



**GEPOLİMER BETONLARDA DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OSMAN ŞİNİK

DANIŞMAN

Doç. Dr. GÖKHAN GÖRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GEPOLİMER BETONLARDA DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

OSMAN ŞİNİK

DANIŞMAN

Doç.Dr. GÖKHAN GÖRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Osman ŞİNİK tarafından hazırlanan "Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN

Başkan : Prof. Dr. İsmail DEMİR
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

Üye : Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

Üye : Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK
Dumlupınar Üniversitesi, Müh. Fak.



Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../2019 tarih ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13.06.2019
Osman ŞİNİK

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**GEOPOLİMER BETONLARDA DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Osman ŞİNİK
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN

Bu çalışmada ana hammadde olarak puzolanik karakteristiklere sahip olan termik santral atığı olan uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Kullanılan Uçucu kül Kütahya Tunçbilek Termik santralinden temin edilmiştir. Örneklerin hazırlanmasında alkali aktifleştirici olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat solüsyonu (Na_2SiO_3) (SS) kullanılmıştır. Betonların üretiminde kullanılan agregalar 0 – 4 mm (ince) ve 4-8 mm (orta) olmak üzere iki farklı sınıfta olup, Afyon’da bulunan özel bir hazır beton firmasından temin edilmiştir.

Geopolimer beton örneklerin hazırlanmasında hammadde olarak kullanılan UK malzemesi ile alkali aktivatörlerin (NaOH ve SS) en iyi tepkimeyi verecek şekilde karışım dizaynı denemeler ile belirlenmiştir. Laboratuvar tipi Pan mikserde hazırlanan karışımlar 10 x 10 x 10 cm boyutlarında sert plastik kalıplara vibrasyon yöntemiyle yerleştirilmiştir. Ardından ilgili örnekler laboratuvar tipi etüve termal kür prosesinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla yerleştirilmiştir. Termal kür prosesinin uygulanabilmesi amacıyla geopolimer beton örnekleri üç farklı süre (5, 8 ve 24 saat) ve üç farklı sıcaklıklarda (50 °C, 60 °C ve 70 °C) kür edilmiştir. Kür işlemlerinin tamamlanmasının ardından örnekler bir gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kalıplardan alınmıştır.

Ardından, ilgili örneklerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için öncelikle geopolimer betonlar 24 saat süre ile su tankına yerleştirilmiştir. Daha sonra örneklerin; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünen yoğunluk gibi fiziksel özellikleri Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde 28 günlük geopolimer beton örnekleri kullanılmıştır.

Geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespitinin ardından ilgili beton örnekleri; ASTM C 672'ye uygun olarak donma çözünme, TS EN 13501-1'e göre yüksek sıcaklık ve sülfat (NaSO_4 ve MgSO_4) ataklarına karşı dayanım gibi bazı durabilite testlerine tabi tutulmuşlardır.

2019, xi + 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Geopolimer, Beton, Dayanıklılık.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE INVESTIGATION OF DURABILITY PROPERTIES ON GEOPOLYMER CONCRETES

Osman ŞİNİK

Afyon Kocatepe University

Institute of Science and Technology

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan GÖRHAN

In this study, fly ash (FA), a thermal power plant waste with pozzolanic characteristics, was used as the main raw material. The fly ash used was obtained from the Kütahya Tunçbilek Thermal Power Plant. The sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate solution (Na_2SiO_3) (SS) were used as the alkali activator in the preparation of the samples. The aggregates used in the production of concretes are in two different grades as 0 - 4 mm (thin) and 4-8 mm (medium). These aggregates were obtained from a special concrete company in Afyon.

In the preparation of geopolymer concrete samples, the mixture design of the alkaline activators (NaOH and SS), which are used as raw materials, are determined by experiments. Mixtures prepared in laboratory type pan mixer are placed on hard plastic molds with dimensions of 10 x 10 x 10 cm by vibration method. Then, the relevant samples were placed the laboratory type oven in order to carry out thermal curing process. In order to apply the thermal curing process, geopolymer concrete samples were cured at three different times (5, 8 and 24 hours) and three different temperatures (50 °C, 60 °C and 70 °C). After the curing process was completed, samples were taken from the molds after one day in laboratory.

Then geopolymer concretes were placed in the water tank for 24 hours to determine the physical properties of the samples. Then the samples; physical properties such as water

absorption, apparent porosity, unit weight and apparent density were determined according to Archimedes' principle. In the determination of physical and mechanical properties of samples, 28-day geopolymer concrete samples were used.

Following the determination of the physical and mechanical properties of geopolymer concretes; According to ASTM C 672, freezing dissolution has been subjected to some durability tests such as high temperature and resistance to sulphate (NaSO_4 and MgSO_4) attacks according to TS EN 13501-1.

2019, xi + 65 pages

Keywords: Fly ash, Geopolymer, Concrete, Durability.

TEŞEKKÜR

Öğrencilik hayatım boyunca gerek derslerde gerekse bu çalışmada, deneysel çalışmalar öncesi yönlendiriciliği, deney aşamasında sağlamış olduğu imkanlar ve yardımlarından, tez yazım aşamasında göstermiş olduğu bilgilendirme ve özverileri yaklaşımlarından dolayı tez danışmanım Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN hocama, deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan laboratuvar görevlisi Bülent YEŞİLAY'a teşekkür ederim.

Bu çalışmada ve örgenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Osman ŞİNİK
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Uçucu Kül (UK).....	4
2.1.1 Uçucu Külün Kullanım Alanları	6
2.1.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması.....	8
2.1.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	9
2.1.4 Ülkemizdeki Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları	10
2.1.5 Uçucu Küllerin Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri.....	10
2.2 Geopolimer Beton.....	11
2.3 Beton	14
2.3.1 Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler.....	15
2.3.1.1 Agrega.....	15
2.3.1.2 Beton Karışım Suyu.....	16
2.3.1.3 Katkılar	17
2.3.2 Betonda Aranılan Özellikler.....	17
2.3.2.1 Taze Beton Özellikleri	18
2.3.2.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri	18
3. MATERYAL ve METOT	20
3.1 Kullanılan Malzemeler	20
3.1.1 Kullanılan Agregaların özellikleri.....	20
3.1.2 Kullanılan Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	21
3.1.3 Kullanılan Kimyasal Malzemelerin Özellikleri	22
3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler.....	23
3.3 Geopolimer Betonların Hazırlanması	23

3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler	26
3.4.1 Su Emme	27
3.4.2 Görünen Porozite.....	28
3.4.3 Görünür Yoğunluk	28
3.4.4 Birim Hacim Ağırlık	28
3.4.5 Basınç Mukavemet Testi	29
3.5 Durabilite (Dayanıklılık) Testleri	29
3.5.1 Donma Çözünme Testleri.....	29
3.5.2 Yüksek Sıcaklık Deneyi	31
3.5.3 NaSO ₄ ve MgSO ₄ Testleri.....	34
3.6 Geopolimer Betonların Mineralojik ve Morfolojik Analizleri	36
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	38
4.1 Geopolimer Betonların Fiziksel Özellikleri.....	38
4.2 Geopolimer Betonların Basınç Dayanım Özellikleri	41
4.3 Geopolimer Betonların Durabilite Özellikleri	42
4.4 SEM-EDX Analizleri.....	51
5. SONUÇLAR.....	55
6. KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μm	Mikrometre
MW	Megawatt
NaOH	Sodyum Hidroksit
NaSO ₄	Sodyum Sülfat
Na ₂ SiO ₃	Sodyum Silikat
Na ₂ O	Sodyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
MgSO ₄	Magnezyum Sülfat
K ₂ O	Potasyum Oksit
KOH	Potasyum Hidroksit
CO ₂	Karbondioksit
CaO	Kalsiyum Oksit
SiO ₂	Silisyum Dioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
SO ₃	Sülfat
B	Bor
Mo	Molibden
Al	Alüminyum
Se	Selenyum
pH	Power of Hydrojen (Hidrojenin Gücü)

Kısaltmalar

AR-GE	Araştırma Gelişme
ASTM	American Society for Testing and Metarials.
UK	Uçucu Kül
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SS	Sodyum Silikat
SSYB	Silindir ile Sıkıştırılabilen Beton Yollar
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
XRF	X Işınları Floresans
XRD	X Işınları Difraktogramı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Üretimde kullanılan agregaların elek analizi.	21
Şekil 3.2 Tunçbilek uçucu külünün XRD difraktogramı	22
Şekil 4.1 Referans geopolimer betonların görünür porozite oranları.....	38
Şekil 4.2 Referans geopolimer betonların su emme oranları.	39
Şekil 4.3 Referans geopolimer betonların birim hacim ağırlığı.	40
Şekil 4.4 Referans geopolimer betonların görünür yoğunlukları.	41
Şekil 4.5 Referans geopolimer betonların basınç dayanımları.	42
Şekil 4.6 Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların görünen porozite ve su emme oranları.	43
Şekil 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların birim hacim ağırlığı ve görünür yoğunluk değerleri.	44
Şekil 4.8 Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer betonların ağırlık kaybı ve basınç dayanım değerleri.....	45
Şekil 4.9 Sülfat etkisine maruz kalan betonların görünür porozite oranları.....	46
Şekil 4.10 Sülfat etkisine maruz kalan betonların su emme oranları.	46
Şekil 4.11 Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonların birim hacim ağırlıkları.	47
Şekil 4.12 Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonların görünür yoğunlukları....	48
Şekil 4.13 Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonların basınç dayanımları.	48
Şekil 4.14 Donma-Çözülme etkisine maruz kalan geopolimer betonların ağırlık kaybı ve basınç dayanım değerleri.....	49
Şekil 4.15 450 Günlük geopolimer betonların basınç dayanım değerleri.	50
Şekil 4.16 50 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM görüntüleri.	52
Şekil 4.17 60 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM görüntüleri.	52
Şekil 4.18 70 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM görüntüleri.	53
Şekil 4.19 50 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM-EDX analizleri.....	53
Şekil 4.20 60 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM-EDX analizleri.....	54
Şekil 4.21 70 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM-EDX analizleri.....	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....	20
Çizelge 3.2 Uçucu külün kimyasal kompozisyonu.	21
Çizelge 3.3 Uçucu küle ait lazer tane boyut boyut analiz değerleri.	22
Çizelge 3.4 Üretimde kullanılan kimyasal malzemeler ve özellikleri.....	23
Çizelge 3.5 1 m ³ geopolimer betonda kullanılan malzeme miktarları.	24
Çizelge 3.6 Geopolimer beton örneklerine uygulanan kür prosesi ile durabilite deneylerinde kullanılan beton örnekler.	26



RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 (a) Bruker D8 Advance; (b) Rigaku ZSX Primus; (c) Malvern Mastersizer 2000.	23
Resim 3.2 Geopolimer beton hazırlamada kullanılan mikser ve taze geopolimer beton karışımı.	24
Resim 3.3 Kalıplara yerleştirilmiş örnekler.	25
Resim 3.4 Etüv kürü uygulanmış geopolimer betonlar.....	25
Resim 3.5 Çalışmada kullanılan beton presi.	27
Resim 3.6 Donma-çözülme deneyi için -20 °C'ye kadar soğuma yapabilen donduruculara konulan Geopolimer beton Numuneleri.	31
Resim 3.7 Yüksek sıcaklık deneyinde kullanılan fırın.....	33
Resim 3.8 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin ilk halleri.	33
Resim 3.9 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin son halleri.	34
Resim 3.10 MgSO ₄ ve NaSO ₄ etkisine maruz bırakılan numuneler (sağdaki MgSO ₄ ve soldaki NaSO ₄).	36
Resim 3.11 SEM cihazı.....	37
Resim 4.1 Çiçeklenme meydana gelen geopolimer örnekleri.....	51

1.GİRİŞ

Litaratür araştırmalarına göre geopolimer (without cement) beton genel anlamıyla çimentosuz beton olarak bilinmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında ise bağlayıcı madde olarak  imento kullanılmadan puzolonik özellikli uçucu kül bağlayıcı madde olarak kullanılmış ve geopolimer beton üretimi yapılarak farklı durabilite özellikleri araştırılmıştır.

Türkiye’de  imento üretimi 2018 verilerine göre yıllık 68,5 milyon ton klinker, 107,5 milyon ton  imento üretimi ile dünya beşincisi ve Avrupanın en büyük  imento üreticisi konumundadır. Çimento ana bileşeni olan “klinker” başlıca kalsiyum, silisyum alüminyum, demir oksit ve az miktarlarda farklı maddeler içeren hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda (1400  C) pişirilmesiyle elde edilir. Çimento tüm dünya da yaygın olarak kullanılan bağlayıcı özelliği yüksek bir bileşendir. Son yıllarda dünyada  imento üretimi % 7 civarı artarken, Türkiye’de % 16,5’lık bir artış göstermiştir. Türkiye  imento ihracatında dünya ikincisi olmasının yanı sıra da üretimde olduğu gibi Avrupa birincisidir. İstatistiklere göre Türkiye gereksiniminden fazla  imento üreten, kapasite fazlası olan ve büyük bir ekonomik getirisi olan  imento üretiminden daha fazla gelir elde edebilmek adına, yeni fabrikalar kurarak üretim kapasitesini arttırmaya çalışan bir görüntü sergilemektedir.

Günümüzde inşaat sektöründe beton ve harçlı imalatlarda en çok kullanılan bağlayıcı malzeme çimentodur. Çimento sektörü, Dünya genelinde insan kaynaklı CO₂ emisyonunun yaklaşık olarak %7’sinden sorumludur. Eğer  imento üretimde fosil yakıt kullanılır ve herhangi iyileştirici bir yöntem uygulanmazsa 1 ton klinker üretimi sonucu 1 ton CO₂ salınımı açığa çıktığı genel olarak kabul edilir (Erdoğan 2014).

Çimento  retiminde;  evre kirliliği ve insan sağlığına olumsuz etkileri olan CO₂ salınımının yüksek olduğu gerçeği birçok çevreci insan topluluklarının dikkatini çekmiş durumdadır. Dünyada artan  evre kirliliği, özellikle Türkiye’de  imento fabrikalarının iç piyasadaki  imento tüketim oranından fazla üretim yapması ile CO₂ salınımının fazla olması  evre duyarlılığını arttırmıştır. Bunun sonucunda birçok bilim insanı tarafından

çimentoya alternatif olabilecek atık malzemelerin kullanılmasına ve atık olarak değerlendirilen malzemelerin geri dönüşümü ilgili çalışmalar ve araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ön plana çıkan ve puzolonik özellikli (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb) atık malzemelerin geri dönüşümünü ile elde edilebilen geopolimer betondur.

Çimento üretimi 1400-1500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda elde edildiği düşünüldüğünde yüksek enerji tüketimi gerektirir. Çimento üretiminin maliyeti içinde enerjinin payı yaklaşık % 60-70 civarındadır (İnt.Kyn.1). Özellikle Türkiye enerjisinin büyük kısmını ithal etmek zorunda olan bir ülkedir. Bunun yanında çimento ihracatında dünyada ilk sıralarda yer almaktadır. Çimento üretiminde yerli kaynaklar kullanılmadığı sürece ithal edilen enerji kaynaklarının kullanılması Türkiye'yi sadece aracı konumuna sokmaktadır. Bunun yanında çevre kirliliği ve CO₂ salınımı düşünüldüğünde Türkiye için avantajdan çok yaşam kalitesi açısından zararları birlikte getirmektedir. Çimentosuz beton üretiminin artırılması, geopolimer betonların üretiminin ve kullanımının artması enerji ihtiyacını ortadan kaldırarak enerji tasarrufu yapılmasında büyük katkıları olacaktır.

Geopolimer beton araştırmalarında genellikle çimento ikame oranının düşürülmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Çimento ikame oranının düşürülmesi puzolanik özellikli uçucu kül, silis dumanı, taban külü vb gibi atık malzemelerin kullanılması ile yapılmaktadır. Bu yaklaşım dünya geneline yayıldığı takdirde çimento üretiminde bir azalma olacağı düşünülebilir.

Puzolanik özellikli malzemelerin beton üzerinde olumlu etkiler yaptığı birçok araştırma sonucunda ortaya konulmuştur. Puzolanik özellikli malzemelerin, betonun durabilitesini iyileştirdiği ve betonun servis ömrünün uzattığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda beton üretiminde puzolanik özellikli malzemelerin kullanılması hem taze beton özelliklerinde hemde uzun vade de durabilitesi daha iyi olan yüksek performanslı betonlar elde edilmesinde etkili bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır (Hamalı 2007). Bu sayede atık malzemeler kullanılmış olacak ve betonun performans özellikleri artırılarak çevresel etkileri azaltılmış olacaktır.

Bu çalışmada özellikle çimento ikamesi yapılmayacak olup bağlayıcı olarak uçucu kül ve alkali aktifleştirilerek kullanarak geopolimer beton üretimi yapılacaktır. Uçucu kül kullanılmasının nedeni ise kolayca temin edilebilmesi ve termik santrallerde fazlaca bulunmasıdır. Öyleki 1000 MW'lık bir termik santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilebilmektedir. Bu atıkların depolanması hem çevre kirliliği hemde maddi kayıplara neden olmaktadır (Yazıcı 2004). Bu sayede uçucu küllerin çevresel etkilerinin azaltılması ve çimento ikame edilmeden üretilen betonların durabilite özelliklerinin araştırması yapılmış olacaktır.

Bu çalışmada uçucu kül ve alkali aktifleştiriciler kullanılarak üretilen geopolimer betonlar üzerinde fiziksel deneyler, donma-çözünme deneyleri, yüksek sıcaklık deneyleri yapılmış ve sülfat saldırılarına maruz bırakılmıştır. Üretilen geopolimer betonlar üzerinde optimum basınç dayanımını kazanabilmesi adına bazı çalışmalar yürütülmüştür.

Bu çalışmanın ikinci bölümde; uçucu kül, geopolimer ve beton hakkında gerekli bilgiler verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise, geopolimer malzemelerin üretimde kullanılan uçucu kül, agrega ve kimyasal malzemeler hakkında detaylı bilgiler sunulmuş ve örneklerin üretimi ve uygulanan deneyler hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde geopolimer beton üretiminden elde edilen bulgular üzerinde yorumlar ve tartışmalar yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar kısaca özetlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Uçucu Kül (UK)

Endüstriyel atık sınıfında olan uçucu küller, pulvarize kömür kullanarak elektrik üretimi yapan termik santrallerin bacalarındaki elektro filtrelerle tutulmasıyla elde edilirler. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu oluşan ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. UK'ler kendi başına bir bağlayıcılığı olmayıp sönmüş kireç ile hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşen ve bağlayıcılık özelliği kazanan bir malzemedir (Hamalı 2007). İnsan eliyle üretilen yapay bir puzolan olan UK betonda mineral katkı olarak kullanılır.

Günümüzde Türkiye' de elektrik enerjisinin üretimi hidroelektrik santraller ve doğalgaz elektrik dönüşüm tesisleri ve düşük kalorili toz halindeki linyit kömürü kullanan termik santrallerden elde edilmektedir. Çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla doğalgaz elektrik dönüşüm tesislerinin devreye girmesine rağmen Türkiye'de Afşin-Elbistan (Kahramanmaraş), Çatalağzı, Seyitömer, Tunçbilek, Kangal, Soma, Orhaneli, Kemerköy, Yeniköy ve Yatağan da olmak üzere 11 adet kömür kullanan termik santral faaliyetlerine devam etmektedir. Bu santrallerin yıllık ortalama UK üretim miktarı 13 milyon ton civarında olmaktadır (İnt.Kyn.2). Doğalgaz elektrik dönüşüm tesislerinin varlığı zamanla yıllık UK üretim miktarının değişime sebep olacaktır. Türkiye'nin enerji kaynaklarının yetersiz olması ve doğalgazı ithal ediyor olması zamanla dışa bağımlılığı arttıracaktır. Dışa bağımlılığın azaltılması adına gelecekte düşük kalorili linyit kömürünün kullanımının artacağı ve UK üretim miktarının artacağı öngörülebilir.

Termik santrallerin en büyük problemlerinden biri atık madde olarak değerlendirilen UK'lerin depolanmasıdır. Zamanla biriken UK'ler geniş alanlara yayılmaya başlar ve depolama alanı oluşturmak için doğanın tahrip edilmesine neden olmaktadır. Doğanın tahrip edilmemesi adına UK'lerin kullanım alanlarının genişletilmesi için araştırmalar yapılmalı ve kullanım miktarının artırılması gerekmektedir. Termik santrallerde atık

olarak değerlendirilen UK'ler kullanılması hem üreticiler ve kullanıcılar açısından ekonomik avantaj sağlayacağı ve doganın tahrip edilmesini önleyeceği açıktır.

Uçucu küllerin özellikleri genel olarak kullanılan taş kömürü yada linyit kömürünün özelliklerine ve yakılma yöntemine göre farklılık gösterebilmektedir. İki yada daha fazla termik santralden alınan UK örnekleri incelendiğinde farklı kimyasal kompozisyonlarda olduğu belirlenmiştir. Öyleki aynı termik santralden farklı günlerde alınan UK'ler arasında yanma sıcaklığına bağlı olarak farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.

UK'lerin genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi sayesinde puzolanik özellik göstermesi çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması yararlı olur. Mikron boyutundaki ince ve küresel yapısı sayesinde taze betonda işlenebilirliği artırır ve hidrasyon ısını düşürür. Çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan kireçle tepkimeye girerek ilave bağlayıcı C-S-H jellleri oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen UK'lerde kireç oranı genellikle yüksektir. Bu tür küller aynı zamanda su ile kolay tepkimeye girmesinden dolayı hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterirler.

UK'lerin taze beton ve betondaki katkılarını kısaca özetlersek; küresel yapısı sayesinde taze betonda işlenebilirliği artırır, su tutucu özelliği sayesinde taze betonda terlemeyi önler, betonda hidrasyon ısını düşürerek sıcak havalarda beton dökümüne olanak sağlar, betonun yavaş ama uzun süreli dayanım kazanmasına yardımcı olur, su ve klorür geçirimsizliğini düşürür, betonun rötre yapmasını engeller, betonda çimento hamuru ve agregalar arasındaki aderansı kuvvetlendirir, betonun kimyasal etkilere karşı dayanıklı hale gelmesine yardımcı olması gibi olumlu etkileri vardır. Bunun yanında çok fazla miktarlarda kullanılması betonun mekanik özelliklerini azalttığı gibi karbonatlaşma olayının hızlandırması gibi olumsuz etkileri vardır (İşbilir 2011).

2.1.1 Uçucu Külün Kullanım Alanları

UK'lerin kullanım alanlarının araştırılması yeterli olmasa da günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Bunların başında çimento üretiminde hammadde olarak ve betonda mineral katkı olarak kullanılmasıdır. Bunların dışında beton bloklarının yapımında ve silindir ile sıkıştırılmış betonlarda, altyapıda kullanılan beton boruların üretiminde, beton ve asfalt yol yapımında, yol yapımında temelde filler malzeme olarak, zemin stabilizasyonunda (grouting), endüstriyel cam-seramik ve boyaların üretiminde ve seralarda bitki üretiminde mineral katkılı toprak olarak kullanılabilir.

UK'ler inşaat sektöründe özellikle çimento yapımında hammadde, katkı maddesi ve ikame malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. UK'ler çimento üretiminde ana hammadde olan kil ve kalkerle birlikte yardımcı hammadde olarak kullanılarak klinker üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye'de 1980'li yıllardan itibaren katkılı çimento üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. UK'lerin çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılması hem enerji tasarrufu yapılmasına hemde ekonomik çimento üretilmesini sağlamıştır. UK'lerin betonda çimentonun yerine ikame malzemesi olarak kullanılması hem çimento sarfiyatını azaltmış hemde betonun durabilite özelliklerine katkı sağlamıştır (Aruntaş 2006).

UK'ler seramik sanayisinde kullanıldığında birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Tane boyutunun küçük olmasından öğütülmeye ihtiyaç duyulmaması, maliyetinin düşük ve kolay bulunabilir olması, içerdiği karbon sayesinde pişirme sırasında sağladığı enerji seramik üretimine sağladığı faydalardır. UK'lere kil ve feldispat ilavesi yapılarak geleneksel ve sanatsal seramik üretiminde hammadde olarak kullanılabilir (Erol 1999).

UK'lerin dolgu malzemesi ve zemin stabilizasyonunda kullanıldığında, normal zeminlere göre mukavmet ve kohezyon açısından bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu artışların UK'lerin küresel yapısından ve zemin içerisinde çimentolaşma özelliklerinden meydana gelmektedir (Çakır 1999). Dünyada birçok ülkede dolgu malzemesi ve zemin stabilizasyonu olarak kullanılmış ancak Türkiye'de yaygınlaşmamıştır. Türkiye'de

genel olarak zemin enjeksiyon sistemlerinde çimento ve kireç ile birlikte kullanılmaktadır. Bunların dışında UK'ler hava ile teması olmayan topraklarda sızdırmazlık sağlamak amacıyla atık toplama sahalarında kullanılmaktadır. UK'lerin Bor (B), Molibden (Mo), Alüminyum (Al) ve Selenyum (Se) gibi elementleri toplama özelliği bulunmaktadır. Bu elementlerin toplanması insan, canlılar ve çevre sağlığına önemli katkıları bulunmaktadır (Söylemez ve Gültekin 2010).

UK'ler bitkilerin gelişiminde ve seracılık faaliyetlerinde de kullanılabilir. Verimsiz topraklarla UK ikamesi yapılarak deneysel olarak gözlemlenmiş ve %10 UK ikameli saksılarda verimsiz topraklarla yapılan deneylere göre bitkinin daha fazla verim alındığı tespit edilmiştir. %30 ve %50 ikameli saksılarda ise %10 ikameli saksılara göre daha az verim alınmıştır. Sonuç olarak bitkisel topraklara düşük miktarlarda UK ikamesi edilmesi toprakların verimliliğini arttırmaktadır. Yüksek derecede UK ikame edilmesi içeriğinde bulunan ağır minerallerin bitkilerin gelişimini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır (İnt.Kyn.3).

UK'ler beton içerisinde ince agrega yerine kullanılabilir. Agrega olarak kullanılan UK'ler farklı oranlarda bileşimler içerdiklerinden betonda farklı özellikler gösterebilmektedir. Betonda F sınıfı uçucu küllerin kullanılması taze betonda işlenebilirliği arttırmakta, betonun mukavemet özelliklerini iyileştirmekte ve rötre gibi olumsuz etkileri azaltmaktadır. Betonda % 40'a kadar değişen oranlarda UK kullanıldığında betonun aşınma direncini arttırmaktadır (Görhan 2008).

Silindir ile sıkıştırılabilen beton yollar (SSBY) genellikle düşük hızlı ağır yüklü araçların kullandığı yol kesimlerinde ve havalimanı pistlerinde dayanıklılığın ve ekonomikliğin önem arz ettiği yollarda kullanılmaktadır. Bu yollarda UK kullanılması işlenebilirliği arttırmakta ve çatlama risklerini önemli derecede azaltmaktadır. Sıcak havalarda beton yol yapımında avantaj sağlamaktadır. Aksine soğuk havalarda ise beton yolların donma çözünme dayanımını azaltmaktadır. Özellikle kış şartlarının ağır olduğu bölgelerde kullanılmaması beton yolların sağlığı açısından önemlidir. Bu bölgelerde UK yerine silis dumanı kullanılması daha sağlıklıdır (İnt.Kyn.4).

UK'ler tuğla üretiminde kullanılan killeri ile aynı oksitleri içerdiği için tuğla yapımında kullanılmaktadır. UK'ler tuğlalarda kuruma ve pişirme sırasındaki büzülmelerini engellemektedir. İçerdiği karbon sayesinde seramik üretiminde olduğu gibi enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ancak tuğla üretiminde kullanacak killerin ve UK'lerin oksit oranları birbirine yakın olması tercih edilmelidir (Söylemez ve Yıldırım 2016). Bilindiği üzere UK'ler oksitleri yanma ve kullanılan kömürün cinsine göre farklılıklar gösterebilmektedir. Gazbeton üretiminde ise hafif agrega olarak % 50 - 70 oranında ince kum yerine UK ikamesi kullanılması önerilmektedir. Bu sayede hem hafif hemde daha mukavemetli gazbetonlar elde edilebilmektedir (Kaplan ve Gültekin 2010).

Baraj imalatında kullanılan sıkıştırılmış betonların hacimce % 60–70 kadarını da uçucu kül oluşturmaktadır. Bu uygulamaya Pozzocrete adı verilir ve uçucu külün küresel tanecikli formunun betonun işlenebilirliğini ve sıkışabilirliğini de kolaylaştırması nedeniyle tercih edilmektedir (Arıöz 2009).

2.1.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması

UK'lerin sınıflandırılmasında kimyasal bileşenlerinin yüzdesi baz alındığından Amerikan standartı ASTM C 618 ve Türk Standartı olarak TS EN 197-1 baz alınmaktadır. Amerikan standartı ASTM C 618'e göre UK'ler F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İçeriğindeki toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan UK'ler F sınıfı olarak, %70'den düşük ve %50'den fazla olan küller ise C sınıfı olarak adlandırılmaktadır. F sınıfı küllerde CaO yüzdesi %10'un altından olduğu için düşük kireçli, C sınıfı küller ise CaO yüzdesi %10'un üstünde olduğu için yüksek kireçli küller olarak tanımlanmaktadır. F ve C sınıfı küller puzolanik özellik göstermektedir ancak C sınıfı küller bağlayıcılık özelliğine de sahiptir (ASTM C 618 2000).

Türk standartı TS EN 197-1 göre UK'ler Silisli (V) ve Kalkersi (W) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sandarta göre V sınıfı küller reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ten oluşur. V sınıfı küllerin reaktif kireç (CaO) oranı %10 dan az ve reaktif silis (SiO_2) oranının %25'ten fazla olması istenir. W sınıfı küllerin ise reaktif CaO oranının %10'dan fazla, reaktif SiO_2 oranının %25'ten fazla olması istenmektedir. W sınıfı küller reaktif CaO, SiO_2 ve

Al_2O_3 'ten oluşur V ve W sınıfı küller puzolanik olmakla birlikte W sınıfı küllerde hidrolik bağlayıcılık özelliği bulunmaktadır (TS EN 197-1 2002).

Termik santrallerdeki yakıt tipine göre sınıflandırıldığında Taş kömürü UK'leri ve Linyit kömürü UK'leri olarak ikiye ayrılmaktadır. Taş kömürünün yanması sonucu Amerikan standartlarına göre F sınıfı küller, linyit kömürünün yanması sonucu C sınıfı küller elde edilebilmektedir.

Bu sınıflandırmaların dışında UK'lerin içerdiği oksitlerden biri olan CaO miktarına göre sınıflandırılmıştır. UK'lerin aktivitesi CaO miktarına bağlı olarak değişmektedir. CaO miktarı % 3,5 ten küçük olanlara çok düşük aktiveli, % 3,5 ve % 7 arasında olanlara düşük aktiveli, % 7 ve % 14 arasında olan küllere aktif ve %14 ten büyük olan küllere ise çok aktif küller olarak dört farklı grupta sınıflandırılmıştır.

2.1.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Termik santrallerde yakılan kömürün cinsine ve yakılma sıcaklığının değişimine ve filtreleme sistemine göre UK'lerin fiziksel özellikleride değişmektedir. Özellikle renkleri, boyutları, çapları ve yoğunlukları bu değişimlerden etkilenmektedir.

UK'ler genellikle gri renktedir ve içeriğindeki CaO miktarı arttıkça daha koyu bir renk almaktadır. Tane boyutları yuvarlak yani küreseldir. Çapları 1-150 μm aralığındadır. Ancak genele bakıldığında %75 oranında 45 μm 'den küçüktür (Çakır 1999). Bileşiğinin % 60-90 arasında camsı bileşen ihtiva eden taneciklerden oluşur. Yoğunlukları ise 2,0-2,7 g/cm^3 aralığında değişmektedir (Aruntaş 2006). İnce taneli yapısından dolayı yüzey alanları yüksektir. Yüzey alanları boyutlarına göre 1-15 m^2/cm^3 arasında değişmektedir (Şengül 2007). UK'ler daha düşük yoğunluğa sahip, silt boyutunda üniform bir malzemedir (Çakır 1999).

2.1.4 Ülkemizdeki Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

Termik santrallerde kullanılan kömürün cinsi, yakılma sıcaklığı ve filtreleme sisteminin farklılığı fiziksel özelliklerinde olduğu gibi kimyasal kompozisyonlarında etkilemektedir.

UK'lerde bulunan başlıca ana bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO 'dur. Bunların dışında SO_3 , MgO ve $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ gibi alkali oksitler bulunur. Ayrıca, yanmamış karbon, titanyum, fosfor, molibdeb ve berilyum gibi bileşenler eser miktarlarda bulunabilmektedir. UK'ler görüldüğü üzere çok bileşenli bir kimyasal yapıya sahiptir.

Ana oksitler olan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO 'ler uçucu külün silisli ve kireçli olmasına göre geniş aralıklarda bulunabilmektedir. SiO_2 oranı %25-60 aralığında, Al_2O_3 oranı %10-30 aralığında, Fe_2O_3 oranı %1-15 aralığında ve CaO oranı ise %1-40 arasında bulunabilmektedir (Türker vd. 2009).

Diğer oksitler MgO en fazla %5, alkali oksitler %5'in altında bulunmaktadır. SO_3 genellikle %0,2-10 arasında bulunabilmekte ancak Türk Standartı TS EN 450 bu miktarı en fazla %3 ile sınırlandırmıştır (Türker vd. 2009).

2.1.5 Uçucu Küllerin Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri

UK'lerin puzolanik özellikleri içerdiği oksitlerden yani mineralojik özellikleriyle ilgilidir. UK'ler, kireç ve suyun bir arada bulunduğu durumda reaktiftir. Bu reaktivlik büyük oranda uçucu külün amorf yapısına dayanmaktadır. Uçucu kül içerisindeki camı (amorf) yapının % 50-90 arasında olduğu bilinmektedir (Görhan ve Demir 2009).

Tane boyutlarındaki incelik ve amorf (camı) bir yapıya sahip mineralojisinden dolayı puzolanik bir malzeme olan UK, ince taneli puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedir. Tek başlarına bağlayıcılık özellikleri olmayıp, CaO ve sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılık özelliklerine sahip olmaktadır. Bu nedenle hem

katkılı çimento üretiminde hemde betonda katkı maddesi olarak büyük miktarlarda kullanılabilirler.

UK'lerin geneli, Oksijen ile bağ oluşturabilen tetrahedral silikatlarla yüksek derecede polimerizasyon oluşturmaya rağmen oda sıcaklığında aktiviteleri yok yavaştır. Daha ince uçucu kül ve daha az karbon içeriği puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır ve 40-50 °C'de kimyasal reaksiyon daha başarılı bir şekilde gerçekleşmektedir (Görhan vd. 2008).

UK'ler genellikle, düşük CaO içeren küller başta camısı (amorf) faz ve minör olarak da kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) içermektedir. Yüksek CaO'lu uçucu küller kuvars, hematit, anhidrit (CaSO_4), serbest kireç, C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), CS ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), mellilit ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Al})(\text{AlSi})_2\text{O}_7$), mervinit ($\text{Ca}_3(\text{Mg})(\text{SiO}_4)_2$), gibi mineraller ve camısı (kristalizesiz) faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanısıra yüksek kireçli küllerde kalsit, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), trisülfoalüminat ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ve mullit'de bulunabilmektedir (Demir vd. 2009).

2.2 Geopolimer Beton

Geopolimer beton, çevreci bir beton çeşidi olarak bilinmekle birlikte witout cement yani çimentosuz beton anlamına da gelmektedir. Geopolimer beton üretiminde puzolanik özellik gösteren ve depolama alanları kısıtlı endüstriyel atıkların kullanılması çevreci beton olarak bilinmesine olanak sağlamıştır. Endüstriyel atıkların beton içerisinde çimentonun yerine kullanılabilir olması çimento tüketimini azaltmakla birlikte betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu katkılarda yapmaktadır.

Uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atıklar, pişirilmiş killer ve şeyller, metakaolin gibi ısıtılmış işlem görmüş malzemeler, volkanik küller, traslar ve diatomit topraklar gibi doğal puzolanlar geopolimer beton içerisinde kullanılabilir. Geopolimer beton içerisinde bu kadar malzemelerin kullanılabilir olması, geopolimerin geniş bir çalışma ve araştırma sahasına sahip olduğunu göstermektedir.

Her ne kadar günümüzde geopolimer beton üzerine araştırmalar yapılsa da, geopolimer beton içerisinde kullanılabilir puzolanların çeşitliliğinin arttırılması ve yaygınlaştırılması gerekmektedir. Günümüzde en çok kullanılan bağlayıcı malzeme çimentodur ve geopolimer kullanımı yaygınlaştırılmadıka kullanılmaya devam edecektir. Yapılan alışmalar sadece bilimsel veri olarak kalmaktadır. Devlet destekli kullanımının teşvik edilmesi, AR-GE çalışmalarının arttırılması gerekmektedir. Yapılan tüm çalışmalar bu bağlamda yetersiz kalmaktadır.

Geopolimer, serbest silis ve alümin içeren malzemelerin Sodyum Silikat (cam suyu), Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Potasyum Hidroksit (KOH) gibi alkalilerle aktivasyonu sonrası oluşan bağlayıcı malzeme olarak tanımlanmaktadır (Topçu ve Toprak 2009). Kısaca geopolimer oluşumu şematik olarak aşağıdaki gibidir.

$$(Si - Al içeren malemeler) + (Alkaliler) = (Geopolimer ara bileşeni) \quad (2.1)$$

$$(Geopolimer ara bileşeni) + (Alkaliler) = (Geopolimer) \quad (2.2)$$

Geopolimerler oluşumunda su bulunmamaktadır. Karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirliği arttırmak için kullanılır ve kr-kurutma aşamasında geopolimerin yapısından uzaklaşarak süreksiz nano boşluklu bir yapı oluşturur. Boşluklu yapı geopolimere hafiflik, yangın dayanımı ve ısı yalıtımı gibi olumlu etkiler kazandırır.

Geopolimerleri ilk olarak 1978' de Prof. J. Davidovits tanımlamış ve sınıflandırmıştır. Davidovits'e göre geopolimer; doğal mineralli malzemelerin kimyasal kompozisyonlarının ve kristal yapılarının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesi ile elde edilen malzemeler grubudur. Bu yöntemler sonucunda geopolimer hem kristal yapıda hemde amorf yapıda olabilmektedir. Silis ve alümin içerikli malzemelerin alkali ortamda jeolojik oluşumlu kayalarla benzer şekilde bağlayıcılık özelliği gösteren malzemeler laboratuvar ortamında üretilmiştir. Kısacası geopolimerler doğal kayalarla benzer özellikler göstermektedir.

Geopolimerlerin oluşumu termoset polimerlerin ısı işlem ve çeşitli kimyasal reaksiyonlarla monomerler arasında bağların değiştirilmesi ve atomlar arası enerji düzeylerinin değişmesi (polikondanzasyon) ile gerçekleşmektedir. Ancak bu işlemler için yüksek sıcaklık gerekli değildir. Geopolimer yapısı füzyon sinterleme ve eritme işlemi değil polimerleşme sürecidir. Bu süreç yakıt tüketimi (enerji tüketimi) ve CO₂ salınımı açısından diğerlerinden avantajlıdır.

Geopolimerizasyon yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme taşınma ve polikondanzasyon hareketlerini kapsayan egzotermik bir kimyasal prosesdir. Geopolimerizasyon Silis ve Alümin atomlarının Oksijen atomları ile elektronlarını paylaşması ve kovalent bağlı bileşik oluşturması esasına dayanır. SiO₂ atomları oldukça kararlı bileşikler olmasına karşın alkali ortamda üç boyutlu ağ yapısı zayıflayarak geopolimerlerin ana bileşiği olan kovalent bağlı Si-O-Al ve Si-O-Si gibi sialatları oluşurak geopolimerizasyon ilerler. Ham maddeye uygulanabilecek olan 100 °C'ye kadar ısıtma ile geopolimerizasyon süreci hızlandırılabilen ve tepkimeye giren sialat miktarları artırılabilir.

Geopolimerizasyon süresince ham madde ve alkali çözelti içinde bulunan sialatlar ve alüminatlar Si/Al oranına göre kristal yapıyı, dolayısıyla malzeme özelliklerini etkileyecektir. Si/Al oranı küçüldükçe daha kristal yapı, oran arttıkça kristal ile amorf yapının bir arada bulunduğu daha akışkan geopolimerler elde edilebilir. Si/Al oranı 15'in üzerinde olduğunda 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer pastası oluşmakta ve savaş uçaklarında kullanılabilecek nano kompozit yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanılabilmektedir.

Geopolimer teknolojisi sadece inşaat sektörünün araştırma sahasında değildir. Birçok mühendislik alanları, organik kimya, uzay teknolojisi gibi çalışma alanlarında kendisine yer bulabilmektedir. Kullanım alanları geniş olmakla birlikte göstermiş olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler ile yangına karşı dayanıklı ürünler, taşıyıcı (beton, tuğla vb.) ve taşıyıcı olmayan (gazbeton, sıva) yapı elemanları, prekast yapılar, tarihi eserlerin restorasyonu, heykeltıraşlık, süsleme sanatları, zemin stabilizasyonu, beton esaslı yol kaplamaları, nükleer atıkların depolanması ve nükleer santrallerde, seramik

kaplamalarda, uçak endüstrisi (özellikle savaş uçakları), beton yapıların güçlendirilmesi gibi alanlarda kullanılabilmektedir (Yonar 2014).

Geopolimerlerin önemli avantajları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları düşük ısı iletkenlik, hacim sabitliği, kısa sürede dayanım kazanabilme özelliği, kimyasal etkilere ve asitlere karşı dayanıklılığı, düşük kür sıcaklığı, yüksek basınç dayanımı, dayanıklılık, çevreci ve koruyucu gibi özelliklerdir.

2.3 Beton

Beton; çimento, su ve agreganın uygun oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen ve kimyasal veya mineral katkıları ilave edilebilen homojen yapılı, başlangıçta plastik kıvamlı olup, kalıp ile şekil verilebilen, zamanla katılaşarak sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir. Beton; çimento hamuru (çimento + su), agrega ve agrega - çimento hamuru arayüzeyi olmak üzere üç fazlı kompozit bir yapı malzemesidir (Bedirhanoğlu 2011). Beton içerisindeki çimento bağlayıcı, iri agrega yüklerin taşınması, ince agrega boşlukların doldurulması, su hidrasyon ve işlenebilirlik, katkıları ise betonun özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılır.

Günümüz inşaat sektöründe taşıyıcı sistemler içinde en çok tercih edilen betondur. Nervürlü çelik ile betonun elastisite modüllerinin birbirine yakın olması betonun nevürlü inşaat demirini iyi derece sarması (aderansın yüksek olması) ve birlikte dış etkilere karşı daha dayanıklı bir taşıyıcı sistemi oluşturması tercih nedenlerinden biridir. Mukavemetinin yüksek olması, kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması, ucuz ve kolay elde edilebilir olması, uzun ömürlü ve dayanıklı olması ise diğer tercih sebepleridir.

Betonun hacimsel olarak % 70'ini agrega, yaklaşık olarak % 18-20'sini su, %10-12 seviyesinde çimentodan ve az miktarda havadan oluşturmaktadır (Yazıcı 2019). Betonun özelliklerinin artırılması adına çimento miktarı yarısına kadar azaltılıp yerine katkı maddeleri kullanılabilmektedir.

Betondan istenilen özelliklerin sağlanması birkaç parametreye bağlı olup bu parametreler değiştikçe betonun basınç dayanım değerleride değişiklik göstermektedir. Özellikle su çimento oranı bunların başında gelmektedir. Su çimento (S/Ç) değeri küçüldükçe beton basınç dayanımı artmakta, büyüdükçe dayanım azalmaktadır. Kullanılan suyun kalitesi, agrega ve çimentonun özellikleri, betonun karılması, taşınması ve yerleştirilmesi, yerleştirildikten sonra kür edilme koşulları betonun dayanım özelliklerini etkilemektedir (Bedirhanoğlu 2011).

2.3.1 Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler

2.3.1.1 Agrega

Amerikan standartı olan ASTM D8'e göre agrega; harç veya beton oluşturmak amacıyla bir bağlayıcı madde ile veya temel tabakaları, demiryolu balastlarında, vb. işlerde tek başına kullanılan kum, çakıl, deniz kabuğu, cüruf ya da kırmataş gibi mineral kompozisyonlu granüler (taneli) bir malzemedir diye tanımlanmaktadır. Agrega beton içerisinde hacimsel olarak %70' ini kapsamaktadır (Yazıcı 2019).

Agregalar iri, ince ve orta granüllü olarak üç çeşit beton içerisinde kullanılmaktadır. İri agregalar sertleşmiş betonda düşey yükleri taşıma görevini üstlenmektedir. İnce agregalar ise iri ve orta agregalar arasında oluşan boşlukları doldurmaktadır. Agregalar genelde yüksek dayanımlı malzemeler olup betonun basınç dayanımlarının yüksek olmasına katkıda bulunur (İnt.Kyn.8).

Agregaların gradasyonu, en büyük tane boyutu, birim ağırlık ve özgül ağırlıkları, su emme kapasitesi, yapısında bulunan yabancı madde türleri ve miktarı, tane şekli, ısısal özellikleri ve dona karşı dayanımı betonun özelliklerini değiştirebilmektedir.

Agregalar elde edildiği kaynağa göre doğal ve yapay olarak, birim ve özgül ağırlıklarına göre hafif, normal ve ağır, tane büyüklüklerine göre iri, ince ve orta, tane şekline göre yuvarlak, yassı, uzun ve köşeli, kimyasal özelliklerine göre de reaktif ve reaktif olmayan olarak sınıflandırılırlar (İnt.Kyn.8).

Agregaların tane dağılımı yani gradasyonu betonun işlenebilirliğini direkt etkilemektedir. Çok fazla iri taneli agregaların tercih edildiği durumda betonda işlenebilirliği arttırmak için daha fazla su kullanılacağından betondan beklenen performans alınmayacaktır. Bunun için agrega gradasyonu hesaplanmalı ve uygun oranlarda ince ve iri agrega tercih edilmelidir. Betonun karılması, taşınması ve yerleştirilmesi esnasında iri ve ince agregaların ayrışmamasını ve betondaki homojen yapının bozulmamasını sağlayan agreganın tane dağılımıdır. Çimentolu sistemde en büyük tane çapı 63 mm'yi geçmemektedir ancak baraj ve kütle çimentolu sistemlerde en büyük tane çapı 150 mm'yi bulabilmektedir.

Agrega yığınlarından numune alınması ve uygulanması gereken yöntemler Türk standartları TS 707 (1980) ve TS EN 932-1'de (1997), Amerikan standardı ASTM C 33/C33M-18'de (2018) belirtilmiştir. Uygulanan yöntemler bu standartlara uygun olarak yapılmalıdır (İnt.Kyn.8).

2.3.1.2 Beton Karışım Suyu

Beton içerisinde kullanılan su; çimentonun hidratasyonu ve işlenebilirlik için kullanılır. Su ile çimento birleştiğinde kimyasal olaylar gerçekleşmeye başlar ve çimentonun tanecikleri su içerisinde çözünür, çözünen bileşenler değişik hızlarda tepkimeye girer ve ısı açığa çıkar, yeni ürünler oluşur. Oluşan yeni ürünler çimento hamurunun sertleşmesine ve agregaların çimento hamuru ile bağlanmasına neden olur (İnt.Kyn.9). O yüzden beton içerisinde kullanılan suyun temiz, berrak ve içilebilir seviyede olmalıdır.

Türk standardı TS EN 1008 (2003)'de beton karma suyunun özellikleri belirtilmiştir. TS 1008'e göre içilebilen sular, beton yapımında kullanılan ve geri kazanılan sular beton içerisinde kullanıma uygun, yer altı suları, tabii yüzey suları ve endüstriyel atık sular deneye tabi olduktan sonra kullanıma uygundur. Deniz suyu ve acı göl suları donatı ve metal bulunmayan betonlarda kullanılabilir ancak suyun klorür muhtevası beton içerisinde kullanımında belirleyici faktördür. Kanalizasyon suları ise beton içerisinde kullanımı uygun değildir.

TS EN 1008' e göre öngerilmeli betonlarda azami klorür miktarı 500 mg/L, donatı veya metal bulunan betonlarda 1000 mg/L, içerisinde donatı veya metal bulunmayan betonlarda 4500 mg/L'dir. Karma suyunun içerisindeki Sülfat miktarı (SO_4^{-2}) 2000 mg/L'den az olmalıdır. Alkali muhtevası Sodyum oksit (Na_2O) miktarı normal şartlarda 1500 mg/L'yi geçmemelidir.

2.3.1.3 Katkılar

Taze veya sertleşmiş betonun özelliklerinin iyileştirilmesi ve değiştirilmesi için karıştırma işlemi sırasında betona çimento dozajının %5 veya %6 sını geçmeyecek şekilde eklenen kimyasal maddeler beton katkı maddeleri olarak adlandırılır. TS EN 934-2' (2011) ye göre kimyasal katkı maddeleri; su azaltıcı, süper akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici, hava sürükleyici, su tutucu katkılar, su geçirimsizlik katkısı, sertleşme hızlandırıcı ve antifiriz olarak gruplandırılmıştır (İnt.Kyn.5).

Bunların dışında beton içerisinde çimento dozajının %50'sine kadar kullanılan mineral katkılarda bulunmaktadır. Bunlar uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin, taban külü gibi puzolanik özellikli malzemelerdir.

Kimyasal ve mineral katkılar genel olarak beton maliyetinin düşürülmesi, betondan daha iyi verim alınması, betonun karıştırılmasından yerleştirilmesine kadar istenilen özelliklerin sağlanması, su miktarını azaltmak, betonun akışkanlığının sağlanması ve su/çimento oranının düşürülmesi için kullanılır (İnt.Kyn.5). Ancak bazı mineral katkılarının kullanılması betonun su ihtiyacını arttırmaktadır.

2.3.2 Betonda Aranılan Özellikler

Kuru harmanın (agrega ve çimento) su ile birleşmesinden sonra çimentonun hidratasyonu başlar. Agregaların çimento hamuru ile bağlanmasıyla devam eder ve beton sertleşmeye başlar. Betonun karıştırılması, taşınması ve yerleştirilme işlemleri sırasında ve yerleştirilip sertleşmeye başlayıp dayanım kazandıktan sonra betondan

beklenen özellikler farklılaşır. Taze beton ve sertleşmiş betonda aranan özellikler olarak iki kısımda incenilmesi gerekir.

2.3.2.1 Taze Beton Özellikleri

Taze betonda en çok aranan özelliklerinin başında işlenebilirlik gelmektedir. İşlenebilirlik betonun karıştırılması, taşınması ve yerleştirilme işlemlerinde minimum enerji sarfıyatı ile betonun homojenliğini yitirmeden ve ayrışma yapmadan kalıbı boşluksuz doldurabilmesidir (Şahin vd. 2007). İşlenebilirlik, kıvam, akışkanlık ve sıkıştırılabilirlik özelliklerindeki kapsamaktadır. Hazır beton endüstrisinin gelişmesiyle birlikte pompalar kullanılmaya başlanmıştır. Pompa ile yerleştirelebilen betonlarda ise pompalanabilirlik kavramı da işlenebilirlik kavramının içine dahil olmaktadır.

Beton herhangi bir ayrışma olmadan kalıba yerleştirilebilir, sıkıştırılabilir ve kolayca mastarlama işlemi yapılabilirdir. Taze betonun işlenebilirliği agregaların gradasyonu ve tane şekline göre, çimento ve katkı maddelerinin kalitesine ve miktarına göre ve hapsolmuş hava miktarına göre değişmektedir (Yazıcı 2019). Taze betonda donma-çözünme direncini arttırmak için hava sürükleyici katkı kullanılır (Şahin vd. 2007). Kısacası taze beton sertleşene kadar donma-çözünme özelliği göstermemelidir.

Taze betonun kıvamını tayin etmek için birçok deney yapılmaktadır. Bunlardan özellikle çökme (slump) deneyi TS EN 12350-2'ye (2010) göre, Vebe deneyi TS EN 12350-3'e (2010) göre, sıkıştırılabilirlik derecesinin tayini TS EN 12350-4'e göre, taze betonun yayılma tayini TS EN 12350-5'e (2010) göre, sıkıştırılmış taze betonun yoğunluk tayini TS EN 12350-6'ya (2010) göre yapılmaktadır (İnt.Kyn.7).

2.3.2.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Sertleşmiş beton, yerleştirme ve sıkıştırma işleminin sonrasında betonun katılaşmasını tamamladığı evre olarak tanımlanır. Sertleşmiş betonda aranan özelliklerin başında basınç dayanımı gelmektedir. Bunun yanında büzülme, sünme, dayanıklılık (durabilite), su emme ve geçirimsizlik gibi diğer aranan özelliklerdir.

Dayanım; betona değişik yönlerde uygulanan yüklere karşı betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Sertleşmiş betondan; düşey yükler altında basınç dayanımının, eğilme ve çekme dayanımının, kayma etkisi yaratacak yükler altında kayma dayanımının, tekrarlı yükler altında şekil değiştirmeye karşı yorulma dayanımının yüksek olması beklenir. Beton dayanımını su/çimento oranı, karma suyunun kalitesi, çimento ve agreganın özellikleri ve kür edilme koşulları gibi etmenler etkilemektedir. Beton basınç dayanımı tayini TS EN 12390-3'a (2010) göre yapılmaktadır. Yarmada Çekme dayanımı tayini TS EN 12390-6 (2010) ve ASTM C 496'ya (2017) göre yapılmaktadır. Eğilmede çekme dayanımı tayini ise TS EN 12390-5 (2010) ve ASTM C293/C293M - 16'ya (2016) göre yapılmaktadır (İnt.Kyn.6).

Beton karışım suyunun fiziksel (buharlaşıma ve terleme) veya kimyasal tepkimeler ve çimentonun hidratasyonu sonucu su miktarı azalır ve betonda büzülme olayı gerçekleşir (İnt.Kyn.6). Büzülme olayı sertleşmiş betondan beklenilmeyecek bir durumdur. Büzülme olayı betonun kür edilmesi veya beton dökümünden sonra betonun sulanması ile engellenebilmektedir.

Beton üzerine uygulanan devamlı yükler neticesinde betonun yapısında ilerleyen yaşlarında sıcaklık ve nemle birlikte deformasyonlar meydana gelir. Beton deforme olduktan sonra hiçbir zaman eski haline geri dönememektedir (İnt.Kyn.6). Bu olaya sünme denilmektedir. Sünme olayı sertleşmiş betonda istenilmeyen bir durumdur.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler

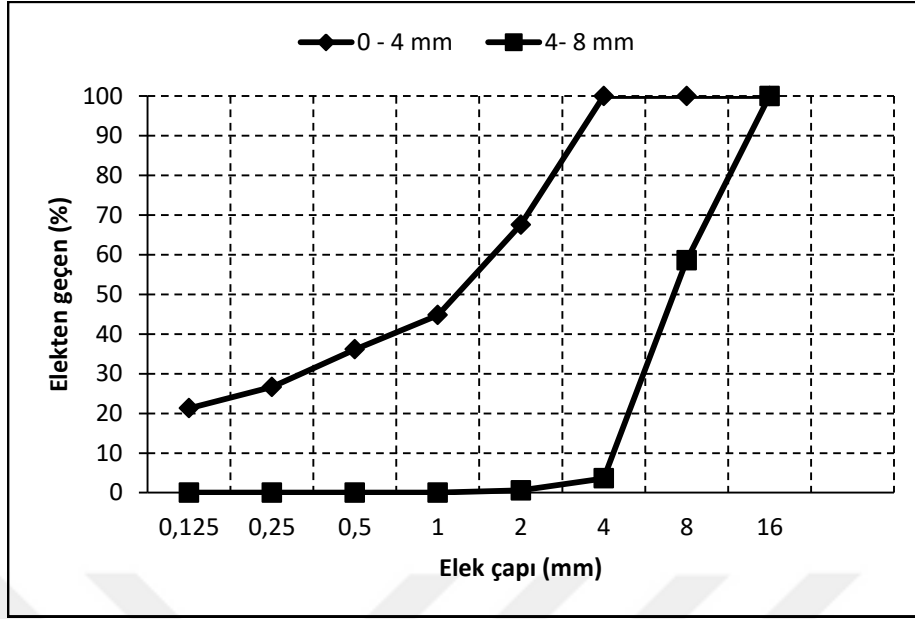
Geopolimer beton üretiminde kullanılan hammaddeler; agregâ, alkali aktifleştiriciler ve bağlayıcı olarak uçucu kül (UK)'dür. Örneklerin üretiminde bağlayıcı hammadde olarak kullanılan UK, Afyonkarahisar'da faaliyet gösteren KOLSAN Hazır Beton A.Ş. firmasından temin edilen Kütahya Tunçbilek Termik Santrali'ne ait uçucu küldür.

Geopolimer betonların üretiminde kullanılan UK, alkali aktifleştiricilerle (NaOH ve SS) aktive edilmiştir. Betonların üretiminde kullanılan agregalar Afyon'da bulunan Kolsan Hazır Beton A.Ş.'den temin edilmiş olup, 0 – 4 mm (ince) ve 4-8 mm (orta) olmak üzere iki farklı sınıfta yer almıştır. Kullanılan agregaların özellikleri Çizelge 3.1.'de, agregalara ait elek analizi grafiğı ise Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

3.1.1 Kullanılan Agregaların özellikleri

Çizelge 3.1 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.

Tane Boyutu (mm)	Nem oranı (%)	Su emme (%)	Özgöl Ağırlık
0 - 4	1.82	1.642	2.639
4 - 8	0.68	0.602	2.688



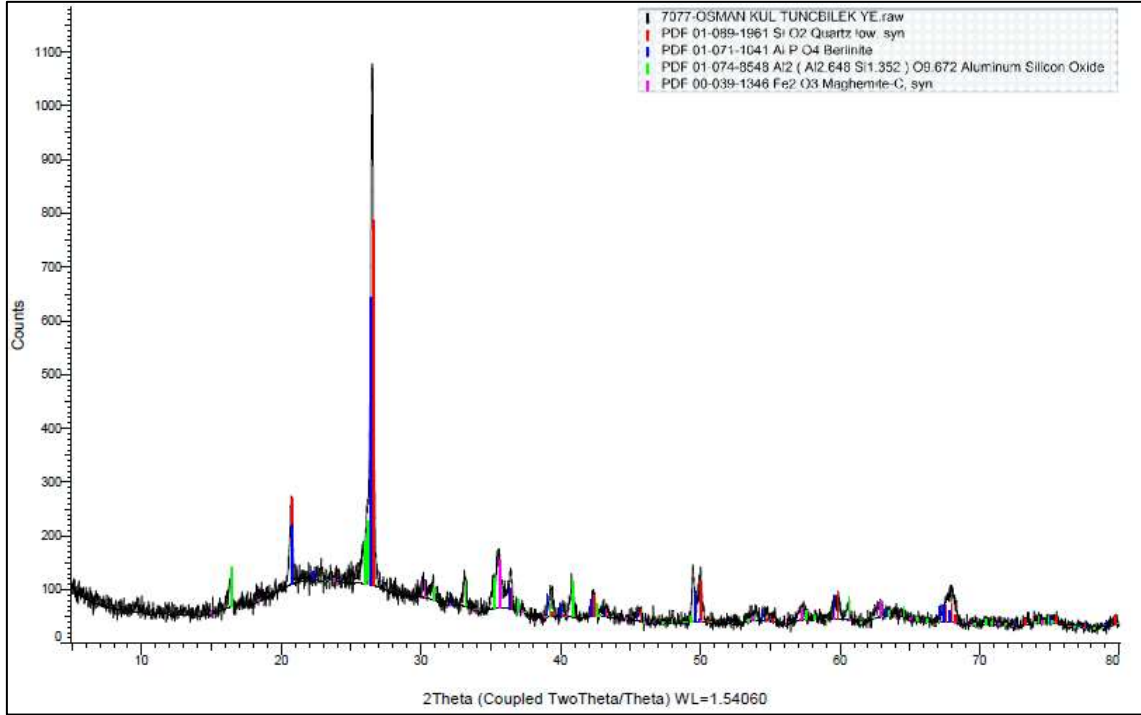
Şekil 3.1 Üretimde kullanılan agregaların elek analizi.

3.1.2 Kullanılan Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

XRF analiz sonuçlarına göre; uçucu külün toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değeri % 85,82, CaO değeri ise % 3,18'dir. Bu veriler ışığında kullanılan uçucu kül ASTM C618-08a' (2000)'ya göre, toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değeri % 70'den fazla ve CaO % 10'dan az olduğu için F sınıfı uçucu küldür. Çizelge 3.2' de görüldüğü gibi uçucu külden kütlece silika/alümina oranı ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) 2,49'dur.

Çizelge 3.2 Uçucu külün kimyasal kompozisyonu.

Malzeme	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	TiO ₂	LOI	Toplam
Tunçbilek	54,37	21,86	9,59	4,09	0,32	2,39	0,71	3,18	1,02	1,52	99,05



Şekil 3.2 Tunçbilek uçucu külünün XRD difraktogramı.

Şekil 3.2’de verildiği gibi uçucu külün X-ışınları difraksiyon grafiğine (XRD) göre uçucu küld; kuartz, müllit ve demir oksit gibi mineraller bulunmaktadır. Lazer tane boyutu analizine göre, uçucu küle ait lazer tane boyut analiz değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Uçucu küle ait lazer tane boyut boyut analiz değerleri.

Numune	d ₁₀ (µm)	d ₅₀ (µm)	d ₉₀ (µm)
Uçucu kül	5,514	44,035	236,495

3.1.3 Kullanılan Kimyasal Malzemelerin Özellikleri

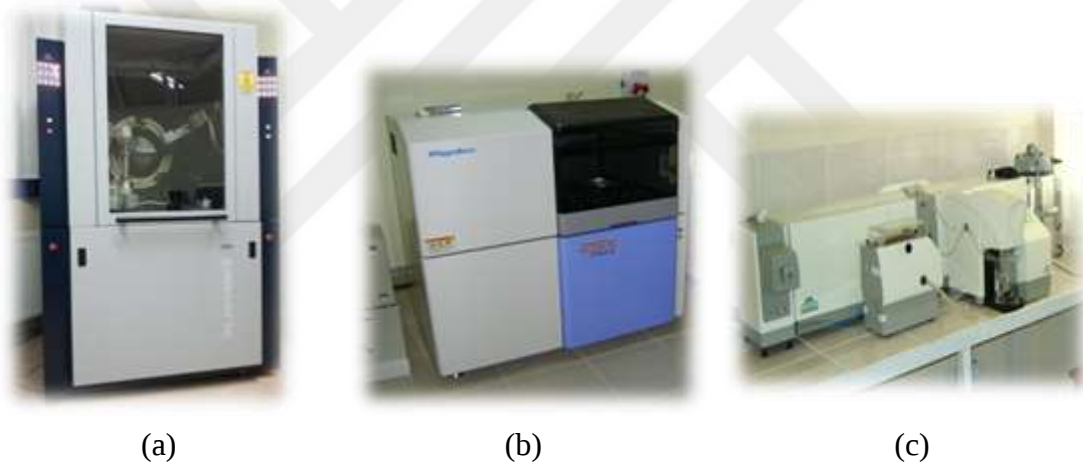
Geopolimer betonların hazırlanmasında UK malzemesi, alkali aktifleştirici olarak NaOH ve sodyum silikat solüsyonu (Na₂SiO₃) - (SS) ile aktifleştirilmiş ve kullanılan alkali aktifleştiricilerin özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Üretimde kullanılan kimyasal malzemeler ve özellikleri.

Sodyum silikat solüsyonu (SS)	Sodyum hidroksit (NaOH)
Na ₂ O: 26.98 (%)	M: 15 g/mol
SiO ₂ : 8.77 (%)	NaOH ≥ 99.0 (%)
H ₂ O: 64.25 (%)	

3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler

Beton üretiminde kullanılan UK malzemesine kimyasal, mineralojik ve tane boyut analizleri yapılmıştır. Malzemelerin mineralojik analizi Resim 3.1a.'de gösterilen Bruker Marka D8 Advance Model cihazında XRD yöntemiyle yapılmıştır. Malzemelerin kimyasal analizleri, Resim 3.1b.'de gösterilen Rigaku ZSX Primus cihazında XRF yöntemi ile ve tane boyut analizleri ise Resim 3.1c'de gösterilen Malvern Mastersizer 2000 cihazında yapılmıştır.



Resim 3.1 (a) Bruker D8 Advance; (b) Rigaku ZSX Primus; (c) Malvern Mastersizer 2000.

3.3 Geopolimer Betonların Hazırlanması

Geopolimer betonların hazırlanmasında agregalar, alkali aktifleştiriciler ve UK kullanılmış olup tüm serilerde aynı oranlar kullanılmıştır. Geopolimer betonların karışım dizaynı TS 802'ye göre hazırlanmıştır. Hazırlanan geopolimer betonlarda kullanılan malzemeler ve oranları Çizelge 3.5'de gösterilmiştir. UK malzemesinin aktifleştirilmesinde 15M NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Geopolimer betonların hazırlanmasında kullanılan su, alkali aktifleştiricilerin çözeltilerinde kullanılmış olup ekstra bir su karışımlara ilave edilmemiştir.

Çizelge 3.5 1 m³ geopolimer betonda kullanılan malzeme miktarları.

No	UK (kg)	NaOH (kg)	SS (kg)	İnce agrega (kg)	Orta agrega (kg)	Toplam (kg)
1	440	113,67	288,3	529,17	793,66	2164,8



Resim 3.2 Geopolimer beton hazırlamada kullanılan mikser ve taze geopolimer beton karışımı.

Çalışmada hazırlanan geopolimer beton örnekleri ve bu örneklerle uygulanan kür prosesleri Çizelge 3.6’de sunulmuştur. Buna göre hazırlanan numunelerde 50 °C’de 5 saat kür edilen örneklerle Ş505, 50 °C’de 8 saat kür edilen örneklerle Ş508, 50 °C’de 24 saat kür edilen örneklerle Ş524, 60 °C’de 5 saat kür edilen örneklerle Ş605, 60 °C’de 8 saat kür edilen örneklerle Ş608, 60 °C’de 24 saat kür edilen örneklerle Ş624, 70 °C’de 5 saat kür edilen örneklerle Ş705, 70 °C’de 8 saat kür edilen örneklerle Ş708, 70 °C’de 24 saat kür edilen örneklerle Ş724 olarak kodlandırılmıştır.

Hazırlanan geopolimer beton örnekleri 4 seri halinde üretilmiştir. Hazırlanan geopolimer beton serilerinden; 1. seri fiziksel özelliklerin araştırılması için referans numuneler olarak adlandırılmıştır. 2. seri donma çözünme deneyleri için, 3. seri yüksek sıcaklık deneyleri için ve 4. seri ise Sülfat (NaSO₄ ve MgSO₄) deneyleri için kullanılmıştır.

Pan mikserde hazırlanan karışımlar, 10 x 10 x 10 cm’lik plastik beton kalıplara dökülmüş ve vibrasyon yöntemiyle sıkıştırılmıştır (Resim 3.3). Akabinde, vakit kaybetmeden hazırlanan örnekler termal kür işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla

laboratuvar tipi etüve yerleştirilmiştir. Örnekler etüvden alındıktan bir gün sonra (Resim 3.4) kalıplarından çıkarılmış ve laboratuvar ortamında testlerin yapılacağı güne kadar 28 gün bekletilmiştir.



Resim 3.3 Kalıplara yerleştirilmiş örnekler.



Resim 3.4 Etüv kürü uygulanmış geopolimer betonlar.

Çizelge 3.6 Geopolimer beton örneklerine uygulanan kür prosesi ile durabilite deneylerinde kullanılan beton örnekler.

No	Geopolimer Beton	Kür Süresi (saat)	Kür Sıcaklığı (°C)	Uygulanan Durabilite Deneyi
1	Ş505-1	5	50	Referans Örnekler
2	Ş508-1	8	50	Referans Örnekler
3	Ş524-1	24	50	Referans Örnekler
4	Ş605-1	5	60	Referans Örnekler
5	Ş608-1	8	60	Referans Örnekler
6	Ş624-1	24	60	Referans Örnekler
7	Ş705-1	5	70	Referans Örnekler
8	Ş708-1	8	70	Referans Örnekler
9	Ş724-1	24	70	Referans Örnekler
10	Ş524-2	24	50	Donma-Çözünme
11	Ş724-2	24	70	Donma-Çözünme
12	Ş505-3	5	50	Na ₂ SO ₄ Atakları
13	Ş605-3	5	60	Na ₂ SO ₄ Atakları
14	Ş705-3	5	70	Na ₂ SO ₄ Atakları
15	Ş505-4	5	50	MgSO ₄ Atakları
16	Ş605-4	5	60	MgSO ₄ Atakları
17	Ş705-4	5	70	MgSO ₄ Atakları
18	Ş524-3	24	50	Yüksek Sıcaklık
19	Ş624-3	24	60	Yüksek Sıcaklık
20	Ş724-3	24	60	Yüksek Sıcaklık
21	Ş505-2	5	50	450 Günlük Örnekler
22	Ş508-2	8	50	450 Günlük Örnekler
23	Ş524-4	24	50	450 Günlük Örnekler
24	Ş605-2	5	60	450 Günlük Örnekler
25	Ş608-2	8	60	450 Günlük Örnekler
26	Ş624-2	24	60	450 Günlük Örnekler
27	Ş705-2	5	70	450 Günlük Örnekler
28	Ş708-2	8	70	450 Günlük Örnekler
29	Ş724-2	24	70	450 Günlük Örnekler

3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler

Geopolimer betonlar numuneleri termal kür işlemlerinin ardından fiziksel ve mekanik testlerin yapılacağı güne kadar 28 gün laboratuvar ortamında ve oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Resim 3.5’de görüldüğü üzere basınç dayanım testleri için laboratuvar tipi beton presleri kullanılmıştır. Geopolimer betonlarda, basınç dayanım testinde üç örneğin ortalaması alınmıştır ve 28 günlük numuneler kullanılmıştır.

Geopolimer betonlar fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 24 saat boyunca su tankına yerleştirilmiştir. Geopolimer beton numunelerinin Arşimet prensibine göre su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel

özellikleri yapılan testler sonucunda belirlenmiştir. Geopolimer beton numunelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sırasında; örnekler su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları ve suya doymun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından ilgili numuneler laboratuvar tipi etüvlerde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulup tekrar tartılmıştır. Elde edilen bu değerler yardımıyla örneklerin; görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri tespit edilmiş, su emme değerleri ASTM C-642'ye (2006) göre belirlenmiştir. Geopolimer betonların mekanik özellikleri ise TS EN 12390-3 (2010)'a göre belirlenmiştir.

Bu işlemler referans numuneler için yapılmıştır. Ayrıca Donma-Çözünme, Yüksek Sıcaklık Etkisi ve Sülfat Deneylerinin ardından aynı işlemler tekrarlanmış ve arasındaki farklar belirlenmiştir.



Resim 3.5 Çalışmada kullanılan beton presi.

3.4.1 Su Emme

Numuneler, $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki ortamda şartlandırıldıktan sonra, sabit kütleye ulaşmaya kadar suya batırılır ve daha sonra da kurutularak değişmez kütleye ulaşması sağlanır. Küttele kaybı, numunenin kuru kütlesine oranla yüzde olarak gösterilir (Ünsal ve Şen 2008). Geopolimer Beton örneklerinin ağırlıkça su emme oranları ASTM C-642 (2006) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Geopolimer beton numuneleri 105°C 'de 24 saat süreyle laboratuvar tipi etüvlerde kurutulur; Tartılıp, kuru ağırlık, M_1 bulunur. 24 saat laboratuvar tipi kür havuzuna bırakılıp su emdirilir. Numuneler suya doymun hale getirilir ve havuzdan alınıp doymun

yüzey kurusu halinde havada tartılır. M_2 değeri bulunur. Numuneler suya doygun halde arşimet terazisinde tartılır. M_3 suda suya doygun ağırlığı ölçülür. $M_3 - M_2 =$ Numunenin toplam hacmidir. Betonların ağırlıkça emmiş olduğu su yüzdesi (W_a) aşağıdaki formül (3.1) ile hesaplanır.

$$W_a = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

3.4.2 Görünen Porozite

Malzemedeki boşluk oranına porozite (gözeneklilik) adı verilir. Görünen porozite, gözeneklilik oranı gibi fiziksel özellikleri (TS EN 1936, 2010) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Su emme tayininde kullanılan ham veriler görünen porozite oranının belirlenmesinde kullanılmıştır. Porozite (P) % olarak hesaplanır. Görünen porozitenin hesaplanmasında aşağıda verilen formül (3.2) kullanılır.

$$P = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100 \quad (3.2)$$

3.4.3 Görünür Yoğunluk

Bulk (yığinsal) yoğunluk; numune ağırlığının bulk hacmine oranı olarak hesaplanır. Bulk hacim toz hacmi, partiküller arası boşluk hacmi ve kapalı ve açık gözenek hacmini içerir. Numunelerin tümünün hacmi olup, cismin katı kısmı ile içerdiği açık (yüzeysel) ve kapalı (numune içi) porozitenin hacimlerinin toplamına eşittir. Malzemenin görünür yoğunluğu (G_y) aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$G_y = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \quad (kg/m^3) \quad (3.3)$$

3.4.4 Birim Hacim Ağırlık

Birim hacim ağırlık (B_a), numunelerin etüv kurusu ağırlığının, numunelerin tüm hacmine (V_1) bölünmesi ile bulunur. Birimi kg/m^3 'tür. Aşağıda verilen formül (3.4) ile hesaplanır.

$$Ba = \frac{M_1}{V_1} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.4)$$

3.4.5 Basınç Mukavemet Testi

Beton genel olarak basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük bir yapı malzemesidir. Betonların çekme dayanımı düşük olduğundan genellikle dikkate alınmamaktadır. Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı; eksenel yük altındaki dayanım olarak ifade edilir. Betonlarda gerilme olarak ifade edilen dayanım; kırılma yükünün numune alanına bölünmesi ile elde edilir. Birimi MPa'dır. Aşağıda verilen formül (3.5) ile hesaplanır.

$$BM = \frac{P_k}{A} \text{ (MPa)} \quad (3.5)$$

BM: Basınç dayanımı (MPa)

A: Basınç uygulanan numune alan (mm²)

P_k: Kırılma anındaki yük (Newton)

Geopolimer beton örneklerinin basınç mukavemet testleri tüm numune gruplarına uygulanmış ve basınç dayanımları belirlenmiştir.

3.5 Durabilite (Dayanıklılık) Testleri

3.5.1 Donma Çözünme Testleri

Çimento esaslı yapı malzemeleri servis ömrü boyunca fiziksel, kimyasal veya biyolojik agresif ortamlar ile hasara uğrayabilir. Özellikle, bu etkiler betonun performansının zamanla azalmasına, proje ömründen önce işlevini ve dayanımını yitirmesine yol açabilir. Tekrarlı donma – çözünme etkisi, fiziksel etkilerden bir tanesidir. Donma – çözünme çevrimlerinin şiddeti betonun bulunduğu ortama, oluşan sıcaklık farklarına, betonun nem durumuna, suyun donma hızı gibi etkenlere bağlı olarak değişir. Sürekli tekrarlayan donma – çözünme ile birlikte betonda hasar oluşmaya başlar. Betondaki hasar oluşumu betonun çatlaması veya yüzeyde oluşan soyulma ve dökülmeler olarak kendini gösterir. Betonun kesiti boyunca çatlaması durumu çok şiddetli ve uzun süreli donma–çözünme etkisinde olurken, yüzey hasarları çevremizde en çok karşılaşılan durumdur (Erdem ve Öztürk 2012).

Üretilen betonun donma-çözülme olayı sonunda parçalanması birçok etkene bağlıdır. Bu etkenlerden en önemlisi agregalardır. Beton agregasının donmaya karşı dayanıklılığı, yenilenen donma-çözülme olayının zararlı etkilerine karşı bırakılan agrega ile üretilen betonun ne derecede dayanıklı olduğunun bir ölçüsüdür (Yıldız vd. 2006).

Yapılan bu tez çalışmasında ise bu deneylerde geopolimer beton örnekleri fiziksel etkilerden olan donma-çözünme etkisine maruz bırakılmıştır. 10 cm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C 672'ye (2012) uygun olarak donma-çözülme deneyi gerçekleştirilmiştir. Donma-çözülme deneyi için -20 °C'ye kadar soğuma yapabilen dondurucular kullanılmıştır. Dondurucu dolapta 12 saat bekletilen geopolimer beton numuneleri daha sonra dolaptan çıkartılarak 23±3 °C'de sıcaklıktaki suda 12 saat süreyle çözülmeye bırakılmıştır. 25 donma- çözülme çevrimi sonunda geopolimer beton numunelerinde meydana gelen fiziksel değişimler görsel olarak incelendikten sonra, numunelerdeki ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı değişimleri deneysel olarak belirlenmiştir.

Sertleşmiş betonun donma olayına karşı dayanıklılığını etkileyen en önemli iki faktör, betonun doygunluk derecesi ve boşluk yapısıdır. Kritik doygunluk değeri altında betonun donma karşı dayanıklılığı iyidir. Geçirimsizliği azaltan tüm faktörler dayanıklılığında arttırmaktadır (Baradan ve Aydın 2013).

Donma çözünme deneyi için 50 ve 70 °C’de 24 saat kür edilen geopolimer beton örnekleri kullanılmıştır.



Resim 3.6 Donma-çözülme deneyi için -20 °C’ye kadar soğuma yapabilen donduruculara konulan Geopolimer beton numuneleri.

3.5.2 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklığa maruz kalan beton veya betonarme elemanların yüzeylerinde fiziksel değişimler ve dayanımlarında mekanik değişimler meydana gelir. Bu değişiklikler sonucunda çatlama, parça atma ve renk değiştirme gibi olaylar ve özellikle betonarmeler sistemlerde ise çelik ve beton arasında aderans kayıpları oluşmaktadır.

Okullar, fabrikalar, tüneller, konutlar ve petrol tesisleri gibi yapılar işlevselliği bakımından yangına maruz kalma olasılıkları yüksektir. Yangın nedeniyle yüksek sıcaklığa maruz kalan yapılarda durabilite bozuklukları ve fiziksel kalıcı hasarlar oluşması, yapıların servis ömrünün tamamlanmasına neden olmaktadır.

Beton yangına karşı dayanıklı bir yapı malzemesine olmasına karşın beton yapımında kullanılan malzemelerin değişmesi (yangına karşı dayanıklı olmayan malzemenin kullanılması) betonun yüksek sıcaklığa karşı durabilitesini azaltabilmektedir. Bu

Çalışmada betonda bağlayıcı olarak kullanılan UK malzemesinin yüksek sıcaklığa karşı davranışı incelenmiştir.

Beton basınç dayanımında önemli parametrelerden biri porozitedir. Porozite arttıa betondaki boşluk oranı artacağından beton dayanımı azalış gösterecektir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda kapiler boşluklardaki sular ayrışacaktır ve agregalarda genleşmeye yol açacaktır. Bağlayıcı malzeme içerinde bulunan suyun ayrışması bzlmeye sebep olacaktır. Beton içerisinde gerçekleşen büzülme ve genleşme etkileşimi betonun dayanımında ciddi azalmalar meydana getirir.

Yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklığa karşı beton içerinde UK kullanılmasının beton üzerinde olumlu etki yaptığı ortaya konulmuştur. UK; 120 - 150  C ler arasında sıcaklık ve basıncın etkisiyle tebormolit jeli oluşturarak basınç dayanımını %150 civarında arttırdığı belirlenmiştir. Tebormolit jeli agreğa ve imento hamuru arasındaki bağı güçlendirerek mikro çatlakların oluşumunu engellemektedir.

Bu çalışmada ise 28 günlük geopolimer beton numuneleri 1000  C kapasiteli laboratuvar tipi elektrikli fırında sıcaklık artış hızı dakikada 2,5  C olacak şekilde son sıcaklık olan 800  C’de 1 saat süresince TS EN 13501-1’e (2007) uygun olarak yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer betonların daha sonrasında fiziksel ve mekanik değişimleri incelenmiştir.

Yüksek sıcaklık deneyi için 50, 60 ve 70  C de ve 24 saat kr edilen ř-524, ř-624 ve ř-724 serileri kullanılmıştır. Bu testlerde kullanılan fırın Resim 3.7’da, deneylerde kullanılan örneklere ait resimler ise Resim 3.8 ve Resim 3.9’da gösterilmişti



Resim 3.7 Yüksek sıcaklık deneyinde kullanılan fırın.



Resim 3.8 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin ilk halleri.

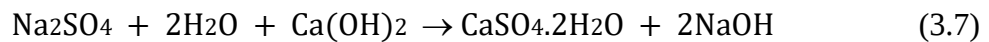
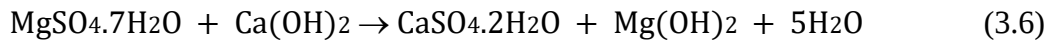


Resim 3.9 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin son halleri.

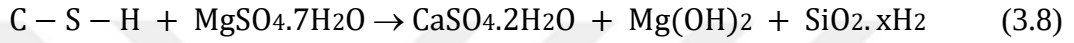
3.5.3 NaSO₄ ve MgSO₄ Testleri

Betonda bozunmaya, durabilite bozukluklarına sebep olacak en önemli unsurlardan biride sülfat tuzlarıdır. Yüksek yoğunluklu sülfat etkisine maruz kalan betonlar tahrip olabilmektedir. Özellikle su ile ilgili yapılarda (köprü, baraj, deniz yapıları) ve su ile temas edebilecek (temel ve altyapıda kullanılan beton borular vb.) yapılarda beton veya betonarme kısımları suyun içinde bulanabilen MgSO₄ ve NaSO₄ tuzlarının saldırılarına maruz kalabilirler.

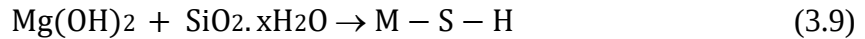
Sülfat etkisi, hidrate Portland çimentosu ile sülfat iyonları (Sodyum, Magnezyum, Potasyum) arasında meydana gelen kimyasal tepkimeler ile oluşur. Sülfat iyonlarının kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) ile reaksiyonlarından sonra oluşan alçıtaşının yanı sıra kation tipine göre Mg(OH)₂ (brusit), NaOH gibi hidroksitler oluşmaktadır. Magnezyum (Denklem 3.6) ve Sodyum (Denklem 3.7) kationlarının oluşturduğu tepkimeler aşağıdaki gibidir.



Magnezyum sülfat çözeltili harçlarda sertleşme olduktan sonra ilk olarak taze harçlarda olduğu gibi magnezyum sülfatın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyonu devam eder. Aynı şekilde yine alçıtaşı oluşur. Oluşan bu alçıtaşı betonda şişmeye neden olur. Magnezyum sülfat etkisine maruz kalan betonlarda ikincil etrenjit oluşumu meydana gelmez. Çünkü $\text{Mg}(\text{OH})_2$ oluşumu, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 'nin çözünürlüğünün çok düşük olması ve çözeltinin pH değerinin düşük olması hem etrenjit hem de C-S-H (kalsiyum silika hidrat) nin stabilitesini bozmaktadır. C-S-H yapısı, çimento hamurunun ana bağlayıcı özelliği olan önemli bir yapıdır. Sülfat etkisi arttıkça C-S-H jelindeki kalsiyum iyonu magnezyum iyonu ile yer değiştirir (Denklem 3.8).



Magnezyum sülfat C-S-H jeli ile reaksiyona girerek alçıtaşı, brusit ve silika jeli (S_2H) oluşur. Reaksiyon sonucu oluşan $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ silika jelidir ve bu jelin bağlayıcı ve dayanım özelliği C-SH jelinin bağlayıcı ve dayanım özelliğine göre çok daha düşüktür. C-S-H jelinin stabiliteyi sağlama ve pH değerini yükseltme aşaması C-S-H jelinin ayrışması olarak adlandırılır. C-S-H jeli ayrışma sırasında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve bağlayıcı özelliklerini kaybettikçe çimento hamurunda oluşan alçıtaşı ve brusit konsantrasyonu artma eğilimi gösterir. Konsantrasyon artmasıyla beraber brusit hidrosilikatlar (silika jeli) ile tepkimeye girerek bağlayıcı ve dayanım özelliği olmayan M-S-H (magnezyum silika hidrat) oluşur (Denklem 3.9).



Sodyum sülfat (NaSO_4) çözeltili harçlarda, MgSO_4 gibi sertleşme olduktan sonra ilk olarak taze harçlarda olduğu gibi sodyum sülfatın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyonu devam eder ve aynı şekilde yine alçıtaşı oluşur. Oluşan bu alçıtaşı MgSO_4 te olduğu gibi şişmeye neden olur. MgSO_4 ten tek farkı sertleşmiş betonlarda ayrıca kalsiyum alüminat hidratlar ve monosülfat hidratlar alçıtaşı ile reaksiyona girerek ikinci etrenjit oluşumuna neden olmasıdır. Oluşan etrenjitler betonda çatlamalara ve dayanım kaybına sebep olur.

Bu çalışmada $MgSO_4$ ve $NaSO_4$ tuzlarının etkisinin incelenmesi amacıyla %5 $NaSO_4$ içeren 11 litre ve %5'lik $MgSO_4$ içeren 12 litre çözelti hazırlanmıştır. Geopolimer beton numuneleri çözelti içine konulmadan önce ağırlık ölçümleri yapılmış ve 28 gün süre ile çözelti içerisinde bekletilmiştir. 28 gün sonunda fiziksel ve mekanik değişimler incelenmiştir.



Resim 3.10 $MgSO_4$ ve $NaSO_4$ etkisine maruz bırakılan numuneler (sağdaki $MgSO_4$ ve soldaki $NaSO_4$).

$MgSO_4$ ve $NaSO_4$ tuzlarının etkilerinin incelenebilmesi için 50, 60 ve 70 °C sıcaklıkta 5 saat kür edilen geopolimer numuneleri kullanılmıştır (Resim 3.10). Ş505-3, Ş605-3 ve Ş705-3 serileri %5'lik 11 L $NaSO_4$ çözeltisine koyularak, Ş505-4, Ş605-4 ve Ş705-4 serileri ise %5'lik 12 L $MgSO_4$ çözeltisine koyularak tuzlarının etkilerine maruz bırakılmıştır. 28 gün sonunda çözeltilerden çıkarılan numunelere fiziksel deneyler uygulanmıştır.

3.6 Geopolimer Betonların Mineralojik ve Morfolojik Analizleri

Çizelge 3.4'e uygun olarak hazırlanan Ş524, Ş624 ve Ş724 kodlu beton örneklerinden analizleri yapılmak üzere numuneler alınmıştır. AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde Bruker Marka D 8 Advance Model cihazıyla (Resim 3.1a) beton örneklerin XRD analizleri yapılmıştır. Yine aynı merkezde bulunan ve Resim 3.11'de gösterilen

LEO 1430 VP model SEM cihazı ile de morfolojik analizler yapılmış ve örneklerin iç yapı görüntüleri çekilmiştir.

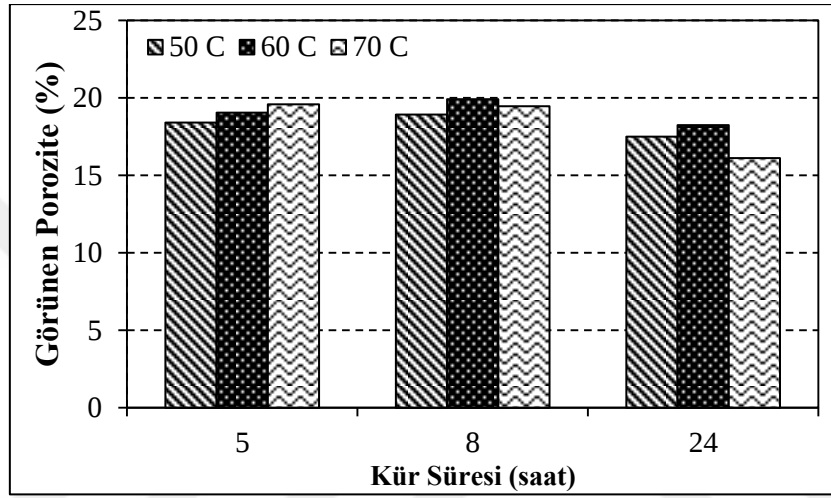


Resim 3.11 SEM cihazı.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Geopolimer Betonların Fiziksel Özellikleri

Çalışmada hazırlanan geopolimer betonların fiziksel özellikleri birbirinden farklı sonuçlar vermiştir. Uygulanan kür sıcaklıklarına ve kür sürelerine göre elde edilen görünen porozite oranları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



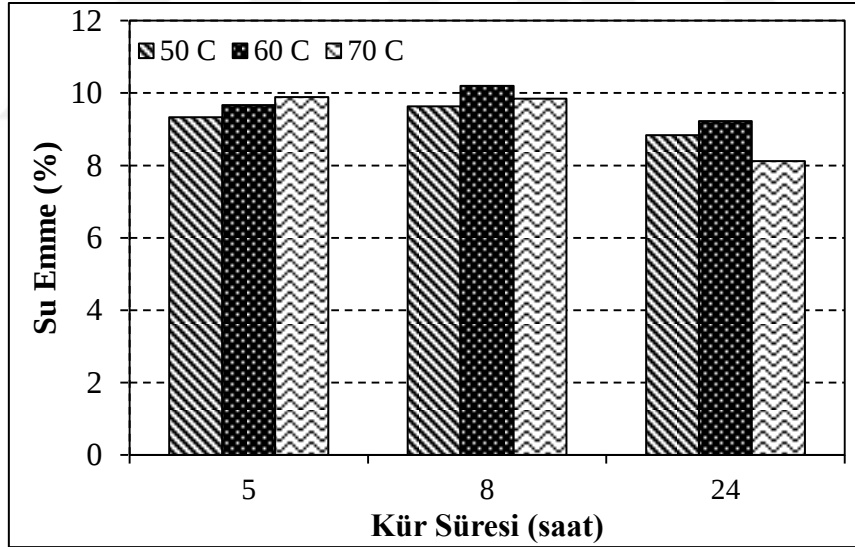
Şekil 4.1 Referans geopolimer betonların görünür porozite oranları.

24 saat kür edilen örneklerde, uygulanan kür sürelerindeki artışların geopolimer betonlarda görünen poroziteyi azalttığı tespit edilmiştir. 8 saat ve 60 °C’de kür edilen örneklerde en yüksek görünen porozite değerine ulaşılmıştır. Aynı zamanda 50 °C’de ve 60 °C’de de kür edilen örneklerde görünen porozite değerlerinde önemli bir farklılık oluşmadığı gözlemlenmemiştir (Şekil 4.1).

Geopolimer betonların 70 °C’de 24 saat kür edilen örneklerinde, görünen porozitenin en düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Bu noktada artan kür sıcaklığı ile birlikte bünyede geopolimer mekanizmasının artışına bağlı olarak, bünyede bulunan açık gözenek oranlarının azalmasından dolayı bu sonuçların ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Tüm örnekler dikkate alındığında geopolimer betonlarda görünen porozite oranlarının % 16,1- % 19,9 arasında değişim gösterdiği Şekil 4.1’de görülebilmektedir.

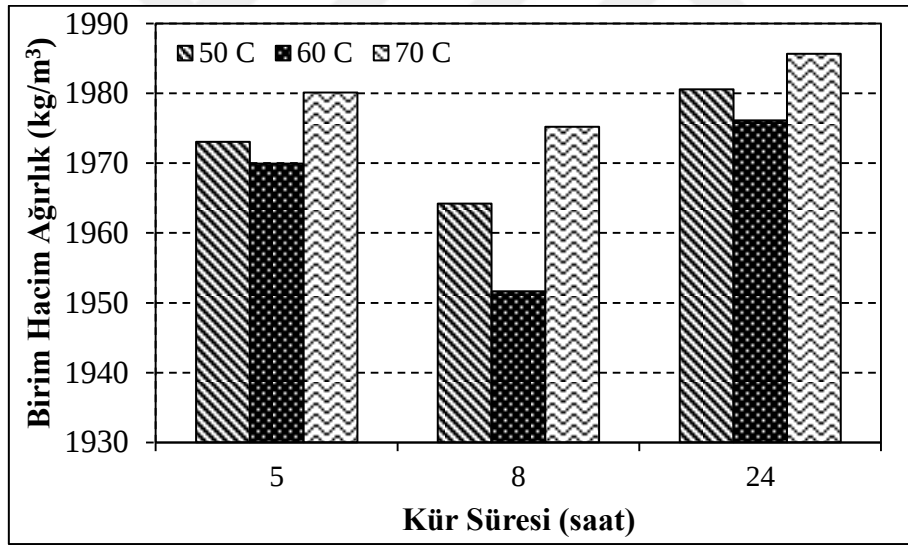
Örneklerde, boşluklu yapının azalması ile birlikte geopolimer betonların su emme oranlarında azalmaların gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu noktadan hareketle görünen porozitesi düşük olan örneklerin yine benzer şekilde su emme oranlarının da düşük seviyelerde olması beklenir. Çalışmada üretilen geopolimer betonların su emme oranları dikkate alındığında ise 5 saat kür edilen örneklerde kür sıcaklığının artışına paralel olarak su emme oranlarında artışlar gerçekleştiği gözlenmiştir. Fakat 8 ve 24 saat kür edilen örneklerde ise belirgin bir eğilimin oluşmadığı Şekil 4.2’de görülmektedir. Bu değişken durumun küçük yüzde oranlarında gerçekleştiği görülmekle birlikte geopolimer betonların bünyesinde boşluk oranlarının artan kür sıcaklığı ile birlikte azalmasının bir sonucu olarak su emme oranlarının da azaldığı düşünülmektedir. 70 °C’de kür edilen geopolimer betonlarda en düşük su emme oranları elde edilmiş olup bu örnek gruplarında ilgili değerler % 9,2 - % 8,1 arasında değişmektedir. Bünyedeki içyapı gelişiminin daha iyi olduğu düşünülen bu örneklerde su emme oranlarının daha düşük seviyelerde kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.2 Referans geopolimer betonların su emme oranları.

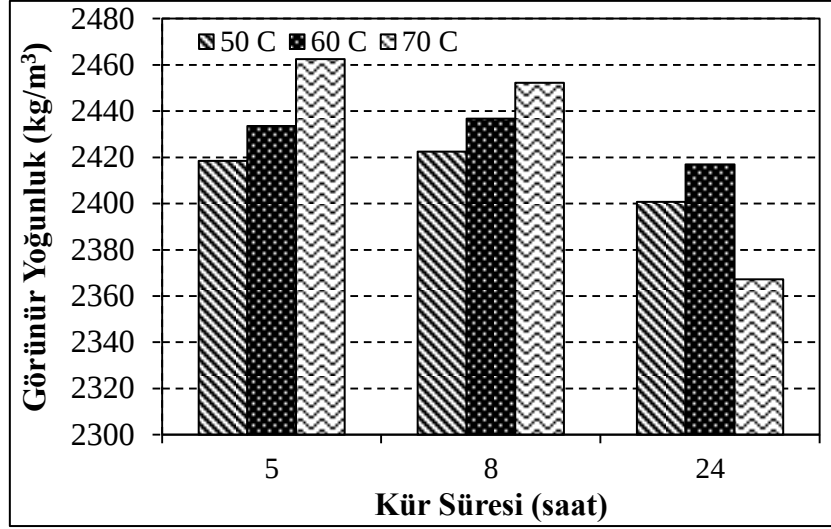
Geopolimer beton örneklerinin yoğunluk durumlarının yorumlanmasında birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerlerinin bir arada değerlendirilmesi daha iyi sonuçlar elde edebilmemiz açısından önemlidir. 70 °C’de kür edilen örneklerin 60 °C’de ve 50 °C’de kür edilen örneklere göre daha yoğun bir yapıda olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.3). Burada 70 °C’de kür edilen örneklerin görünen porozite değerlerinin düşük olması ve

geopolimerleşmenin artması ile birlikte bünyedeki boşluklu yapının azalmasıyla geopolimer beton örneklerinde birim hacim ağırlıklarının beklenildiği gibi en yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. 70 °C’de ve 24 saat kür edilen örneklerde birim hacim ağırlıklar 1 976,1 – 1 985,6 kg/m³ arasında değişmektedir. 24 saat kür edilen geopolimer beton örnekleri tüm kür sıcaklıklarında en yüksek birim hacim ağırlık değerlerine sahiptir. Bu nedenle geopolimerleşme mekanizmasının tüm kür sıcaklıkları dikkate alındığında 24 saatlik süreçlerde daha iyi bir gelişim gösterdiği düşünülmektedir. Bununla birlikte, 60 °C’de ve 8 saat kür edilen örneklerde 1 951,6 kg/m³ ile en düşük birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde 8 saat kür uygulanan geopolimer beton örneklerinde su emme ve görünen porozite oranlarının diğer örneklerle nazaran daha yüksek seviyelerde olması nedeniyle ilgili örnek gruplarına ait betonların birim hacim ağırlıklarının nispeten daha düşük seviyelerde kaldığı Şekil 4.3’de görülebilmektedir.



Şekil 4.3 Referans geopolimer betonların birim hacim ağırlığı.

Hazırlanan geopolimer beton örneklerinin birim hacim ağırlıklarının 2 000 kg/m³’ten düşük olması nedeniyle hazırlanan geopolimer betonlar hafif beton olarak değerlendirilebiliriz (TS EN 206-1 2002).



Şekil 4.4 Referans geopolimer betonların görünür yoğunlukları.

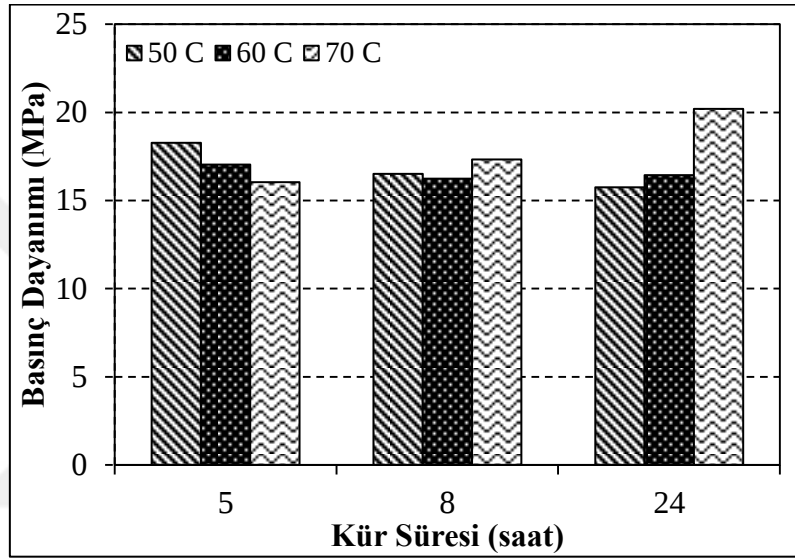
Geopolimer betonların görünür yoğunluk değerleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde 5 ve 8 saat kür edilen örneklerin görünür yoğunluk değerlerinin artan kür sıcaklığı ile birlikte arttığı 24 saat kür edilen örneklerde ise kür sıcaklığının değişken sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte elde edilen değerler arasında önemli bir farklılık oluşmadığı gözlenmekle birlikte geopolimer betonların görünür yoğunlukları 2 367,3 – 2 462,5 kg/m³ arasında değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.4).

4.2 Geopolimer Betonların Basınç Dayanım Özellikleri

Geopolimer betonların mekanik özelliklerden biri olan basınç dayanımları kür edilmelerini takiben döküm yaşı 28 gün olduğunda belirlemiştir. Elde edilen bulgular ise Şekil 4.5’da gösterilmiştir. Elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde geopolimer beton üretiminde kullanılan ana hammadde olan uçucu külün çok reaktif bir kül olmadığı ve bu nedenle elde edilen basınç dayanım değerlerinin çok yüksek seviyelere ulaşmadığı düşünülmektedir. Bu noktada uygulanan 15 M NaOH çözeltisinin normal koşullarda ideal basınç dayanım değerlerini elde etmede yeterli ve ideal bir konsantrasyon olduğu düşünülse çalışmada üretilen örneklerde ortalama ve normal bir dayanım değerlerinin elde edildiği gözlenmiştir. Bu noktada uygulanan kür sıcaklıkları ve kür sürelerinin ise basınç dayanım değerleri üzerinde çok büyük

değişimler gerçekleştirmediği ve kür süreleri dikkate alındığında ise sıcaklıkların değişken sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

İlgili örneklerde genel anlamda basınç dayanım değerleri 15,7 – 20,2 MPa arasında değişkenlik göstermektedir. 50 °C’de kür edilen örneklerde ideal kür süresinin 5 saat, 60 °C’de kür edilen örneklerde ideal kür süresinin 5 saat, 70 °C’de kür edilen örneklerde ise ideal kür süresinin 24 saat olduğu göze çarpmıştır.



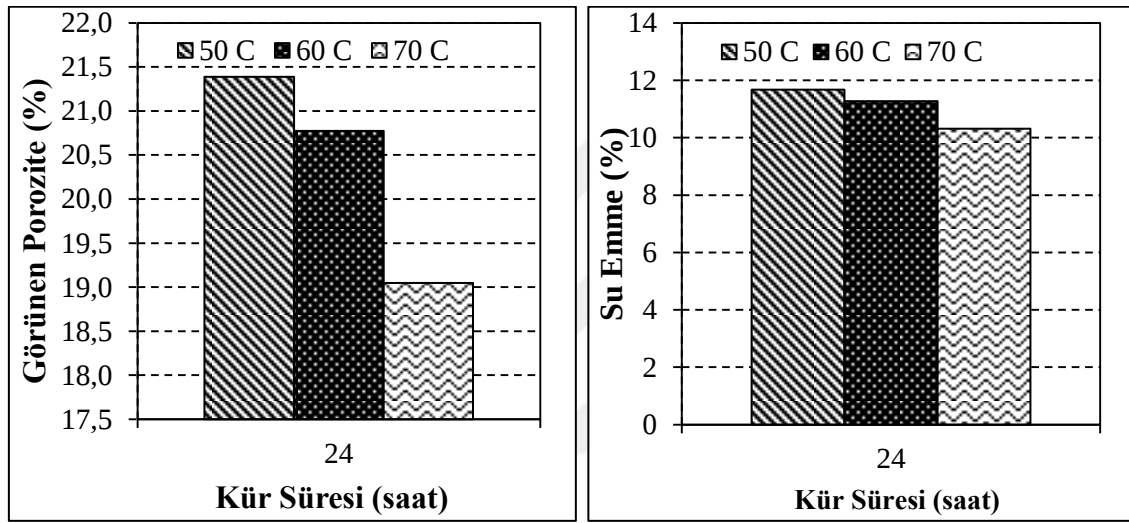
Şekil 4.5 Referans geopolimer betonların basınç dayanımları.

4.3 Geopolimer Betonların Durabilite Özellikleri

Geopolimer betonların yüksek sıcaklık etkisinde kalmaları neticesinde örnek özelliklerinde meydana gelen değişimler bu bölümde sunulmuştur. Yapılan bu çalışmada daha materyal ve metot bölümünde verildiği gibi sadece 24 saat kür edilen örneklerle ait geopolimer betonlar yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. İlgili örneklerin fiziksel özelliklerinden olan görünen porozite ve su emme oranları Şekil 4.6’de verilmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde geopolimer betonların üretiminde uygulanan kür sıcaklığının yüksek olduğu örneklerde, maruz kalınan yüksek sıcaklıkta ilgili örneklerin daha düşük bir porozite oranına ve su emme oranına sahip oldukları belirlenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan örneklerin referans örnekleri ile veriler kıyaslandığında ise porozite oranlarının bir miktar yüksek sıcaklık sonrası arttığı

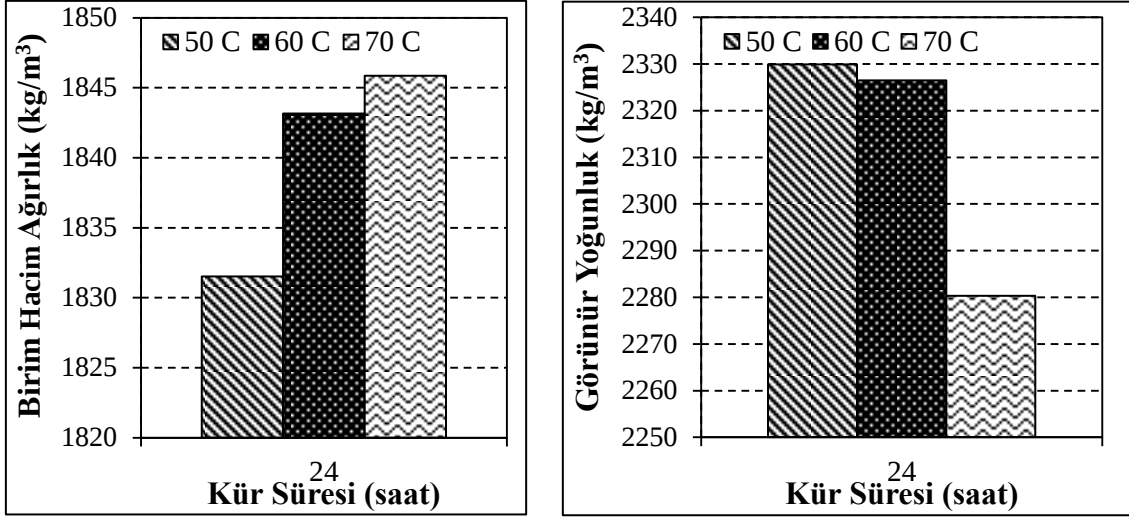
gözlenmiştir. Bununla birlikte yüksek sıcaklık uygulaması sonucu porozite verilerinde olduğu gibi geopolimer betonların su emme oranlarının da bir miktar arttığı gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan örneklerde, 70 °C'lik kür uygulanan geopolimer betonların daha dolu ve daha az su emme potansiyeline sahip oldukları belirlenmiştir. Betonların porozite oranları % 21,4 - % 19,1; su emme oranları ise % 11,7 - % 10,3 arasında değişmiştir.



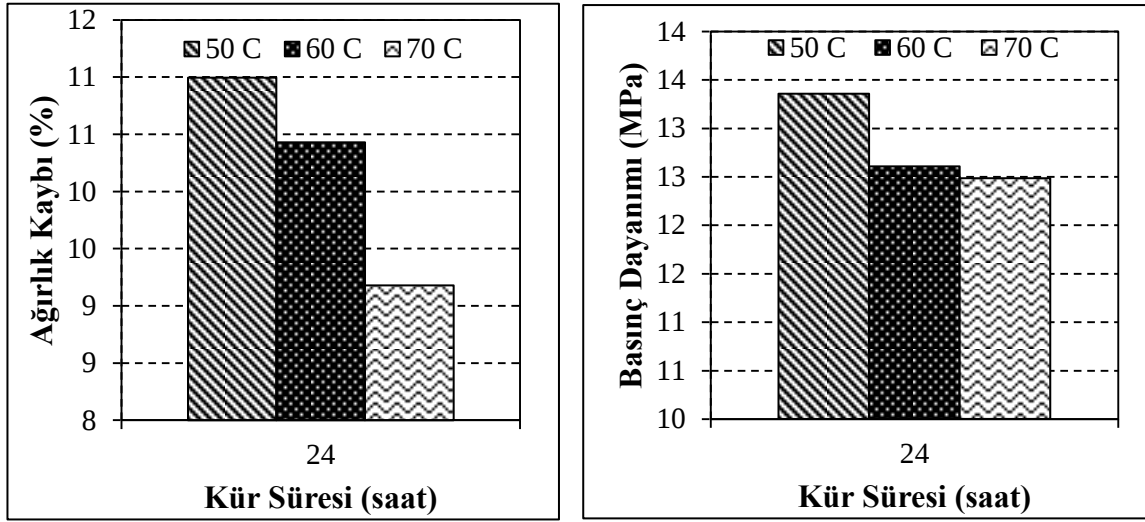
Şekil 4.6 Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların görünen porozite ve su emme oranları.

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan örneklere ait yoğunluk değerleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Veriler incelendiğinde referans örneklere göre geopolimer betonların birim hacim ağırlıklarının azaldığı göze çarpmıştır. Aynı zamanda görünür yoğunluk değerlerinde bir miktar azalma gerçekleştiği belirlenmiştir. Yoğunluklardaki bu azalmaların yüksek sıcaklık etkisi sonucu örnek bünyelerinde meydana gelen ağırlık kayıplarından kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek birim hacim ağırlıklar 70 °C’de kür edilen örneklerde 1 845,8 kg/m³; en yüksek görünür yoğunluklar ise 50 °C’de kür edilmiş olan örneklerde 2329.9 kg/m³ olarak elde edilmiştir.



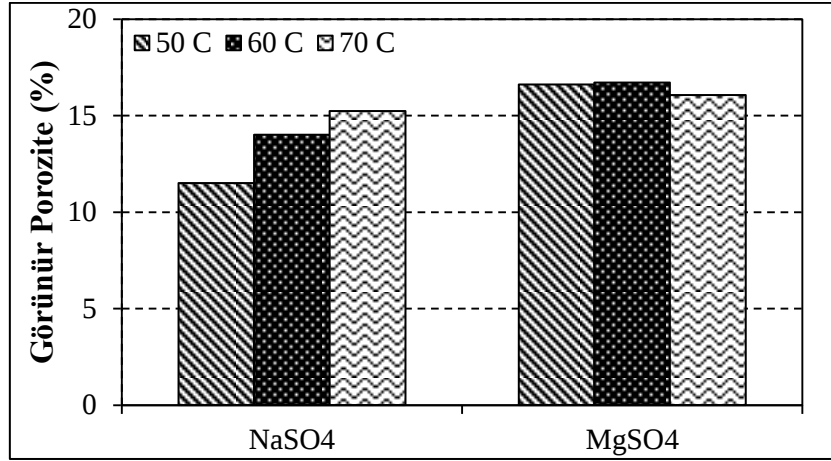
Şekil 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların birim hacim ağırlığı ve görünür yoğunluk değerleri.

Geopolimer betonların yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kayıpları ve basınç dayanım testlerine göre elde edilen veriler Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Örneklerin ağırlık kayıpları %9,2 ile %11,0 arasında ve basınç dayanımları 12,5 MPa – 13,5 MPa arasında değişmektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde yüksek sıcaklığa maruz kalan örnekler içerisinde geopolimer betonların sentezleme sıcaklığının basınç dayanım değerlerini etkilediği görülmüştür. Bu noktada 70 °C’de kür edilen geopolimer betonların daha iyi bir iç yapı geliştirdikleri ve bu geopolimerleşme mekanizmasının ise yüksek sıcaklığa maruz kalınan durumlarda örnek stabilitesini ve mekanik özelliklerinin bozulmadan muhafaza edilmesine yardımcı olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda 70 °C’de kür edilen örneklerde diğer örneklerle nazaran daha az ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Ancak basınç dayanımındaki değişim (düşüş) oranı referans örneklerle göre 70 °C’de kür edilen örneklerde meydana gelmiştir. Genel olarak bakıldığında ise tüm kür edilme sıcaklıklarında basınç dayanımlarının aynı seviyelerde olduğu aralarında farklılık olmadığı görülmektedir (Şekil 4.8). Bunun nedeninin geopolimer betonların aynı karışım oranlarda hazırlanmış olduğu düşünülmektedir.

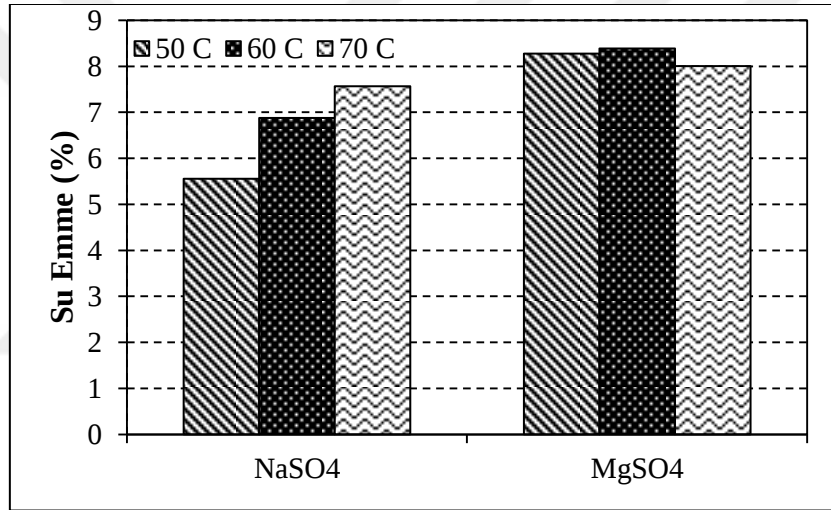


Şekil 4.8 Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer betonların ağırlık kaybı ve basınç dayanım değerleri.

Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer örneklerine ait görünen porozite ve su emme oranları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'de gösterilmiştir. NaSO_4 ve MgSO_4 çözeltilisine maruz kalan geopolimer betonlarda çözelti tipinin değişken sonuçlar oluşturduğu tespit edilmiştir. Örneklerin NaSO_4 çözeltilisine maruz kalmaları durumunda, MgSO_4 çözeltilerine göre daha düşük seviyelerde porozite oranlarının olduğu görülmüştür. Referans örnekler ile kıyaslandığında ise çözeltilere maruz kalan örneklerin görünen porozitelerinin küçük bir oranda azalma gösterdiği belirlenmiştir. Bu aşamada sülfat çözeltilerinin bünyede bazı kristalleri oluşturmasından dolayı bünyede kısmen bir doluluk oluşturduğu ve olayın neticesinde de gözeneklilik ve su emme oranlarının küçük de olsa azaldığı düşünülmektedir.

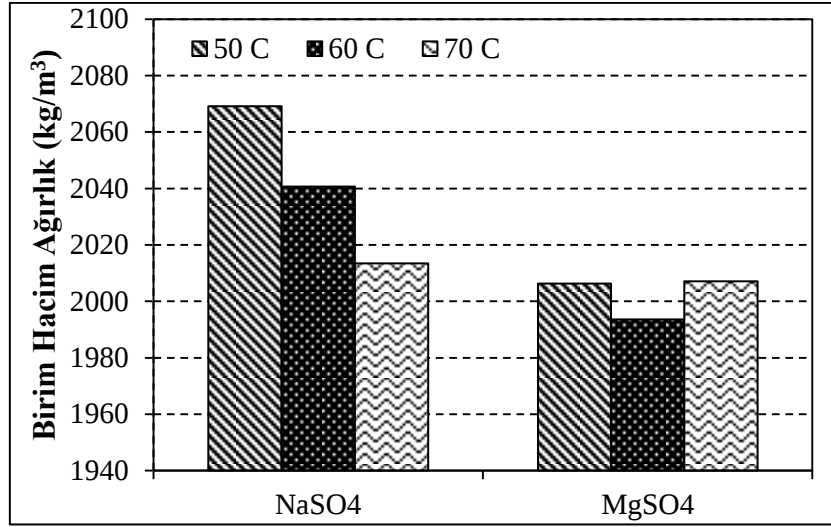


Şekil 4.9 Sülfat etkisine maruz kalan betonların görünür porozite oranları.



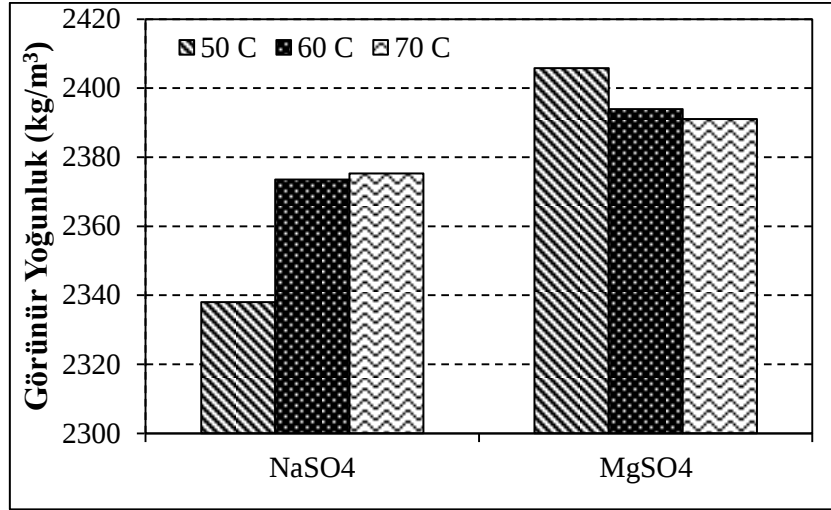
Şekil 4.10 Sülfat etkisine maruz kalan betonların su emme oranları.

Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonların birim hacim ağılıkları Şekil 4.11’de, görünür yoğunluk değerleri ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde $MgSO_4$ çözeltisine maruz kalan geopolimer betonların biraz daha fazla yıprandığı ve bu sebeple birim hacim ağırlık değerlerinin nispeten daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür.

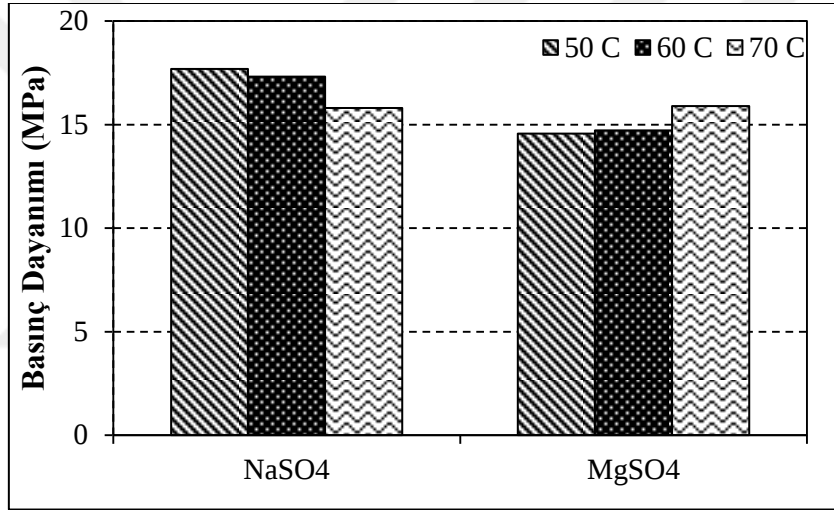


Şekil 4.11 Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonların birim hacim ağırlıkları.

Birim hacim değerleri açısından MgSO_4 çözeltisine maruz bırakılan örneklerin birim hacim ağırlıkları $1\,993,6\text{ kg/m}^3 - 2\,007,1\text{ kg/m}^3$ arasında değişirken; NaSO_4 çözeltisine maruz bırakılan örneklerin birim hacim ağırlıkları $2\,013,5\text{ kg/m}^3 - 2\,069,1\text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Görünür yoğunluk değerlerinde ise MgSO_4 çözeltisine maruz kalan örneklerde görünür yoğunluk değerlerinin nispeten biraz daha yüksek değerlerde olduğu Şekil 4.12’de görülmüştür. Bu noktada MgSO_4 kristallerinin bünyede belli oranlarda boşlukları doldurduğu ve bünyenin yoğunluk değerlerini arttırdığı fakat bu yoğunluk artışlarına sebep olan kristallerin basınç dayanımlarına önemli katkı yapmadıkları ve bu nedenle MgSO_4 çözeltisine maruz kalan örneklerde basınç dayanım değerlerinin daha düşük seviyelerde kaldığı düşünülmektedir (Şekil 4.13).

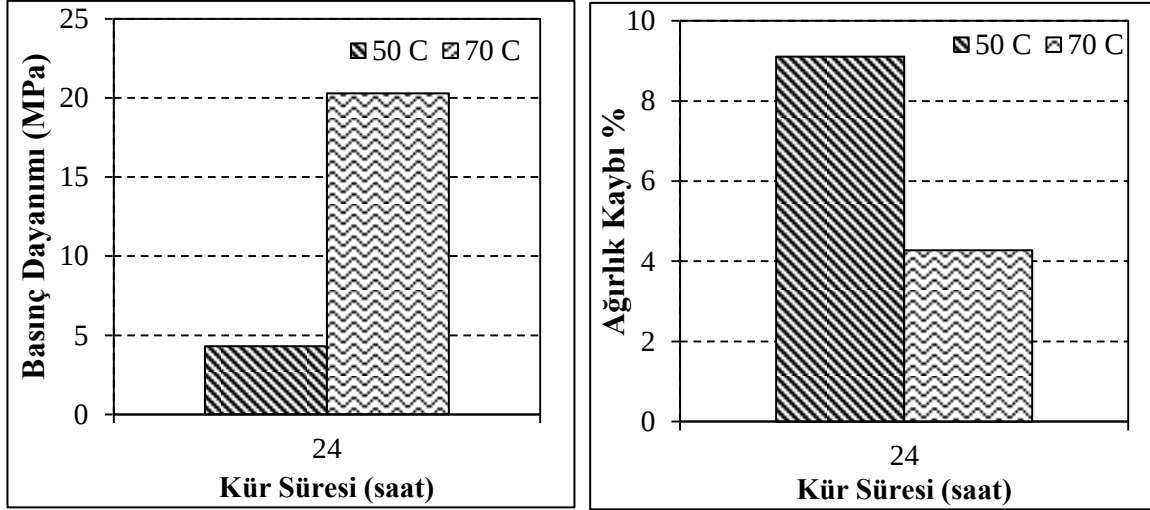


Şekil 4.12 Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonların görünür yoğunlukları.



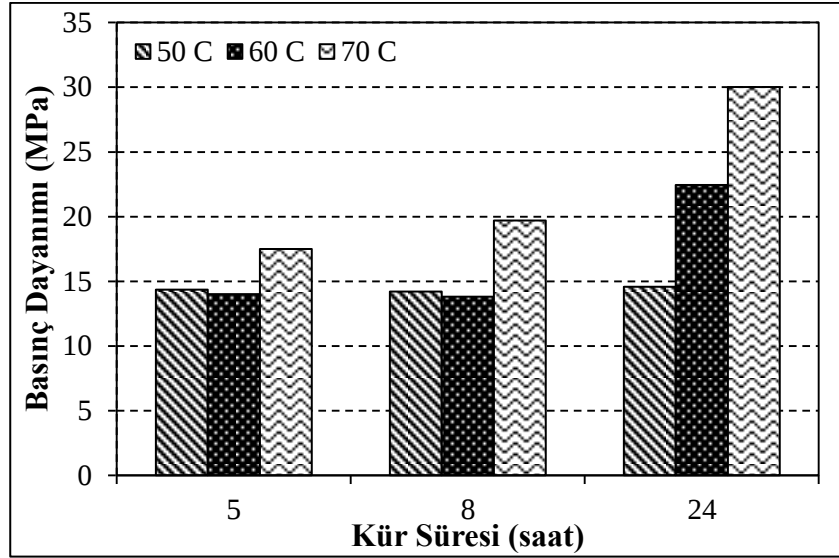
Şekil 4.13 Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonların basınç dayanımları.

NaSO₄ çözeltisine maruz kalan örneklerde, basınç dayanım değerlerinin MgSO₄ çözeltisine maruz kalan örneklere kıyasla biraz daha yüksek seviyelerde kaldığı gözlenmiştir. Geopolimer betonlardan NaSO₄ etkisine maruz kalan örneklerin basınç dayanım değerlerinin 15,8 MPa – 17,7 MPa; MgSO₄ etkisine maruz kalan örneklerin basınç dayanım değerlerinin ise 14,6 MPa – 15,9 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.13). Referans örneklerin basınç dayanımları ile birlikte bir değerlendirme yapıldığında ise sülfat çözeltilerine maruz kalan örneklerin basınç dayanımlarında kayda değer bir azalmanın gerçekleşmediği ve örneklerin sülfat çözeltilerinden önemli bir zarar görmediği de tespit edilmiştir.



Şekil 4.14 Donma-Çözülme etkisine maruz kalan geopolimer betonların ağırlık kaybı ve basınç dayanım değerleri.

Donma-çözülme etkisine maruz kalan geopolimer betonların ağırlık kaybı ve basınç dayanım testi sonuçları Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre 24 saat süre ile 50 ve 70 °C’de kür edilmiş olan geopolimer betonlarda 70 °C’de kür edilmiş örneklerin bünyede daha fazla geopolimerleşme mekanizmasının gelişim gösterdiği düşünüldüğünden dolayı daha dayanıklı oldukları gözlenmiştir. Bu örnek grubunun 50 °C’de kür edilen geopolimer beton örneklerine oranla daha az ağırlık kaybına (% 4,3) uğradıkları ve daha yüksek basınç dayanımlarına sahip oldukları (20,3 MPa) ve aynı örnek grubunun referans örneklerine (20,2 MPa) oranla herhangi bir dayanım kaybı yaşamadığı gözlenmiştir. Bu noktada 50 °C’de kür edilen örneklerin donma-çözülme döngüsü sonrasında önemli oranda basınç dayanım kayıpları yaşadıkları ve ilgili örneklerin basınç dayanım değerlerinin 4,3 MPa olduğu Şekil 4.15’de görülebilmektedir. Referans örneklerin aynı sıcaklık ve sürelerdeki basınç dayanım değerlerinin 15,7 MPa olduğu düşüldüğünde ortaya çıkan dayanım kaybının ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.15 450 Günlük geopolimer betonların basınç dayanım değerleri.

Geopolimer betonlar üretiminden 450 gün sonra basınç dayanım değerleri kontrol edilmiş ve elde edilen veriler incelenmiştir (Şekil 4.15). Elde edilen sonuçlara göre 5 ve 8 saat kür edilen örneklerde 28 günlük referans örneklere göre basınç dayanımlarında göz ardı edilebilecek derecede azalmalar meydana gelmiştir. Ancak 24 saat kür edilen örneklerde belirgin artışlar gözlenmiştir. Özellikle 24 saat ve 70 °C’de kür edilen örneklerde 30,01 MPa değeri elde edilmiştir. Bu serinin 28 günlük referans örneklerinin basınç dayanım değeri 20,2 MPa’dan 30,01 MPa’a yükselerek yaklaşık %50 civarında basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir. Bu artışın geopolimerleşme mekanizmasının 70 °C’de betonun ilerleyen yaşlarında da devam ettiğini göstermektedir. 50 °C ve 60 °C’de geopolimerleşme mekanizması için yeterli sıcaklık değerleri olmadığı düşünülmektedir.

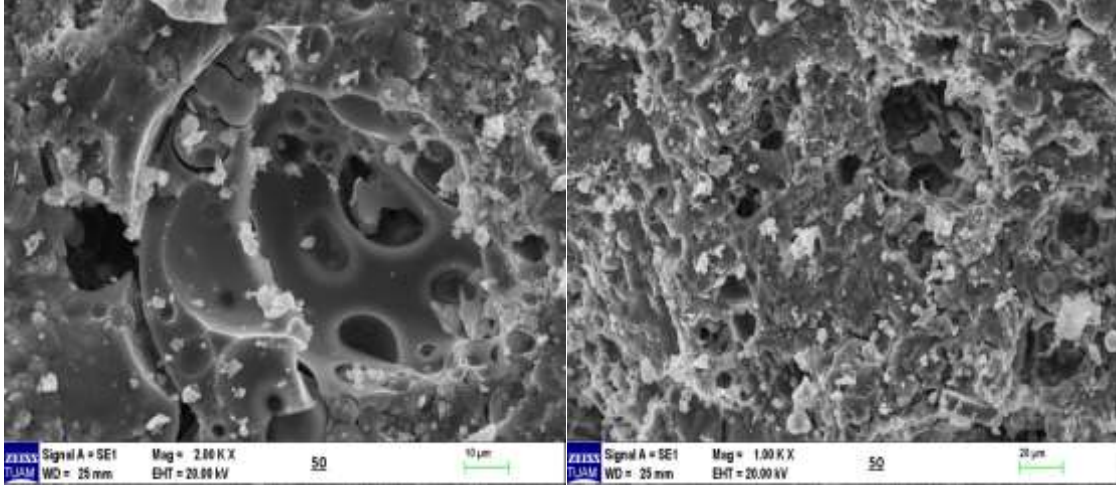
Üretimi takiben 450 gün laboratuvar ortamında bekletilen geopolimer beton örnekleri içinde 50 °C’de kür edilen numunelerde yüzeysel olarak çiçeklenme gözlenmiştir (Resim 4.1). Bunun sebebinin düşük sıcaklıklarda termal kür prosesinin tamamlanmaması nedeniyle reaksiyona girmeyen NaOH tuzlarının beton yüzeyine çıkarak çiçeklenmeye sebep olduğu düşünülmektedir.



Resim 4.1 Çiçeklenme meydana gelen geopolimer örnekleri.

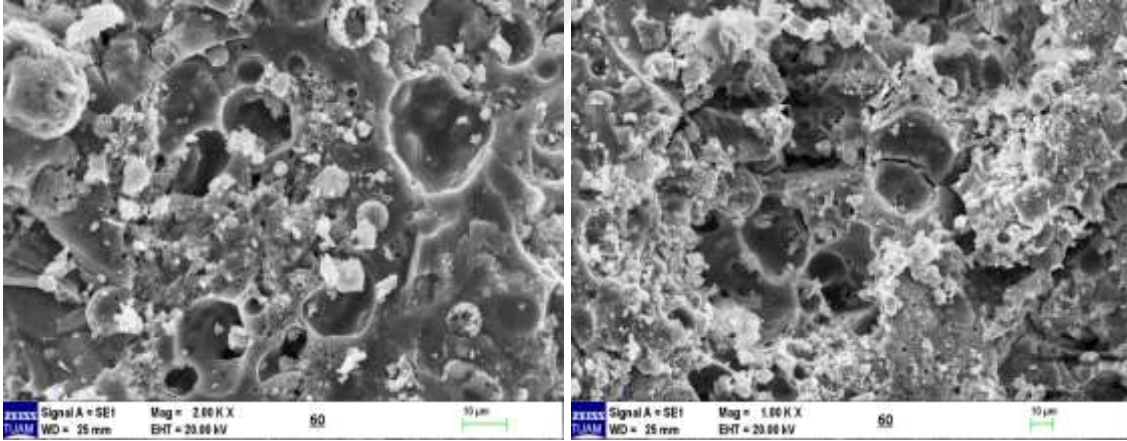
4.4 SEM-EDX Analizleri

Çalışmada üretilen geopolimer betonların morfoloji incelendiğinde, kür sıcaklığının artmasına paralel olarak malzeme bünyesindeki, yüzey morfolojisinin daha düzgün ve sıkı bir yapılanma gösterdiği gözlenmiştir. Sekil 4.16 - Şekil 4.18’de görülen SEM görüntülerinde de tespit edileceği gibi uçucu kül taneciklerinin bir kısmının reaksiyona girdiği, bir kısmının ise girmediği görülebilmektedir.

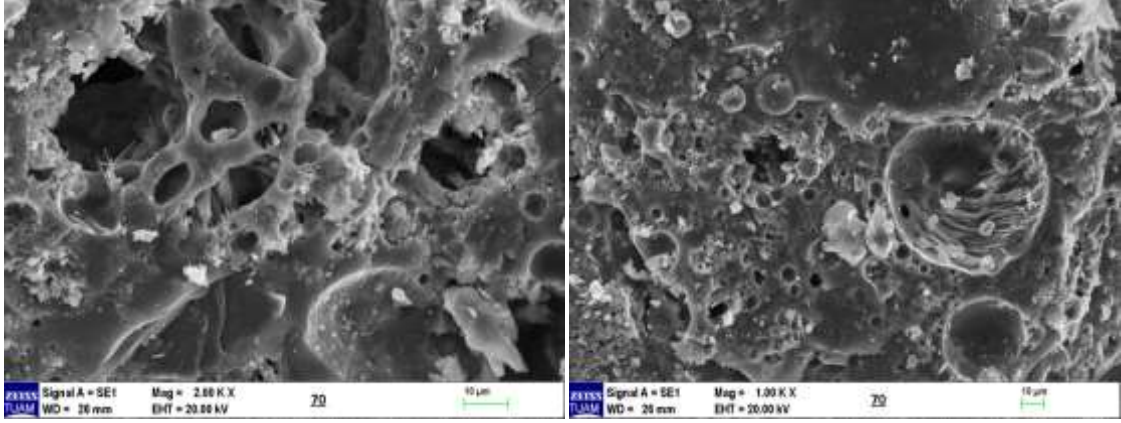


Şekil 4.16 50 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM görüntüleri.

70 °C’de kür edilen örneklerde ise ufak çaplı etringit oluşumlarının ortaya çıktığı Şekil 4.18’de görülebilmektedir. Bununla birlikte geopolimer betonların yüzey morfolojisinde önemli bir çapta çatlak oluşumu görülmemiştir.

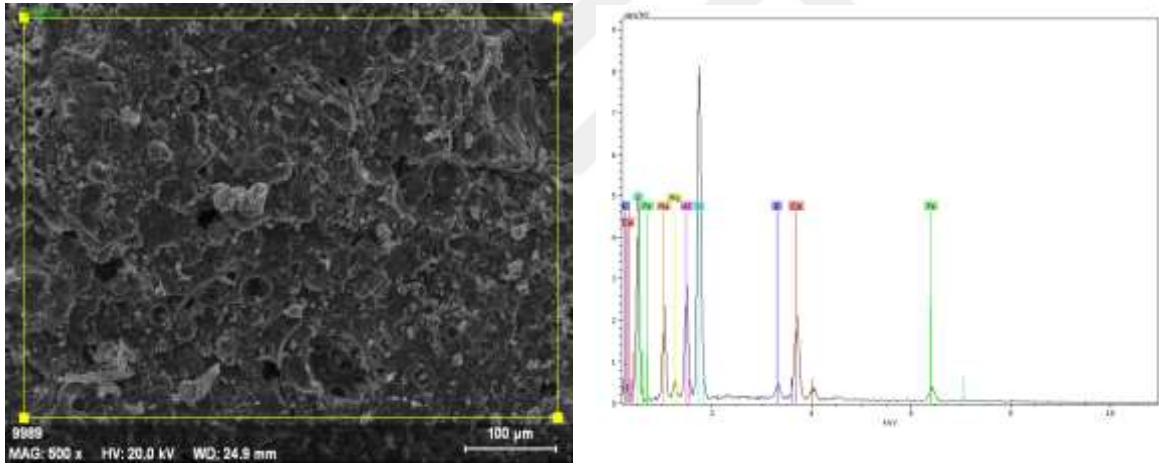


Şekil 4.17 60 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM görüntüleri.

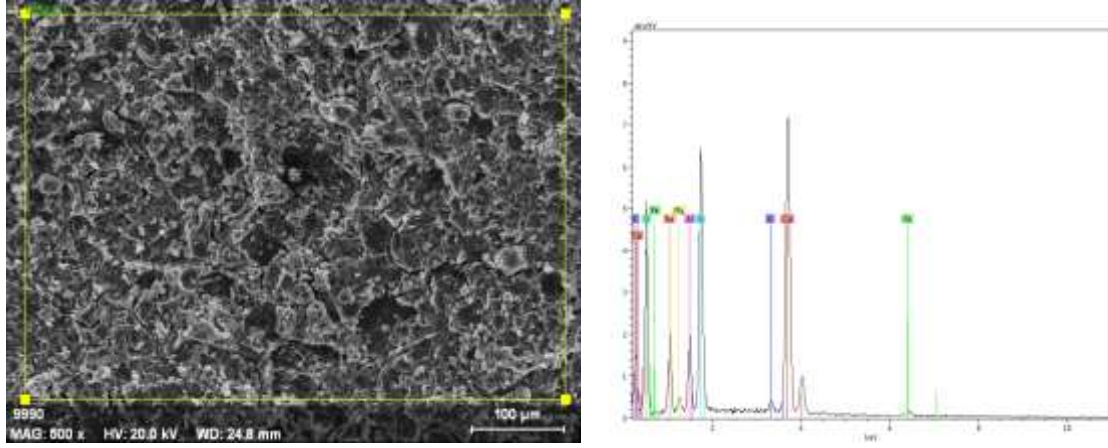


Şekil 4.18 70 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM görüntüleri.

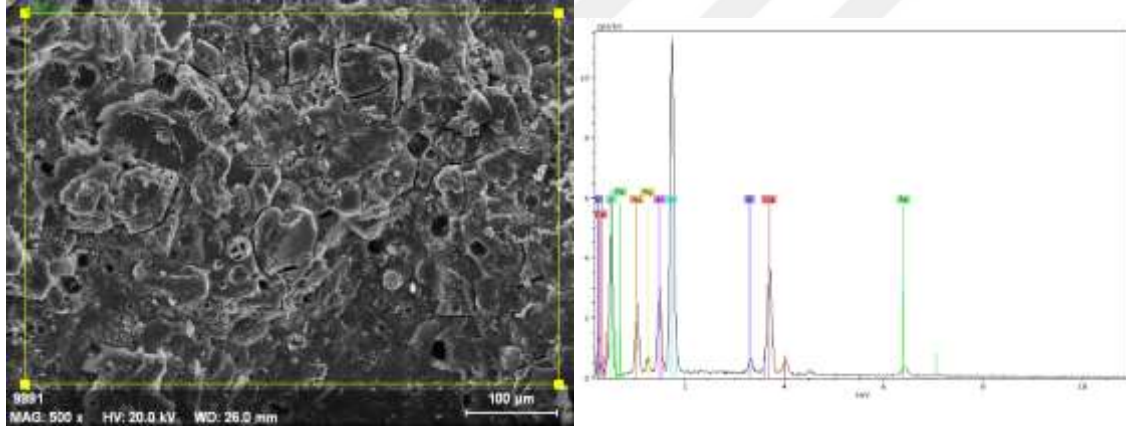
Geopolimer beton örneklerine ait SEM-EDX analizleri Şekil 4.19 - Şekil 4.21’de verimiştir. EDX analiz sonuçlarına göre beton örneklerinin bünyesinde önemli oranda sodyum, alüminyum ve kalsiyum oksitlerinin varlığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.19 50 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM-EDX analizleri.



Şekil 4.20 60 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM-EDX analizleri.



Şekil 4.21 70 °C’de kür edilen geopolimer betonlara ait SEM-EDX analizleri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Uçucu külün alkali aktivatörler (NaOH ve SS) ile aktive edilerek üretilen geopolimer betonlara farklı sıcaklıklarda (50 °C, 60 °C ve 70 °C) ve farklı sürelerde (5, 8 ve 24 saat) kür işlemi uygulanmıştır. Kür işlemi uygulanan örnekler fiziksel ve mekanik testler uygulanarak örneklerin; birim hacim ağırlıkları, görünür porozite değerleri, görünür yoğunluk değerleri, su emme değerleri, ağırlık kayıpları ve basınç dayanım değerleri bulunmuştur. Örnekler; yüksek sıcaklık deneyi, donma çözünme deneyi uygulanmış ve Sülfat ($MgSO_4$ ve $NaSO_4$) ataklarına maruz bırakılarak fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler gözlemlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca SEM-EDX analizleri uygulanmıştır. 450 gün sonunda örneklerin basınç dayanım testleri yapılmış ve basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Hazırlanan örnekler incelendiğinde 8 ve 24 saatlik kür sürelerinde 60 °C en yüksek görünen porozite ve su emme değerlerine ulaşılmıştır. 5 saat kür edilen örneklerde ise en yüksek görünen porozite ve su emme değerleri 70 °C’de tespit edilmiştir. Geopolimerlerin yapısındaki boşluklu yapının artmasıyla birlikte tüm kür saatlerinde en düşük birim hacim ağırlık değerleri 60 °C’de tespit edilmiştir. En yüksek birim hacim değerleri ise tüm saatlerde 70 °C’de tespit edilmiştir. Genel olarak bakıldığında sıcaklık artışının örneklerin geopolimerizasyon mekanizmasını arttırdığı ve boşluklu yapının azalarak görünen porozite ve su emme değerlerinde ise azalışlar meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak örneklerden 70 °C’de kür edilenlerinde birim hacim ağırlıkları daha yüksek olmuştur.

Donma – çözünme etkisine maruz kalan geopolimer beton örneklerinde 50 °C’de kür edilen örneklerde ağırlık kaybının fazla olmasıyla birlikte basınç dayanımlarında belirgin bir azalış olmuştur. 70 °C’de ise ağırlık değişimi fazla olmamakla birlikte basınç dayanımlarında belirgin bir azalış meydana gelmemiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan örnekler incelendiğinde ise 50 °C ve 60 °C’de kür edilen örneklerde basınç dayanımlarında belirgin azalışlar meydana gelmemiştir. 70 °C’de kür edilen örneklerde ise basınç dayanımlarında belirgin azalışlar meydana gelmiştir.

Genel olarak bakıldığında 70 °C’de geopolimerleşmenin daha yoğun gerçekleştiği tespit edilmiştir. 70 °C’de kür edilen örneklerin dayanıklılık özellikler diğer kür sıcaklıklarına göre da iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Örneklerin mekanik özellikleri ise yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığının, donma – çözünme etkisine göre daha zayıf kaldığı belirlenmiştir. Üretilen örnekler donma – çözünme etkisine karşı daha dayanıklıdır. Sülfat etkisine maruz kalan örneklerde referans örneklere nazaran belirgin değişimler gözlemlenmemiştir. 70 °C’de kür edilen örneklerde betonun ilerleyen yaşlarında geopolimerleşme mekanizmasının devam ettiği ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.

Sülfat etkisine maruz kalan örnekler incelendiğinde ise $MgSO_4$ çözeltisinde örneklerin daha çok yıprandığı gözlenmiştir. $NaSO_4$ çözeltisinde ise boşluklu yapıların kristalize olmasından dolayı tüm numunelerde birim hacim ağırlıklarında artışlar su emme oranlarında ise azalmalar meydana gelmiştir. Tüm örneklerde boşluklu yapı azalmasına rağmen basınç dayanımlarında önemli bir artış gözlenmemiştir.

Çalışmada kullanılan UK’ün lazer tane boyut analizi incelendiğinde oldukça iri taneli olduğu görülmektedir. Geopolimer betonların üretilmeden önce uçucu külün öğütülme işlemi uygulanıp daha ince taneli olarak kullanılması durumunda geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin daha iyi sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

Geopolimer betonların kür edilmesi sırasında, geopolimer betonların bünyesinde bulunan suyun 60 °C’de uzaklaşmaya başladığı 70 °C’de ise suyun geopolimer betonların bünyesinden tamamen ayrıldığı düşünülmektedir. Bu bağlamda 50 °C’de kür edilen örneklerde bünyede bulunan suyun donma - çözünme çevrimleri sırasında genleşip çözünmesi ile geopolimer betonların mekanik özelliklerine zarar verdiği düşünülmektedir.

Genel olarak bakıldığında yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini koruyabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda yangına dayanıklı ürünlerin üretiminde kullanılması önerilmektedir.

Çalışmada üretilen geopolimer betonlar donma – çözünme etkisine maruz kalabilen duvar uygulamalarında ve kaplamalarında kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

Üretilen geopolimer betonların sülfat saldırıları karşısında oldukça dayanıklı olduğu fiziksel ve mekanik özelliklerini uzun süre koruduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda özellikle deniz suyu ile temas eden köprü ayakları ve deniz yapılarında, su tutan barajlarda, yer altı suyu ile temas eden (okul, bina vb.) yapıların temel betonlarında ve alt yapıda kullanılan beton boruların üretiminde kullanılması önerilmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Arıöz, E. (2015). Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, pH ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi. Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **21**: 193-203.
- ASTM C 293 / C293M-16. (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). American Society for Testing and Metarials.
- ASTM C 33/C33M-18 (2018), Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing and Metarials. American Society for Testing and Metarials.
- ASTM C 496. (2017) Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Metarials.
- ASTM C 618 (2000), Standard Specification for Coal Fly Ashand Rawor Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02.
- ASTM C 642 (2006), Test Method For Density, Absorption, and voids in Hardener Concrete. American Society for Testing and Metarials.
- ASTM C 672 (2012), Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals. American Society for Testing and Metarials.
- ASTM D8 (2018), Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements. American Society for Testing and Metarials.
- Baradan, B. & Aydın, S. (2013), Betonun Dürabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Hazır Beton : 54-68.
- Başaraner, E. & Mutlu, M. (2012). Temel Beton Dökümlerinde Sıcaklık Kontrolü. Hazır Beton: 76-80

- Bedirhanoğlu, İ. (2011). Beton Tasarımı. *Yapı Malzemesi Ders notu*.
- Binici, H., Eken, M., & Aksoğan, O. (2012). Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik Ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **8**: 12-25.
- Çakır, M. (1999). Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Dayı, M., Aruntaş, H. Y., Çavuş, M., & Şimşek, O. (2013). Zeolit, Uçucu KÜl ve Atık Cam Malzemelerin Portland Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* **28**:491-499.
- Demir,İ., Başpınar, M. S., Görhan, G., Kahraman E. (2009). Seyitömer Uçucu Külünün Yapı Tuğlası Üretiminde Kullanılabilirliğin Ön Araştırması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **9**: 131-137
- Doğan-Sağlamtimur, N., & Bilgil, A. (2018). Atık Kazan Altı Külü ve Pomza Elek Altı Atığından Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **7**: 590-599.
- Doğruyol, M., & Karaşin, H. (2011). Sülfatın beton ve betonarme elemanlara olumsuz etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi*, **2**: 79-85.
- Ekmen, Ş., & Mermerdaş, K. (2018). Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **3**: 93-101.
- Erdem, R. T., & Öztürk, A. U. (2012). Mermer Tozu Katkısının Çimento Harcı Donma-Çözünme Özellikleri Üzerine Etkisi. *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **1**: 85-91.
- Erol, M. (1999). Uçucu Küllerin Cam-Seramik Yapımında Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gök, S. G., & Kılınç, K. (2017). Alkali ile Aktive Edilmiş Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Betonların Mekanik Özellikleri. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science* **3**: 123-131.

- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., & Demir, İ. (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Olusumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2: 85-94.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H. (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, 419-423.
- Gümüş, A. (2016). Geoplimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., & Mermerdaş, K. (2007). Metakaolin Katkılı Betonların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi. *7. Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı*, 259-269.
- Hamalı, Y. (2007). Metakolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılınç, K. (2003). Beton Karışım Suyundaki Magnezyum Sülfat, Sodyum Sülfat ve Sodyum Sülfür Tuzlarının Taze ve Sertleşmiş Çimento Harcı Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kuşcu, M., & Demiray, Z. (2015). Mermer Ve Yapıtaşı Olarak Kullanılan Farklı Jeolojik Kökenli Kayaçların Porozite, P-Dalga Hızı Ve Basınç Dayanımı İlişkisinin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19: 16-23.
- Sert, M. (2010). Isparta ve Nevşehir Yöresi Volkanik Kökenli Taşların Fiziko Mekanik Özelliklerinin Belirlenerek Kullanım Alanlarının İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Söylemez, M., & Yıldırım, A. (2016). Termik Santral Uçucu Külünün Tuğla Dayanımına Etkisi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4: 19-31.

- Subaşı, S., İşbilir, B., & Ercan, İ. (2011). Uçucu Kül İkameli Çimento Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi. *Politeknik Dergisi*, **14**: 141-148.
- Şahin, R., Taşdemir, M. A., Gül, R., & Çelik, C. (2007). Taze Beton Özelliklerinin Optimizasyonu. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **38**: 127-135.
- Şengül, Ü. (2007). Uçucu Kül ve Çevresel Etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **7**: 89-104.
- Toklu, K., Demirel, C., Şimşek, O., & Baharavar, S. (28-30 Mayıs 2015). Magnezyum Sülfat Çözeltisinin Beton Basınç Dayanımına Etkisi. *2nd International Sustainable Buildings*, 66-70.
- Topçu, İ. B., & Toprak, M. U. (2009). Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **22**:153-164.
- TS 707 (1980). Beton agregalarından numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi. TSE, Ankara
- TS EN 1008, (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. TSE, Ankara.
- TSE EN 12350-2 (2010). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slamp)deneyi. TSE, Ankara.
- TSE EN 12350-3 (2010). Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 3: Vebe deneyi. TSE, Ankara.
- TS EN 12350-4 (2010) Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 4: Sıkıştırılabilirlik derecesi. TSE, Ankara
- TS EN 12350-5 (2010) Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi. TSE, Ankara
- TS EN 12350-6 (2010) Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk. TSE, Ankara
- TS EN 12390-3 (2010) Sertleşmiş beton deneyler - Bölüm 3: Deney numunelerinden basınç dayanımı tayini. TSE, Ankara

- TS EN 12390-5 (2010) Sertleşmiş beton deneyler - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. TSE, Ankara
- TS EN 12390-6 (2010). Beton - Sertleşmiş beton deneyler - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. TSE, Ankara
- TS EN 13501-1, (2007). Yapı mamulleri ve yapı elemanları, yangın sınıflandırması bölüm 1: Yangın karşısındaki davranış deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma. TSE, Ankara.
- TS EN 1936, 2. (2010). Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 197-1, 2. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- TS EN 206-1 (2002). Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TSE, Ankara.
- TS EN 932-1 (1997). Agregaların genel özellikleri için deneyler-Kısım 1 numune alma metotları. TSE, Ankara.
- TS EN 934-2 (2011). Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkılar - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. TSE, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A. (2009). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Ankara.
- Ünsal, A., & Şen, H. (2008). *Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri*. T.C Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Yadollahi, M. M., Varolğüneş, S., & İşsever, F. (2017). Na₂O, silika modülü, su/bağlayıcı oranı ve yaşlanmanın cüruf tabanlı geopolimerlerin basınç mukavemetinde olan etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, **6**: 26-31.
- Yaprak, H., & Kaplan, G. (2016). Farklı Kür Koşullarının Taban Külü Katkılı Geopolimerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Türk Bilim Araştırma Vakfı*, **9**: 41-51.

- Yazıcı, H. *Agregalar-1*. Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi 2 Ders Notları, İzmir.
- Yazıcı, H. Beton Karışım Hesabı. Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi 2 Ders Notu, İzmir.
- Yazıcı, H. Beton Tasarımı ve Taze Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi 2 Ders Notları, İzmir.
- Yıldız, S., Demirli, İ. H., & Keleştemur, O. (2006). Kırmataşla Üretilen Hazır Betonların Donma-Çözölmeye Karşı Dayanıklılığının Araştırılması. *Fırat Üniversitesi. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **18**: 375-383.
- Yonar, Y. (2014). Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yüzer, N., Akbaş, B., & Kızıllkanat, A. B. (2007) Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonun Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Tahmini. 7. Ulusal Beton Kongresi, 271-280

İnternet Kaynakları

- 1) http://www.verimlilikkongresi.gov.tr/nuh_cimento.pdf, 25.09.2018
- 2) <http://www.teknomin.com.tr/ucucu-kul/ucucu-kul-nedir/>, 15.02.2019
- 3) <https://www.bilimsenligi.com/fen-projesi-kulunden-dogan-bitki.html/>, 22.02.2019
- 4) <http://www.insaatim.com/index.php?pid=yazidetay&yazi=151>, 17.03.2019
- 5) <http://www.iksa.com.tr/katki.html>, 21.02.2019
- 6) <http://www.mabetas.com.tr/p45-sertlesmis-beton-ozellikleri>, 03.03.2019
- 7) https://www.academia.edu/9793790/TAZE_BETON_DENEYLERİ, 04.01.2019
- 8) <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/B233E3D2B809414EB44ED57D69AA522B.pdf>, 01.04.2019
- 9) http://www.akcansa.com.tr/docs/20120216160047_teknik-notlar-3.pdf, 02.04.2018

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Osman ŞİNİK
Doğum Yeri ve Tarihi : Kastamonu / İnebolu, 14.03.1991
Yabancı Dili : İngilizce (orta), Almanca (başlangıç)
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 534 892 82 80, sinikosman@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Hüseyin Bürge Anadolu lisesi, (2005-2009)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniveritesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği, (2011-2015)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.
(2015-2019)

Afyonkarahisar / Merkez 434 Konut + 24 derslikli
Okul Toki Şantiyesi (08.2015-07.2017)

Uşak / Banaz 137 Konut + Büfe Toki Şantiyesi
(07.2017-02.2019)

Denizli / Bekilli 134 Konut+ Camii + Ticaret
Merkezi Toki şantiyesi (02.2019- Devam ediyorum)