kaynaklar incelenerek kaynak taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde GPBK üretiminde kullanılan malzemeler, üretilen benzer beton çeşitleri, kullanılan bağlayıcılar, alkali aktivatörler ve köpük ajanı hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde üretimi yapılan GPBK üretim metotları ve yapılmış olan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde ise yapılmış olan çalışmalar ve laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçlar başlığı altındaki son bölümde de yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bilim (2006); Kullanılan granüle yüksek fırın cürufu OYSA İskenderun Çimento Fabrikası'ndan alınmış olup hazırlanan numunelerde harç ve beton özelliklerinde oluşan etkileri araştırılmıştır. Farklı oranlarda Cüruf ve su/bağlayıcılarla hazırlanmış olan harç ve beton karışımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, NaOH, Na₂CO₃ ve Na₂SiO₃ kullanılarak aktive edilen yüksek fırın cüruf katkılı numunelerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri de araştırılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda, % 40 ve % 60 cüruf bulunan harç numunelerinde aşınma, basınç ve eğilme dayanımları artış gösterirken boşluk oranı ve kapiler su emme katsayılarında kontrol numunesine göre önemli oranda düşüşlerin meydana geldiği anlaşılmıştır. Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş olan yüksek fırın cürufü numunelerde ise en yüksek mekanik dayanımlara ulaşılmıştır. Yapılmış olan testlerin sonucunda alkalilerle aktive edilmiş olan numunelerde kontrol numunelerine göre daha yüksek kuruma rötresi elde edilmiştir. Kuru kür şartlarında kontrol numunelerin cüruf katkılı numunelere göre daha az etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Canbaz (2007); Türkiye'nin farklı bölgelerinde bulunan üç demir çelik fabrikasında atık olarak meydana gelen yüksek fırın cürufunu çimento yerine % 0, % 25, % 50, % 75, % 85, % 90, % 95 % 100 gibi farklı oranlarda kullanılarak harç numuneleri elde edilmiştir. Numune üretiminde NaOH, Na₂CO₃ ve Na₂SiO₃ aktivatör olarak kullanılmıştır. Numunelere standart kür koşullarını uygulanmıştır. Elde edilen numuneler üzerinde eğilme basınç dayanımı, birim ağırlık, rezonans frekansı ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme, asit ve sülfat gibi zararlı ortamlara bırakılan numunelerin dayanımlarına bakılmıştır. Elde edilen numunelerde XRD yardımıyla kimyasal analizleri yapılmıştır. Ayrıca, yüksek fırın cürufu ile üretilen harçların SEM ile mikro yapı fotoğrafları çekilerek içyapısına bakılmıştır. Yapılmış olan deneyler sonucunda NaOH ve Na₂CO₃ en etkili olan aktivatörler olarak belirlenmiştir. Çimento yerine kullanılan yüksek fırın cürufunun oransal olarak % 75-100 arasındaki değer aralığında kullanılması uygun görülmüştür.

Abdullah ve ark. (2012); Uçucu kül bir alkali aktivatör çözeltisi (Na_2SiO_3 ve NaOH karışımı) ile karıştırılmıştır ve GPKB üretmek amacıyla karışıma köpük ajanı ilave edilmiştir. Hazırlanan numunelerin 1., 7. ve 28. günlerde basınç dayanımlarına bakılmıştır. Ayrıca su emme, gözeneklilik, kimyasal bileşim, mikro yapı, XRD ve FTR analizleri üzerine çalışılmıştır. 60°C sıcaklıkta kür uygulamasına tabi tutulan numuneler (LW2) daha sonra maksimum basınç değerlerine bakılıp sırasıyla 11,03 MPa, 17,59 MPa ve 18,19 MPa değerleri elde edilmiştir. LW2'nin su emme ve gözenekliliği oda koşullarında kür uygulamasına maruz bırakılan numunelere (LW1) göre 28. gün sonunda sırasıyla % 6,78 ve % 1,22 daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. SEM görüntülerinde LW2 numunelerinde LW1'den daha yoğun bir ana yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni LW2 numunelerinin ısıyla sertleşmesi ve geopolimerizasyon oranının artmasıdır. LW1 numunelerinin yüzeyinde bulunan mikro çatlaklar basınç dayanımının düşmesine ve su emme ve gözenekliliğin artmasına sebep olmaktadır.

Posi ve ark. (2012); Atık hafif blokları agrega olarak kullanılarak üretilen geopolimer betonun özellikleri araştırılmıştır. Atık hafif blok ezilmiş ve ince, orta ve kaba agregalar olarak sınıflandırılmıştır. Hazırlanan harçlarda çeşitli sıvı alkalin/kül oranlarına, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranlarına, NaOH konsantrasyonları, agrega/kül oranlarına bakılmıştır. Ayrıca birim hacim ağırlık, basınç dayanımları, sertleşme sıcaklıkları, gözeneklilik, su emme ve esneklik modülünü belirleme gibi birçok deney yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kullanılabilirliği ve uygulanabilirliği olan hafif geopolimer bloklar üretilmiştir. Numunelerin 28. gün basınç dayanımları 1,0-16,0 MPa, birim hacim ağırlığı $860-1400 \text{ kg/m}^3$, su emme % 10-31 ve gözeneklilik % 12-34 ve 2,9-9,9 GPa aralığında olan esneklik modülü elde edilmiştir. Sonuç olarak üretilen geopolimer beton duvar ve bölme için kullanılabilir nitelikte olduğu kanısına varılmıştır.

Kupaei ve ark. (2013); Araştırma yapılan bölgede kolayca temin edilebilen iki atık malzemedenden düşük kalsiyum içeren uçucu külü bağlayıcı, palmye ağacı kabuğunu ise agrega olarak kullanılarak geopolimer hafif beton üretilmiştir. Uçucu kül bazlı palmye ağacı kabuğu içeren geopolimer hafif beton (OPSGPC) için uygun bir karışım tasarımı elde etmek amacıyla farklı karışım oranları kullanılarak 32 farklı karışım hazırlanmıştır. Alkali aktivatörü olarak farklı molaritelerde (M) NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı

kullanılmıştır. Uçucu kül oranının artması işlenebilirlik için ilave suya bağlı olarak basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. Aktivatör miktarının 14 M'den 16 M'ye çıkarmak basınç dayanımında istenen düzeyde artış sağlamamıştır. 14 M'de uçucu kül içeriği 480 kg/m³ ve su/FA oranı 0,34 olan OPSGPC'nin 28 günlük basınç dayanımı yaklaşık 32 MPa'dır. Ayrıca OPSGPC'nin birim ağırlığı yaklaşık 2000 kg/m³ olarak bulunmuştur.

Lui ve ark. (2013); Konut sektöründe, binaların yalıtımında yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri de köpüklü betonlardır. Çalışmada, düşük kalsiyumlu uçucu kül ve palmiye ağacı kabuğu yakılarak elde edilen kül gibi çimento benzeri atık malzemeler kullanılarak köpük beton üretimi yapılmıştır. Ayrıca hafif kaba agrega olarak palmiye ağacı kabuğu kullanılmıştır. Kontrol numunesi için geleneksel malzemelerden blok ve tuğla kullanılmıştır. Palmiye ağacı kabuğu ile üretilen GPKB'lerin birim ağırlıkları 1300 kg/m³ ve ısı iletkenlik katsayısı 0,47 W/mK olup kontrol numunesi olan blok ve tuğladan sırasıyla % 22 ve % 48 daha düşük bulunmuştur.

Zhang ve ark. (2014); Günümüzde, GPKB'nin işlevsellik açısından ve enerji tasarrufu gibi birçok nedenden dolayı geliştirilmesi için dünya genelinde ilgi giderek artmaktadır. Bu çalışma GPKB'nin özelliklerinin ve faydalarının daha iyi anlaşılması için yapılmıştır. GPKB'nin yangına karşı göstermiş olduğu direnç de önemlidir. Bu beton teknolojisinin gelişmesi için kullanılan hammaddenin kimyasal yapısının ve geopolimerlerin mikro yapısal gelişiminin daha ayrıntılı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

Özodabaş (2014); Çalışmasında inşaat sektörünün olmazsa olmazı olan beton üretiminde kullanılan çimento miktarını azaltmak amacıyla alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harç numunelerinde kullanılmıştır. CO₂ salınımını ve çevre kirliliğini azaltmak ve yüksek dayanım değerleri elde etmek amaçlanmıştır. Bunlara ek olarak alkali ile elde edilmiş yüksek fırın cürufu harçların en büyük handikap olan kuruma büzülmesi değerini düşürmek ve sülfata karşı dayanıklı beton üretmek hedeflenmiştir. Daha öce yapılmış olan çalışmalardan farklı olarak numunelerde uçucu kül ve ponza kullanılarak sülfata karşı dayanıklılık ve büzülme değeri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mikro yapılarını incelemek amacıyla SEM görüntüleri alınmıştır.

Açıkgöz (2015); Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruf kullanılarak harç numunelerinin hidrasyon sıcaklığı üzerine çalışılmıştır. Çimento türlerinden CEM I ve CEM II portland çimentoları kullanılarak 6 adet kontrol numunesi 18 adet alkali yardımıyla aktive edilen yüksek fırın cürufu numune olmak üzere 24 adet numune hazırlanmıştır. Numunelerde su/bağlayıcı oranı 0,5 olmakla birlikte bağlayıcı dozajları 300, 350 ve 400 kg/m³'tür. Aktivatör olarak NaOH ile NaOH-Na₂SiO₃ karışımı tercih edilmiştir. Hazırlanan numunelerde sodyum (Na⁺) yüzdeleri % 4, % 6 ve % 8 alınmıştır. Her bir numunede basınç dayanımı ve hidrasyon sıcaklığı ölçülmüştür. Yapılan deneylerin sonucunda, hazırlanan karışımlarda bağlayıcı miktarının ve (Na⁺) sodyum yüzdesinin artışı ile basınç dayanımlarından ve hidrasyon sıcaklıklarında artış tespit edilmiştir. NaOH-Na₂SiO₃ karışım olarak kullanılan numunelerde yüksek basınç dayanımları elde edilmesine rağmen hidrasyon sıcaklıkları düşük çıkmıştır. Kontrol numunesi olarak üretilen numunelere göre aktivatör kullanılarak elde edilen yüksek fırın cürufu numunelerin tamamında düşük hidrasyon sıcaklıkları saptanmıştır.

Mahmut (2015); Son yıllarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerin bazı alkalilerle aktive edilerek harç üretimi yapıldığına değinilmiştir. Belirlenmiş aktivasyon sıcaklıkları 40, 65 ve 90 °C olup aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ ile Elazığ ferrokrom cürufunu aktive edilerek numuneler hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken kıvam ve priz süresi deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş olan harç numunelerini belirlemiş olduğu aktivasyon sıcaklıklarında etüvde bekletildikten sonra birim ağırlık, basınç dayanımı, kapiler su emme ve ultra ses iletkenlik deneyleri yapılarak değerler elde edilmiştir.

Zhang ve ark. (2015), GPKB'nin birleşim ve karakteristik yapısını incelemeyi hedeflemişlerdir. GPKB'de bulunan köpük ajanı miktarlarının değiştirilmesi ile 720-1600 kg/m³ arasında yoğunluklar elde etmişlerdir. Basınç dayanımları ise 3-48 MPa arasında değişen değerler almıştır. GPKB'lerin ısı iletkenlik katsayıları, kontrol numunesi olarak hazırlanmış olan portland çimentolu köpük beton numunelerine göre daha iyi sonuçlar vermiş olup 0,15-0,48 W/mK aralığındadır. Ayrıca GPKB numuneleri 40-150 Hz'de 0,7-1,0 ve 800-1600 Hz'de 0,1-0,3 arasında akustik emme katsayıları sergilemiştir.

Sanjayan ve ark. (2015); Bu çalışmada, boşluklu yapı oluşturmak amacıyla alüminyum tozu kullanılarak üretilen hafif geopolimer beton numunelerinin özellikleri incelenmiştir. Geopolimerlerde alüminyum tozu alkali aktivatör arasında reaksiyonlar sonucunda yüksek gözenekli yapılar elde edilmiştir. Sodyum silikatın soydum hidroksite oranı ile alkali aktivatörün uçucu küle oranına göre farklı numuneler yapılmıştır. Tüm gözenekli numunelerin basınç mukavemeti, tuğla, ateşe dayanıklı paneller ve gömülü boru hattı vb. olarak kullanımına uygun olup 0,9-4,35 MPa aralığındadır. Ayrıca numunelerin mikro yapısını incelemek amacıyla SEM analizi de yapılmıştır. Çok fazla alüminyum tozu ile köpürtülen numunelerde, köpüklenme reaksiyonunun çok hızlı olması geopolimerlerin tamamen aktivasyonunu önlediği ve bu nedenle reaksiyona girmemiş birçok uçucu kül parçacığının kaldığı görülmüştür.

Posi ve ark. (2015); Geri dönüştürülmüş ambalaj köpüğü içeren hafif geopolimer betonların özellikleri araştırılmıştır. Geri dönüştürülen ambalaj köpüğü 2,35-4,74 mm boyutlarında olacak şekilde öğütülüp hafif agrega olarak kullanılmıştır. Sıvı alkalin/kül oranları 0,5-1,0 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranları 0,33-3,0 köpük içeriği % 0,85-1,05 aralığında alınıp 60 °C sıcaklıkta kür uygulamasına maruz bırakılıp birim hacim ağırlıklarına ve basınç dayanımlarına bakılmıştır. Ayrıca geopolimer beton numunelerin ısı iletkenlik katsayıları da ölçülmüştür. Sonuç olarak 1000-1300 kg/m^3 aralığında birim hacim ağırlığa sahip uygun mukavemetli ve düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip hafif jeopolimer blokların yapılabileceği öngörülmüştür.

Wongsa ve ark. (2016); Kömür yakıtlı termik santrallerde oluşan atıkları değerlendirmek amacıyla, geopolimer bağlayıcı olarak uçucu kül ve agrega olarak taban külü kullanılarak üretilen hafif geopolimer betonun özellikleri incelenmiştir. Aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH kullanılmıştır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı olarak 0.5, 1.0, ve 1.5 ve sıvı/uçucu kül oranları 0.70, 0.75, 0.80 alınmıştır. Elde edilen numunelerde birim ağırlık, basınç dayanımı, çekme dayanımı, aşınma, ısı iletkenlik katsayısı ve ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda, uçucu külün ve taban külünün basınç dayanımlarının 14,3-18,1 MPa, gerilme dayanımlarının 1,2-2,0 MPa ve birim hacim ağırlıklarının 1661-1688 kg/m^3 aralığında değerler aldığı saptanmıştır. Isı iletkenlik katsayıları ise 0,43-0,47 W/mK aralığında olmakla birlikte doğal agrega içeren

geopolimer betondan daha düşüktür. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimer bağlayıcı olarak uçucu kül ve agrega olarak taban külü kullanılarak üretilen hafif geopolimer betonlar orta dayanımlı beton sınıfında olduğu düşünülebileceği ve ısı yalıtım betonu olarak kullanılabileceği kanısına varılmıştır.

Ulu (2016); Sodyum hidroksit ve sıvı halde olan sodyum silikat karışımını aktivatör olarak kullanılarak alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu (AA-YFC) harçlar ile yüksek fırın cürufu-metakaolin (AA-YFC-MK) karışımli harçlar hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlarda agrega olarak atık pet şişe kırıklarını kullanılmıştır. Atık pet şişe kırıkları, öğütülmemiş yüksek fırın cürufu birlikte agrega olarak hacimce % 20, % 40, % 60, % 80 ve % 100 gibi yüzlerde yer değiştirilerek numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen numuneler için basınç ve eğilme dayanımları, birim hacim ağırlık, su emme oranı, boşluk oranı ve ultra ses geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklıktaki dayanımlarını incelemek amacıyla cüruf agregalı numuneler belirli sıcaklıklarda (200, 400, 600, 800 ve 1000 °C) etüvde bekletilmiştir. Yüksek sıcaklığa tabi tutulan numunelerde 800 °C'ye kadar basınç dayanımları azalmasına rağmen 1000 °C'deki dayanımlar da ise tekrar bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca Pet agrega miktarı yüzdesi % 60 ve % 80 olan AA-YFC'li numunelerde yapılan deneyler sonucunda birim ağırlık ve basınç dayanımları taşıyıcı hafif beton değerlerini kapsayan sınırlar içerisinde çıkmıştır. Yapılan deneyler sonucunda atık PET şişe kırıkları cüruf agregalı harçlarda agrega yerine kullanılabilir kanısına varılmıştır.

Posi ve ark. (2016); Geri dönüştürülmüş hafif beton agregası (RLCA) içeren hafif uçucu küllü basit portland çimentolu geopolimer beton numunelerinin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı incelenmiştir. Geopolimer çimento, yüksek kalsiyum içeren uçucu kül ve basit portland çimentosu ile NaOH ve Na₂SiO₃ karışımından üretilmiştir. Uçucu kül ağırlıkça % 0, 5, 10, ve 15 oranlarında portland çimento yerine kullanılmıştır. Sonuçları 1200-1500 kg/m³ arasında birim ağırlıklara sahip hafif jeopolimer betonların 4,5-17,5 MPa arasında 28 günlük basınç dayanımları elde edilmiştir. RLCA'nın numunelere eklenmesi hafif betonun hem birim ağırlığını hem de basınç dayanımını azaltmıştır. Basit portland çimentosunun eklenmesi geopolimer basınç dayanımını arttırmıştır. Fakat aynı zamanda birim ağırlığın artmasına sebep olmuştur.

Dakman (2017); Çalışmasında farklı oranlarda köpük ajanı kullanarak hazırlamış olduğu köpük beton numunelerine yüksek sıcaklık uygulayarak dayanım olarak en iyi değere ulaşmayı amaçlamıştır. Hazırlanan numuneler 28 gün kür havuzunda tutularak 20 °C, 100 °C, 400 °C ve 700 °C olarak belirlenmiş sıcaklıklarda 3 saat bekletilmiştir. Belirlenen sıcaklıklarda bekletilen numuneler 1 gün (24 saat) soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin birim ağırlıkları, basınç dayanımları ve ultra ses geçiş süreleri hesaplanmıştır. Daha sonra EXD analizi ve SEM ile mikro yapıları incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda, köpük solüsyonu oranı arttıkça basınç dayanımının, ultra ses geçiş hızının ve elastisite modülünün azaldığı gözlemlenmiştir. 100 °C'ye kadar sıcaklığa maruz kalan numunelerde büzülmeden kaynaklı hacimsel küçülmeler meydana gelirken, 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mikro çatlaklar oluşumu nedeniyle boşluk hacimde artış olduğu anlaşılmıştır.

Ören (2017); Çimento dozajı ile yüksek fırın cürufunu farklı oranlarda kullanılarak köpük beton numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere fiziksel ve mekanik deneyler uygulanmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin birim hacim ağırlıkları 926–1132 kg/m³, basınç dayanımları 1–1.62 MPa ve ısı iletkenlik katsayıları 0.208 –0.264 W/mK aralığında tespit edilmiştir. Köpük beton üretiminde, çimento dozajında artışa gerek görülmediği ve kum yerine yüksek fırın cürufu kullanılması uygun bulunmuştur.

Tuzlak (2017); Agreganın miktarı ve dane boyutları sabit bırakılarak su/çimento oranında, köpük ajanı ve çimento miktarında değişiklik yapılarak köpük beton üretilmiştir. Üretilen numunelerde, numunelerin reolojisini, dayanım ve ısı iletkenliği özellikleri incelenmiştir. Dayanım ve ısı iletkenlik deneyleri sonucunda elde edilen değerlerin birim hacim ağırlıkla ilişkili olduğu ve numunelerin reoloji özelliklerinin Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu saptanmıştır.

Atabey (2018); Mermer tozu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi sanayi atıklarını hammadde olarak kullanılarak köpük beton blokları üretilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 R tipi portland çimento ve polipropilen elyafını da çimento bağlayıcının % 0.5'ine denk gelecek şekilde kullanmıştır. Köpük beton bloklarının

üretimi sırasında ön köpük metodu tercih edilmiştir. Köpük yoğunluk ölçümlerini köpük makinesinde ürettikten sonra karışıma ilave edilmiştir. Karışımda bulunan tüm bileşenler karışıma eklendikten sonra mekanik yöntemler uygulanarak karışım hazırlanmıştır. 15x15x15 cm boyutlarındaki kalıplar kullanılarak numuneler elde edilmiştir. Numunelerin ısı iletkenlik değerleri 0.14 – 0.20 W/mK arasında elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin ticari amaçla hazırlanan gaz betonlarla aynı olduğu saptanmıştır. Mermer tozu kullanılıp hazırlanan numunelerde rötre değerleri % 0.09 iken rötre değerinin maksimum olduğu değer filler olarak tamamen uçucu kül kullanılan numunelerde olup % 0.11 değeri elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri ise 1.60 MPa – 4.35 MPa arasında bir değer almaktadır.

Wongsa ve ark. (2018); Kırılmış kil tuğla ve pomza agregaları kullanılan hafif geopolimer betonun (LWGC) özellikleri incelenmiştir. Geopolimer bağlayıcı olarak Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltileri ile aktive edilen içerisinde kalsiyum oranı yüksek olan uçucu kül kullanılmıştır. Birim hacim ağırlık, işlenebilirlik, basınç dayanımı, gerilme mukavemeti, yüzey aşınma direnci, ısı iletkenlik, ultrasonik darbe hızı ve yangın dayanımı dahil olmak üzere LGWC'lerin özellikleri araştırılmış ve kontrol numunesi olarak normal geopolimer betonun özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Yangın dayanıklılığını test etmek için numunelere 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklık uygulanmıştır. Ezilmiş kil tuğla ve pomza içeren LWGC'ler doğal agrega içeren geopolimer betonlara kıyasla daha iyi ısı yalıtım ve yangına dayanıklılık performansı sergilemiştir. Ezilmiş kül tuğla agregası ile üretilen LWGC'ler hafif geopolimer beton üretimi için uygun sonuçlar sergilemiştir. Pomza agregası ile üretilen LWGC'lerin basınç dayanımı büyük ölçüde düşük ancak beton blok üretimi için kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Singh (2018); Portland çimentosuna bir alternatif olarak son yıllarda geopolimer çimentolar kullanılarak daha sürdürülebilir ve dayanıklı betonlar üretilmek amaçlanmıştır. Bu çalışmada, geopolimer beton köpüklerin sentezi ve karakteristik yapısı incelenmiştir. GPKB'nin birim ağırlık, basınç dayanımları, morfolojisi, ısı iletkenliği, gözenek boyutu, akustik özellikleri ve ısı iletkenliği tarif edilmiştir. Ayrıca fosfat esaslı geopolimer özellikleri tartışılmıştır.

Bingöl (2018); Granüle yüksek fırın cürüflü geopolimer harç hazırlamak amacıyla aktivatörlerden sodyum meta silikat kullanılarak mekanik ve durabilite özelliklerine bakılmıştır. Yapılan deneylerde soydum (Na^+) oranları % 4, % 8 ve % 12 gibi değerler alınmıştır. Üretilen harçlar 24 saat etüvde 75 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Durabilite deneylerini uygulamak amacıyla numuneler 28 gün su içerisinde 28 gün havada kür uygulamasına bırakılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen numunelere birim ağırlık, kılcal su emme, ıslanma ve kuruma, yüksek sıcaklık, rötre, aşınma, asit ve baz etkisi, karbonlaşma, hızlı klor geçirimsizliği ve işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu kullanılarak kontrol numunesi hazırlanmıştır. Sonuç olarak kontrol numunelerine göre yüksek fırın cürüflü geopolimer numunelerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çaçur (2019); Hücreli hafif betonun yalıtım malzemesi olarak kullanılması için birim hacim ağırlığı düşük seviyelere indirgeyip yalıtım malzemesi olarak en ideal malzeme özelliklerinin kazandırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda birim hacim ağırlık, basınç ve çekme dayanım, ultrasonik ses ve ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlığı en düşük olan numunelerde ısı iletkenlik değeri 0.0398mW/mK ölçülmüş olup bu değer en düşük ısı iletkenlik değeri olduğu saptanmıştır. Basınç dayanımları 0.25-4.66 MPa aralığında değerler alınırken çekme dayanımının en büyük değeri 0.921 MPa'dır. Ultrasonik ses deneylerinde ise birim hacim ağırlıkları düşük olan numunelerde genellikle ses iletimlerinde de düşük değerlere ulaşılmıştır. Su emme deneyleri sonucunda ise yüzdeleri % 37.19 - % 199.20 aralığında bulunmuştur. Donma çözünme testinde su emme yüzdesi düşük olan numunelerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Wongkeo ve ark. (2019); Bu çalışmada geopolimer, uçucu kül, NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılarak oluşturulmuştur. Alüminyum tozu hafif beton üretiminde kabarcık oluşturmak için kullanılmıştır. Basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme ve ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. İlk olarak NaOH konsantrasyonu geopolimer hafif beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Birim hacim ağırlıkları 633-763 kg/m^3 , su emme değerleri % 21-31 aralığında, maksimum basınç mukavemeti 1,7 MPa ve ısı iletkenlik katsayısı olarak bulunmuştur. İkinci çalışmada Na_2SiO_3 'nun NaOH'a oranı 1, 1.5, ve 2 olduğu geopolimer hafif beton özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Maksimum

basınç mukavemeti 4,4 MPa, birim hacim ağırlık 1,428 kg/m³, su emme değerleri % 16-18 aralığında ve son olarak ısı iletkenlik katsayısı 0,15-0,31 W/mK aralığında elde edilmiştir. Sonuç olarak NaOH ile birlikte kullanılan Na₂SiO₃ 'ten elde edilen geopolimer betonun basınç mukavemeti ile birim hacim ağırlığında artış görülürken, su emme değerleri ve ısı iletkenlik katsayılarının azaldığı görülmüştür.



3. GENEL BİLGİLER

Günümüzde atık malzemelerin geri dönüşümünü sağlamak ve yaşanabilir çevre oluşturmak amacıyla dünya genelinde sayısız çalışma ve kampanya yapılmaktadır. Atık malzemeleri geri dönüşümde kullanmak ve sürdürülebilir çevre oluşturmak amacıyla birçok alanda olduğu gibi inşaat sektöründe de ciddi ölçüde çalışmalar ve kampanyalar yapılmaktadır.

İnşaat endüstrisinin temel yapı malzemelerinden biri çimentodur. Çimento üretiminde doğaya yüksek oranda CO₂ salınımı yapılmaktadır (Singh, 2018). CO₂ salınımı sonucunda asit yağmurları oluşmaktadır. Asit yağmurları ise dünyaya büyük zararlar vermektedir. Çimento üretimini azaltmak ve çimento yerine bağlayıcı özelliği olan atık malzemeler kullanarak doğaya verilecek zararı minimuma indirmek için yapılan çalışmalar son yıllarda giderek artmaktadır. Çimento kullanımı olmadan ve atık malzemeler kullanılarak üretilen inşaat malzemelerinden biri de betondur. İşlenebilirlik, dayanıklılık, ekonomiklik, iyi ses ve ısı yalıtımı gibi birçok farklı özelliğe sahip çeşitli beton üretimleri yapılmaktadır. GPKB'larda son yıllarda üretilen beton giderek artan bir beton türüdür. Uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu gibi alüminasilikat kaynaklı geopolimerlerin alkalınlarla reaksiyonu ve köpük ajanı ilave edilmesi sonucunda GPKB elde edilir. Bu çalışmada üretilen GPKB'da YFC, alkalın (NaOH ve Na₂SiO₃), ve köpük ajanı kullanılmıştır.

3.1 Yüksek Fırın Cürufu

Ham demir ve bazı metallerin üretimi sırasında elde edilen ana ürünün yanında, atık olarak bazı ürünler oluşmakta; oluşan bu atık ürünler topluma ve çevreye birçok sorun teşkil etmektedir. Fakat günümüzde bu malzemelerin özelliklerine bakılarak tamamen veya belli miktarlarda inşaat endüstrisinde kullanılabilmesi öngörülmektedir (Bilim, 2006). Birçok muhtelif metal üretim tesislerinde yan ürün olarak meydana gelen cüruf, ham demir üretiminde atık madde olarak ortaya çıkmaktadır. Cüruflar, üretimi yapılan ana ürünün tipine ve üretim tekniğine göre fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından değişiklik gösterebilmektedir. Örnek olarak, demir cürufları kendi başlarına bağlayıcılık

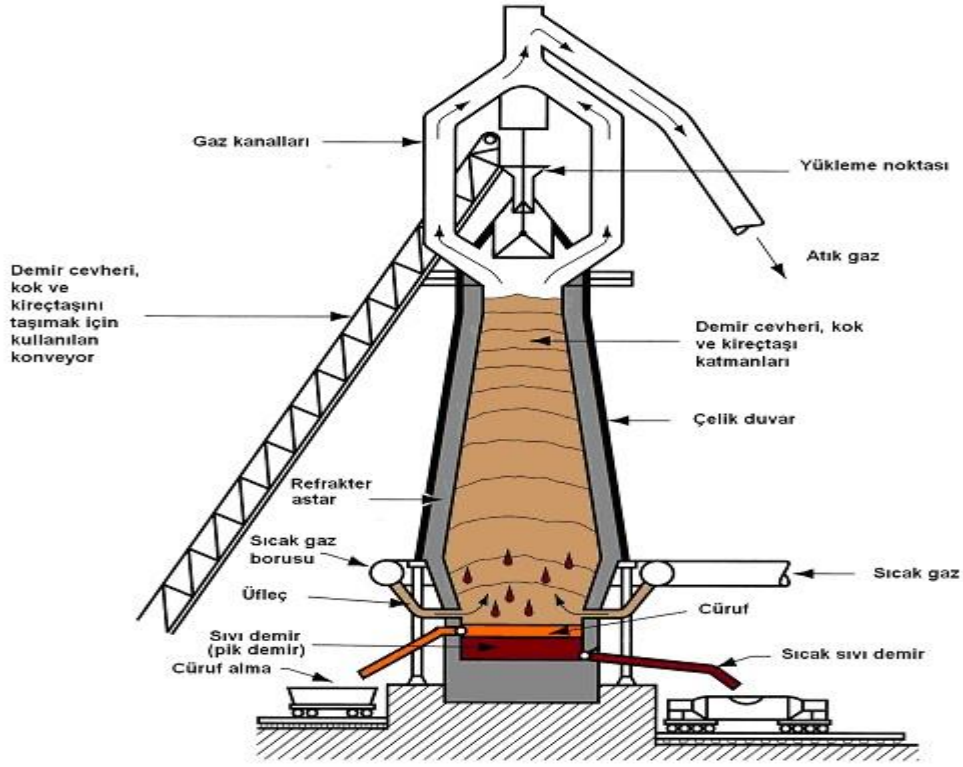
özelliğine sahiptir. Fakat nikel ve bakır cürufları yalnız puzolanik özellik göstermektedir (Bilim, 2006; Tokyay, 2003).

Lariot tarafından 1974 yılında öğütölmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ile söndürölmüş kirecin birleştirilmesi ile hazırlanan karışımın üzerinde yapmış olduğu çalışmalar neticesinde ÖYFC'nin bağlayıcı özelliklere sahip malzeme olarak kullanılabilceği görölmüştür. Emil Langen tarafından 1862 yılında Almanya'da ise ÖGYC'nin hidrolik bağlayıcı özelliği keşfedilmiştir. Portland çimentosu klinkerinin granüle yüksek fırın cürufu ile beraber öğütölmesi ile elde edilen portland -yüksek fırın cürufu çimentosunun üretimine Almanya'da 1892 yılında başlanmıştır (Bilim, 2006; Erdoğan, 1995; Tokyay, 2003).

Cürufların beton ve çimento sektöründe birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Klasik çelik üretimin teknikleri kullanılarak elde edilen cüruflar, kristal yapıya sahip olduklarından bağlayıcı olarak kullanılmamakta fakat beton içerisinde agrega ve yol yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Modern çelik üretimi yapan tesislerde elde edilen cüruflar ise camsı(amorf) yapıda oldukları için çimentolu sistemlerde kullanılabilirler. Yüksek fırın cürufları, tüm cüruflar içerisinde en çok kullanım alanına sahip olan cüruflardır (Bilim, 2006).

3.1.1. Yüksek fırın cürufunun üretimi

YFC'ler yüksek fırınların demir üretimi esnasında elde edilen endüstriyel atık ürünleridir. Demir cevherleri, hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) ve siderit ($FeCO_3$) gibi demir oksit bileşenlerle birlikte çok az miktarda alimüm silis, kükürt, fosfor, mangan ve kil gibi yabancı maddeler de yapılarında bulunmaktadır (Bilim, 2006; Doğulu, 1998). Cevher içeriğinde bulunan demirin eldesi için cevherin içerisindeki yabancı maddelerin cevherden arındırılması gerekmektedir. Demir oksitlerin ise ayrıştırılarak içerisinde bulunan oksijen de uzaklaştırılmalıdır. Bu yüzden demir cevherleri yüksek fırın adı verilen fırınlar kullanılarak yüksek sıcaklıkta ısıtılıp eritilmektedir. Şekil 3.1'de YFC'nin üretim sürecinin şematik olarak gösterimi yapılmıştır (Bilim, 2006).



Şekil 3.1. YFC'in oluşum şeması (Gençoğlu, 2013)

Kok kömürü yüksek fırınlarda en fazla kullanılan yakıttır. Demir cevherinin bünyesinde bulunan yabancı maddelerin arındırılması için bir miktar kalker taşı da cevherler birlikte üst taraftan fırın içerisine konulmaktadır. Kok kömürünün içerisindeki karbon, cevherin bünyesindeki demir oksitini oksijeniyle kimyasal tepkimeye girerek karbondioksit ve karbon monoksit halini alarak fırından uzaklaşmaktadır. Bu işlem sonucunda geriye eriyik haldeki demir ile beraber kireç, kok kömür külü, silis, alümin, karbon, mangan, fosfor ve sülfür gibi malzeme topluluğu kalmaktadır. Bu malzeme topluluğu 'cüruf' adını almaktadır. Yoğunluklarının farklı olmasından dolayı demir ve cüruf yüksek fırından ayrı noktalardan dışarı çıkmaktadırlar (Bilim, 2006).

Yüksek fırın içerisinden çıkarılan cüruf yaklaşık olarak 1400-1600 °C arasında bir sıcaklığa sahip olduğu için soğutulmalıdır. Soğutma işlemlerine göre cüruf farklı özellikler kazanmaktadır. Granülasyon ve peletleme (hava granülasyonu) olmak üzere iki farklı metot uygulanarak cüruf uygun bir forma getirilir ve bağlayıcı malzeme olarak kullanılır (Bilim,2006; Newman ve Choo, 2003).

Granülasyon metodunda erimiş halde bulunan cüruf soğutulması için yüksek basınçlı su fiskiyelerinin içinden geçerek amorf (camsı) yapıya sahip ve hidrolik özellikte granüle bir malzeme elde edilir. Bu yöntemde 1 ton granüle YFC elde etmek için 10 ton su harcanmaktadır. Yapılan işlem sonucunda cüruf içerisinde yaklaşık %30 oranında su bulunmaktadır (Bilim, 2006).

Peletleme metodunda ise eriyik halde bulunan cüruf vibrasyon plakasının üzerine dökülmektedir. Vibrasyon üzerine dökülen cüruf üzerine su püskürtülüp soğutulmaktadır. Daha sonra yaklaşık 1 m çapında ve yüzgece benzer çıkıntılı olan bir tambura aktarılmaktadır. Tambur aracılığıyla havaya fırlatılan cüruf, havada ani soğuma ile granülasyon elde edilmektedir. 1 m³ su kullanılarak 1 ton cüruf işlem görmektedir. Yapılan işlem sonucunda cüruf % 10'dan daha az su içermektedir (Bilim, 2006).

Yüksek camsı yapıya sahip cüruf üretiminde kullanılan en etkili yöntem granülasyon metodudur. Fakat maliyet açısından peletleme yöntemine göre 6 kat daha fazla maliyetli olması dolayısıyla granülasyon yönteminin kullanımına sınırlama getirilmektedir (Bilim, 2006; Regaurd, 1986).

Granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (GÖYFC) hidrolik bağlayıcılığı, çok ince öğütüldüğünde yükseleceğinden, portland çimentosundan daha ince olacak şekilde en az 400 m²/kg inceliğe kadar öğütülmelidir (Bilim 2006; Newman ve Choo, 2003).

3.1.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

YFC'ler kimyasal yapısı yüksek fırının şartlarına ve ham maddelerin kaynağına göre farklılık gösterebilmektedir (Newman ve Choo, 2003). Yapısında silika, alümin ve kireç olmakla birlikte çok az miktarda demir (Fe), magnezyum (Mg), kükürt (S), bulunmaktadır. Farklı ülkelerde üretimi yapılan YFC'lerin kimyasal içeriği portland çimentosunun içeriği ile karşılaştırılarak Çizelge 3.1'de verilmiştir (Onat, 1998). Ülkemizde YFC üretimi yapılan tesisler demir çelik fabrikaları olan Ereğli (Zonguldak), Karabük, İskenderun (Hatay)'dur.

Çizelge 3.1. YFC'lerin ve Portland Çimentonun Kimyasal İçeriği (Onat, 1998)

İçerdiği Maddeler	Ülkelere Göre YFC'nin Kimyasal İçeriği				Portland Çimentosu
	ABD & Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	
<i>CaO</i>	29-50	30-40	38-48	34-41	60-67
<i>SiO₂</i>	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
<i>Al₂O₃</i>	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
<i>Fe₂O₃</i>	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6.0
<i>MgO</i>	0-19	8-21	1-3	3.5-7	0.1-0.4
<i>MnO</i>	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5	-
<i>S</i>	0-2.0	1-1.6	0.6-0.8	1-2	-
<i>SO₃</i>	-	-	-	-	1-3

YFC'lerin içerisinde portland çimentosuna nazaran daha az miktarda CaO bulunmaktadır. Ancak YFC'lerin SiO₂ ve Al₂O₃ miktarları portland çimentosuna kıyasla daha fazladır. Portland çimentosunun yoğunluğunun YFC'ye göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. YFC'ler yüksek miktarda SiO₂ içerdiği için portland çimentosundan daha zor öğütülme işlemi görmektedir (Engin, 2019)

3.1.3. Yüksek fırın cürufunun aktivitesi ve bağlayıcı özellikleri

YFC'ler su ile karıştırıldığında az bir miktar bağlayıcı özellik göstermektedir. Fakat YFC'ler sadece su ile gerçekleştirmiş olduğu reaksiyonlar, portland çimentolarının hidratasyonuna göre daha yavaş reaksiyon gerçekleştirdiğinden YFC'lerin bu şekilde kullanımları çok fazla yaygın değildir (Tokyay, 2003; Bilim, 2006).

Yapılan birçok çalışmada üretilen çimentosuz harçlarda YFC ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkları aktivatör yardımıyla bağlayıcı özellik kazandırılmaktadır. YFC'lerin aktivasyonu için kullanılan aktivatörleri iki farklı tür olarak gruplamak mümkündür;

1. Alkaliler (Soda, Kireç, Na₂CO₃, Na₂SiO₃, NaOH vb.)
2. Sülfatlar (Alçı, Anhidrid, Fosfojip vb.)

Verilen iki grup malzemelerde YFC'lerin hidratasyon ürünlerinin eldesini hızlandırarak reaksiyon sonrası ortam pH seviyesini yükseltirler ancak pH seviyesi kritik bir değere yükseldiğinde, cürufun camısı(amorf) yapısı bozulup reaktivite gerçekleşerek cürufun jellerini üreten suyla reaksiyon vermeye başlar (Bilim, 2006; Newman ve Choo 2003).

Yüksek fırın cürufunun aktivitesi ve bağlayıcı özelliklerini etkileyen faktörler

YFC'lerin aktivitesini ve bağlayıcı özelliklerini etkileyen faktörler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- a) Cürufun kimyasal yapısı
- b) Cürufun inceliği
- c) Ortam sıcaklığı
- d) Reaksiyona giren alkali aktivatörün konsantrasyonu
- e) Cürufun camısı(amorf) yapısı

YFC'lerin betonun özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri Çizelge 3.2'de verilmiştir. (Özodabaş, 2009)

Çizelge 3.2. YFC'lerin betonun özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri

Olumlu Etkileri	Olumsuz Etkileri
Betonun priz süresinin uzamasını sağlar.	Betonda ilk günlerde dayanım kazanma hızını yavaşlatır.
Betonun işlenebilirliğini artırır.	Betonun soğuk havalarda priz süresinin uzamasına neden olur.
Betondaki terlemeyi azaltır.	Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek amacıyla daha fazla hava sürükleyici katkı malzemesi kullanılmasına neden olur.
Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini artırır.	
Sertleşmiş betonun sülfata karşı dayanıklılığını artırır.	

3.1.4. Yüksek fırın cürufunun inşaat sektöründe kullanım alanları

YFC'ler atık bir malzeme olmasına rağmen inşaat sektöründe birçok özellik açısından iyi sınırlara sahip olan malzemelerdir. Durağanlık, işlenebilirlik, geçirimsizlik, yüksek dayanım, ısı ve ses yalıtkanlığı ve hafiflik gibi özellikleri sağlamak amacıyla birçok alanda kullanılmaktadır.

YFC'nin inşaat sektöründe kullanım alanları maddeler halinde aşağıda verilmiştir;

- a) Hafif beton agregası olarak
- b) Yol malzemesi ve asfalt beton agregası olarak
- c) Katkılı çimento ve beton üretiminde
- d) Briket ve tuğla üretiminde
- e) Yalıtım malzemesi üretiminde
- f) Cam ve seramik üretiminde kullanılmaktadır.

3.2. Alkali Aktivatörler

Beton üretiminde kullanılan portland çimentoların üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ miktarını azaltmak amacıyla son yıllarda çimentosuz veya tarımsal ve endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyon işlemine tabi tutularak çimento yerine kullanılarak beton üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmalarda en fazla rağbet gören malzemeler uçucu kül ve YFC gibi endüstriyel atıklardır. Bu atıklar alkali aktivatörlerle aktive edilerek çimento yerine kullanımı amaçlanmıştır.

YFC'leri alkalilerle aktive ederek ilk çalışmalar 1908 yılında Kühl tarafından yapılmıştır. Kühl, YFC ve kireci sülfat ve Na₂CO₃ gibi alkalilerle aktive edebileceğini savunmuştur. (Çolak, 2018). Bu aktivatörleri kullanarak bağlayıcılık özelliğinin hızlandırabileceğini söylemiştir. Purdon, alkalilerin aktivasyonu üzerine 1940 yılında yapmış olduğu çalışmalarla alkalilerin bağlayıcılık özelliğini daha da geliştirmiştir (Çolak, 2018). Alkali aktivasyonu ile ilgili önemli gelişmelerin tarihçesi Çizelge 3.3'te verilmiştir. (Sağlık, 2009; Arsoy, 2019)

Çizelge 3.3. Alkali aktivasyonu ile ilgili önemli gelişmelerin tarihçesi

Tarih	Yazar	Gelişme
1939	Feret	Çimentoda cüruf kullanımı
1940	Purdon	Alkali-cüruf birleşiminin kullanımı
1959	Glukhovsky	Alkalın çimentoların teorik esasları ve gelişimi
1965	Glukhovsky	“Alkalın çimentolar” adının ilk kullanımı
1979	Davidovits	“Geopolimer” adının ilk kullanımı
1989	Talling ve Brandsstetr	Cürufun alkali aktivasyonu
1990	Wu ve diğer.	Cüruf çimentoların aktivasyonu
1991	Roy ve diğer.	Hızlı priz alan alkali-aktif bağlayıcıların geliştirilmesi
1993	Roy ve Malek	Cüruf çimentosu
1995	Wang ve Scrivener	Alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapı incelemeleri
1996	Shi	Alkalilerle aktive edilmiş cürufların dayanımı, geçirimsizliği ve boşluk yapısı
1998	Katz	Alkali aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapısı
2000	Puertas	Alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül- cüruf çimentosu
2001-2002	Bakharev	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf beton
2004	Grutzeck	Zeolit oluşumu
2008	Hajimohammadi ve diğer.	Geopolimerlerin tek başına kullanılması
2009	Provis ve Van Deventer	Geopolimerlerin yapısı, üretimi, özellikleri ve uygulama alanları

Aktivatör kullanılarak bağlayıcılık özelliği kazandırılan malzemeler birçok farklı uygulama alanına sahiptir. Bu uygulama alanları maddeler halinde aşağıda verilmiştir (Caijun ve ark., 2006; Odabaş, 2018);

- a) Yapısal betonlarda
- b) Duvar bloklarda
- c) Beton kaldırımlarda
- d) Beton büz yapımında
- e) Elektrik direklerinin üretiminde
- f) Isıya dayanıklı betonlarda
- g) Petrol kuyuların yapımında
- h) Tehlikeli ve radyoaktif atıkların stabilizasyonu gerektiren betonlarda
- i) Sulama sistemleri ve dalga kırın yapımında
- j) Prefabrik ve yerinde bina inşaatlarında
- k) Döşemeler ve temellerde

Yapılmış olan önceki çalışmalarda alkaliler aktive edilerek kullanılmış olan puzolanlar (Pacheco ve ark., 2008; Odabaş, 2018);

- a) Kaolin kili
- b) Metakaolin
- c) Uçucu küller
- d) Yüksek fırın cürufu
- e) Metakaolin ve uçucu kül
- f) Metakaolin ve yüksek fırın cürufu
- g) Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül
- h) Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı
- i) Yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur
- j) Uçucu kül ve kırmızı çamur
- k) Zeolit

Çalışmalarda kullanılan aktivatörler; sodyum hidroksit, sodyum sülfat, sodyum silikat ve potasyum hidroksit'tir.

3.2.1. Sodyum hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit 'kostik soda' olarak bilinmektedir. Sodyum hidroksit, OH- iyonundan faydalanmak amacıyla yaygın olarak kullanılan alkali aktivatörlerden birisidir. Geopolimer harç özelliklerinin belirlenmesinde sodyum hidroksitin derişimi(molaritesi) önemlidir. Sodyum hidroksitin yüksek konsantrasyonları kimyasal çözünmeyi hızlandırırken, bağlayıcı oluşumunda etrenjit ve C-S-H oluşumunu sağlamaktadır. Çok yüksek konsantrasyona sahip NaOH, yüksek dayanıma sahip geopolimer malzeme elde edilmesine yardımcı olur. Fakat çözeltinin içerisinde OH- iyonlarının fazlalığı nedeniyle elde edilen geopolimer malzeme uniform olmayan morfolojisinden kaynaklı dayanım açısından olumsuzluklar meydana getirebilmektedir (Khale ve Chaudhary 2007; Köker, 2019). Aşırı miktarda sülfat ve NaOH kullanımı ile aktivasyonu yapılmış olan geopolimerlerin, asit içeren ortamlarda stabilitesini koruduğu ve kristal yapısının da geliştiği görülmüştür (Criado ve ark., 2007; Köker, 2019).

3.2.2. Potasyum hidroksit (KOH)

Potasyum hidroksit, suda ısı açığa çıkararak çözünen ve beyaz renkte katı halde bulunan alkalik bir bazdır. Arap sabunu üretiminde, tarımsal gübre üretiminde ve pillerde elektrolit olarak kullanılmaktadır.

Geopolimer malzemelerde, NaOH yerine KOH'un deneysel çalışmalarda kullanımı ile alkali metal katyonunun geopolimer üzerindeki etkileri incelemek amaçlanmıştır. KOH içerisine bulunan katyon iyonları, hammaddelerin çözünmesinde kullanılır ve meydana gelen ürünlerin özelliklerine etki etmektedir (Xu ve Van Deventer, 2000; Duxson ve ark., 2007; Köker, 2019).

KOH/uçucu veya KOH/metakaolin karışımlarından oluşan kristal yapılar, NaOH/uçucu kül ve NaOH/metakaolin karışımlarından oluşmuş kristal yapılara göre daha yavaş bir oluşuma sahiptirler (Provis, 2009; Köker, 2019).

3.2.3. Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

Na_2SiO_3 , ‘cam suyu’ olarak bilinen bir alkali aktivatördür. Silis kumu (SiO_2) ile Na_2CO_3 ’ın 1100 °C sıcaklığa kaynatılarak yarı viskoz sıvı hale getirildikten sonra yüksek basınçlı buhar ile çözülmesi sonucu elde edilmektedir (Fernandez ve ark., 2005; Köker, 2019). Na_2SiO_3 bünyesinde yeterli miktarda OH^- iyonuna sahip olmadığı için yalnız başına aktivatör kullanımı nadirdir. Tepkimeyi başlatmak ve bağlayıcılık özellik kazandırmak amacıyla genellikle NaOH ile beraber kullanılmaktadır. Bundan dolayı geopolimerizasyon işleminde en fazla kullanılan aktivatörler NaOH ile Na_2SiO_3 ’tür (Kong ve ark., 2010). Na_2SiO_3 , agregalar ve geopolimer harçla arasındaki ara yüzey bağlarının güçlenmesini sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2008; Köker, 2019).

3.2.4. Sodyum sülfat (Na_2SO_4)

Na_2SO_4 , geopolimer ürün elde edilirken aktivatör olarak kullanılmaktadır. İçeriğine göre su içermeyen Na_2SO_4 ve su içeren $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ olmak üzere iki farklı çeşit Na_2SO_4 bulunmaktadır. Na_2SO_4 , Doğada kendiliğinden meydana gelebilir veya farklı endüstriyel kimyasal malzemeler elde edilirken bir yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır (Provis, 2009; Köker, 2019).

3.3. Köpük Ajanı

Köpük ajanı, beton harcının içerisine hava sürüklemek amacıyla köpük kabarcıklarının eldesini sağlayan köpüğün ana malzemesidir. Köpük ajanı, içerdiği milyonlarca 0-1 mm - 2mm boyutlarındaki hava kabarcıkları sayesinde farklı yoğunluklarda ve yalıtım özelliklerinde beton harç üretimi gerçekleştirmektedir (Short ve Kinniburgh, 1963; Tuzlak, 2017).

Köpük ajanları, beton üretiminde iki farklı yöntemle kullanılmaktadır. Birinci yöntemde köpük ajanında elde edilen köpük, harca ilave edilerek beton üretimi yapılmaktadır. Diğer yöntemde ise köpük ajanı harca, harç yapım esnasında ilave edilip köpük oluşturulmaktadır (Nambiar ve Ramamurthy, 2007; Ören, 2018).

Köpük ajanları organik ve sentetik olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır.

Organik ajanlar

- Bitkisel esaslı
- Reçine esaslı
- Protein (kan, keratin vb.) esaslı olmak üzere üç türü bulunmaktadır.

Sentetik ajanlar

Kimyada deterjan olarak kullanılan kimyasal maddelerden üretilen çözücü esaslı ajanlardır (Naimbary ve Kinniburd, 1963; Tuzlak, 2017).

3.4. Köpük Beton

Hafif betonun bir türü olan köpük beton, hücreli veya gözenekli beton olarak da adlandırılmaktadır. Köpük beton, çimento, su ve agrega karışımına köpük ajanı yardımıyla oluşturulan köpüğün ilavesi ile oluşmaktadır. Yapısında hacminin % 75-80 oranında birbirinden bağımsız kapalı gözenekler bulunmaktadır. Köpük beton, yapılarda iç ve dış duvar imatları ve yapı zeminlerde uygulanan tesviye imatları yerine kullanılması öngörülen hafif, ısı ve ses yalıtımını sağlayan alternatif bir yapı ve yalıtım malzemesidir (Ekinci, 2013; Tuzlak, 2017).

Köpük betonun önce 1914 yılında Aylsworth ve Dyer tarafından daha sonra 1923'te Bayern ve Erikson tarafından patenti alınmıştır. Ancak 21. yüzyılın başlarında hafif bir yapı malzemesi olarak kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Ramamurthy, ve ark., 2009). Jones ve McCarthy, 2005 yılında köpük beton tarihçesini, yangın dayanımı, ısı iletkenlik ve akustik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca dünya üzerinde yapılmış olan çalışmalar üzerine değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Yangın dayanımı, ısı iletkenlik ve akustik özellikleri üzerine görüşlerini bildirmelerine rağmen köpük betonun taze beton özellikleri, durabilitesi ve hava boşluğu sistemi gibi konularla ilgili oldukça sınırlı bilgi vermişlerdir (Davraz ve ark., 2015).

Köpük jeneratörü yardımıyla üretilen karakteristik (kararlı) köpüğün beton harcın içerisine homojen bir şekilde karıştırılması ile elde edilen gözenekli yapıya sahip hafif beton türüdür. Köpük beton, hafif agrega kullanılarak üretilen betonlarla karıştırılmamalıdır. Üretim sırasında kimyasal reaksiyon olarak sadece çimentonun hidrasyonu gerçekleşmektedir. Sıva, şap, blok harcı ve betonarme betonu olarak kullanılmaktadır. İçerisinde çimento ve kum haricinde malzeme bulunmamaktadır. Köpük yapımında kullanılan köpük ajanı tamamen doğal bir malzeme olup insan sağlığına hiçbir şekilde zarar vermemektedir (Bekaroğlu, 2012).

3.4.1. Köpük betonun özellikleri ve kullanım alanları

Köpük beton, köpük ajanı kullanılarak oluşturulan köpüğün harç içerisinde hava boşlukları meydana getirerek hafif beton olarak da adlandırılan çimento harcıdır. Düşük birim hacim ağırlık, çok az miktarda agrega kullanımı, yüksek akışkanlık, düşük dayanım ve çok iyi ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahiptir. Köpük miktarı ayarlanarak 400-1000 kg/m³ aralığında birim hacim ağırlığına sahip köpük beton üretimi yapılmaktadır. Köpük beton; oda bölmesi, yalıtım malzemesi, dolgu ve taşıyıcı duvar gibi birçok amaç için kullanılmaktadır (Volare, 1954; Dakman, 2017).

Köpük beton, yapısında bulunan boşluk miktarına bağlı olarak yoğunluğunda değişiklikler göstermektedir. Yoğunluğu düşük köpük beton, yüksek yalıtım özelliklerine ve düşük dayanım değerlerine sahipken, yoğunluğu yüksek köpük beton, daha düşük yalıtım özelliklerine ve yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Köpük beton, üretiminde kullanılan malzemelerin yoğunluğu ve yapısına bağlı olarak normal yoğunluktaki betondan % 10-50 daha düşük bir ısı iletkenlik katsayısına sahiptir (Ramamurthy ve ark., 2009).

Köpük beton, yoğunluğa bağlı olarak yapıların iç ve dış duvarlarında ve zeminlerde kullanılan yapı elamanlarının (tuğla, bims, tesviye betonu (şap), sıva, dış cephe mantolama ve süs malzemeleri vb.) yerine kullanılmaktadır. Bünyesinde doğal agrega, çimento ve köpük haricinde malzeme bulunmayan hafif, ısı ve ses yalıtım değerleri uygun ve üretim maliyetleri düşük bir yapı malzemesidir (Koudriashoff, 1949; Tuzlak, 2017).

Yoğunluğuna ve kullanım alanlarına göre sınıflandırılarak Çizelge 3.4'te verilmiştir (Bekaroğlu, 2012).

Çizelge 3.4. Köpük beton yoğunlukları ve kullanım alanları

No	Yoğunluk kg/m ³	Kullanım Alanları
1	400-600 kg/m ³	Isı ve ses yalıtımı (Tavan ve yer döşemesi)
2	600-900 kg/m ³	Blok ve panel üretimi
3	900-1200 kg/m ³	Dış ve ana duvar, blok ve panel üretimi
4	1200-1600 kg/m ³	Taşıyıcı özellikli duvar, blok ve panel üretimi

Köpük betonun son yıllarda kullanım alanları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Isı yalıtımlı hafif beton üretiminde
2. Isı yalıtımlı hafif tuğla, blok tuğla, bims ve duvar panel üretiminde
3. Isı ve ses yalıtımlı şap üretiminde
4. Çimento ve alçı esaslı hafif plaka üretiminde
5. Isı yalıtımlı hafif kiremit ve seramik üretiminde
6. Yapılarda bodrum kat, ısı yalıtım amaçlı toprak altı dolgu betonu olarak
7. Yapı etrafında oluşabilecek çökmeleri önlemek için hafif dolgu betonu olarak
8. Toprak altı su drenajı amaçlı gözenekli dolgu betonu olarak
9. Köprü ve köprü yolunda buzlanmayı önlemek amacıyla yol altı dolgu betonu
10. Tünel ve kuyu dolgu amaçlı hafif beton üretiminde
11. Perlitli sıva ve perlitli hafif beton üretiminde
12. Prefabrik bina üretiminde kullanılır (Bekaroğlu, 2012).

3.5. Geopolimer

Geopolimerler, organik polimer karışımı elde etmek için alümino-silikat içeren doğal ya da atık puzolanların alkali aktivatörlerle aktive edilmesi sonucu meydana çıkan ürünlerdir. Metakaolin, YFC ve uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin maliyetlerinin düşük olması ve kolay bir şekilde elde edilebilmesinden dolayı alümino-silikat kaynağı olarak kullanılmaktadır. Portland çimento üretimine kıyasla geopolimer üretiminde CO₂ salınımı daha az olmakla birlikte enerji tasarrufu da sağlanmaktadır. Geopolimerler, günden güne giderek kirlenen dünyamız için çevre dostu malzemedir.

1982 yılında Fransa’da Davidovits, alümino-silikat esaslı inorganik polimerle alkalilerin reaksiyonu sonucunda oluşan malzeme için ‘Geopolimer’ terimini kullanmıştır. Geopolimerler, puzolanik veya alümino-silikat malzemelerin alkali çözeltiler ile reaksiyonu sonucunda meydana gelmektedir (Davidovits, 1991). Uçucu kül, metakaolin, silis dumanı ve YFC geopolimer üretiminde kullanılan atık malzemelerdir. Depolama, taşıma ve yok edilme gibi birçok olumsuz duruma neden olan endüstriyel atıklar değerlendirilerek geopolimer üretimi yapılmaktadır (Shi ve ark., 2012; Kantarcı, 2018).

Portland çimentosu üretimin için kullanılan enerji, geopolimer üretiminde kullanılan aktivatörlerin üretilmesi için gerekli olan enerjinin iki katıdır (Daniel ve ark., 2006; Koker, 2019). Alkali aktivatör olarak genellikle NaOH ve Na₂SiO₃ gibi alkali çözeltiler kullanılmaktadır (Rangan, 2008; Koker, 2019).

Geopolimerizasyon reaksiyonu katı halde bulunan alümino-silikat oksitler ile alkali metal silikat çözeltileri (NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ vb.) arasında orta derece sıcaklıklarda (20-150 °C) ve yüksek bazik kondüsyonlarda Si-O-Si ve Si-O-Al sistemlerini içeren polimerik amorf veya yarı kristalin yapıların kurulması sonucunda oluşmaktadır (Yunming ve ark., 2016, Top, 2019).

YFC dünyada bol miktarda bulunan metal endüstrisinin atık ürünüdür. Temel olarak kireç ve kalsiyum-magnezyum alümino-silikatlardan meydana gelmektedir. Geopolimer beton üretiminde çimento yerine YFC kullanımını CO₂ emisyonunu azaltmaktadır (Bakharev ve

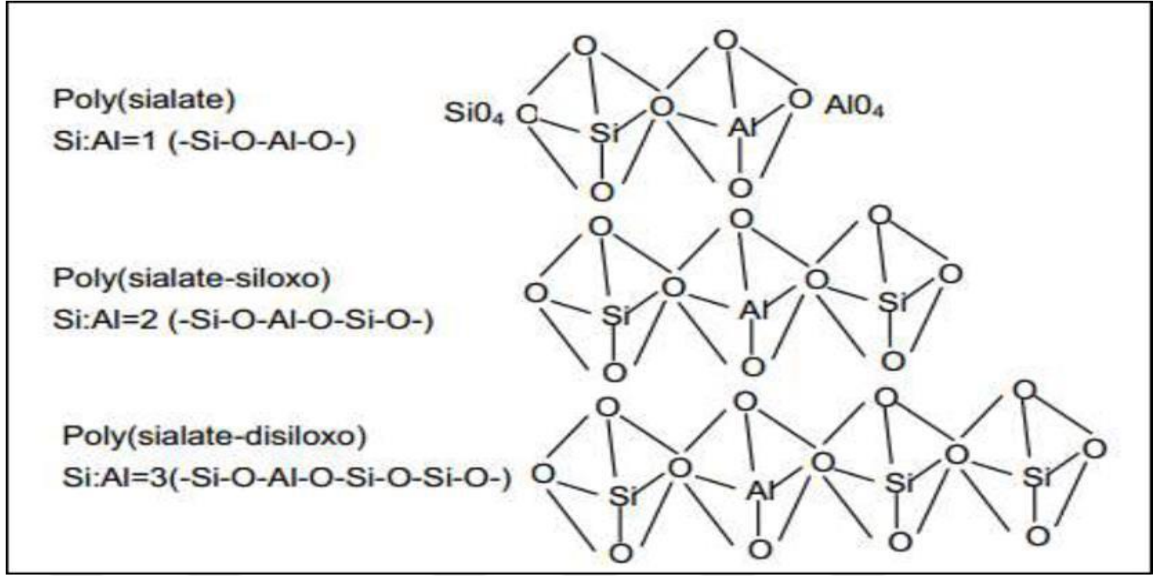
ark., 2001; Koker, 2019). YFC alkali çözeltilerle karıştırılıp bağlayıcılık özelliği kazanarak basınç dayanımı yüksek, aside karşı direnci yüksek ve erken dayanım elde edilen geopolimerler üretilmektedir (Zeybek, 2009; Koker, 2019).

3.5.1. Geopolimerlerin kimyası

Geopolimerizasyon süreci; kaolin, feldispat ve endüstriyel atıklardan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli yüksek oranda alümino-silikat içeren katı malzemelerin NaOH (Sodyum hidroksit), KOH (Potasyum hidroksit), Na₂SiO₃ (Sodyum silikat) ve K₂Si₂O₅ (Potasyum silikat) gibi alkali aktivatörlerle aktive edilmesiyle başlar. Yüksek oranda alkali bulunan ortamdaki moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondensasyon (çoklu yoğunlaşma) gibi süreçlerini içerisinde barındıran ekzotermik kimyasal olay ‘geopolimerizasyon’ olarak adlandırılmaktadır (Zeybek, 2009; Gümü, 2016).

Son derece kararlı bileşik olan silikat mineralleri (SiO₂) içerisindeki oksijen atomu ile alüminatların elektronlarını ortaklaşa kullanarak kovalent bağlı bileşik oluşturulması sonucunda geopolimerler meydana gelmektedir (Zeybek, 2009). Silikat (SiO₂) minerallerinin alkali aktifleştiriciler yardımıyla heliks üç boyutlu ağ yapısına kadar çözünmesi sonucunda geopolimerlerin ana yapısı olan sialatlar (Si-O-Al) oluşmaktadır (Zeybek, 2009).

Geopolimerlerin ana yapısını oluşturan sialatların Si/Al oranına göre 3 farklı bağ yapısı -Poly(sialate) [-Si-O-Al-O-], -Poly(sialate-siloxo) [-Si-O-Al-O-Si-O-] ve -Poly(sialate-disiloxo) [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-] meydana gelmektedir. Oluşan sialat monomerlerin görünümü şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Sialat yapıları ve geopolimer türleri

Geopolimer içerisindeki toplam Si/Al molar oranı üretilen malzemenin moleküler yapısını ve bu doğrultuda kullanım alanını belirleyici parametredir. Si/Al molar oranına göre malzeme özellikleri Çizelge 3.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Geopolimer malzemelerin moleküler yapısı ve kullanım alanları

No	Si/Al (Molar Oran)	Moleküler Yapı	Kullanım Alanı
1	1	Zeolitin kristal yapısına benzemektedir.	Yangına karşı koruyucu malzeme, tuğla ve seramik üretiminde kullanılır.
2	2	Seramik amorf arası yapıdadır.	Radyoaktif malzemelerin depolanmasında kullanılan ürünler üretilmektedir.
3	3	Akışkan polimerik yapıya sahiptir	1000 °C’de dayanım verebilen malzemeler üretilmektedir.
4	>3	Polimerik yapıya sahiptir.	Dolgu malzemesi olan köpükler üretilmektedir.
5	>15	2 boyutlu moleküler ağ yapısına sahiptir.	Savaş uçaklarında kullanılan nano kompozit, yangın ve ısıya dayanıklı malzemeler üretilmektedir.

3.5.2. Geopolimer beton

Geopolimer beton, normal betonda bağlayıcı olarak kullanılan portland çimentosu kullanmaksızın üretilen yeni bir malzemedir. Çimento üretiminde çevreye salınımı gerçekleşen CO₂ miktarını azaltmak hedeflendiği için geopolimer beton çevre dostu beton olarak da bilinmektedir. Çimento yerine bağlayıcı olarak, pişirilmiş küller, metakaolin gibi ısı işlem görmüş malzemeler, uçucu kül, dip külü, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atıklar, volkanik küller, traslar ve diatomik topraklar gibi doğal puzolanlar geopolimer beton üretimine kullanılan malzemelerdir. Geopolimer beton üretiminde serbest silis ve alümin içeren bu malzemelerin çimento gibi bağlayıcılık özellik göstermesi için Na₂SiO₃, NaOH, KOH ve K₂Si₂O₅ gibi alkalilerle aktivasyon prosesinden geçmesi gerekmektedir. Bu işlem sonrasında oluşan geopolimer harca ince ve iri agrega ilave edilerek geopolimer beton elde edilmektedir.

Geopolimer beton, normal portland çimentolu betonların geopolimerlerinin kalsiyum silika hidrate (C-S-H) jeli yerine geopolimerik alüminosilikat hidrat (A-S-H) jelinden meydana gelmektedir (Albitor ve ark., 2017; Özcan, 2018). Geopolimer beton üretimi şekil 3.3'te verilmiştir. (Shrestha, 2013; ; Kantarcı, 2018)



Şekil 3.3. Geopolimer beton üretim şeması

Geopolimer betonun normal portland çimentosu ile üretilen betonlarla karşılaştırıldığında avantajları maddeler halinde verilmiştir (Li ve ark., 2004; Kantarcı, 2018).

- 1) **Bol miktarda hammadde kaynağı:** Alkali çözeltiler içerisinde çözünen silikatların veya alümino-silikatların bünyesinde bulunduran endüstri atıkları ve doğal puzolanlar dünyada bol miktarda bulunmaktadır.
- 2) **Enerji tasarrufu ve çevre dostu:** Geopolimerler, portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha az enerji tüketimi yapmakta; ayrıca daha düşük miktarda CO₂ salınımı gerçekleştirdiği için çevre dostudur.
- 3) **Basit hazırlama yöntemi:** Alkali aktivatörlerin alümino-silikat malzemeler ile aktivasyonu yapılarak basit bir şekilde geopolimerler sentezlemektedirler. Oda sıcaklığında kür uygulanarak kısa sürede yeterli mukavemete sahip olmaktadır. Uygulanan proses, portland çimentolu betonların hazırlanma şekline benzemektedir.
- 4) **İyi hacim kararlılığı:** Geopolimerlerde röte, portland çimentolarına kıyasla %80 daha azdır.
- 5) **Kısa zamanda dayanım kazanma:** Geopolimerler, priz süresinin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının %70'ine ulaşabilmektedir.
- 6) **Mükemmel dayanıklılık:** Geopolimer beton veya harçlar doğa şartlarında çok fazla işlev kaybı yaşamaksızın uzun zaman dış etkenlere karşı dayanabilmektedir.
- 7) **Yüksek sıcaklıkta dayanım ve düşük ısı iletkenlik:** Dayanım kaybı olmaksızın 1000-1200 °C'lere kadar dayanabilmektedirler. Isı iletkenlikleri ise 0,24-0,3 W/mk arasında olup bu değer hafif tuğlalara göre daha düşüktür.

3.6. Geopolimer Köpük Beton

İnşaat endüstrisinde, beton üretiminin neden olduğu çevre kirliliğini, çimento kullanımını, üretim ve işletme enerjisini azaltmak amacıyla tüm dünyada birçok atık malzemenin beton üretiminde kullanımı giderek artış göstermektedir. Bahse konu olan sebeplerden dolayı 21. yüzyılın başlarından itibaren yeni bir beton türü olarak çalışmalarda kullanılan GPKB, geopolimer beton teknolojisine dayanılarak üretilmeye çalışılmaktadır. Uçucu kül ve YFC gibi atık puzolonları, NaOH ve Na₂SiO₃ gibi alkalilerle aktive ederek geopolimer beton harcı elde edilmektedir. Geopolimer harçlara köpük ajanı ilave edilerek gözenekli yapıya sahip olan GPKB elde edilmektedir. Beton harcı üretiminde kullanılan köpük ajanları, harcın prizini almadan gözenekler oluşturarak

boşluklu yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Gözenek boyutları nanometre ölçeğinden milimetre ölçeğine kadar uzanabilmektedir (Singh, 2018).

GPKB, inşaat sektöründe blok malzemesi, ses ve ısı yalıtım amacıyla kullanılabilir. GPKB'lerin inşaat teknolojisinde gelişimi sınırlı olmakla birlikte bu konuda çok fazla araştırma yapılmamıştır.

3.6.1. Geopolimer köpük betonunun üretimi

GPKB, ön köpükleme yöntemi ve karışık köpürtme yöntemi olmak üzere iki farklı şekilde üretilmektedir (Narayanan ve ark., 2000). Ön köpükleme yönteminde, ilk olarak geopolimer harç oluşturulur. Daha sonra köpük ajanı su ile belirli oranda karıştırılarak köpük solüsyonu elde edilir. Bu solüsyon geopolimer harç ile birleştirilerek karıştırılır. Köpük solüsyonunun kullanım miktarına göre oluşturulan GPKB'in taze birim hacim ağırlığı belirlenir. Karışık köpürtme yönteminde ise bulamaç halde bulunan harç içerisine köpük ajanı ilave edilerek istenilen yoğunluğa gelene kadar karıştırılır (Narayanan ve ark., 2000). GPKB üretimi esnasında kararlı karışım üretimi, homojen bir gözenekli yapı elde etmek için köpük ajanına uygulanan metot, kullanılan puzolan veya atık malzemenin (uçucu kül ve YFC gibi) kimyasal içeriği, köpük ajanının türü ve karışımın tasarım yöntemleri gibi birçok faktöre bağlıdır.

3.6.2. Geopolimer köpük betonun özellikleri

GPKB'lerin araştırılmasında ilgilenilen en temel özelliklerin başında beton yoğunluğu ve basınç dayanımı gelmektedir. GPKB'ler konvansiyonel betonlara göre daha düşük yoğunluğa sahiptirler. Konvansiyonel betonların yoğunluğu 2000-2600 kg/m³ arasında değişkenlik gösterirken GPKB'ler ise 300-1850 kg/m³ arasındadır (Neville, 2011). GPKB'lerin basınç dayanımları ise genellikle 1-10 MPa aralığındadır. GPKB'lar düşük yoğunluklarından dolayı yapı ağırlığını azaltmak amacıyla inşaat malzemesi (blok, bims ve tesviye betonu vb.) olarak tercih edilmektedir. Depremlerin neden olduğu kuvvetin yapı üzerindeki etkisi, yapının ağırlığının azalması ile doğru orantılı olarak azalmaktadır. (Sutama ve ark., 2019).

Köpük betonlarda veya GPKB'lerde, normal yoğunluktaki betonlara göre çok daha fazla büzülme görülmektedir. GPKB'lerin bir yıl sonra ölçülen kurutma büzülme değeri % 0,1-0,36 arasındadır. (Jones ve ark. 2003). Bu değer agrega/çimento oranı 3-7 arasında olan beton numunelerin tipik büzülmesinden 5 ila 10 kat daha yüksektir (Neville, 2011). Büzülme oranının yüksek olmasına neden olan faktörler arasında az hiç agrega kullanılması veya hiç agrega kullanılmaması, hidrasyon ürünlerinin mikro yapısı, gözenek boyutu ve spesifik yüzey gösterilmektedir (Neville, 2011).

GPKB'lerin en önemli özelliklerinden biri de iyi ısı yalıtım özelliği göstermeleridir. Yapıların tüm yaşam döngüsü boyunca iyi ısı yalıtıma sahip olması enerji tüketiminden önemli ölçüde tasarruf edilebileceği anlamına gelmektedir (Pullen, 2000). İyi derecede ısı yalıtım özelliği gösteren GPKB'lerin termal iletkenlik katsayısı da normal betonlara göre daha düşüktür.

GPKB'lerin mikro yapı analizi(gözenek özellikleri) SEM gözlemlerine dayanarak yapılmaktadır. GPKB'lerin yapısındaki gözenek boyutu köpük oranına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu değişkenlik GPKB'lerin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Köpük oranının artması, gözenekli yapının artmasını bunun sonucunda da beton numunelerin yoğunluğunun azalmasını sağlamaktadır ancak basınç dayanımının ise azalmasına sebep olmaktadır (Risdanareni ve ark., 2017).

Genel olarak GPKB'ların köpük dozajının artması veya azalmasına bağlı olarak fiziksel ve mekanik özellikleri değişkenlik gösterir. Köpük dozajının artması veya azalması;

- Kuru birim hacim yoğunluk
- Gözenekli yapı
- Basınç dayanımı
- Esneklik modülü
- Büzülme oranı
- Isı iletkenlik katsayısı
- Ultrases geçirgenlik hızı
- İşlenebilirlik

gibi birçok özelliğe etki etmektedir.

3.6.3. Geopolimer köpük betonun kullanım alanları ve avantajları

GPKB, kuru birim hacim yoğunluğunun ve ısı iletkenlik katsayısının düşük olması nedeniyle inşaat sektöründe, inşaat malzemesi olarak birçok farklı alanda kullanılmak amacıyla son yıllarda araştırma çalışmalarına konu olmuştur. GPKB'in kullanım alanları maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır;

- a. Duvar malzemesi (Gaz beton, bims ve blok vb.)
- b. Döşeme malzemesi (Tabliye, tavan ve çatı vb.)
- c. Tesviye betonu
- d. Yalıtım malzemesi (Isı ve ses yalıtımı).

Ayrıca GPKB'ler, normal portland çimentolu betonlara göre hem fiziksel hem de mekanik özelliklerinden dolayı birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Bina enerji verimliliğinin artmasını sağlar.
2. Çimento kullanımı az veya hiç olmamasından dolayı CO₂ salınımını daha düşüktür.
3. CO₂ salınımının az olması veya hiç olmaması ve artık maddelerden elde edilmesinden dolayı çevre dostudur.
4. İyi bir ısı yalıtım özelliğine sahiptir.
5. Yüksek derece sıcaklıkta fiziksel ve mekanik özelliğini belli seviyeye kadar korumaktadır.
6. Düşük maliyete sahiptir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilen GPKB malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, hazırlanan numunelerde bulunan malzeme miktarları ve bu numuneler üzerinden yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. Karışımlarda Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışmada kullanılan YFC İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın bir atığı olmakla birlikte OYAK Adana Çimento A.Ş. tarafından öğütülmüştür. Öğütülmüş olan YFC'nin özgül ağırlığı $2,88 \text{ gr/cm}^3$ ve Blaine özgül yüzeyi ise $5990 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir. YFC'nin görseli Şekil 4.1'de verilmiştir. YFC'ye ait XRF analizi Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yaptırılmıştır. Kimyasal içeriği ve oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Yüksek fırın cürufunun kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Kompozisyon	Analiz Sonucu (%)
SiO ₂	35.50
CaO	34.36
Al ₂ O ₃	11.71
MgO	4.32
SO ₃	2.75
Fe ₂ O ₃	1.44
MnO	1.36
K ₂ O	0.31
TiO ₂	0.55
Kızdırma Kaybı	7.70



Şekil 4.1. Yüksek fırın cürufu

4.1.2. Su

YFC'nin alkalilerle aktive edilmesi ile elde edilen geopolimer harç üretiminde kullanılan ve köpük elde etmek amacıyla köpük ajanına ilave edilen su, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Yapı Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan şebeke suyundan temin edilmiştir.

4.1.3. Alkali aktivatörler

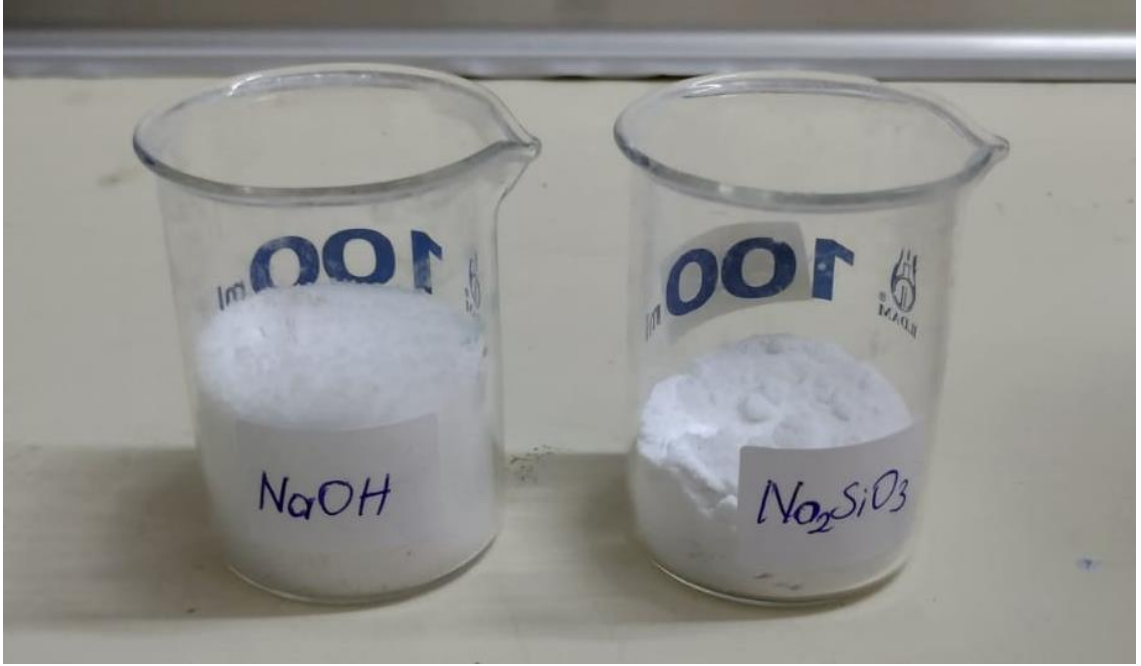
GPKB üretiminde, hazırlanan harçların içerisine alkali aktivatör olarak NaOH, Na₂SiO₃ ve KOH kullanılmıştır. Bütün alkaliler katı fazda olmakla birlikte su ile çözelti haline getirilmiştir. Alkalilerin YFC ile aktivasyonu sonucunda geopolimer harç elde edilmiştir.

NaOH (Sodyum Hidroksit), güçlü bir baz olup çözünmesi sırasında ekzotermik tepkime gerçekleşmektedir. Küçük tanecikler halinde bulunan NaOH beyaz ve kokusuzdur. Molekül ağırlığı 39,99 g/mol ve oda sıcaklığında yoğunluğu 2,15 gr/cm³'tür.

Na₂SiO₃ (Sodyum Silikat), cam suyu olarak da bilinmektedir. Beyaz renkte ve toz halinde olup su ile renksiz bir çözelti oluşturmaktadır. Na₂SiO₃'ün molekül ağırlığı 184,04 g/mol ve oda koşullarında yoğunluğu 1,35 gr/cm³'tür.

KOH (Potasyum hidroksit), bu çalışmada Na_2SiO_3 ve NaOH 'a ek olarak ön çalışmalarda denenmiştir.

GPKB üretiminde kullanılan alkali aktivatörler Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Alkali aktivatörler

4.1.4. Köpük ajanı

Numune üretiminde kullanılan köpük ajanı protein esaslı bir malzemedir. Yoğunluğu yaklaşık olarak $1,085 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Üretilen köpüğün birim hacmi $0,032\text{-}0,035 \text{ gr/cm}^3$ aralığındadır. Bir litre köpük ajanına 20 litre su ilave edilerek köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Köpük ajanı

4.2. Ön Deneme Numunelerinin Üretimi

Bu tez çalışmasındaki tüm numuneler Tokat Gazi Osmanpaşa Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır. GPKB numune üretim aşamasında YFC, su, köpük ajanı ve alkali aktivatörlerden NaOH, Na_2SiO_3 ve KOH kullanılmıştır. Alkali aktivatörlerden KOH istenilen fiziksel ve mekanik özellikleri sağlamadığı için GPKB üretiminden çıkarılmıştır. Köpük ajanı ve su 1/20 oranında karıştırılarak daha önceden hazırlanmış olan mekanik düzenek yardımıyla köpük solüsyonu üretilerek GPKB numunelerine ilave edilmiştir.

YFC kullanılarak hazırlanan GPKB üzerine yapılmış olan çalışmaların az olması ve literatürde bulunan karışım reçetelerinin birçok parametreden etkilenmesi dolayısıyla anlamlı karışım oranı bulunurken deneme-yanılma (deneysel) çalışma metodu kullanılarak ön deneme numuneleri üretilmiştir. İdeal reçeteyi belirlemek amacıyla 53 adet farklı ön deneme numunesi hazırlanmıştır. Bu ön deneme numunelerinde YFC/su, YFC/Köpük ajanı, alkali oranları, kür koşulları ve köpük miktarları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Çizelge 4.2'de ve Çizelge 4.3'te ön deneme karışım oranları (ÖDKO) ve yapılan deneylerde elde edilen sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.2. ÖDKO'ları ve yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar-1

Numune Adı	NaOH (gr)	NaSiO ₃ (gr)	KOH (gr)	Köpük Ajam (ml) veya (gr)	YFC (gr)	Toplam Su (ml)	Taze Beton Ağırlığı (gr)	Taze Beton Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Köpük Birim Hacim (gr/cm ³)	Birim Hacim (gr/cm ³)	Dayanım 1. Gün (mPA)
D-1	31	21	0	10	200	102.0	-		-	-	-
D-2	16	40	0	5	292	170.0	-		-	-	-
D-3	20	40	0	5	600	270.0	-		-	0.75	1.35
D-8	12	40	0	74/800	600	270.0	-	-	0.093	0.70	2.40
D-9	12	40	0	74/800	600	270.0	-	-	0.093	-	-
D-10	25	40	0	74/800	600	270.0	142.0	0.71	0.093	0.72	1.46
D-11	25	40	0	55/600	600	270.0	188.0	0.94	0.092	1.00	3.46
D-12	20	50	0	74/800	600	270.0	-	-	0.093	-	-
D-14	20	30	0	55/600	600	270.0	185.5	0.92	0.092	0.98	3.83
D-15	20	30	0	36/400	600	270.0	250.0	1.24	0.090	1.37	11.38
D-21	20	40	0	76/800	700	270.0	288.0	1.27	0.095	1.37	19.41
D-25	30	40	0	74/800	700	270.0	-	-	0.093	-	-
D-26	0	40	20	74/800	700	270.0			0.093	1.15	4.50
D-27	30	30	0	74/800	700	270.0			0.093	1.27	1.96
D-28	40	20	0	74/800	700	270.0	-	-	0.093	-	-
D-29	0	20	40	74/800	700	270.0			0.093	-	-

Yukarıdaki Çizelge 4.2'de ön deneme çalışmalarından D1 ve D2 Z. Zang ve B. Abdullah tarafından yazılmış olan makalelerde bulunan reçetelere göre hazırlanmış olup numunelerde basınç dayanım değerleri okunamadığı için bu numuneler başarısız sayılmıştır. D3 denemesi ilk yapılan 7 numune içerisinde anlamlı dayanıma sahip olan ilk numune olmuştur. Kuru birim hacim değeri 0,75 gr/cm³ ve basınç dayanım değeri 1,35 MPa elde edilmiştir.

D-8 ve D-24 arasında 17 adet deneme numune ile D-25 ve D-29 arasında 5 adet deneme numunesi D-3 numunesi ölçü alınarak farklı oranlarda ön deneme numuneleri hazırlanmıştır. Bazı deneme numunelerinin karışımı sırasında alkali aktivatör ile YFC karışımlarında topaklanma olayı meydana gelmiştir. Ayrıca geopolimer harç ile köpük solüsyonu karışımlarında ise karışım esnasında köpükte sönme olayı ile karşılaşmıştır. Alkali aktivatörlerden KOH kullanımıyla yapılan ön deneme çalışmalarında topaklanma olayıyla çok fazla karşılaşıldığı için KOH kullanımı köpüklü geopolimer harç üretiminden çıkarılmıştır.

D-24 numaralı deneme numunesine kadar olan tüm numuneler 24 saat 60 °C sıcaklıkta kür koşulları uygulanmıştır. D25-D-29 arasındaki numuneler ise 24 saat 40 °C sıcaklıkta kürlenmiştir. Ayrıca D-27 numaralı deneme numunesini ise laboratuvar ortamında küre tabi tutulmuştur.

Çizelge 4.3. ÖDKO'ları ve yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar-2

Numune Adı	Kür Koşulları	KARIŞIM ORANLARI					DENEY SONUÇLARI							
		NaOH (gr)	NaSiO ₃ (gr)	KÖPÜK AJANI (gr)	YFC (gr)	Toplam su (ml)	TAZE BETON BİRİM AĞIRLIK (gr)	TAZE BETON BİRİM AĞIRLIK (gr/cm ³)	1.Gün Ort. Ağırlık	3.Gün Ort. Ağırlık	1.Gün Ort. Basınç	3.Gün Ort. Basınç	7.Gün Ort. Basınç	1. gün Ultrases
D-30	40 °C Etüvde	30 gr	40 gr	150 gr	800	210	115	0.57	0.62	0.59	1.44	1.48	-	1633
D-31	40 °C Etüvde	30 gr	40 gr	120 gr	800	210	150	0.75	0.75	0.73	2.16	2.22	-	1900
D-32	40 °C Etüvde	30 gr	40 gr	100 gr	800	210	220	1.09	1.16	1.16	6.48	9.16	-	2533
D-33	60 °C Etüvde	30 gr	40 gr	100 gr	800	210	185	0.92	0.94	0.93	3.41	4.35	-	2217
D-34	Laboratuvar Ortamında	30 gr	40 gr	100 gr	800	210	245	1.22	1.3	1.3	4.48	12.67	-	2300
D-35	Laboratuvar Ortamında	25 gr	40 gr	100 gr	800	210	175	0.87	0.99	0.86	1.86	5.04	-	1867
D-36	40 °C Etüvde	25 gr	40 gr	100 gr	800	210	185	0.92	1.01	1.09	4.83	6.08	-	2400
D-37	60 °C Etüvde	25 gr	40 gr	100 gr	800	210	172	0.86	0.87	0.87	2.73	3.73	-	2200
D-38	40 °C Etüvde	30 gr	40 gr	100 gr	800	260	120	0.60	0.59	-	1.66	1.78	1.67	1750
D-39	Laboratuvar Ortamında	30 gr	40 gr	50 gr	800	260	182	0.91	1.05	-	2.31	6.26	4.98	2000
D-40	Laboratuvar Ortamında	30 gr	40 gr	70 gr	800	260	133	0.66	0.78	-	0.62	2.5	-	1700
D-41	Laboratuvar Ortamında	30 gr	40 gr	70 gr	800	260	158	0.79	0.88	-	1.43	3.8	3.24	1750
D-42	40 °C Etüvde	30 gr	40 gr	70 gr	800	260	155	0.77	0.81	-	2.13	2.7	2.43	1850
D-43	40 °C Etüvde	30 gr	40 gr	70 gr	800	260	171	0.85	0.87	-	2.92	3.63	3.97	2100
D-44	60 °C Etüvde	30 gr	40 gr	80 gr	800	260	120	0.60	0.67	-	2.00	1.7	2.19	1933
D-45	60 °C Etüvde	30 gr	40 gr	70 gr	800	260	177	0.88	0.95	-	3.84	4.54	4.85	2100
D-46	60 °C Etüvde	30 gr	40 gr	70 gr	800	260	145	0.72	0.79	-	2.8	2.91	2.9	1966
D-47	75 °C Etüvde	30 gr	40 gr	70 gr	800	270	148	0.74	0.78	-	2.03	2.27	-	-
D-48	100 °C Etüvde	30 gr	40 gr	80 gr	800	270	143	0.71	0.77	-	1.7	1.87	-	-
D-49	75 °C Etüvde	30 gr	40 gr	80 gr	800	270	145	0.72	-	-	2.06	2.54	-	-
D-50	Laboratuvar Ortamında	30 gr	40 gr	85 gr	800	270	150	0.75	-	-	0.51	2.06	2.57	-
D-51	60 °C Etüvde Sadece YFC	0 gr	0 gr	-	800	270	0	0.00	-	-	6.61	7.35	9.94	-
D-52	60 °C Etüvde Alkali-YFC	30 gr	40 gr	-	800	270	0	0.00	-	-	46.00	54.2	59.3	-
D-53	60 °C Etüvde Köpük-YFC	0 gr	0 gr	70 gr	800	270	165	0.82	-	-	0	0	-	-

Ön deneme numunelerinden elde edilen sonuçlara göre alkali aktivatör oranı belirlenmiştir. Alkali aktivatör oranlarının belirlenmesinin ardından, YFC'nin köpük

solüsyonuna oranı ve etüv sıcaklığının artırılıp azaltılmasına bağlı olarak taze beton birim hacim ağırlıklarına, kuru birim hacim ağırlıklarına, basınç dayanımlarına ve ultra ses geçiş hızlarına bakılmıştır. D-30 ile D-53 arasında yapılmış olan 24 adet ön deneme numune sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

4.3. Karışım Oranları Belirlenmesi

Yapılmış olan ön deneme numune sonuçlarına dayanarak YFC/su oranı ve alkali aktivatör miktarları sabitlenmiştir. Köpük ajanı/su oranı 1/20 alınarak köpük solüsyonu oluşturulmuştur. Sonuç olarak laboratuvar ortamında, 40 °C ve 60 °C sıcaklıkta etüvde tutulmak üzere köpük solüsyonunun YFC'ye oranı % 12.5, % 15 ve % 17.5 olan numunelerin üretilmesine karar verilmiştir. Ayrıca, hazırlanan numunelerde 6,82 M NaOH ve 1,45 M Na₂SiO₃ kullanılmıştır. GPKB numunelerinin karışım miktarları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

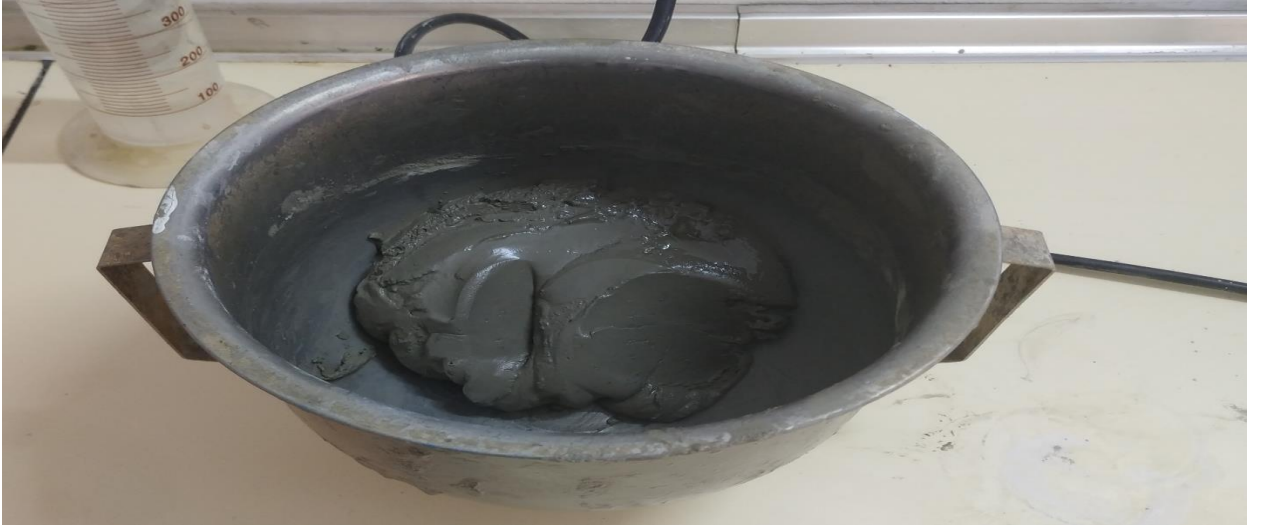
Çizelge 4.4. GPKB numunelerinin karışım miktarları

Karışım Kodu	YFC (gr)	NaOH (M)	Na ₂ SiO ₃ (M)	Toplam Su (ml)	Köpük Solüsyonu (gr)	Köpük Solüsyonu / YFC oranı	Kür Şartları
K1-LAB	800	6,82	1,45	260	100	% 12.5	Laboratuvar ortamı
K2-LAB	800	6,82	1,45	260	120	% 15.0	Laboratuvar ortamı
K3-LAB	800	6,82	1,45	260	140	% 17.5	Laboratuvar ortamı
K1-40	800	6,82	1,45	260	100	% 12.5	40 °C
K2-40	800	6,82	1,45	260	120	% 15.0	40 °C
K3-40	800	6,82	1,45	260	140	% 17.5	40 °C
K1-60	800	6,82	1,45	260	100	% 12.5	60 °C
K2-60	800	6,82	1,45	260	120	% 15.0	60 °C
K3-60	800	6,82	1,45	260	140	% 17.5	60 °C

K1, K2 ve K3 numunelerinin laboratuvar ortamında bekletilen numuneler K1-LAB, K1-LAB ve K1-LAB, 40 °C sıcaklıkta etüvde bekletilen numuneler K1-40, K2-40 ve K3-40, 60 °C etüvde bekletilen numuneler ise K1-60, K2-60 ve K3-60 olarak adlandırılmıştır. Bütün numuneler laboratuvar ortamında ve etüve 24 saat bekletildikten sonra 1., 3., 7. ve 28. günde fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur.

4.4. Karışımların Hazırlanması

Köpüklü geopolimer harç karışımların hazırlanmasında ilk olarak ön deneme numune çalışmaları sonucunda hazırlanmış olan reçetede bulunan alkali aktivatör, su ve YFC miktarları hazırlanmıştır. Belirlenen oranlara göre alkali aktivatör ile su karıştırılarak alkali çözeltileri elde edilmiştir. Bu çözeltiler YFC ile karıştırılarak geopolimer harç elde edilmiştir. Geopolimer harç eldesi için laboratuvar tipi mikser yardımıyla her bir numune için 2 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.4. Geopolimer harç

Hazırlanan geopolimer harç içerisine, hazırlanan mekanik düzenek yardımıyla üretilen köpük solüsyonu ilave edilerek köpüklü geopolimer harç elde edilmiştir. Bu işlem sırasında elde edilen köpüklü geopolimer harç numunelerinde, 0.8 cm çapında ve 0.4 cm yüksekliğe sahip prizmatik silindir kap yardımıyla taze beton birim hacim ağırlıklarına bakılmıştır.



Şekil 4.5. Köpük solüyonu üretimi için kullanılan mekanik düzenek ve köpük solüyonu

İstenilen taze beton birim hacim ağırlıklara sahip köpüklü geopolimer harç numuneleri 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıpların içerisine dökülmüştür.



Şekil 4.6. Geopolimer köpük betonların kalıp içerisine döküm işlemi

Prizmatik kalıplar içerisine dökülmüş olan köpüklü geopolimer harç numuneleri laboratuvar ortamında, 40 °C ve 60 °C sıcaklıktaki etüv kabininde 24 saat bekletildikten sonra belirlenmiş olan deneylere tabi tutulmuştur.



Şekil 4.7. Geopolimer köpük beton numunelerinin etüve konulması

4.5. Deneyle

Çalışmanın bu bölümünde, köpüklü geopolimer harç numuneleri ve GPKB numuneleri üzerine yapılmış olan deneylere yer verilmiştir.

4.5.1. Köpüklü geopolimer harçların taze birim ağırlık deneyi

Köpüklü geopolimer harç numunelerin ağırlıklarını bulmak amacıyla öncelikle silindirik kalıpların darası alınmıştır. Daha sonra silindirik kalıplara köpüklü geopolimer harç yerleştirilmiş halde numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. Bu kalıpların harç dolu olan ağırlıklarından silindirik kalıpların darası çıkarılarak köpüklü geopolimer harç numunelerin ağırlıkları bulunmuştur. Silindirik kalıpların belirli olan hacimlerine numune ağırlıkları bölünerek taze beton birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Tartım işlemleri SS Wock RCZ-B marka elektronik tartı ile yapılarak taze beton birim hacim ağırlıklarını bulunmasında kullanılan formül denklem 1'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Köpüklü geopolimer harçların taze harç birim ağırlık deneyi

$$W_{TBHA} = (W_{Kalıp+Harç} + W_{Kalıp})/V_{SKH} \quad (1)$$

W_{TBHA} : Taze harç birim hacim ağırlık (g/cm^3),

$W_{Kalıp+Harç}$: Köpüklü geopolimer harç ile doldurulmuş silindirik kalıbın ağırlığı (gr),

$W_{Kalıp}$: Silindirik kalıbın ağırlığı (gr),

V_{SKH} : Silindirik kalıbın hacmi (cm^3).

4.5.2. Kuru birim hacim ağırlık deneyi

Prizini ve sertleşme sürecini tamamlamış olan harcın ağırlığının boşluklu yapısını da içerecek şekilde olan hacmine oranı birim hacim ağırlık olarak tanımlanmaktadır. GPKB numunelerin laboratuvar ortamında, 40 °C ve 60 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde kurutulduktan sonra elektronik tartı yardımıyla ağırlıkları belirlenmiştir. Numune üretiminde kullanılan 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik kalıplar vasıtasıyla üretilen numunelerin hacmi hesaplanmıştır. Laboratuvar ortamında ve etüvde bekletilen numunelerin ağırlıkları boyutları belli olan prizmatik kalıbın hacmine bölünerek kuru

birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Numunelere ait kuru birim hacim ağırlıkları denklem 2'ye göre hesaplanmıştır.



Şekil 4.9. GPKB numunelerinde kuru birim hacim ağırlıklarının hesaplanması

$$W_{BHA} = W_{Etüv} / V_{PKH} \quad (2)$$

(W_{BHA}): Birim hacim ağırlık (g/cm^3),

($W_{Etüv}$): Laboratuvar ortamında ve etüvde bekletilen numunelerin ağırlıkları (gr),

(V_{PKH}): Prizmatik kalıbın hacmi (cm^3).

4.5.3. Kapiler su emme deneyleri

Betonların yapısında mikron mertebesinde de olsa kılcal boşluklar bulunmaktadır. Numunelerin yüzeylerinin su ile temas etmesi durumunda zamanla numuneler su emmeye başlar ve numunelerin yapılarında istenmeyen sorunlar oluşabilir. Ayrıca su içerisindeki bazı kimyasalların bulunması halinde daha tehlikeli durumlarla karşılaşılabilir.

Numunelerin veya betonunu yüzeyine temas eden su, mikron mertebesindeki kılcal boşluklardan zamanla yükselmeye başlamaktadır. Bu durum kılcallık (kapilarite) olarak ifade edilmektedir.

Kapiler su emme deneyi, TS EN 772-11 standardına uygun 4x4x16 cm boyutlara sahip prizmatik numuneler ile yapılmıştır. 28. gün yaştaki prizini almış GPKB numuneler ilk olarak 24 saat 105±5 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Daha sonra şekil 4.9'da görüldüğü gibi alt yüzeyleri su içerisinde kalacak şekilde suya bırakılmıştır. Numunelerin kılcal su emme miktarları 5., 10., 15., 30., 60., 120., 240., 300. ve 1440. dakikalarda suya temas eden yüzeyleri silinerek ağırlıkları tartılmıştır. Belirlenen su miktarları yardımıyla denklem 3'e göre numunelere ait kılcallık katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 4.10. GPKB numunelerinde kapilarite katsayısının belirlenmesi

$$Q^2 = k/t \quad (3)$$

Q: Birim zamanda emilen su miktarı (cm³/cm²)

k: kapilarite katsayısı (cm²/s)

t: Geçen zaman (sn)

4.5.4. Su emme ve görünür porozite deneyleri

GPKB numunelerin ağırlıkça su emme deneyi TS EN 12390-7 ve görünür porozite deneyi de TS EN 772-4 standardında uygun şekilde yapılmıştır. 28. gün yaşına ait su emme

oranları ve görünür porozite yüzdeleri hesaplanmıştır. Öncelikle 4x4x16 cm boyutlarındaki numuneler laboratuvar ortamında 24 ±0,5 saat su içerisine bırakılmıştır. Su içerisinden alınan numuneler, havlu yardımıyla kurutularak suya doymuş ağırlıkları tespit edilmiştir. Sonrasında arşimet terazisi yardımıyla numunelerin su içerisindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra numunelerin kuru ağırlıklarının tartım işlemi için 105 °C sıcaklıkta 24 saat etüve bırakılmıştır. Numunelerin sıcaklıkları oda koşullarındaki sıcaklığa gelince kuru ağırlıkları belirlenmiştir.



Şekil 4.11. GPKB’larda su emme ve görünür porozite deneylerinin yapılması

Numuneler için yapılan tartım işlemlerinin yardımıyla aşağıdaki denklem 4’te su emme oranı ve denklem 5 de ise görünür porozite yüzdeleri verilmiştir.

$$S_a = \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1} \right) * 100 \quad (4)$$

$$GP = \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1 - P_3} \right) * 100 \quad (5)$$

S_a : Geopolimer köpük beton su emme oranı,

GP: Görünür Porozite

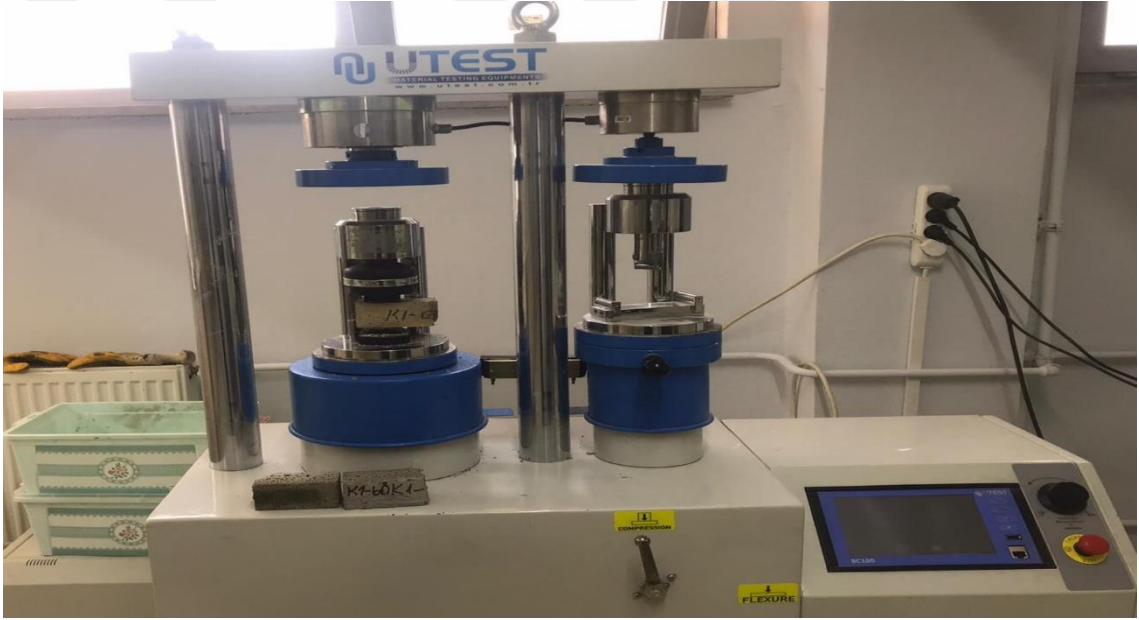
P1: Numunenin kuru ağırlığı (gr)

P2: Suyu doymuş numunenin ağırlığı (gr)

P3: Numunenin su içerisindeki ağırlığı (gr).

4.5.5. Basınç dayanımı deneyleri

GPKB numuneleri üzerine yapılan basınç dayanım deneyleri TS EN 1015-11(2020) standartına uygun şekilde yapılmıştır. Basınç dayanım değerlerini saptamak amacıyla 6 adet numune üretimi yapılmıştır. Numuneler ortadan ikiye bölünerek 12 adet deney numunesi oluşturulmuştur. Deney numunelerinden 1., 3., 7. ve 28. gün olmak üzere 4 ayrı gün için 3'er adet kullanılarak basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Basınç dayanımına ait formül denklem 6'da verilmiştir.



Şekil 4.12. GPKB numunelerinde basınç dayanımı değerlerinin hesaplanması

$$\sigma = P/A \quad (6)$$

σ : Basınç dayanımı, (MPa)

P: Numuneye uygulanan yük, (N)

A: Numunenin basınç uygulama alanı, (mm²)

4.5.6 Ultrases geçiş hızı belirleme deneyi

Çalışmada, 4x4x16 cm boyutlara sahip prizmatik kalıplarda üretilen GPKB numuneleri kullanılarak ultrases geçiş hızı (m/sn) hesaplanmıştır. Numunelere ait ultrases geçiş hızı

deneyleri ASTM C-597-09 standardına uygun şekilde ve ultrases test cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.13. GPKB numunelerinde ultrases geçiş hızının hesaplanması

Ultrases geçiş hızına ait formül denklem 7’de verilmiştir.

$$V_{ses} = (S * 1000)/t$$

V_{ses} : Ultrases geçiş hızı (m/s),

S: Numune ait ölçüm yapılan iki yüzey arasındaki mesafe (m),

t: Numune ait ölçüm yapılan iki yüzey arasından sesin geçiş sırasında geçen süre olmakla birlikte mikro saniye (μs) olarak ifade edilmektedir.

4.5.7. Isı iletkenlik deneyi

GPKB numunelerine ait ısı iletkenlik deneyleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde yapılmıştır. Isı iletkenlik katsayısı, ölçüm sistemi termal iletkenlik ısı akısı tekniğine dayanan düz katı numunelerin ASTM C518, ISO 8301 ve TS EN 12667 standartlarına göre belirlenmiştir. ThermtestHFM-100 marka cihaz kullanılmıştır.

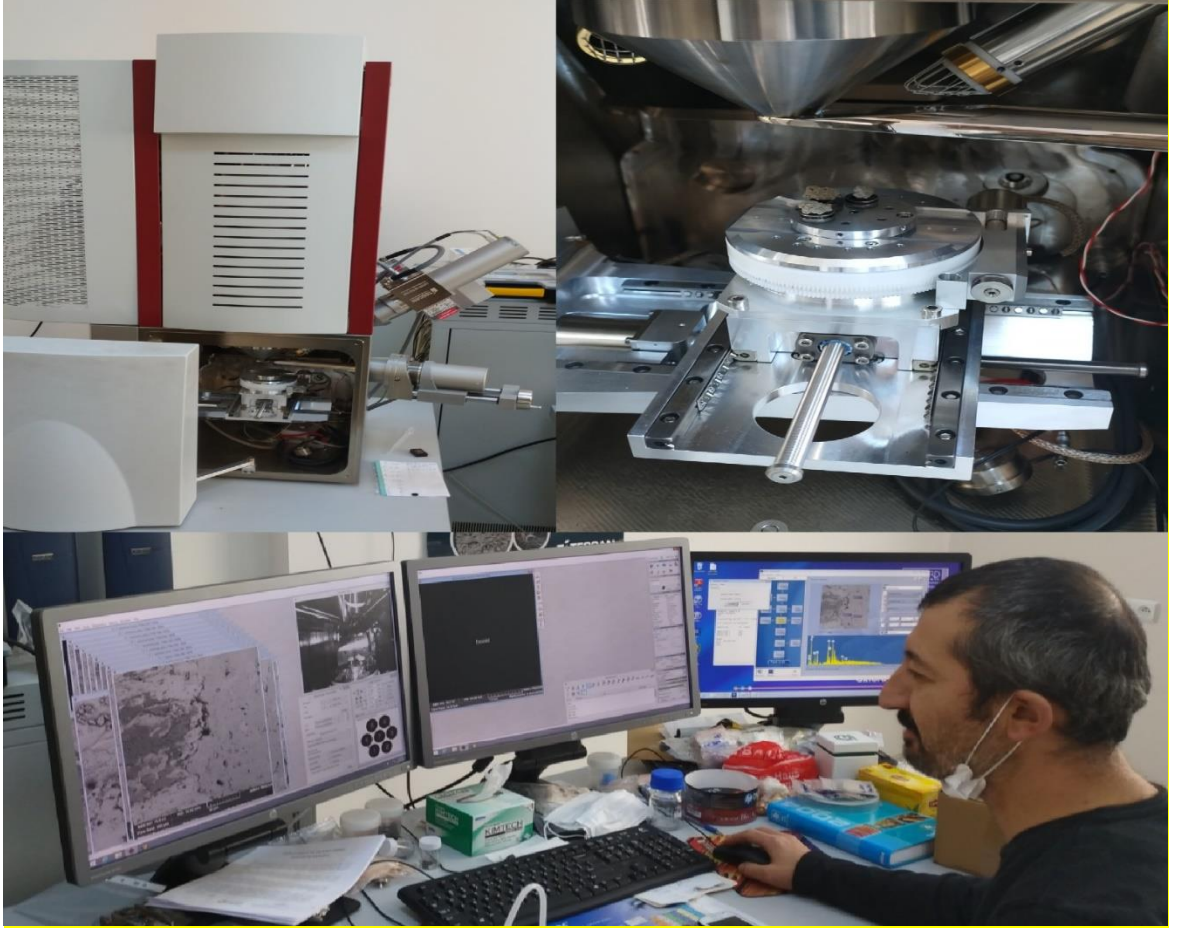


Şekil 4.14. Isı iletkenlik katsayısı belirlemede kullanılan cihaz

4.5.8. GPKB numunelerinin ait mikro yapısal özelliklerine bakılması

Bu çalışma kapsamında, üretimi yapılan GPKB numunelere SEM görüntüleme analizi ve XRD analizleri yapılarak numunelerin mikro yapısındaki faz yapılarının incelenmesi hedeflenmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobu ile SEM görüntüleme işlemi numunelerin üzerine kaynak olarak ışık yerine yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektron ışını probu yardımıyla taratılması ile nano ölçeğe kadar numuneleri görüntüleme tekniği olarak bilinmektedir.



Şekil 4.15. Taramalı elektron mikroskobu

Bu teknik, çeşitli bilim ve sanayi dallarında birçok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır.

X-ışınları difraksiyonu (XRD) spektroskopisi adı verilen cihaz ile bir maddenin ve malzemenin kristal yapılarına gönderilen ışının farklı açıda ve şiddette kırılmasına göre analiz yapmaktadır. Bu analizde, maddelerin ve malzemelerin mineralojik yapısında meydana gelen kristalleşme türlerinin pik seviyeleri hakkında bilgi vermektedir.

GPKB numunelerine ait SEM ve XRF analizleri Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yapılmıştır. XRD analizi ise Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde yapılmıştır.

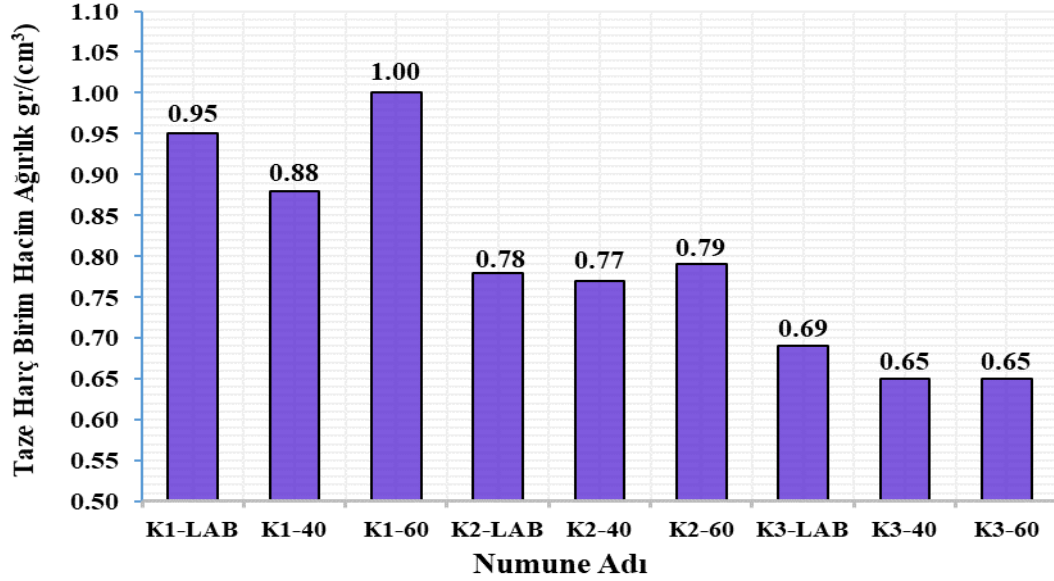
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

GPKB üretiminde, YFC miktarı ve alkali aktivatör oranları sabit tutulmuştur. Köpük solüsyonu miktarı değiştirilerek farklı kuru birim hacim ağırlıklara sahip K1, K2 ve K3 numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler laboratuvar ortamı, 40 °C ve 60 °C sıcaklıkta 24 saat kür uygulanarak fiziksel ve mekanik özellik deneyleri uygulanmıştır.

5.1. Taze Harç Birim Hacim Ağırlık Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi

0.8 cm çapında ve 0.4 cm yüksekliğe sahip prizmatik silindir kap yardımıyla taze beton birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen değerler Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Taze Harç Birim Hacim Ağırlık Grafiği

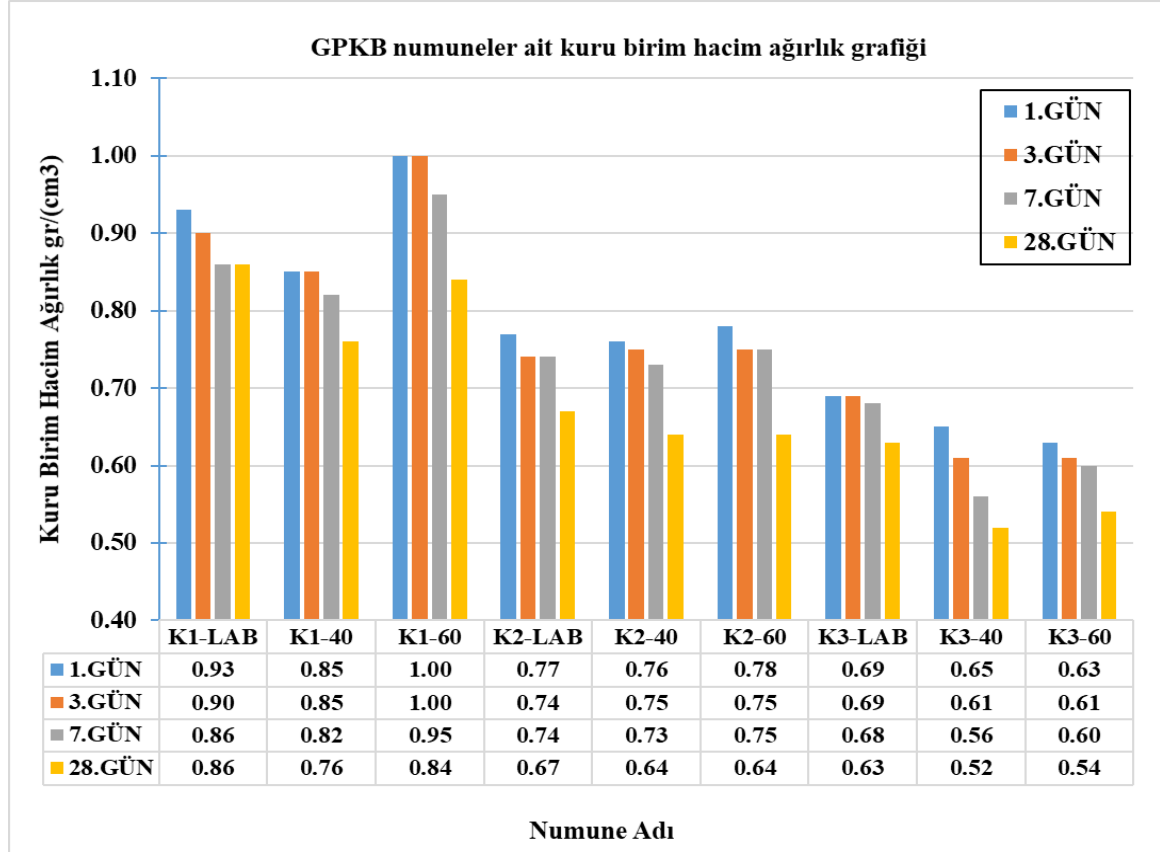


Şekil 5.1. GPKB numunelerine ait taze harç birim hacim ağırlık grafiği

Şekil 5.1. incelendiğinde en yüksek taze harç birim hacim ağırlık değerleri K1 numunelerinde gözlenmiştir. En düşük taze harç birim hacim ağırlık değerleri ise K3 numunelerinde saptanmıştır. Karışımların hazırlanmasında geopolimer harç içerisine ilave edilen köpük miktarının artması ile GPKB numunelerinin taze harç birim hacim ağırlıklarının düştüğü gözlenmiştir.

5.2. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi

Kuru birim hacim ağırlık deneylerinde 40x40x160 mm boyutlara sahip prizmatik numuneler kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında, 40 °C ve 60 °C sıcaklıkta 24 saat etüvide kuru tabii tutulan numunelerin 1., 3., 7. ve 28. günde ağırlıkları tartılarak kuru birim hacim ağırlıkları saptanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. GPKB numunelerine ait kuru birim hacim ağırlık grafiği

Şekil 5.2’de görüleceği üzere GPKB numunelerinin kuru birim hacim ağırlıkları 0.50-1.00 gr/cm³ aralığındaki değerlerden oluşmaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değerlerinde 28. güne kadar bir düşüş gözlenmektedir. Kuru birim hacim ağırlık deneyi sonucunda köpük miktarı fazla olan K3 numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri daha düşükken köpük miktarının en az olduğu K1 numunelerinin kuru birim hacim ağırlık değerleri yüksek değerlere sahiptir. Ayrıca 60 °C sıcaklıkta kür edilen GPKB numunelerinde kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki azalma yüzdesi genel anlamda daha yüksektir.

5.3. Kapiler Su Emme Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi

GPKB numunelerine ait kapilarite katsayısını belirlemek amacıyla yapılan deneylerin sonuçları çizelge 5.1, çizelge 5.2, şekil 5.3 ve şekil 5.4'te verilmektedir. Çizelge 5.1'de verilen taban alanı 16 cm² (4cm x 4cm= 16 cm²) olan numunelerde birim zamanda bünyesine en fazla su alan numuneler genel anlamda 60 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde bekletilen numunelerdir. Ayrıca bünyesine en fazla su emen numunenin K3-60 numunesi olduğu gözlemlenmiştir. K3-60 numunesinin diğer numunelere kıyasla oluşan çatlakların uzantıların daha fazla olması dolayısıyla daha fazla su emdiği düşünülmektedir.

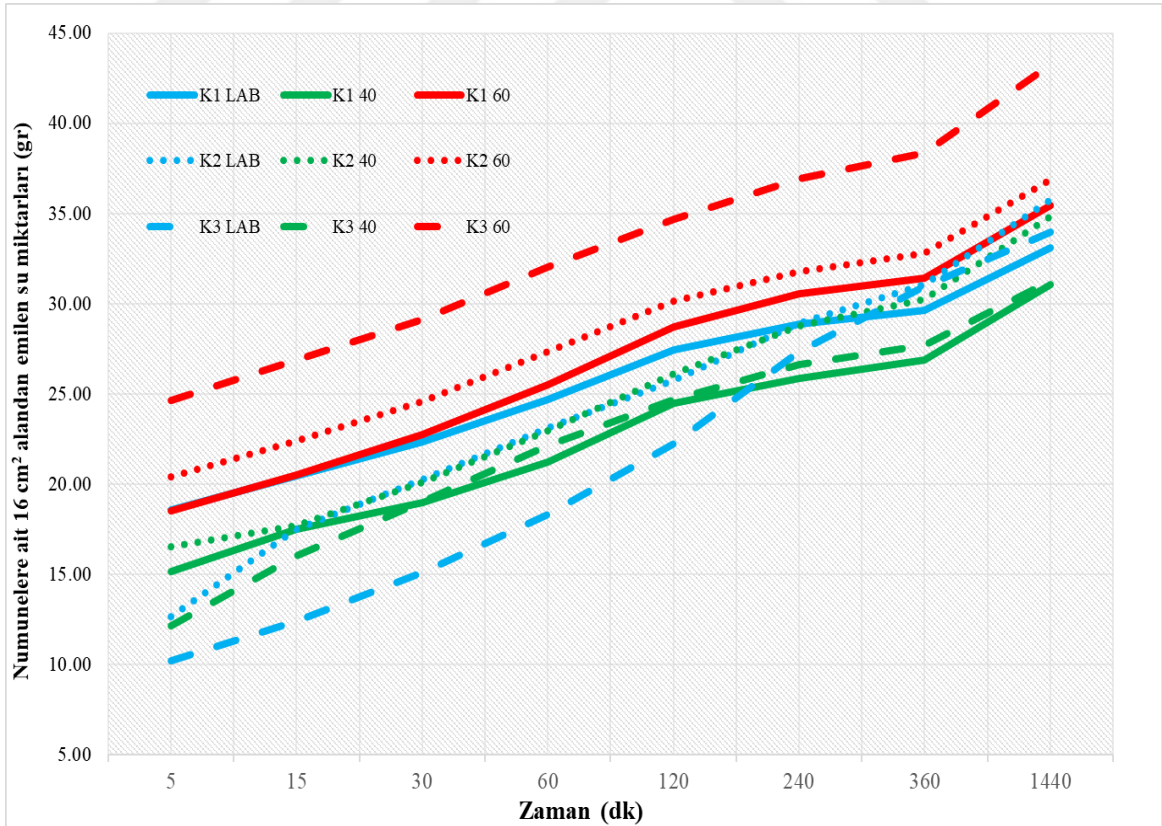
Çizelge 5.1. Numunelere ait 16 cm² alandan emilen su miktarları (gr)

NUMUNE ADI/SÜRE (dk)	K1 LAB	K1 40	K1 60	K2 LAB	K2 40	K2 60	K3 LAB	K3 40	K3 60
5	18.58	15.14	18.52	12.67	16.54	20.42	10.23	4.01	24.65
15	20.45	17.51	20.51	17.50	17.70	22.38	12.38	16.01	26.90
30	22.34	18.98	22.74	20.27	20.09	24.58	15.11	19.04	29.13
60	24.68	21.21	25.49	23.12	22.95	27.33	18.30	22.16	32.02
120	27.43	24.50	28.72	25.78	26.13	30.17	22.24	24.70	34.68
240	28.85	25.88	30.56	28.90	28.78	31.80	27.35	26.64	36.93
360	29.63	26.87	31.42	31.08	30.27	32.78	30.98	27.70	38.34
1440	33.12	31.08	35.44	35.77	34.84	36.86	33.95	31.26	43.25

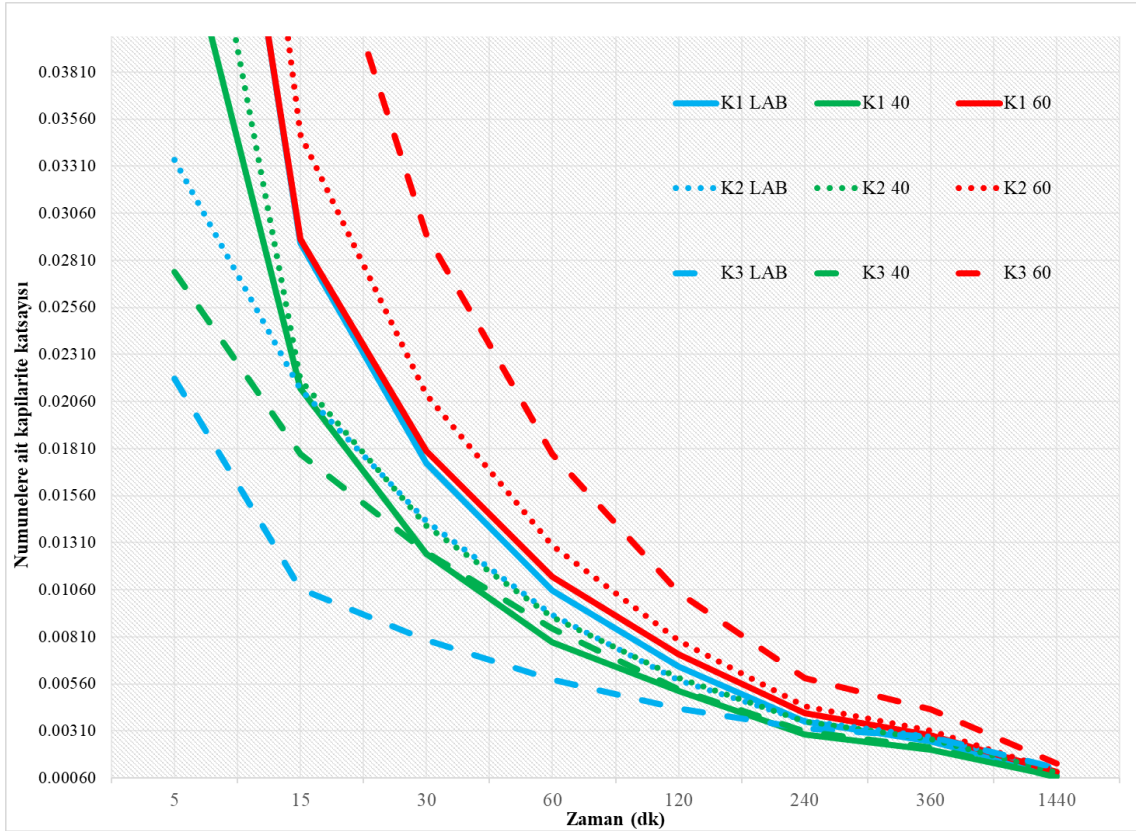
Kapilarite deneylerine tabi tutulan tüm numuneler sıcaklık durumu göz önüne alınmadan değerlendirildiğinde K1 numunelerinin genel anlamda emilen su miktarları ve kapilarite katsayıları daha düşüktür (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. Numunelere ait kapilarite katsayısı

NUMUNE ADI/SÜRE (dk)	K1 LAB	K1 40	K1 60	K2 LAB	K2 40	K2 60	K3 LAB	K3 40	K3 60
5	0.07192	0.04775	0.07146	0.03344	0.05699	0.08687	0.02180	0.00335	0.12659
15	0.02904	0.02129	0.02921	0.02127	0.02176	0.03478	0.01064	0.01780	0.05025
30	0.01733	0.01251	0.01796	0.01427	0.01401	0.02098	0.00793	0.01259	0.02946
60	0.01057	0.00781	0.01128	0.00928	0.00914	0.01297	0.00581	0.00853	0.01780
120	0.00653	0.00521	0.00716	0.00577	0.00593	0.00790	0.00429	0.00530	0.01044
240	0.00361	0.00291	0.00405	0.00363	0.00360	0.00439	0.00325	0.00308	0.00592
360	0.00254	0.00209	0.00286	0.00280	0.00265	0.00311	0.00278	0.00222	0.00425
1440	0.00079	0.00070	0.00091	0.00092	0.00088	0.00098	0.00113	0.00102	0.00135



Şekil 5.3. GPKB numunelerine ait 16 cm² alandan emilen su miktarı grafiği



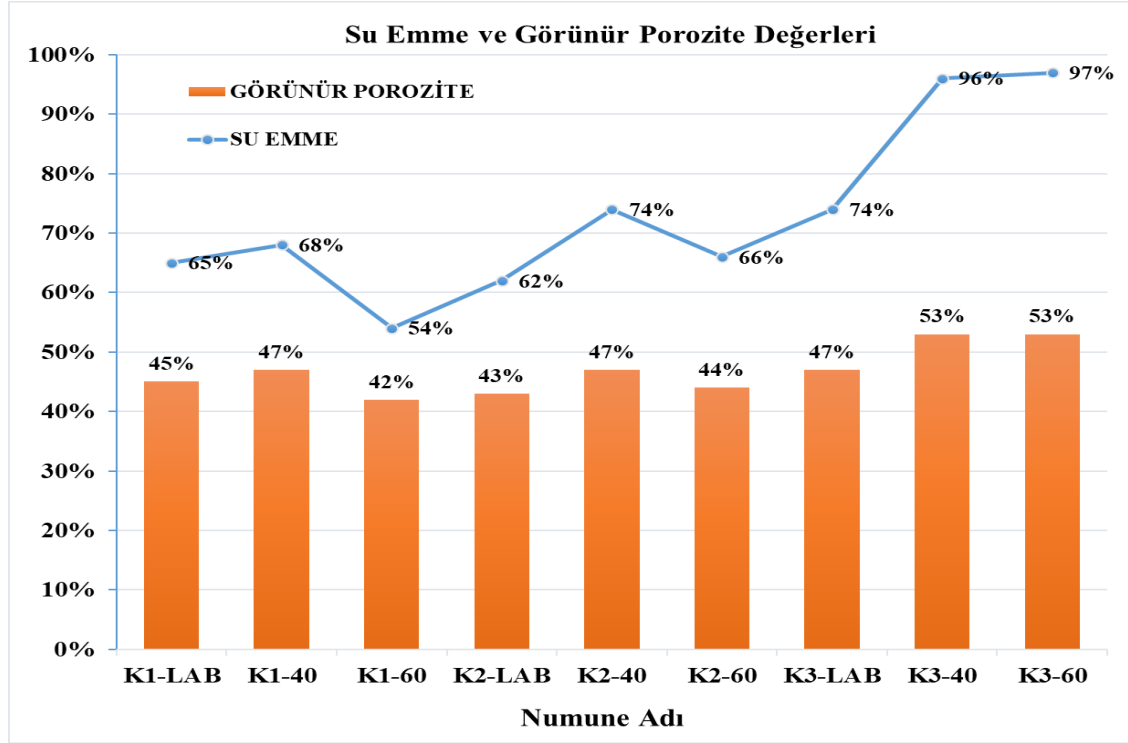
Şekil 5.4. GPKB numunelerine ait kapilarite katsayı grafiği

Şekil 5.3'te emilen su miktarlarını gösteren grafik ile şekil 5.4'te kapilarite kat sayılarını gösteren grafik benzer özellikler göstermektedir.

5.4. Su Emme ve Görünür Porozite Deneylerinin Sonuçlarının İrdelenmesi

GPKB numuneleri gözenekli yapıya sahip olduklarından dolayı suya bırakıldıkları anda bünyelerine hızlı bir şekilde su almaya başlamışlardır. Numuneler ait su emme oranları ve görünür porozite değerleri şekil 5.5'te verilmiştir. Numuneler içerisinde K3-60 numunesi % 97 ile en fazla ve K1-60 numunesi % 54 ile en az su emme oranına sahip numuneler olarak gözlemlenmiştir. GPKB numunelerine ait su emme oranlarının genel anlamda kuru birim hacim ağırlıkları ile ters orantılı olduğu belirlenmiştir. Kuru birim hacim ağırlık değerlerinin artması ve buna bağlı olarak numunelerdeki boşluk oranının azalması ile numunelere ait su emme oranları düşmüştür.

Şekil 5.3'te verilen grafikteki görünür porozite değerleri su emme oranlarının eğilimleri aynı davranış sergilemektedir. Genel olarak su emme oranları için yukarıda bahsedilen durumlar görünür porozite değerleri içinde söylenebilir.



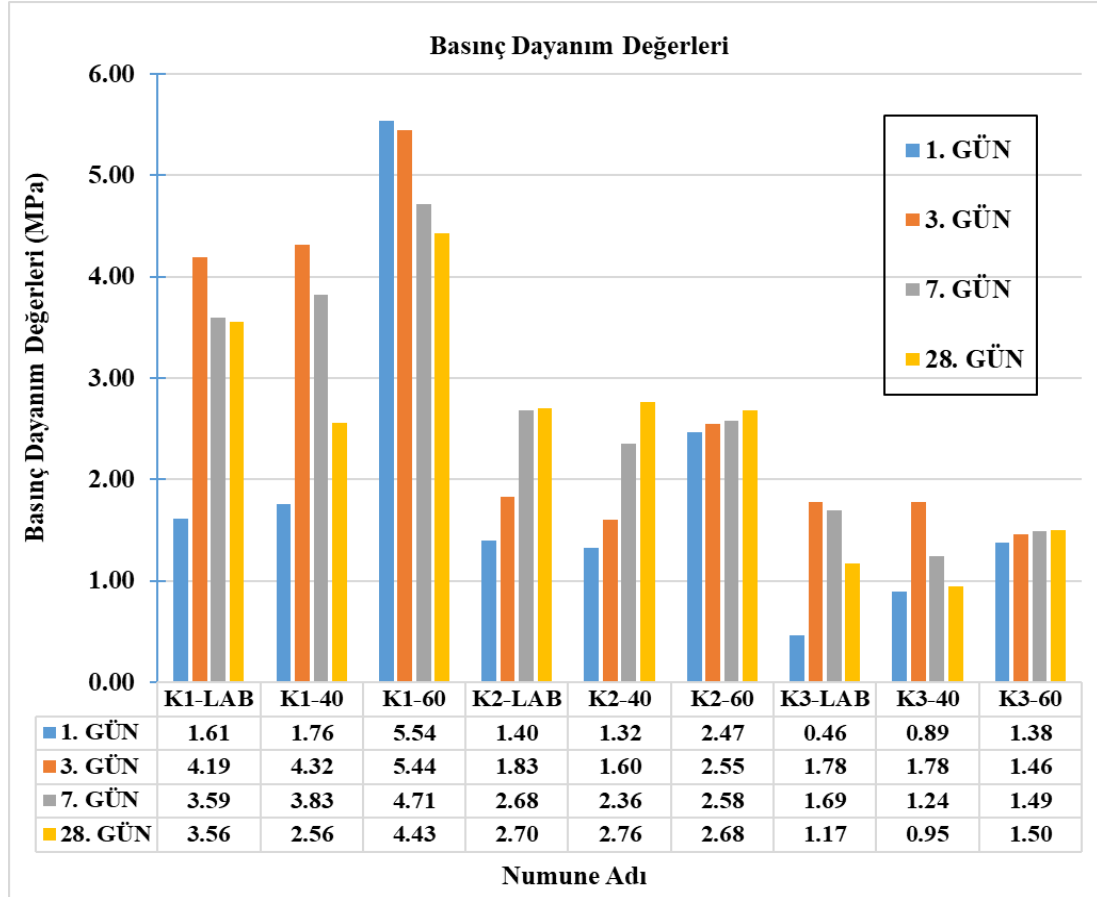
Şekil 5.5. GPKB numunelerine ait su emme ve görünür porozite değerleri

5.5. Basınç Dayanımı Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi

GPKB numunelerine ait basınç dayanım değerleri şekil 5.6'da verilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık değerinin en büyük olduğu K1 numunelerinde yüksek dayanım elde edilmiştir. K1 numunelerinde 7. gün ve 28. gün basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. K2 numunelerinde ise giderek artan bir basınç dayanımı elde edilmiştir. K3-Lab ve K3-40 numunelerinde 3. günden sonra basınç dayanımlarında bir azalma gözlemlenirken K3-60 numunesinde bu olumsuz durumla karşılaşılmamıştır.

GPKB numunelerin büyük çoğunluğunda 3. günden itibaren basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Bu durumun gözenekli yapı içerisinde oluşmuş rötire çatlaklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

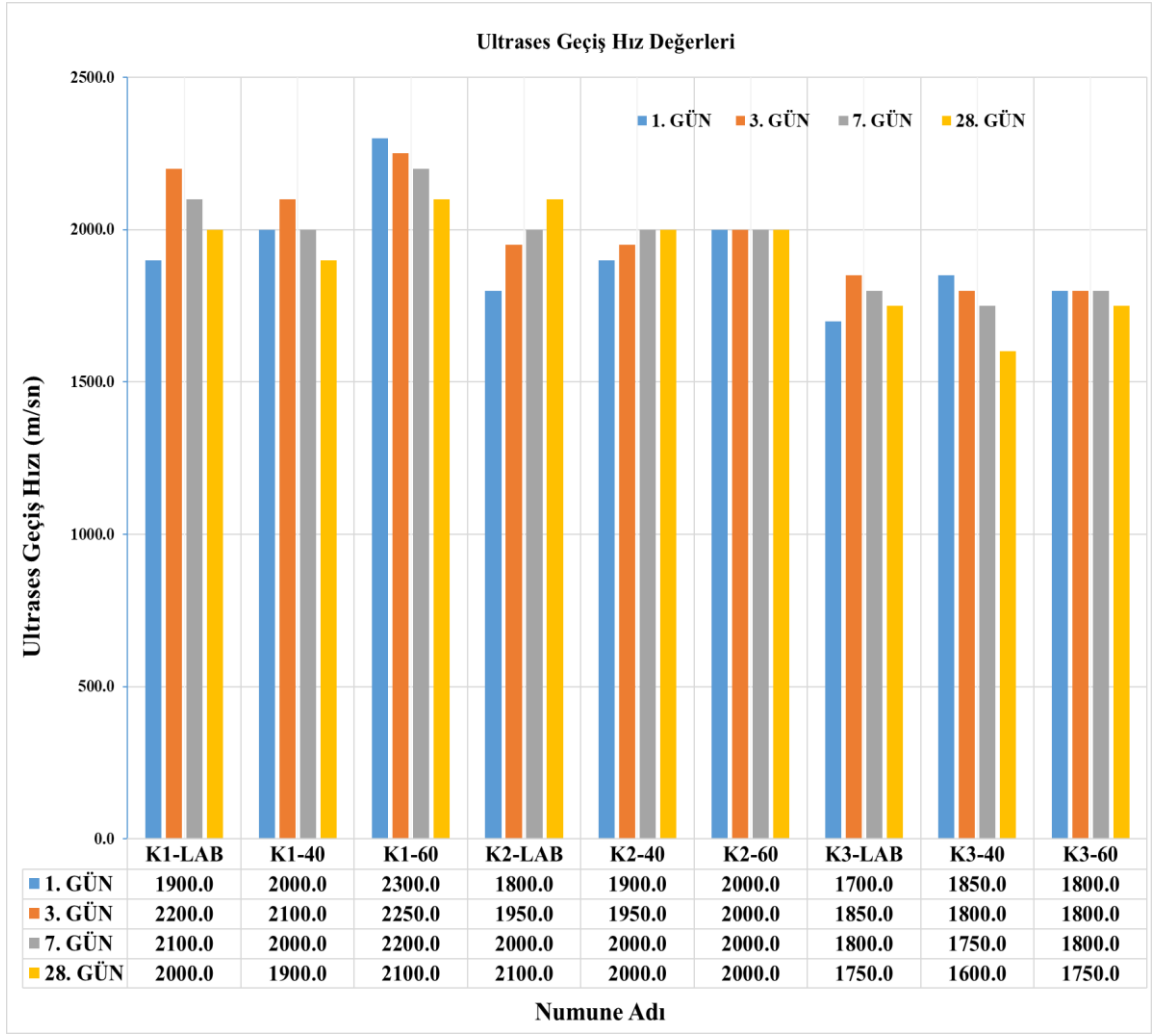
Ayrıca, farklı kür koşulları göz önüne alınarak basınç dayanım değerleri incelenecek olunursa; GPKB numunelerinde 60 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde küre tabi tutulan numunelerin basınç dayanım değerleri en yüksek değerlere sahiptir.



Şekil 5.6. GPKB numunelerine ait basınç dayanım değerlerini

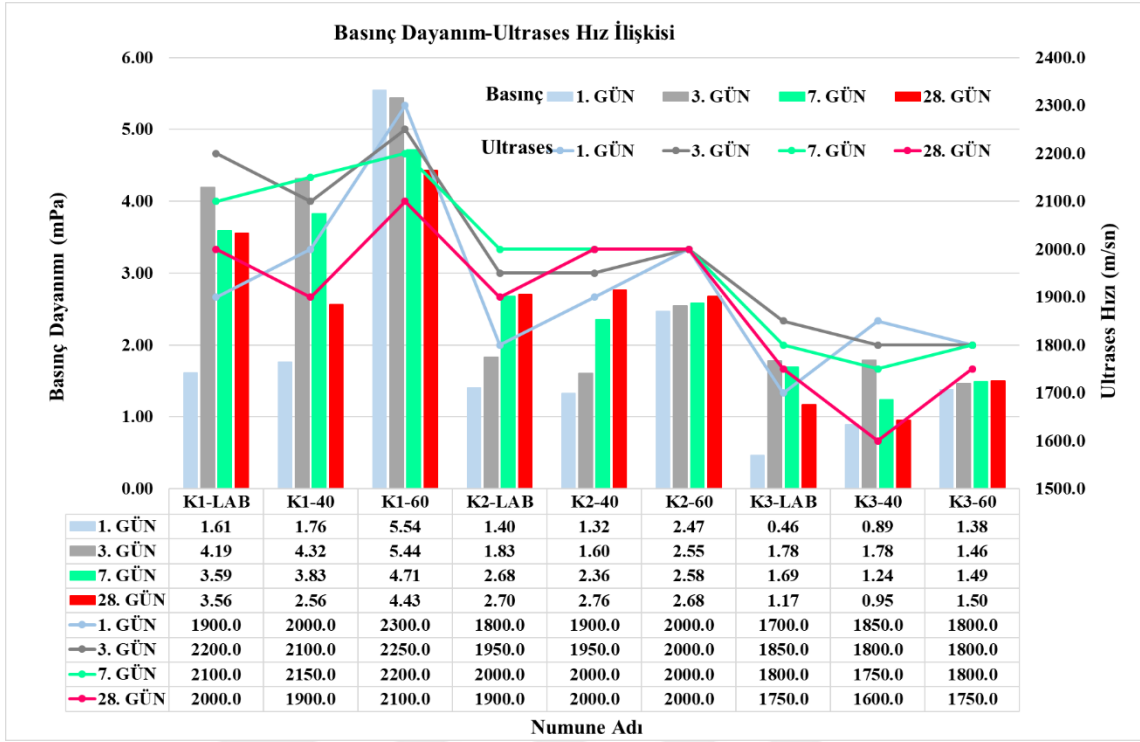
5.6. Ultrases Geçiş Hızı Belirleme Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi

Ultrases geçiş hızı belirleme deneyi bütün numunelerde 1., 3., 7. ve 28. günlerinde yapılmıştır. Deney sonuçları şekil 5.7’de verilmiştir. Kuru birim hacim ağırlıkları yüksek olan K1 numunelerinde ultrases geçiş hızı 1800-2300 m/sn, K2 numunelerinde 1800-2100 m/sn ve kuru birim hacim ağırlıkları düşük olan K3 numunelerinde ise 1700-1900 m/sn’dir. Sonuç olarak kuru birim hacim ağırlıkla ultrases geçiş hızı arasında doğru orantı bulunmaktadır.



Şekil 5.7. GPKB numunelerine ait ultrases geçiş hız değerleri

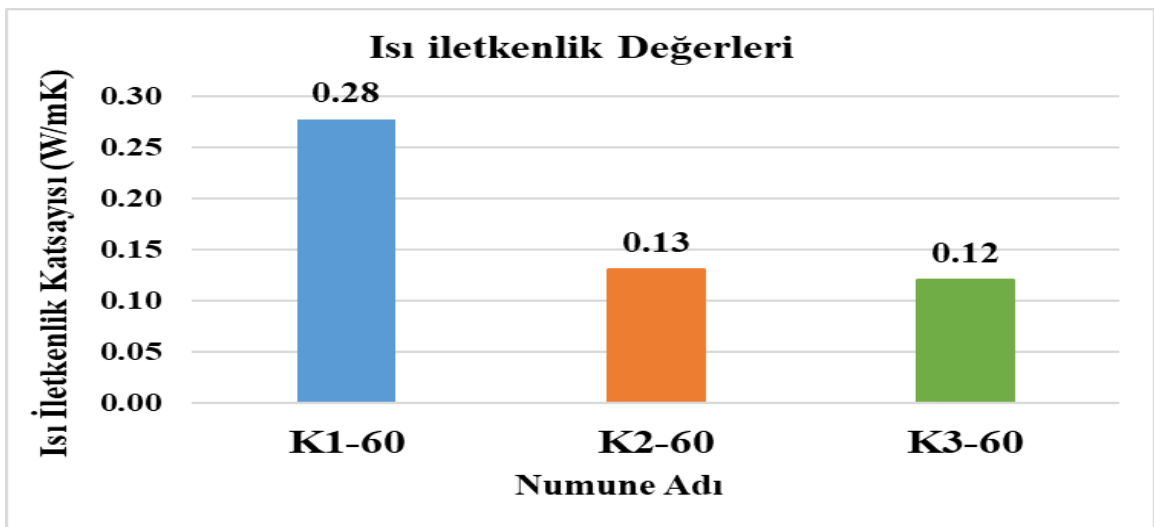
Şekil 5.8’de verilmiş olan basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişki grafiğine bakılarak basınç dayanım değerleri ile ultrases geçiş hızı arasında korelasyon saptanmıştır. K1 numunelerinde basınç değerlerinde ve ultrases geçiş hızlarında 3. güne kadar artış gözlemlenirken daha sonraki günlerde her iki parametrede de azalma meydana gelmiştir. K2 numunelerinde hem basınç dayanım hem de ultrases geçiş hızı değerleri giderek artmıştır. K3 numunelerinde ise her iki parametrede de en düşük değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.8. GPKB numunelerinde basınç dayanım ultrases geçiş hız ilişkisi

5.7. Isı İletkenlik Deneyinin Sonuçlarının İrdelenmesi

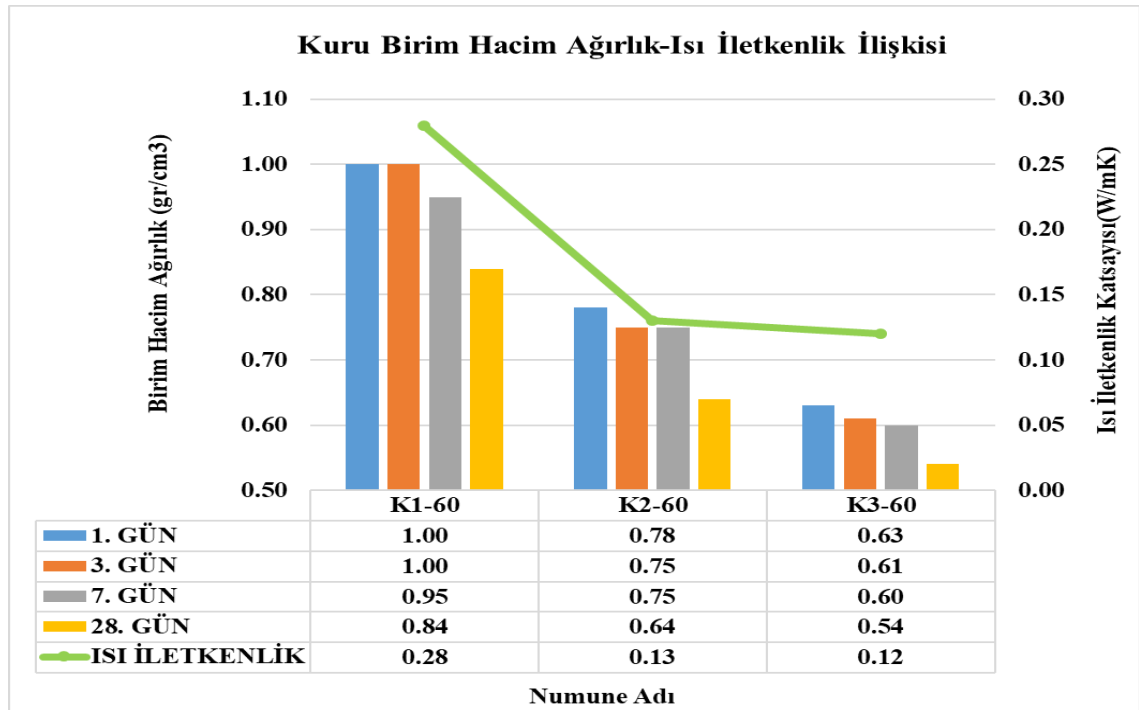
Isı iletkenlik katsayı değerlerini veren deney sonuçları şekil 5.9'da gösterilmiştir. Isı iletkenlik katsayı değerleri K1-60 numunesinde 0.28 W/mK değeri bulunmuştur. K2-60 ve K3-60 numuneleri için sırası ile 0.13 ve 0.12 W/mK değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.9. GPKB numunelerine ait ısı iletkenlik katsayı değerleri

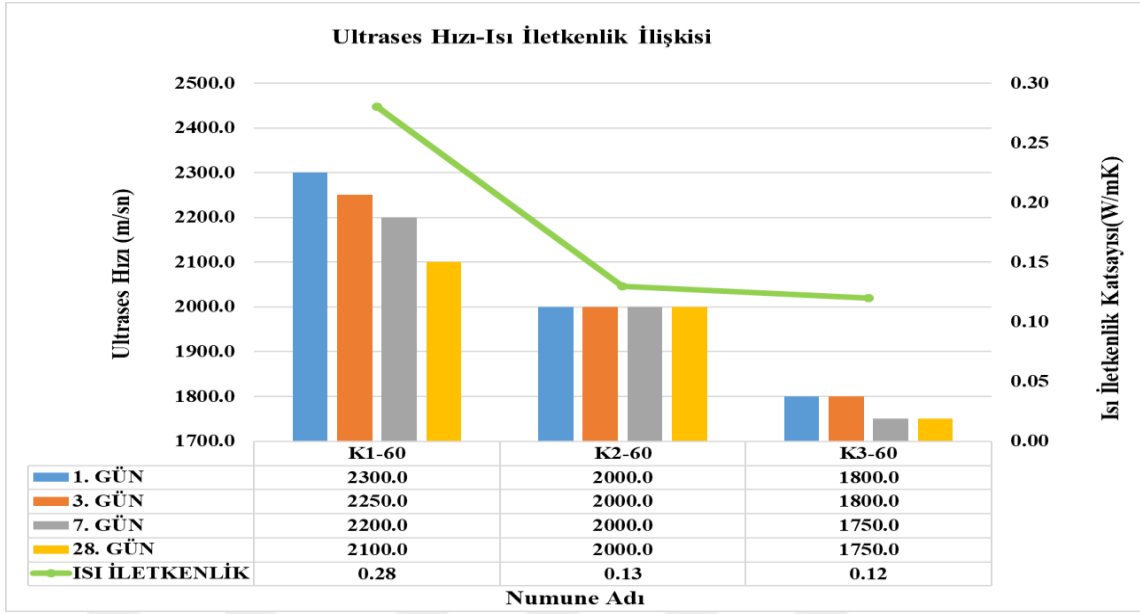
Isı iletkenlik katsayısı, ısının malzeme içerisinde bir uçtan bir uca iletilme durumu olarak ifade edilmektedir. Isı iletkenlik katsayısının düşük olması malzemenin ısı yalıtım özelliğinin iyi olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.10’da kuru birim hacim ağırlık ısı iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki verilmiştir. K3-60 numunesinin ısı iletkenlik katsayısının düşük olması, kuru birim hacim ağırlık değerinin düşük olması ve diğer numunelere oranla daha gözenekli yapıya sahip olması ile alakalıdır.



Şekil 5.10. GPKB numunelerinde kuru birim hacim ağırlık ısı iletkenlik katsayı ilişkisi

Şekil 5.11’de verilen grafikte ultrases geçiş hızı ile ısı iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. K3-60 numunesinin ısı ve ses yalıtımı açısından en iyi değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.11. GPKB numunelerinde ultrases geçiş hızı ısı iletkenlik katsayısı ilişkisi

5.8. Geopolimer Köpük Beton Numunelerine ait Mikro Yapı Analizlerinin İrdelenmesi

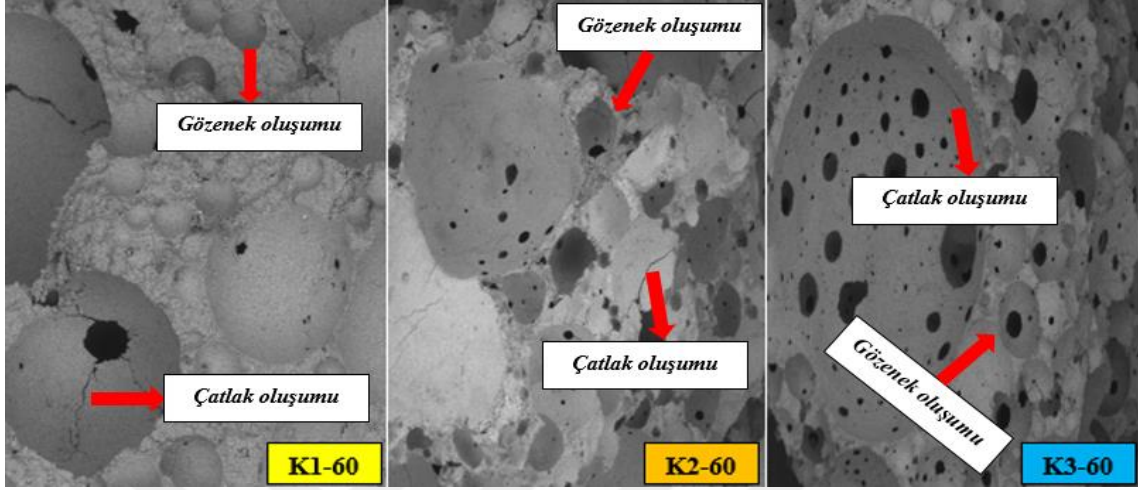
Bu çalışma kapsamında üretimi yapılan GPKB numunelerinde SEM ve XRD analizleri yardımıyla numunelerin mikro yapısında meydana gelen faz yapıları incelenerek bulgular sunulmuştur.

5.8.1. SEM görüntüleme analizi

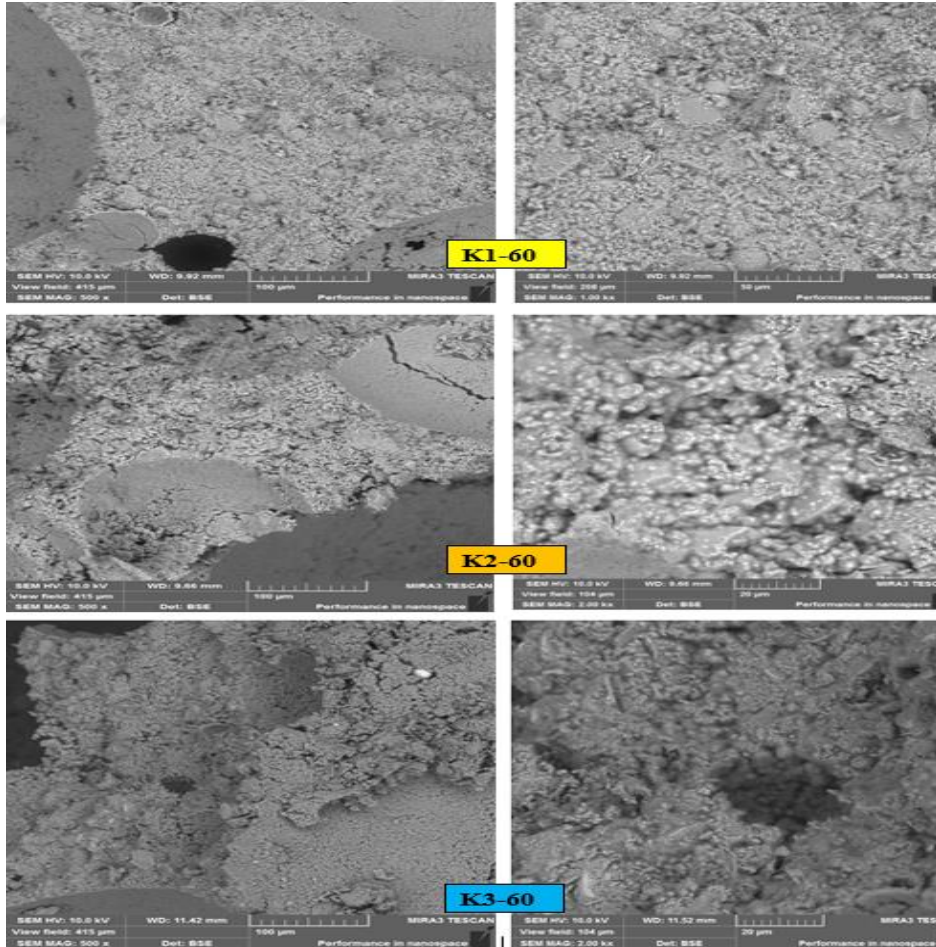
SEM görüntüleme analizi için 60 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde kür uygulanan GPKB numuneler kullanılmıştır. GPKB numunelerine ait SEM görüntüleme analizleri şekil 5.12 ve şekil 5.13'te verilmiştir.

Şekil 5.12'de verilen SEM görüntüleme analizinde gözenekli yapı K1-60 numunesinden K3-60 numunesine doğru artmıştır. Numuneler hazırlanırken karışım içerisine ilave edilen köpük solüsyonu miktarının artması ile gözenek sayısının attığı gözlemlenmiştir. K1-60 numunesinde meydana gelen çatlaklar gözeneklerin kenarlarında meydana gelmiştir. K2-60 numunesinde bu çatlaklar birbirine komşu iki gözeneklere kadar uzanmaktadır. K3-60 numunelerinde ise bu çatlaklar birbirine komşu olmayan daha uzak

gözeneklere kadar uzanan çatlaklar gözlemlenmiştir. Çatlakların oluşum şekli ve uzantısına bağlı olarak basınç dayanımını etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 5.12. GPKB numunelerinde SEM görüntülerinde gözenekler ve çatlak oluşumları



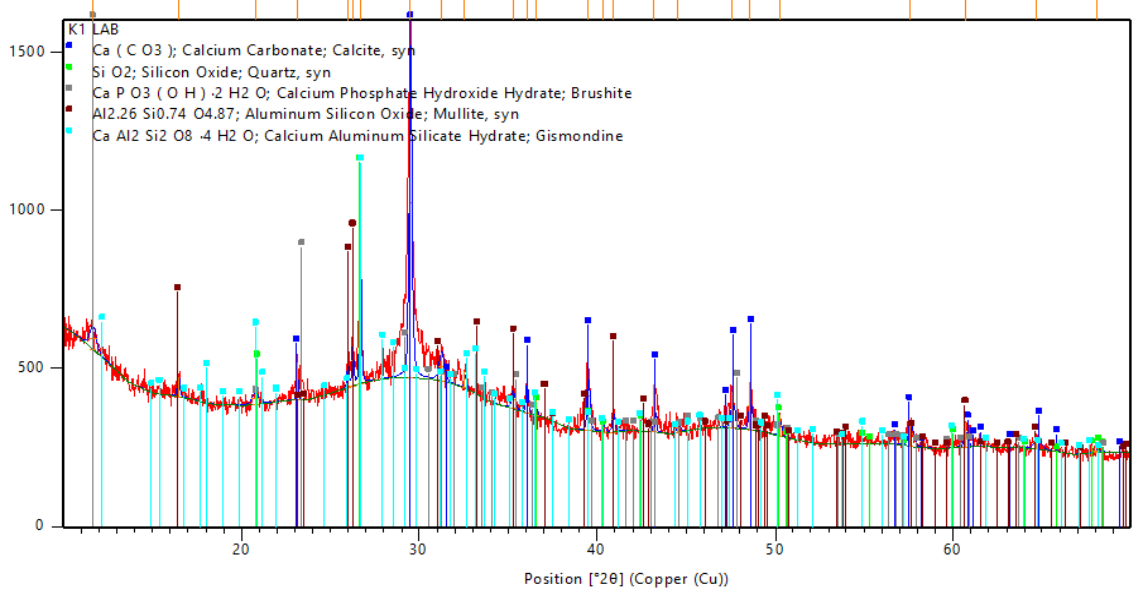
Şekil 5.13. GPKB numunelerinde SEM görüntülerinde jel oluşumu

Şekil 5.13'te verilen SEM görüntülerinde numunelerde köpük solüsyonu miktarının azalması ile numunelerin daha yoğun bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Bu durum kuru birim hacim ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlarla tutarlılık göstermektedir.

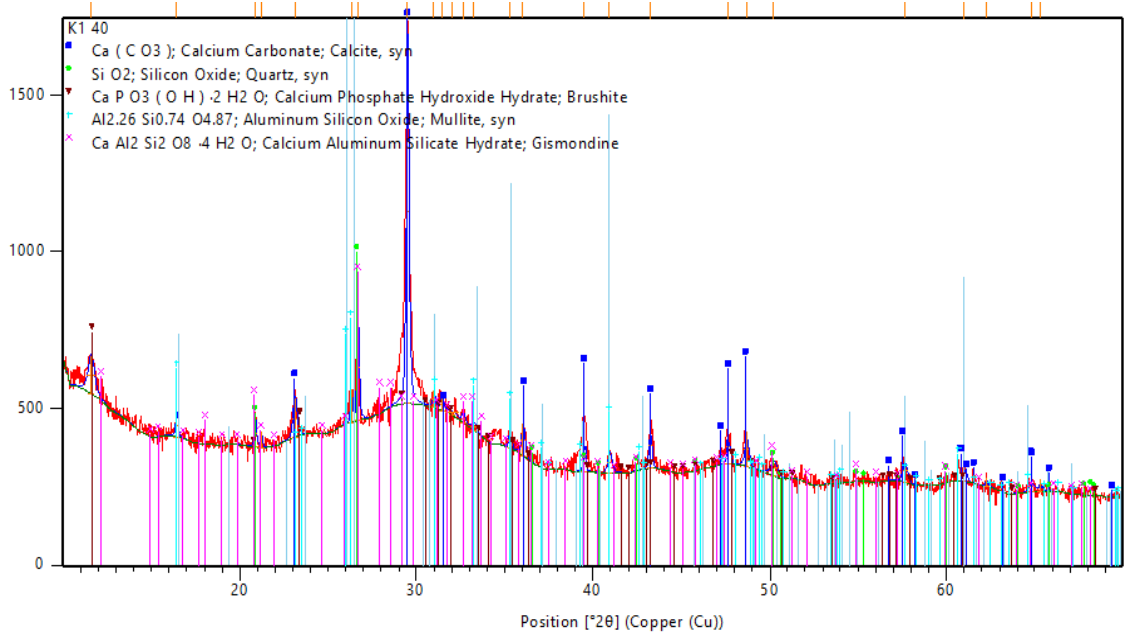
5.8.2. XRD analizi

K1-LAB, K1-40 ve K1-60 numunelerinden alınan örneklerle Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde XRD analizleri yapılmıştır. Numunelere ait XRD difraktogramları Şekil 5.14, şekil 5.15 ve şekil 5.16'da verilmiştir.

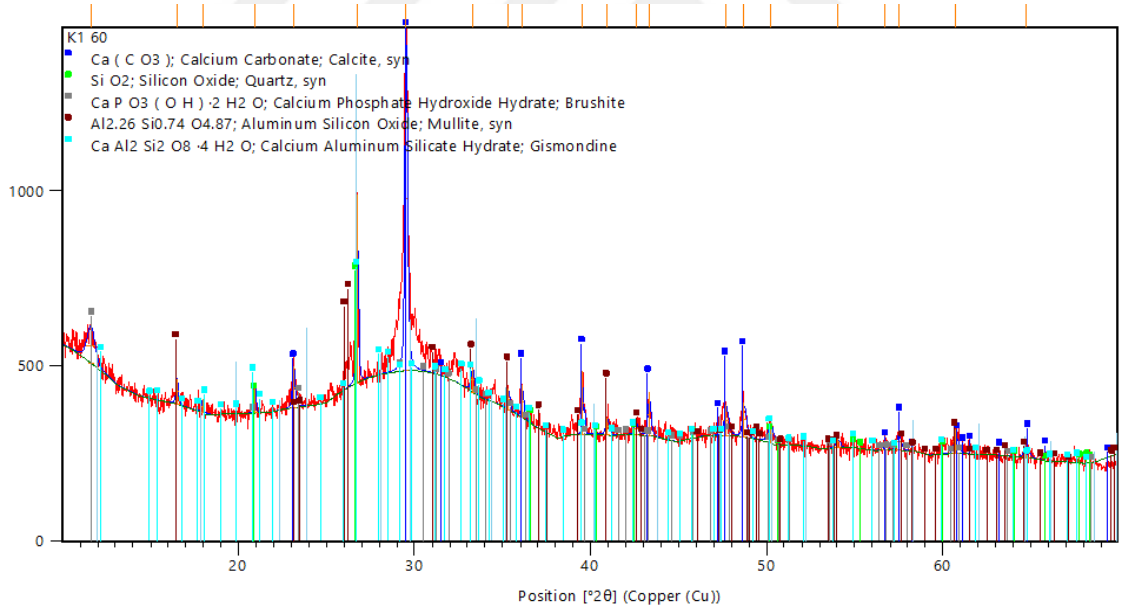
GPKB numunelerine ait piklerin bulunduğu difraktogramlar incelenecek olunursa tüm numunelerde Calcite, Quartz, Brushite, Mullite ve Gismondine kristal fazları bulunmuştur. Tüm numunelerde kristal fazlar benzer özellik göstermektedir. Ayrıca K1-40 numunesinde diğer numunelere oranla daha fazla Quartz ve Mullite kristal fazları oluşmuştur. K1-40 numunesinde bu fazların yoğun olmasından dolayı geopolimerizasyon olayı için en ideal sıcaklığın 40 °C olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.14. K1-LAB GPKB numunesine ait XRD difraktogramı



Şekil 5.15. K1-40 GPKB numunesine ait XRD difraktogramı



Şekil 5.16. K1-60 GPKB numunesine ait XRD difraktogramı

6. SONUÇ

Bu çalışmada İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın bir atığı olan YFC, alkalilerle (NaOH ve Na₂SiO₃) aktive edilerek geopolimer harç elde edilmiştir. Bu harç içerisine köpük solüsyonu ilave edilerek GPKB üretilmiştir. GPKB numunelerinde kuru birim hacim ağırlık, kapilarite, su emme, görünür porozite, basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde elde edilen sonuçlara bakılarak belirlenen bazı numunelerde SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ve analizler doğrultusunda elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir.

1. K1 numunelerinin kuru birim hacim ağırlık değerleri K2 ve K3 numunelerinin değerlerine göre daha büyüktür. Bu durumun nedeni, K1 numunelerine ilave edilen köpük solüsyonu miktarı en az olmasından dolayıdır. Kür koşullarının göz önünde bulundurulması durumunda 60 °C sıcaklıkta etüvde bekletilen numunelerin diğer kür koşullarında bekletilen numunelere göre kuru birim hacim ağırlıklarındaki değişim oranı daha yüksektir.
2. Kapilarite katsayısını belirleme deneyleri sonucuna göre K3 numunelerinde en yüksek kapilarite katsayı değerleri elde edilmiştir. SEM görüntüleri doğrultusunda K3 numunelerinde bulunan çatlaklar numunelerde oluşmuş olan boşluklu yapılar arasına meydana gelmiştir. Bu çatlakların uzunlukları en fazla K3 numunelerinde oluşmuştur. K2 numunelerinde oluşmuş olan çatlaklar numunede birbirine yakın iki boşluklu yapı arasında meydana gelmiştir. K1 numunelerinde ise bu çatlakların uzunlukları en kısa olmakla birlikte numunelerde bulunan boşluklu yapıların etrafında meydana gelmiştir. SEM görüntüleri ile belirlenmiş olan durum ile kapilarite katsayıları arasında paralellik bulunmaktadır.
3. SEM analizlerine bakılarak yapıların içerisinde rötre çatlaklarının meydana geldiği görülmüştür. Bu çatlakların oluşum şekline göre su emme değerleri de aynı eğilim göstermektedir. Ayrıca görünür porozite değerleri kuru birim hacim ağırlığı en düşük olan K3 numunelerinde en büyük değerleri almıştır. Kuru birim

hacim ağırlığının düşük olması K3 numunelerinin daha fazla gözenekli yapıya sahip olduğundan kaynaklanmaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değerleri yükseldikçe görünür porozite değerleri düşmüştür.

4. GPKB numunelerinin basınç dayanım değerleri ile kuru birim hacim ağırlıkları arasında doğru orantı bulunmaktadır. K1 numuneleri en yüksek basınç dayanım değerlerine sahiptir. Fakat K1 numunelerinin basınç dayanım değerleri 3. günden sonra giderek düşmektedir. Basınç dayanım değerlerinde K3 numuneleri K1 numuneleri ile benzer sonuçlar sergilemiştir. Fakat K3 numuneleri basınç dayanım değerleri en düşük numuneler olarak saptanmıştır. Numunelerin çoğunluğunda 3. günden sonra basınç dayanım değerlerinin düşmesine rötre çatlaklarının neden olduğu düşünülmektedir.
5. Tüm numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri ile kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri arasında genel anlamda paralellik bulunmaktadır. En düşük kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerlerine sahip olan K3 numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri de tüm numuneler arasında en düşük değerlere sahip numunelerdir.
6. Genel olarak aynı GPKB numunesinin farklı kür koşulları göz önüne alınarak incelenecek olunursa; GPKB numunelerinde 60 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde küre tabi tutulan numunelerin basınç dayanım değerleri en yüksek değerlere sahiptir. 40 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde bekletilen GPKB numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri en düşüktür. Ayrıca laboratuvar ortamında 24 saat kür uygulaması yapılan numunelerde ise en düşük görünür porozite ve su emme değerleri tespit edilmiştir.
7. GPKB numuneler köpük solüsyon miktarına göre hazırlanmıştır. SEM görüntü analizlerine göre köpük solüsyon miktarının en fazla olduğu K3 numunelerinde gözenekli yapı en fazladır. Numunelerin içyapı yoğunluğu köpük solüsyon miktarının azalması ile artmamıştır. SEM görüntü analizlerinde rötre çatlaklarına da rastlanmıştır. Fakat numune tiplerine göre farklı uzantılı ve boyutlu çatlaklıklar oluşmuştur.

8. XRD analiz sonuçlarına göre GPKB numunelerin kimyasal yapılarının genelinde Calcite, Quartz, Brushite, Mullite ve Gismondine kristal fazlar meydana gelmiştir. Geopolimerizasyon olayında oluşan siliat yapıları en fazla piklerin bulunduğu difraktogram K1-40 numunesine aittir. K1-40 numunesine dayanarak geopolimerizasyon olayı için ideal sıcaklığın 40 °C olduğu söylenebilir.
9. Yapılan çalışmalar sonucunda üretilen GPKB numunelerinin kuru birim hacim ağırlık değerleri, basınç dayanım değerleri, ultrases geçiş hızı değerleri ve ısı iletkenlik katsayı değerleri piyasada üretilen bims, blok ve gaz beton gibi taşıyıcı özelliği bulunmayan duvar malzemelerine eş değer GPKB üretilmiştir.
10. Numunelerdeki rötre çatlaklarının oluşmasını engellemek amacıyla lifli malzemeler ve beton katkıları kullanılabilir. Daha sonraki çalışmalarda kür uygulama sıcaklığı ve süresi değiştirilerek GPKB numuneler üretilir. YFC'den daha fazla endüstriyel bir atık olan uçucu kül YFC ile birlikte farklı oranlarda kullanılarak GPKB üretimi denenebilir. Ayrıca üretilen GPKB numuneler bims, blok ve gaz beton gibi taşıyıcı özelliği bulunmayan duvar malzemelerine benzer boyutlarda üretimi gerçekleştirilerek maliyet analizleri yapılabilir.

Bu tez çalışmasında; çimento kullanımı olmaksızın endüstriyel atıklar kullanılarak inşaat sektöründe taşıyıcı özelliği bulunmayan duvar malzemelerine eş değer özellikte geopolimer köpük beton üretimi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmanın iki önemli amacı bulunmaktadır. İlk olarak inşaat sektörünün yapı taşlarından olan çimentonun kullanımını azaltmaktır. Çünkü çimentonun üretimi esnasında havaya ciddi oranlarda CO₂ gazının salınımı yapılmaktadır. Açığa çıkan CO₂ gazı sera etkisine neden olmaktadır. İkinci amacı ise insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yapmış oldukları üretim veya tüketim sonucunda dünyaya bıraktıkları bir takım atıkların geri dönüşümünü sağlayarak dünyamızın daha yaşanabilir bir yolarak gelecek nesillere bırakmaktır.

7. KAYNAKLAR

- 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. *Internatioanal Journal of Molecular Sciences*, 13(6), 7186-7198.
- Açıkgöz, A., 2015. Yüksek Fırın Cürüflü Betonların Hidratasyon Sıcaklığının Araştırılması. (Y. Lisans Tezi), Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Niğde.
- Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Drechsler, M. 2017. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374-385.
- Arsoy, A., 2018. Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Alakalilerle Aktivasyonu ile Üretilen Betonların Özelliklerinin İncelenmesi. (Y. Lisans Tezi), İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hatay.
- Atabey, V., 2018. Mermer Atıklarından Köpük Beton Üretimi. (Y. Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Afyon.
- Bakharev, T., Sanjayan, J., G. ve Cheng, Y.B., 2001. Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali–aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 331–334.
- Bekaroğlu, M., 2012. Kompozit Yapıda Pomza Agregası İçeren Köpük Betonun Özellikleri ve Teknik Parametrelerin İrdelenmesi. (Y. Lisans Tezi),), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta.
- Bilim, C., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği. (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana.
- Bingöl, Ş., 2018. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. (Doktora Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri.

- Canbaz, M., 2007. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflu Harçların Özellikleri. (Doktora Tezi), Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir.
- Criado, M., Palomo, A. & Fernandez-Jimenez, A., 2005. Alkali Activation of fly ashes Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, 84(16), 2048-2054.
- Criado, M., Fernandez, A.J., Aranda, M., Palomo, A., 2007, An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. *Cem Concr. Res.* 2007b, 37(5), 671–679.
- Çaçur, Y., 2019. Hücresel Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. (Y. Lisans Tezi), Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Van.
- Çolak C., 2018. Mechanical and Durability Properties of Alkali Activated Slag Concrete. (M. Sc. Thesis), İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.
- Dakman, M. H., 2017. Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi. (Y. Lisans Tezi), Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir.
- Daniel, K., Sanjayan, J., and Crentsil, K.S., 2006. The behaviour of geopolymer paste and concrete at elevated temperatures. *International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer*, 105–118.
- Davidovits, J. (1991a veya b kullan aynı tarih için). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *J. Therm. Anal.* 37(8), 1633-1656.
- Davraz, M., ve Kılınçarslan, Ş., 2015. Investigation of relation of between compressive strength and ultrasonic pulse velocity in the foam concrete with different density, *ICOCEE-Cappadocia*, p. 994-998, Nevşehir.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., Koru, M., 2015. Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım Ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal beton kongresi, 93-102.
- Duxon, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C, Palomo, A. and Van Deventer J.S.J, 2007. “Geopolymer technology: the current state of the art”. *Journal Material Scientist* 42 (9), 2917- 2933.

- Doğulu, S., 1998. Effect of Fineness of Ground Granulated Blast-Furnace Slags on Their Cementitious Properties. (Y. Lisans Tezi), Orta Dođu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erdoğan, T. Y., 1995. Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 1–13.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Palomo, J., 2005. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator. *Cement and Concrete Research* 35(10), 1984–1992.
- Gümüş, A., 2016. Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi. (Y. Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Afyon.
- Jones, M. R., McCarthy, M. J., McCarthy, A., 2003. Moving fly ash utilisation in concrete forward : A UK perspective. *International Ash Utilization Symposium*. Center for Applied Energy Research, University of Kentucky.
- Kantarıcı, F., 2018. Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tüf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi Ve Özelliklerinin Araştırılması. (Doktora Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malatya.
- Khale, D. and Chaudhary, R., 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729-746.
- Koker, T. Ş., 2019. Hafif Agregalı Katkılı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri. Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Niğde.
- Kong, D.L.Y. ve Sanjayan, J.G., 2010. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research* 40(2), 334–339.
- Koudriashoff, I.T., 1949. Manufacture of reinforced foam concrete roof slabs. *J Am Concr Inst*, 21(1), 37–48.
- Kupaei, R.H., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z.B., Nikraz, H., 2013. Mix design for fly ash based oil palm shell geopolymer lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 43(2013), 490-496.

- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y., 2004. Development of sustainable cementitious materials (pp. 55-76). Proc. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. May 20-21, Beijing.
- Luga, E., 2015. Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikler. (Doktora Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ercri.
- Lui, 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 and Buildings*, 72(2014), 238-245.
- Luukkonen, T., Sarkkinen, M., Kemppainen, K., Lassi, J. R.U., 2016. Metakaolin geopolymer characterization and application for ammonium removal from model solutions and landfill leachate. *Applied Clay Science*, 119 (2016), 266–276.
- Mahmut, O., 2015. Geopolimer Harç Üretiminde Elazığ Ferrookrom Cürufu Kullanımının İncelenmesi. (Y. Lisans Tezi), Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Düzce.
- Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601-605.
- Mehta, P. K. & Paulo, J. M. M., 2006. *Concrete Microstructure Properties and Materials.*, 239 p, California, USA.
- Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K., 2006. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(5), 475–480.
- Nambiar, E., ve Ramamurthy, K., 2007. Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 221–30.
- Narayanan, N., Ramamurthy, K., 2000. Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cem. Concr. Compos.* 22(2000), 321–329.
- Newman, J., Choo, B. S., 2003. *Advanced Concrete Technology. Constituent Materials*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Onat, O. B., 1998. Türkiye’de Üretilen Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Özelliklerine Etkisi. (Y. Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özcan, A., 2018. Ferrookrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Asit, Tuz ve Sülfat Etkilerine Karşı Dayanıklılığının

- Araştırılması. (Y. Lisans Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malatya.
- Ören, O. H., 2017, Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Köpük Beton Özelliklerine Etkisi. (Y. Lisans Tezi), Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bartın.
- Özodabaş, A., 2014. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harçların Performansının Geliştirilmesi. (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes J. P., and S. Jalali, S., 2008 Alkaliactivated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1315-1322.
- Posi, P., Teerachanwit, C., Tanutang, C., Limkamoltip, S., Lertnimoalchi, S., Sata, V., Chindaprasirt, P., 2013. Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. *Material and Design*, 52(2013), 580-586.
- Posi, P., Ridtirud, C., Ekvang, C., Chammanee, D., Janthowang, K., Chindoprasirt, P., 2015. Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. *Construction and Building Materials*, 94(2015), 408-413.
- Posi, P., Thongjapo, P., Thamultree, N., Boontee, P., Kasemsiri, P., Chindaprasirt, P., 2016. Pressed lightweight fly ash-OPC geopolymer concrete containing recycled lightweight concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 127 (2016) 450–456.
- Provis, J. L., 2009. Activating solution chemistry for geopolymers. *Structures, Processing, Properties and Industrial Applications Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 50-71.
- Pullen, S., 2000. Energy used in the construction and operation of houses. *Architect Sci. Rev.* 43(2), 87–94.
- Sanjayan, J. G., Nazari, A., Chen, L., Nguyen, G.H., 2015. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer. *Construction and Building Materials*, 79(2015), 236-244.

- Ramamurthy, K., Nambiar, E.K., Ranjani, G., 2009. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composite*, 31(6), 388-396.
- Rangan, B.V., 2008, Low-calcium, fly-ash-based geopolymer concrete. *Concrete construction engineering handbook*, CRC Press 26-1.
- Regourd, M., 1986. Slags and Slag Cements. *Cement Replacement Materials*, R.N. Swamy, Surrey University Pres, s. 73–79.
- Risdanareni, P., Hilmi, A., & Susanto, P. S., The effect of foaming agent doses on lightweight geopolymer concrete metakaolin based. *AIP Conference Proceedings*. May, 2017. American Institute of Physics.
- Sağlık, A. Ü., 2009. Alkali-Silica Reactivity And Activation of Ground Perlite - Containing Cementitious Mixtures, (PhD Thesis), Middle East Technical University, Ankara.
- Serin, G., Çankıran, O., Başyigit, Ç., Taş, H.H., Fenkli, M., 2007. Normal, hafif ve yarı hafif beton blokların fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(2016), 15-22,
- Shi C., Krivenko, P.V., Roy, D., 2006. *Alkali-Activated Cements and Concretes*, CRC Press, p.392, USA.
- Shi, X.S., Wang, Q. Y., Zhao, X. L., Collins, F., 2012. Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate. *Adv. Mater. Res.* 450-451, 1577-1583.
- Short, A., Kinniburgh, W., 1963. *Lightweight Concrete*. Asia Publishing House.
- Shrestha, P., 2013. *Development Of Geopolymer Concrete For Precast Structures*. (Master Of Science Thesis), The University Of Texas At Arlington, Texas.
- Singh, N.B., 2018. Foam geopolymer concrete. *Material Today: Proceeding*, 5(2018), 15243-15252.
- Sutama, A., Saggaff, A., Hanafiah, S., 2019. Properties and microstructural characteristics of lightweight geopolymer concrete with fly ash and kaolin. *International Journal of Scientific & Technology Research*, Volume 8(2019), 57-64.
- Tokyay, M., 2003. *Cürüflar ve Cürüflu Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlerdirmesi Raporu*. TÇMB. Ankara.

- Top, S., 2019. Termik Santral ve Metalurjik Tesis Artıklarından Yapay Zeolit ve Geopolimer Malzemelerin Eldesi. (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana.
- TS EN 772-4, (2000). Kagir Birimler, Deney Metotları- Bölüm 4: Tabii Taş Kâgir Birimlerin Toplam ve Görünen Porozitesi İle Boşluksuz ve Boşluklu Birim Hacim Kütlesinin Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 772-11, (2012). Kagir Birimler- Deney Yöntemleri Bölüm 11: Betondan, Gazbetondan, Yapay ve Doğal Taştan Yapılmış Kâgir Birimlerde Kapiler Su Emme ve Kil Kâgir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-7, (2019). Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12667, (2003). Yapı Malzemeleri ve Mamullerinin Isıl Performansı- Muhafazalı Sıcak Plaka ve Isı Akış Sayacı Metotlarıyla Isı Direnci Tayini Yüksek ve Orta Isıl Dirençli Mamuller. TSE, Ankara.
- Tuzlak, F., 2017. Taze Beton Reolojisinin Köpük Beton Özelliklerine Etkisi. (Y. Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta.
- Ulu, C., 2016. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Metakaolinli Harçlarda Atık Pet Agrega Kullanımının Araştırılması. (Y. Lisans Tezi), Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Niğde.
- Valore, R.C., 1954, Celluar concrete part 1 composition and methods of production, ACI J, 50 (1954), 773-796.
- Wangkeo, W., Seekaew, S., Kaewrahan, O., 2019. Properties of high calcium fly ash geopolymer lightweight concrete. Material Today: Proceedings, 17(2019), 1423-1430.
- Wongsa, A., Zaetang, Y., Sata, V., Chindaprasirt, P., Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates. Construction and Building Materials, 111 (2016) 637–643.
- Wongsa, A., Sata, V., Nuoklang, P., Chindoprasirt, P., 2018. Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 188(2018), 1025-1034.

- Xu, H. and Deventer V., 2000. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-66.
- Yakupoglu, A., 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürüflu Harçların Özellikleri. (Y. Lisans Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bakri, M. M. A. ve Hussin K., 2016. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress In Materials Science*, 83(2016), 595-629.
- Zeybek, O., 2009. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. (Y. Lisans Tezi), Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir.
- Zhang, J., Provis, J.L., Feng D. and Deventer, V., 2008. 'Geopolymers for immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺'. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2008), 587-598.
- Zhang, Z., Provis, L. J., Reid, A., Wang, H., 2014. Geopolimer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56(2014), 113-127.
- Zhang, Z., Provis, L. J., Reid, A., Wang, H., 2015. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete (GFC). *Cement and Concrete Composites*, 62(2015), 97-105.

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hüseyin ERSOY
Doğum Yeri ve Tarihi : Bayburt / 10.05.1992
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 05425285061 / hersoy@ilbank.gov.tr /
huseyinersoy6179@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Zonguldak İ.M.K.B. Anadolu Öğretmen Lisesi
(2005-2009)
Lisans : Boğaziçi Üniversitesi (2010-2012)
T.C. Maltepe Üniversitesi (2012-2016)
Yüksek Lisans : Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği, (2018-2019)
Yüksek Lisans : Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü
Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim
Dalı, (2018-2020)
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Dilaz İnşaat Dış Tic. San. ve Tic. Ltd. Şti. 2017
Özgün Gıda San. ve Tic. Ltd. Şti. 2018-2019
İlbank Sivas Bölge Müdürlüğü 2019-