



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE ELAZIĞ FERROKROM
CÜRUFU KULLANIMININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuz MAHMUT

EKİM 2015

DÜZCE

KABUL VE ONAY BELGESİ

Oğuz MAHMUT tarafından hazırlanan **Geopolimer Harç Üretiminde Elazığ Ferrokrom Cürufu Kullanımının İncelenmesi** isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **12.10.2015** tarih ve **876** sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından inşaat mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye
(Tez Danışmanı)
Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Düzce üniversitesi

Üye
Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Düzce üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Metin İPEK
Sakarya Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 14.10.2015

ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Oğuz MAHMUT'un inşaat mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

14 Ekim 2015

Oğuz MAHMUT

Sevgili Eşime, Oğluma ve Kızıma....

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam **Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU**'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Prof. Dr.Ömer KELEŞOĞLU ve Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'na şükranlarımı sunarım.

Ayrıca yüksek lisans öğrenimim boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

14 Ekim 2015

Oğuz MAHMUT

TEŞEKKÜR SAYFASI	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ÖZET	1
ABSTRACT	2
EXTENDED ABSTRACT	3
1. GİRİŞ	6
1.1. GEOPOLİMERLER	6
1.1.1. Alkali Aktivatörler	7
1.1.2. Geopolimer Harç/Betonların Kullanım Alanları	8
1.1.3. Geopolimer Harç'ın Bileşenleri	8
1.2. PUZOLANLAR	9
1.2.1. Puzolanların Tarihçesi	9
1.2.2. Puzolanik Malzemelerin Sınıflandırılması	10
<i>1.2.2.1. Elazığ Ferrookrom Cürufu</i>	11
<i>1.2.2.2. Elazığ Ferrookrom Cürufunun Fiziksel Özellikleri</i>	11
<i>1.2.2.3. Elazığ Ferrookrom Cürufunun Kimyasal Özellikleri</i>	11
<i>1.2.2.4. Elazığ Ferrookrom Cürufunun Depolama Ve Tüketim Aralığı</i>	11
1.3. LİTERATÜR ÖZETİ	12
2. MATERYAL VE METOD	18
2.1. MATERYAL	18
2.1.1. Elazığ Ferrookrom Cürufu	18
2.1.2. Kum	18
2.1.3. Kimyasal Katkı	19

2.1.4. Karma Suyu	19
2.2. METOD	20
2.2.1. Numunelerin Hazırlanması.....	20
2.2.2. Alkali Aktive Edilmiş Harç Karışımları.....	20
2.2.3. Elazığ Ferrokrom Cürufu Hamuru Üzerinde Yapılan Deneyler	21
2.2.3.1. Kıvam Tayini.....	21
2.2.3.2. Priz Başlama Ve Sona Erme Süresinin Tayini	22
2.2.4. Sertleşmiş Harç Numunelerinde Uygulanan Deneyler	23
2.2.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi	23
2.2.4.2. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	23
2.2.4.3. Kapilarite Deneyi	25
2.2.4.4. Birim Ağırlık Deneyi	26
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
3.1. KIVAM TAYİNİ SONUÇLARI.....	27
3.2. PRİZ BAŞLAMA VE SONA ERME SÜRESİNİN TAYİNİ SONUÇLARI	27
3.3. BİRİM AĞIRLIK DENEYİ SONUÇLARI.....	27
3.4. KAPİLARİTE DENEYİ SONUÇLARI.....	29
3.5. ULTRASES GEÇİŞ HIZI DENEYİ SONUÇLARI	31
3.6. BASINÇ DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI	32
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Geopolimer harç bileşenleri	8
Şekil 1.2.	Elazığ ferrokrom cürufu	11
Şekil 2.1.	Elazığ ferrokrom cürufunu öğütme ve eleme işlemi	18
Şekil 2.2.	CEN standart kumu	18
Şekil 2.3.	Alkali aktivatörün hazırlanması	19
Şekil 2.4.	Numunelerin hazırlanması	20
Şekil 2.5.	Kıvam tayini	21
Şekil 2.6.	Yükleme presi.....	23
Şekil 2.7.	Ultrases test cihazı	23
Şekil 2.8.	Kapilarite deneyi için numunelerin hazırlanması	25
Şekil 2.9.	Kapilarite deneyi	25
Şekil 2.10.	Birim ağırlık deneyi.....	26
Şekil 3.1.	Birim ağırlık deney sonuçları	27
Şekil 3.2.	Birim ağırlık deney sonuçları	28
Şekil 3.3.	Birim ağırlık deney sonuçları	29
Şekil 3.4.	Kapilarite deney sonuçları	30
Şekil 3.5.	Kapilarite deney sonuçları	31
Şekil 3.6.	Kapilarite deney sonuçları	31
Şekil 3.7.	Basınç dayanımı değerlerinin kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molariteye göre değişimi.....	32
Şekil 3.8.	Deneysel ve tahmini basınç dayanımları arasındaki ilişki	35

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1.1.	Elazığ ferrokrom cürufunun fiziksel özellikleri	11
Çizelge 1.2.	Elazığ ferrokrom cürufunun kimyasal özellikleri	11
Çizelge 2.1.	Alkali aktivatörlerin özgül ağırlıkları	20
Çizelge 2.2.	Geopolimer harçtaki karışım miktarları	22
Çizelge 2.3.	Betonun kalitesinin tahmin edilmesi durumları	23
Çizelge 3.1.	Priz başlama ve sona erme süresinin tayini	27
Çizelge 3.2.	Ultrases geçiş hızı deney sonuçları	31
Çizelge 3.3.	Basınç dayanımı deneyi sonuçları	32
Çizelge 3.4.	Çoklu doğrusal regresyon analizi model özeti	35

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al_2O_3	Aluminyum Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
$^{\circ}C$	Sıcaklık
CO_2	Karbondioksit
CM	Santimetre
Δw	Ağırlıklar Ortalaması
Fe	Demir Elementi
Fe_2O_3	Demir Oksit
G	Gram
KG	Kilogram
KM	Kilometre
MgO	Magnezyum Oksit
MPa	Dayanım
M.Ö.	Milattan Önce
MOL	Molarite
MM	Milimetre
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat
Na_2SiO_3	Cam Suyu
$Na_2O+0,658K_2O$	Alkali Miktarı ASTM C 150'ye Göre Hesap Formülü
N	Kırılma Yüğü
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü
SiO_2	Silisyum Oksit
$Si_3Al_4O_{12}$	Gama-Alümina Tipi Yapı Dönüşümü
$SiAl_2O_5$	Andaluzitler
SN	Saniye
UK	Uçucu Kül
PÇ	Portland Çimentosu
V	Hız
W	Ağırlık
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
%	Yüzde Oran

ÖZET

GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFU KULLANIMININ İNCELENMESİ

Oğuz MAHMUT

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr.Mehmet EMİROĞLU

Ekim 2015, 43 sayfa

Demirçelik üretimi sırasında ortaya çıkan atıklardan biri olan yüksek fırın cürufu atık bir malzeme olması, puzolanik aktiviteye sahip olması ve çimento-beton numunelerinin durabilite performansını arttırması gibi nedenlerle yapı malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Elazığ ferrokrom cürufu, kütlece (CaO+MgO) / (SiO₂) oranı 1,3 olan ve TS EN 197-1'e göre kimyasal bileşimi bakımından gerekli koşulu sağlayan bir puzolandır. Son yıllarda, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi bazı puzolanların sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na₂CO₃), cam suyu (Na₂SiO₃) gibi alkalilerle aktive edilmesi ile alkali aktive edilmiş harç üretimi ile ilgili çalışmalar yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada, çimento inceliğindeki Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak NaOH ve Na₂SiO₃ ile 40, 65 ve 90°C aktivasyon sıcaklığında harç üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen harçlar üzerinde; piriz başlangıç ve sona erme süreleri ile kıvam deneyleri yapılmıştır. sertleşmiş harç numunelerinde ise her bir aktivasyon sıcaklığında (40, 65 ve 90°C) 1., 2. ve 4. gün etüvde kalma süresi sonunda; birim ağırlık, ultrases, kapiler su emme ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Alkali Aktivasyon, Ferrokrom Cürufu, Harç

ABSTRACT

EXAMINATION ON THE USE OF ELAZIĞ FERROCHROMIUM SLAG IN THE PRODUCTION OF PRODUCTION OF GEOPOLYMER CONCRETE MORTAR

Oğuz MAHMUT

Düzce University

Institute of Science, Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU

October 2015, 43 pages

High oven slag that is produced as waste material during iron-steel production is widely used as a construction material because it has pozzolanic activity, is a waste material and increases the durability performance of cement-concrete samples. Elazığ ferrochromium slag is a pozzolan with a $(CaO+MgO) / (SiO_2)$ ratio by mass of 1,3 and that provides the necessary condition with regard to its chemical composition in accordance with TS EN 197-1. Recently, the number of studies has increased on the activation of various pozzolans such as high oven slag and fly ash via alkaline material such as sodium hydroxide (NaOH), sodium carbonate (Na_2CO_3), water glass (Na_2SiO_3) as well as on the production of alkaline activated mortar. In this study, mortar productions were carried out for the Elazığ ferrochromium slag at cement thickness with NaOH and Na_2SiO_3 at activation temperatures of 40, 65 and 90°C. Experiments were carried out on the produced mortars for start and finish times of setting as well as consistency. Whereas unit weight, ultrasound, water absorption and compressive strength were determined for hardened mortar samples at the end of the 1st., 2nd. and 4th.days in the drying oven.

Keywords: Alkaline Activation, Ferrochromium Slag, Mortar

EXTENDED ABSTRACT

EXAMINATION ON THE USE OF ELAZIĞ FERROCHROMIUM SLAG IN THE PRODUCTION OF PRODUCTION OF GEOPOLYMER CONCRETE MORTAR

Oğuz MAHMUT

Düzce University

Institute of Science, Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU

October 2015, 43 pages

1. INTRODUCTION

Geopolymer composites usually the fly ash consists of the waste materials such as blast furnace slag. Fly ash, and blast furnace slag derived from the iron and steel from thermal power plants. Once the fly ash and blast furnace slag is processed by the method and technology it can be provided for the introduction of a proper form concrete. This results in the plant and being arranged stock accumulated as thermal power plants, waste material and also a large amount for obtaining Portland cement observed effects serious for our environment CO₂ (carbon dioxide) in the air release the latter there is no need. Geopolymer studies have revealed many positive results in terms of availability and reproducibility of concrete. building in many parts of Anatolia made Centuries ago, during the construction of the Pyramids of Egypt, particularly inspired in the acceleration of work to produce the old Roman structure at numerous common pozzolanic-material structure of today, there are still more innovative in the concrete in a section structure of researchers to remain stable technology. The overall data obtained in the experiments were as follows; geopolymer have proven to be as high as 70 MPa level, the compressive strength of the concrete, the maximum compressive strength of Portland cement has been observed that can be accessed more quickly than concrete. In normal concrete by hydration temperature it was found to be at very low level. Fittings for the protection against corrosion of iron were found to be more favorable. It is determined to be quite durable and strong against acid attack.

2. MATERIAL AND METHOD

In the study, geopolymer production was prepared with 6, 9 and 12 mol NaOH and Na₂SiO₃. Samples with binder / water ratio of 0,30 were prepared for the study. Slag that was obtained at cement thinness from the Elazığ Ferrochromium establishment and that was ground was used in place of cement for slag mixture calculations. The silica sand used in the experiment is manufactured by Limak. The specific weight of the sand is 2.50 g/cm³. Initially, equipment was prepared for the preparation of geopolymer mortar and it was made sure that the equipment is clean. NaOH was first mixed with some water in a steel cup for the % 50 value in the mixture, after which % 50 Na₂SiO₃ was added after it was observed that NaOH dissolved homogeneously in water. The silica sand and ferrochromium slag to be added to the mixture were prepared according to their ratios in the mixture.

First of all the aqueous solution was added to the reservoir of the automatic mixer after which ferrochromium slag and finally silica sand was added and the mixing process was carried out in 2 stages with 30 second intervals. Fresh concrete was placed to the 5 x 5 x 5 cubic molds on the vibratory table. The concrete samples were left to wait in the mold for 3 days after which they were taken out and were subject to experimental processes following a waiting time of 4 days in the laboratory. Physical and mechanical experiments were carried out on the samples in which 6, 9 and 12 mol activator was used following heat treatment process of 1., 2. and 4. days at temperatures of 40, 65 and 90 °C.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

When the chemical additive material is considered as a result of the observations made, it can be suggested that the mixing samples should be kept at environments free from moisture and water contact and that water and moisture resistant chemicals should be used.

It is thought that the use of ferrochromium slag as an alternative for light concrete production will decrease the structure load.

It is suggested that the use of aggregate with different grain diameter other than silica sand and the use of higher temperatures for the drying oven will provide positive effects.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

It was observed that the volumetric expansion that might occur in the prepared samples will not create any problems since it is lower than the 10 mm limit value specified in TS EN 196-3.

It was observed that the increase of curing time, duration of stay in the drying oven and the increase of material molar ratios resulted in an increase in the compressive strength values of concrete samples.

It was determined that the chemical additive substances gained binding property as a result of the reaction that occurs when they are used together at the molars specified thus increasing the strength and resistance of the samples. It was observed that sodium silicate or sodium hydroxide additive did not increase strength and resistance and that the mixture has no binding property because the samples disintegrated like sand.

Ultrasonic sound transition speed values increased in parallel to the increase of the temperature and molar values.

It was observed that the chemical structure, sample integrity, binding property and strength properties of hardened mortar samples deteriorated in moist or aqueous environments and that a white colored bloated stain occurred on the sample surface.

When an evaluation with regard to our environment is made, it can be stated that the use of ferrochromium slag as cement additive provides contributions to economy and ecology by arranging the stocks of waste material at factories and thermal power plants.

1. GİRİŞ

Geopolimer kompozitler genellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerden oluşmaktadır. Uçucu küller, termik santrallerden yüksek fırın cürufu ise demir çelik tesislerinden elde edilebilmektedir. Uçucu küller ve yüksek fırın cürufları uygun yöntem ve teknoloji ile proses edildikten sonra beton üretimi için uygun bir forma getirilmesi sağlanabilmektedir. Bunun sonucu olarak fabrikalar ve termik santrallerin atık malzeme olarak biriktirdiği stoklar düzenlenmiş olmakta ve ayrıca çevremiz açısından ciddi etkileri görülen Portland çimentosu elde etmek için yüksek miktarda CO₂ (karbon dioksit)'in havaya salınımına da gerek kalmamaktadır (Anonim 2014a).

Yapılan çalışmalar geopolimer betonun kullanılabilirliği ve üretilebilirliği açısından birçok olumlu sonucu ortaya koymuştur. Asırlar öncesinde yapılan yapılarda Anadolu'nun birçok yerinde, Mısır Piramitlerinin inşaatı sırasında, özellikle eski roma yapılarında çokça rastlanan puzolanik malzemeli yapıların günümüze kadar halen bir kısmının bozulmadan kalabilmesi araştırmacıların yapı teknolojisinde daha yenilikçi bu betonu üretmek için çalışmalarını hızlandırmalarında ilham kaynağı olmuştur (Akman 2003).

Yapılan deneylerde genel olarak elde edilen veriler şöyledir; geopolimer betonun basınç mukavemetinin 70 MPa seviyesine kadar ulaşabildiği görülmüştür, maksimum basınç mukavemetine Portland çimentolu betondan daha hızlı erişebildiği gözlemlenmiştir. Normal betonlara göre hidrasyon ısısının oldukça düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Donatı demirlerinin korozyona karşı korunmasında daha elverişli olduğu saptanmıştır. Asit ataklarına karşı oldukça dayanıklı ve güçlü olduğu belirlenmiştir (Anonim 2014a).

1.1. GEOPOLİMERLER

Geopolimerler bir inorganik polimer karışım elde etmek amacıyla alüminosilikat içeren malzemelerin alkaliler ile reaksiyonunun sonucunda ortaya çıkan ürünlerdir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar düşük maliyetleri ve kolay elde edilebilirlikleri sayesinde alüminosilikat kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Diğer sanayi atıklarının da kullanımı sonucunda geopolimer bağlayıcılar normal Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında gömülü CO₂ miktarını %80 azaltabilecektir (Castel ve Foster 2014).

Gopolimerlerin sıfır çimento yaklaşımı çevreyle dost bir bağlayıcı olması birçok araştırmacıyı beton içerisinde agrega bağlayıcı malzeme olarak değerlendirilmesine sevk etmiştir (Embong ve diğ. 2016).

Alkalilerin çimentolu malzemelerde ilk kullanımı 1930'lu yıllarda potas kostik olarak da bilinen potasyum hidroksit ve öğütülmüş cüruf tozu karışımının priz özelliklerinin belirlenmesi ile başlamaktadır. Yine 1930'lu yılların sonu ve 1940'lı yılların başında kostik potas ile sodyum solüsyonlarının cürufle reaksiyonu ve baz ve alkaline tuz kullanılarak cüruf içeren klinkersiz çimento üretimi çalışmalarının sürdürüldüğü görülmektedir.

1957 yılında yapılan bir diğer çalışmada, toprak çimento olarak da bilinen çimentolu karışımlar, sulu ve susuz alüminosilikatların kullanımı ile elde edilmiştir. 1982 yılında Davidovits tarafından Fransa'da, alkalilerin kaolinit, kireç taşı ve dolomit ile karıştırılması sonucunda elde edilen ve "Geopolymer", "Pyrament", "Geopolycem", "Geopolymite" gibi ticari isimlere sahip olan geopolimerler üretilmiştir (Shi ve diğ. 2006).

Geopolimerler, hızlı basınç dayanımı gelişimi, asit ve yanmaya karşı direnci, hızlı priz alma, donma-çözölmeye karşı direncinin yeterli olması gibi birçok faydalı özelliğe sahiptirler (Luukkonen ve diğ. 2016).

Mekanik dayanım değerlerine çok hızlı ulaşması nedeniyle inşaat uygulamalarında karşılaşılabilecek aksaklıkları azaltma potansiyeli bulunan alkali aktive edilmiş harçlar üzerinde uzun yıllardır çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (İlkentapar 2013).

1.1.1. Alkali Aktivatörler

Genel olarak alkalilerle aktive edilmiş çimento ve betonlarda kostik alkaliler ya da alkali tuzlar alkali aktivatörler olarak kullanılmaktadırlar. Kimyasal kompozisyonlarına bağlı olarak alkali aktivatörler, kostik alkaliler (MOH); silikasız zayıf asit tuzları (M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF vb.); silikatlar ($M_2O.nSiO_2$); alüminosilikatlar M_2O ($M_2O.Al_2O_3$) ve silikasız güçlü asit tuzları olarak altı grupta sınıflandırılmıştır. Tüm bu aktivatörler hem yaygın kullanıma sahip hem de ekonomik kimyasallardandır (Shi ve diğ. 2006).

Sodyum silikat, genel formülü $Na_2(SiO_2)_nO$ ile gösterilen kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. En çok bilineni Na_2SiO_3 olan sodyum metasilikat' tır. Bunlar dışında su camı - sıvı cam olarak da bilinen bu malzemeler, sulu çözelti içinde veya bir katı içinde kullanılabilir. Saf bileşimler renksiz ya da beyaz renktedir. Genel olarak Bu

bileşikler çimentolarda, pasif yangın korumada, tekstilde, kereste işlemede, refrakter malzemelerde, otomobillerde ve diğer çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Anonim 2014c). Sodyum hidroksit ise, beyaz renkte olup nem çekici özelliği bulunan bir maddedir. NaOH formülüyle gösterilir. Suda kolaylıkla çözünür ve yumuşak kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. İnsan dokusuna kaşındırıcı bir etkisi vardır.

Sodyum hidroksit (kostik soda), laboratuvarında CO₂ gibi asidik gazları yakalamak için kullanılır. Endüstride birçok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır. Bir baz'dır ve su ile tepkimeye girdiğinde yaklaşık 5 dakika içinde sıcaklığı 50 °C dereceye çıkar ve yaklaşık 15 dakika sıcak kalır. Özellikle inşaat laboratuvarlarında organik madde tayini için kullanılmaktadır (Anonim 2014d).

1.1.2. Geopolimer Harç/Betonların Kullanım Alanları

Geopolimer betonun kullanım alanları normal betonun kullanıldığı her unsur olabilir ancak malzeme olarak normal çimentolu beton kadar yaygın olmadığından kullanımı pek popüler değildir.

Genel olarak kullanım alanları; İstinad Duvarları, Betonarme Su Tankları, Barajlar ve Öngermeli Köprüler, Zemin Stabilizasyonu olarak bilinmektedir. Geopolimer beton harcı kuruma esnasındaki çekme miktarı az olduğundan dolayı ince ve dar durumdaki yapı elemanlarında da kullanıma elverişlidir (Anonim 2014a).

1.1.3. Geopolimer Harç'ın Bileşenleri

Geopolimer malzemelerin içinde çoğunlukla ısıyla aktive edilmiş ve oluşturulmuş doğal malzemeler olan silikon ve alüminyum bulunmaktadır. Geopolimerde bulunan bu malzemeler alkaline kullanılmasıyla aktive edilerek moleküller arası bağlar güçlendirilip polimerleştirilmesi sağlanmaktadır (Şekil 1.1). Bu yolla elde edilen çimentolara genellikle alkali aktivasyonlu veya inorganik polimer çimento adı verilmektedir (Anonim 2014b).

Geopolimer beton'un birleşiminde uçucu kül, cüruf, iri ve ince agrega dışında alkali aktivasyon yönteminde; alkali silika, hidroksit, damıtılmış su kullanılan kombinasyonlardır (Anonim 2014a).



Şekil 1.1. Geopolimer harç bileşenleri (Anonim 2014a).

1.2. PUZOLANLAR

Puzolanlar doğal halde iken herhangi bir bağlayıcılık özelliği bulunmayan ya da çok az olan maddelerdir. Puzolan maddeler öğütülerek ince taneli yapıya dönüştürüldüklerinde, normal sıcaklıklarda ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle tepkime oluşturulduğunda bağlayıcılık özelliği kazanabilen, silikal veya alüminal malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Yapısında silikat ve aliminat bulunan her madde puzolan değildir. Örnek vermek gerekirse kuvars (SiO_2), mullit ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$) ve sillimanit (SiAl_2O_5) puzolanik özelliğe sahip olmayan maddelerdir. Son zamanlarda doğal ve yapay olmak üzere birçok puzolanik madde mevcut bulunmaktadır, bu puzolanik maddelerin çimentoya doğrudan katılarak kullanılmakta veya bir kısmının yerine koyulması yolu ile kullanılmaktadır. Puzolanik malzemeler köken, yapı, kimyasal ve mineralojik bileşenleri bakımından oldukça farklı malzemelerdir ve sulu ortamlarda bağlayıcı özelliği kazanabilen kararlı yeni hidratasyon ürünleri oluşturmak için kireçle birleşme eğilimine sahiptirler (Alpaslan 2012).

1.2.1. Puzolanların Tarihçesi

Konya-Çatalhöyük'teki Neolitik çağa ait evlerin harçları üzerinde bilim adamları tarafından yapılan araştırmalar sonucu, bölge evlerinde kullanılan harçların 8000 yıl kadar eski olduğu tespit edilmiştir. Sadece kil, kireç veya alçıdan oluşturulan harçların suya dayanıklı olmadıkları bilinmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulursa oradaki harçların büyük bir olasılıkla volkanik kül içeren topraklarla yapılmış olma gerçeği elde

edilmektedir. Bahsedilen bölge Çatalhöyük, Erciyes ve Hasandağı gibi dağların çok uzağında bir yer değildir. Girit'te, Rodos'ta ve birçok yerde üç dört bin yıl önce yapılmış olan su yapıları ve mozaik işleri de bugün hala dayanıklılığını korumaktadır. Bu yapılarda da puzolan ve söndürülmüş kireçten oluşan bağlayıcılar kullanılmıştır (Erdoğan 2010, Erdoğan ve Erdoğan 2007). Puzolan diye nitelendirilebilecek malzemelere puzolan isminin verilmesi ve bu malzemelerin harç ve beton yapımında yaygın olarak kullanılması, MÖ 200-300 yılı civarında Romalılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Puzolanik türdeki malzemelerin bağlayıcılık özellikleri Romalılar tarafından keşfedilmiş ve bu tür malzemelerin pozzolana (puzolan) olarak anılmaya başlanması, Romalı ünlü mimar Marcus Vitruvius Pollio'nun MÖ 300 – MÖ 200 yılları arasında tamamladığı “Mimarlık Üzerine On Kitap” (De Architectura Libri Decem) isimli eserinin ikinci kitabında bahsedilmektedir. Vitruvius'a göre, Romalılar, pişirilmiş kilin veya öğütülmüş tuğla veya kiremidin de puzolanik özellik gösterdiğinin bilincinde olmuşlardır.

Romalılar volkanik külü, volkanik küllü toprağı veya pişirilmiş kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirerek, su altında da sertleşebilen bağlayıcı hamur elde etmişlerdir. Bu tür bağlayıcıların içerisine taş parçaları gömerek, bugünkü betona benzer betonlar yapmışlardır. Osmanlılar zamanında yaygın olarak kullanılan “Horasan harcı” da kilden yapılan ve pişirilen tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmüş durumdayken söndürülmüş kireçle birleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir (Erdoğan 2010, Erdoğan ve Erdoğan 2007).

1.2.2. Puzolanik Malzemelerin Sınıflandırılması

Genel olarak puzolanların sınıflandırılması doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olarak iki başlık altında incelenmektedir. Doğal puzolanlar; doğadaki volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, zeolit, diatomit ve diatomlu topraklar olarak örneklenebilmekte ve öğütmenin dışında bir işlem gerektirmemektedirler (Erdoğan 2010). Yapay puzolanlar; çok az puzolanik özelliğe sahip olan veya hiç olmayan malzemelerin kimyasal ve yapısal modifikasyonlarının bir sonucu oluşur. Yapay puzolanlar endüstriyel atıklar olup en çok tanınanları; silis dumanı, UK ve YFC'dir. Ayrıca bazı doğal malzemelerin ısı ileme tabii tutulması sonucunda elde edilen puzolanik malzemeler de yapay puzolan olarak sınıflandırılmaktadır (Özkan 2009).

1.2.2.1. Elazığ Ferrookrom Cürufu

Elazığ ferrookrom cürufu; Elazığ yöresinde bulunmakta olan ferrookrom işletmesinde demir-çelik üretimi esnasında ortaya çıkan atık maddedir (Yazıcıoğlu ve diğ. 2005). Ferrookrom cürufu madenden gelen metal malzeme içeren kayaç ve büyük kaya moloz agregaların yüksek fırınlarda 1500–1700 °C sıcaklıkta eritilerek cevherin ve cürufun ayrıştırılması şeklinde olmaktadır (Yazıcıoğlu ve diğ. 2005).

1.2.2.2. Elazığ Ferrookrom Cürufunun Fiziksel Özellikleri

Elazığ ferrookrom cürufu; Elazığ yöresinden ve yakın çevresinden elde edilen maden ürünlerinin oluşturulması esnasında ortaya çıkar. Elazığ ferrookrom cürufuna ait fiziksel özellikler Çizelge 1.1'de verilmektedir (Yazıcıoğlu ve diğ. 2005).

Çizelge 1.1. Elazığ ferrookrom cürufunun fiziksel özellikleri.

Birim ağırlık (gr/cm ³)	Su emme (%)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)
1,06 (gr/cm ³)	(%) 13,63	2,86 (gr/cm ³)

1.2.2.3. Elazığ Ferrookrom Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Yapılan deneyler sonucu Elazığ ferrookrom cürufunun aşağıdaki çizelgede (Çizelge 1.2) belirtilen kimyasal özellikleri gösterilmiştir (Yazıcıoğlu ve diğ. 2005).

Çizelge 1.2. Elazığ ferrookrom cürufunun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+0,658K ₂ O
45,62	31,90	1,95	2,25	16,80	1,48

1.2.2.4. Elazığ Ferrookrom Cürufunun Depolama ve Tüketim Aralığı

Elazığ yöresinde üretimi gerçekleştirilen bu atık malzeme Devlet tarafından işletildiği zamandan kalan cüruflar ile birlikte mevcut ferrookrom üretim sürecinden çıkan cüruflar fabrika sahası içerisinde düzenli depolanmaktadır (Şekil 1.2). Bu işletmede uzun vadede mevcut fazla cüruf stoklarının tahmini tüketim aralığını 2015-2020 olarak planlamaktadır (Anonim 2015a). Elazığ ferrookrom cürufu işletmede faaliyette olduğu yıl itibarı ile yaklaşık 700 bin ton granüle yüksek fırın cürufu atıl durumda

bulundurmaktadır ve her yıl bu değere ek olarak 100 bin ton yüksek fırın cürufu eklenmektedir. Bu durumdan dolayı Elazığ ferrokrom cürufunun çimento üretilmesinde katkı maddesi halinde kullanılabilirliğinin sağlanabilmesi ekonomik olarak çimento üretimine ve ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır (Yazıcıoğlu ve diğ. 2005).



Şekil 1.2. Elazığ ferrokrom cürufu

1.3. LİTERATÜR ÖZETİ

Öner (2001), Yüksek fırın cüruflarının çimento üretiminde kullanımında öğütmeyle ilgili parametrelerin etkilerinin belirlenmesi araştırılmıştır. Çalışmada, yüksek fırın cürufu çimentoların üretiminde klinker ve cürufun ayrı ayrı veya birlikte öğütülmesi yöntemleri, öğütülebilirlik ve öğütme kinetiği açılarından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak malzemelerin hem öğütülebilirlik hem de öğütme kinetiği açılarından çok farklı özellikler gösterdiği saptanmıştır. Çalışmanın sonuçları, ayrı ayrı öğütmenin özgül enerji tüketimi açısından tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Lind vd. (2001), Yol yapımında ferrokrom cüruf kullanımının çevresel etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 1994 yılında inşa edilmiş yollarda yeraltı analizini içeren ve ferrokrom cürufunun çevre üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmaya ek olarak, karahindiba bitkisi kökleri tarafından krom ve diğer metallerin biyo-alınımını kapsayan yeni bir yöntem de denenmiştir. Sonuç olarak cürufun kendi kökleri ile büyüyen bitkiler tarafından alınan krom açısından önemli olduğu görülmüştür.

Yazıcıoğlu vd. (2002), Elazığ ferrokrom cürufunun betondaki karbonatlaşmaya etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, Deneysel numuneleri özel olarak dizayn edilmiş deney aletinde %55 bağıl nemde karbonatlaşmaya maruz bırakılmıştır. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyine maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinliği, basınç dayanımları ve su emme miktarları belirlenmiştir. Sonuç olarak cüruf katkısı %3'e kadar basınç dayanımını arttırmış, %5'de dayanım düşmesine karşın referans ile hemen hemen aynı seviyeye kadar düşmüş ve cüruf içeriği artmaya devam ettikçe de basınç dayanımı buna paralel olarak azalmıştır. Çimento içerisindeki cüruf miktarının artması ile karbonatlaşma derinliği de artmıştır.

Yazıcıoğlu vd. (2005), Elazığ ferrokrom'dan temin edilen yüksek fırın cürufunun betonun basınç dayanımı ve çarpma enerjisi üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada, çimento inceliğinde öğütülen cüruf, beton karışımına Portland çimentosu (CEM I 32,5) ile ağırlıkça % 1, % 3, % 5, % 7 ve % 10 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımına ve çarpma enerjilerine bakılmıştır. Çalışmada maksimum agrega tane çapı arttıkça betonun basınç dayanımında ve çarpma enerjisinde artış olduğu gözlenmiştir. Cüruf katkısı % 3 olan betonların mukavemeti kontrol betonundan yüksek ve % 5 katkılı betonlarda ise kontrol betonuna denk mukavemetler elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, maliyeti azaltmak açısından cüruf katkısının % 5'e kadar çimento katkı malzemesi olarak betonda kullanılabileceğini göstermiştir.

Canbaz (2007) sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat kullanarak alkali aktive ettiği yüksek fırın cürufu harçları üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak karışımlarda yüksek fırın cürufu miktarındaki artışa bağlı olarak ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Ayrıca $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ ve $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ kombinasyonlu alkali aktivatör seçeneklerinin yüksek fırın cürufu kullanılarak elde edilecek alkali aktive edilmiş harçlar için en uygun aktivatör tipi olduğu tespit edilmiştir.

Karataş (2008), Elazığ ferrokrom tesisinden elde edilen cürufun betonda basınç ve eğilme dayanımı üzerine etkilerini incelemiş olup, hazırlanan beton karışımlarına çimento ağırlığının %3, %5, %7 ve %10'u şeklinde olmak üzere değişen oranlarda cüruf ikame etmiştir. Deneysel numunelerinin 3, 7 ve 28. kür günleri ardından basınç ve eğilme dayanımı değerlerini belirlemiştir. Araştırmacı bu çalışmada sonuç olarak % 3

cüruf katkılı betonların en yüksek basma ve eğilme dayanımına ulaştığını belirleyerek cürufun betonda çimento katkı maddesi olarak %5'e kadar kullanılabileceğini tespit etmiştir.

Toprak (2011) geopolimer harç üretilmesinde termik santral taban külünün kullanılmasına yönelik yapmış olduğu çalışmada, elde etmiş olduğu geopolimer harç üzerinde sülfat ve etkisi, donma-çözülme ve yüksek sıcaklı etkisi gibi dayanıklılık deneyleri gerçekleştirmiştir. %12 Na₂O ve %8 SiO₂ içeren alkali çözelti ile aktive edilen geopolimer harçların 25-30 MPa seviyelerinde basınç dayanımı değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, asit etkisiyle meydana gelen dayanım kaybının sülfat etkisi sonucunda meydana gelenden dayanım düşüşünün çok daha fazla olduğu, 100 çevrim donma çözülme etkisi sonucunda numunelerin dayanımlarında %20 kayıp gözleendiği ve 400°C'de %5-7 oranında gerçekleşen dayanım azalmasının 800°C'de %23-28 değerlerine ulaştığı belirtilmiştir (Toprak 2011).

Allahverdi vd. (2011), Tras tabanlı maden eritme ocağı cürufu çimentosunun geopolimer oluşumuna etkileri, Karışımların temel mühendislik özellikleri üzerinde maden eritme ocağı cürufunun etkileri incelenmiştir. Çalışmada farklı miktarlarda maden eritme ocağı cürufu, sodyum oksit oranı ve su-çimento oranında sahip geopolimer karışımlarının basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak en yüksek 28-günlük basınç dayanımı değerinin 36 MPa'lık ve Maden eritme ocağı cürufu % 8 olan karışım olmuştur. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu % 5 içeren karışımlar en az çiçeklenmeyi ve en iyi sağlamlığı sergilediği bildirilmiştir.

Erdoğan (2011), Öğütülmüş ferrokrom cürufu kullanılarak geopolimer üretimi gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı halde sodyum silikat malzemelerini kullanarak Elazığ ferrokrom cürufu ile geopolimer üretimi yapmıştır. Çalışmada aktivasyon sıcaklığı olarak 1100 °C sıcaklığa iki saat süreyle bırakılan numunede dahi bozulmaların olmadığı ama en olumlu sonuçların Yaklaşık 80-100 °C sıcaklıkta kür işleminin mekanik özellik gelişimine etkisi, oda sıcaklığında kür'ün etkisine veya daha yüksek sıcaklıklarda kür'ün etkisine kıyasla daha iyi olduğunu belirlemiştir.

Koluçolak (2012), Yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza katkılı beton boruların tepe yükü dayanımları ve durabilite özellikleri üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, katkılı beton boruların tepe yükü dayanım değerlerinin referans numunelerine göre daha yüksek

olduğu görülmüştür. Özellikle yüksek fırın cürufu katkılı beton borularda, katkı oranının artmasıyla birlikte tepe yükü dayanımında da bir artış gözlemiştir. Sülfat direnci en yüksek örnek %15 yüksek fırın cürufu katkılı örnekler, geçirimsizlik değerinin en düşük olduğu örneklerin ise pomzanın tek başına kullanıldığı örnekler olduğu görülmüştür.

Binici vd. (2012), Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada yüksek fırın cürufu ile elde edilen geopolimerin su emme oranı diğer numunelere göre daha düşük bulunmuştur. Su emme değerleri fazla olan örneklerin ultrases geçirgenlik hızları daha düşük bulunmuştur. Ayrıca bu numunelerin eğilme ve basınç dayanımları diğerlerine göre çok daha yüksek bulunmuştur. Ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımı arasında belirli bir ilişki gözlenmiştir. Sonuçlar daha boşluksuz geopolimerlerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Mane vd. (2012), Yüksek sıcaklık altında geopolimer harç ve beton numunelerinin davranışlarını incelemiştir. Geopolimer harç ve beton için sıcaklık değerleri kaba ve ince agrega için farklı ayarlanmıştır. Geopolimer bileşik için uçucu külün sodyum silikat ile sentezlenmesi sağlanmıştır. Tüm deneyde genel olarak doğal nehir kumu ve kırma kum kullanılmıştır. Geopolimer betonlar geleneksel betona göre çevre sıcaklığı ve yükseltelen sıcaklıklarda daha iyi performans vermiştir. Ayrıca geopolimer beton PÇ ye göre daha iyi mukavemet sağladığı saptanmıştır.

Kantarcı (2013), Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer betonların yangın dayanımı araştırılmıştır. Bu çalışmada araştırmacı, cürufu çimento inceliğinde öğütmüş ve aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanmıştır. Üretilen geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları, fiziksel özellikleri, yangın dayanımları ve mikro yapıları incelenmiştir. Araştırmacı çalışmada sonuç olarak, numunelerde 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık 35 MPa olduğunu belirlemiştir. Yangın sonrası basınç dayanımlarında ise kontrol numunelerine göre basınç dayanımı değerlerinde artış olduğunu tespit etmiştir.

Maraş (2013), Cüruf çimento inceliğinde öğütülüp, alkali ile aktive edildikten sonra, bağlayıcı özelliğe sahip bir geopolimer malzeme oluşturulmasını amaçlamış ve geopolimer hamur numunelerinde priz süresi, hidrasyon ısı ve basınç dayanımı değerlerini incelemiştir. Çalışmada sonuç olarak farklı Na₂O içeriğine bağlı olarak priz

süreleri 120 ve 870 dakika arasında değişim gösterdiği saptanmıştır. Araştırmacı 28 günlük maksimum basınç dayanımı Na_2O içeriği %7 ve silis modülü 0.70 olan numuneden elde etmiştir. En yüksek basınç dayanım değerini ise 35 MPa olarak tespit etmiştir. Çalışmada, geopolimer harç numunelerin su / bağlayıcı oranının artmasına paralel olarak basınç dayanımlarının azaldığını belirtilmiştir. Ayrıca numunelerin magnezyum sülfata karşı iyi direnç gösterdiği tespit etmiştir.

Vapur vd. (2013), Elazığ ferrokrom tesisi cüruflarının agrega özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada ferrokrom cürufunun temel kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirledikten sonra cürufların agrega özelliklerini belirlemek üzere araştırmacılar; Los Angeles aşınma deneyi, Schmidt çekici sertlik deneyi, nokta yük dayanımı deneyi, alkali agrega reaktivitesi, asitte çözünen sülfat, donma-çözünme deneylerini yapmışlardır. Çalışmada sonuç olarak Elazığ ferrokrom cüruflarının agrega olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir.

Erdoğan vd. (2014), Elazığ ferrokrom tesisinden temin edilen cüruf kullanılarak cürufun aşındırıcı özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Aşınma deney yöntemi olarak mikro-aşınma yöntemi kullanılmıştır. Deneysel cürufun aşındırma özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla SiC ve Al_2O_3 tozları ile de numuneler mikro-aşınma testlerine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile krater çapları ise optik mikroskop ile ölçülmüş ve sonuç olarak cürufun aşındırma özelliğinin olduğu tespit edilmiştir.

Karakoç vd. (2014), Ferrokrom cürufu içeren geopolimer harçların ve pastaların mekanik özellikleri ile piriz sürelerini tayin etmişlerdir. Çalışmada geopolimer oluşturmak için aktivatör madde olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Deney için 3 farklı silis modülü (0.50, 0.60, 0.70) ve 4 farklı Na_2O (%4, %7, %10 ve %12) konsantrasyonu kullanılarak hazırlanan numunelerin 7 ve 28 gün sonundaki basınç dayanımlarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 7 günlük numuneler incelendiğinde en yüksek dayanım değeri 20,76 MPa değeri ile %12 sodyum oksit karışımında elde edilmiştir. 28 günlük numunelerde ise en yüksek dayanım değeri 13,82 MPa ile %7 sodyum oksit içeren seriden elde edilmiştir.

Yang vd. (2014) Yüksek magnezyumlu nikel cürufu ile üretilmiş geopolimerlerin mikroyapılarının araştırıldığı çalışmalarında, tehlikeli bir atık olan yüksek magnezyumlu nikel cürufunun geopolimer üretiminde kullanımının fizibilitesini

araştırmışlardır. Geopolimer sentezinde, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat tercih edilmiştir. Sonuç olarak, yüksek magnezyumlu nikel cürufunun geopolimer karışımlarında mikro agrega olarak kullanılabilmesi ve bu malzemenin kullanımı ile karışımların mikro boşluklarında azalma gözlenirken makro boşluklarında artış gösterdiği belirtilmiştir (Yang ve diğ. 2014).

Castel vd. (2015) Cüruf ve uçucu kül kullanılarak üretilmiş geopolimer betonlarda donatı aderansı performansını araştırmışlardır. Çalışmada, aderans dayanımının belirlenmesi amacıyla nervürlü ve düz olmak üzere iki farklı donatı yüzey özelliği test edilmiştir. Geopolimer karışımlarda %85,2 oranında düşük kalsiyumlu uçucu kül ve %1,8 oranında ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Sonuç olarak, 48 saat süresince 80 °C sıcaklıkta kürlenmiş geopolimerlerin normal beton ile benzer özellik sergilediği, benzer dayanım sınıfında geopolimer betonların normal betona oranla daha iyi aderans performansı sergilediği bildirilmiştir (Castel ve diğ. 2015).

Embong vd. (2016), Yüksek kalsiyum ve su emici agrega içeren uçucu kül esaslı geopolimer betonların dayanım ve mikroyapılarını incelediği çalışmalarında, aşırı su emici agregaların alüminosilikatların polimerizasyonunu olumsuz etkilediğini ve geopolimer matris ile agregalar arasındaki taneler arası boşlukların basınç dayanımı değerlerini önemli ölçüde etkilediğini bildirmişlerdir (Embong ve diğ. 2016).

Perna vd. (2016), Kil-cüruf matrisli geopolimerlerin priz sürelerini araştırdığı çalışmalarında, 0-1 mm boyutlarında öğütülmüş fırın cürufu kullanılarak sulu potasyum silikat çözeltisi ile geopolimerizasyon sağlanmıştır. Sonuç olarak, yüksek fırın cürufunun geopolimer karışımlarının priz sürelerini hızlandırdığını, ayrıca yüksek oranda cüruf kullanımı ile de priz süresi değerlerinin azalması gösterdiğini bildirmişlerdir (Perna ve Hanzlicek 2016).

2. MATERYAL VE METOD

2.1. MATERYAL

2.1.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu

Deneyde Elazığ ferrokrom işletmesinden elde edilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan cüruf TS EN 1097-2 ve ASTM C 131'e uygun olarak Los Angeles cihazı ile öğütülmüştür. Öğütme işlemi sonunda oluşan malzeme alınıp üretilecek numunelerde kullanılmak üzere 0,212 mm'lik elekten elenmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Elazığ ferrokrom cürufunun öğütme ve eleme işlemi.

2.1.2. Kum

Bu çalışmada harç üretimi için kullanılan kum olarak Limak Trakya Çimento Sanayi ürünü olan CEN standart kumu kullanılmıştır (Şekil 2.2) (Anonim 2015b).



Şekil 2.2. CEN standart kumu

2.1.3. Alkali Aktivatör

Bu çalışmada sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) olmak üzere iki çeşit alkali aktivatör kullanılmıştır (Şekil 2.3.). Kullanılan alkali aktivatörlere ait özellikler Çizelge 2.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Alkali aktivatör özgül ağırlıkları

Alkali Aktivatörler	Özgül Ağırlık (g/cm^3)
Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)	1,38 (g/cm^3)
Sodyum Hidroksit (NaOH)	2,1 (g/cm^3)

- Na_2SiO_3 (sodyum silikat) sıvı halde maddedir
- NaOH (sodyum hidroksit) katı halde maddedir.



Şekil 2.3. Alkali aktivatörün hazırlanması.

2.1.4. Karma Suyu

Deneysel çalışmaların tamamında TS EN 1008'e uygun, Elazığ ili şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. METOD

2.2.1. Numunelerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında, kullanılacak deney malzemeleri sıralanacak olursa kum olarak CEN standart kumu, su, bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu, katkı maddesi olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak numuneler hazırlanmıştır.

Çalışmada Elazığ ferrokrom cürufu dozajı 400 gr olarak seçilmiş ve su/bağlayıcı oranı 0,30 olarak belirlenmiştir. Üretilecek numunelerin 7 gün havada kür edilmesinden sonra 6, 9 ve 12 molarite değerine sahip numuneler için 40, 65 ve 90°C sıcaklıkta 1, 2 ve 4 gün süresince ısıtılma tabii tutulmuştur. Basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme ve birim ağırlık deneyleri için 50x50x50 mm ölçeklerindeki küp numuneler kalıplara yerleştirilerek hazırlanmıştır. Numuneler 3 gün kalıpta bekledikten sonra kalıptan alınarak toplamda 7 gün oluncaya dek laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Numunelerin hazırlanması

2.2.2. Alkali Aktive Edilmiş Harç Karışımları

Çalışmada geopolimer üretiminde 6, 9 ve 12 mol NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatör olarak kullanılmıştır. Elazığ ferrokrom işletmesinden elde edilen ve çimento inceliğinde öğütülen cüruf karışımı kullanılmıştır. Deneyde kullanılan silis kumu limak (batı çimento) tarafından üretilen kumdur. Kumun özgül ağırlığı 2.50 g/cm³'dür.

Geopolimer harç hazırlanması için öncelikle karışımı oluşturacağımız ekipmanlar hazırlanmış ve temiz olduğuna dikkat edilmiştir. Karışımda % 50 oranındaki değer için NaOH öncelikle bir miktar su ile kapta karıştırılmıştır, NaOH'in su içerisinde homojen çözüldüğü görüldüğünde % 50 oranındaki Na_2SiO_3 eklenmiştir. Karışıma eklenecek olan silis kumu ve Elazığ ferrokrom cürufu oranları Çizelge 2.2'de verilmiştir. Harcın homojen karıştırılması için otomatik karıştırma aleti haznesine önce sulu karışımı takiben Elazığ ferrokrom cürufu ve son olarak silis kumu eklenip 30 saniye aralıklarla 2 aşamada karışım gerçekleştirilmiştir.

Taze beton 5 x 5 x 5'lik küp kalıplara sarsma tablasında yerleştirilmiştir. Beton numuneler 3 gün kalıpta bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmış ve 4 gün laboratuvar ortamında bekletilmesi sağlandıktan sonra deneysel işlemlere tabi tutulmuştur. 6, 9 ve 12 mol aktivatör kullanılan numuneler 40, 65 ve 90 °C derecelerde 1, 2 ve 4 günlük ısı işlem ardından fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Karışım oranları çizelgede (Çizelge 2.2) gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Geopolimer harçdaki karışım miktarları

Malzemeler.	6mol	9mol	12 mol
	Ağırlık (g)	Ağırlık (g)	Ağırlık (g)
YFC	400	400	400
Kum	1350	1350	1350
Saf Su	120	120	120
%50 NaOH	14,2	21,6	28,8
%50 Na_2SiO_3	43,92	65,88	87,84

2.2.3. Elazığ Ferrokrom cürufu Hamuru Üzerinde Yapılan Deneyler

2.2.3.1. Kıvam Tayini

Kıvam tayini deneyi TS EN 196-3'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 500 g numune için belirlenen oranda Elazığ ferrokrom cürufu tartılmıştır, karışım için gerekli olan su miktarı toplam numune ağırlığının % 25'i olacak şekilde alınarak dereceli kapta ölçülmüştür.

Hazırlanan Elazığ ferrokrom cürufu hamuru vicat kalıbına yerleştirilmiştir, sondanın kalıbın merkezinde olduğuna dikkat edilerek Elazığ ferrokrom cürufu pastası ile temas edinceye kadar yavaş bir şekilde indirilmesi sağlanmıştır.

Sabitlenen sonda serbest bırakılmış ve kendi ağırlığı doğrultusunda Elazığ ferrokrom cürufu pastanın merkezine girmesi sağlanmıştır. Sondanın batma işlemi tamamlandığı anda sonda ucu ile taban plakası arasında kalan mesafenin mm olarak okuması sağlanmıştır.

Tekrarlayarak devam edilen bu deneyde sondanın tabanda bulunan levhaya olan uzaklığı 5-7 mm oluncaya kadar su miktarı ayarlanmıştır. Belirtilen mm aralığı yakalandığında katılan su miktarı, kıvam için gerekli su miktarı olarak belirlenmiştir. (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Kıvam tayini

2.2.3.2. Priz Başlama Ve Sona Erme Süresinin Tayini

Priz başlangıç ve bitiş süresi deneyi TS EN 196-3 standardına uygun olarak yapılmış ve vicat iğnesi ile tabandaki plaka arası mesafe 3-5 mm oluna kadar geçmiş olan süredeki priz başlangıç için sonuçlar dakika olarak kaydedilmiştir.

priz sona ermesi işlemi için, priz başlaması tespiti yapılan Elazığ ferrokrom cürufu hamuru dolu vicat halkasının cam ile temas eden yüzeyi ters çevrilmiştir.

Deney için vicat iğnesinin batırılmasına 15 veya 30 dakika aralıklar şeklinde devam edilmiştir. İğne her defasında nemli bir bez ile silinmiştir. Vicat iğnesinin 0,05 mm

battığı an sıfır olarak kabul edilip aradaki geçen zaman dilimi priz sona ermesi için dakika olarak kaydedilmiştir.

2.2.4. Sertleşmiş Harç Numunelerinde Uygulanan Deneyler

2.2.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi, 3 er adet 50x50x50 mm ölçekli küp numuneler üzerinde TS EN 196-1'e uygun olarak yapılmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6.Yükleme presi

2.2.4.2. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases test cihazı ile beton içerisine gönderilen ses dalgalarının betonun iki yüzeyi arasından geçmesi ölçülmektedir (TS EN 12504-4, ASTM C 597), böylece dalga hızı hesaplanmaktadır (Şekil 2.7).

Bulunan sonuçlar beton basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişkiyi elde etmeyi sağlamaktadır (Çizelge 2.3). Bu çalışmada her sıcaklık ve mol için 3 er adet 50x50x50 mm ölçekli küp numuneler üzerinde uygulanmıştır (Çizelge 3.2).



Şekil 2.7. Ultrases test cihazı

Ses geçiş hızı ölçüldükten sonra dalga hızı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$(V = \frac{s \times 1000}{t})$$

Burada belirtilen ;

V = Ses üstü dalga hızı (km/sn)

S(L) = Numunenin ölçüm yapılan iki yüzeyi arası mesafe (metre)

t = numunenin ölçüm yapılan iki yüzeyi arasında ses üstü dalganın geçiş süresi (mikron saniye)

Çizelge 2.3. Betonun kalitesinin tahmin edilmesi

SES HIZI İLE BETONUN KALİTESİNİN TAHMİN EDİLMESİ	
Ses Hızı (V) Km/Sn	Beton Kalitesi
>4,5	Mükemmel
3,5-4,5	İyi
3,0-3,5	Şüpheli
2,0-3,0	Zayıf
<2,0	Çok Zayıf

2.2.4.3. Kapilarite Deneyi

Kapilarite deneyi sonuçları 6, 9 ve 12 mol olacak şekilde hazırlanan numuneler için her bir molaritelek değerdan üçer numune üzerinde sonuçlar alınmıştır (Şekil 2.8), (Şekil 2.9), (TS EN 3526).

Sonuçlar hazırlanan çizelgelerde ölçülen veriler doğrultusunda değerdendirmeye alınmıştır (Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6).



Şekil 2.8. Kapilarite deneyi için numunelerin hazırlanması



Şekil 2.9. Kapilarite deneyi

2.2.4.4. Birim Ağırlık (Yoğunluk) Deneyi

Birim ağırlık deneyi için numunelerden belirtilen şekillerdeki (Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3) sonuçlar elde edilmiştir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda aşağıda gösterilen bağıntı kullanılarak birim ağırlık deneyi sonuçları bulunmuştur.

$$P_{(\text{Yoğunluk})} = \frac{W_{\text{kuru}}}{W_{\text{doygun}} - W_{\text{suda}}}$$



Şekil 2.10. Birim ağırlık (yoğunluk) deneyi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. KIVAM TAYİNİ SONUÇLARI

Yapılan yayılma ölçümü ardından dört noktadan ölçülen yayılma çapı değerleri 6, 9 ve 12 mol için sırasıyla 157, 154 ve 151 mm olarak tayin edilmiştir. Sonuç olarak molaritenin artmasıyla yayılma çapı değerlerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir.

3.2. PRİZ BAŞLAMA VE SONA ERME SÜRESİNİN TAYİNİ SONUÇLARI

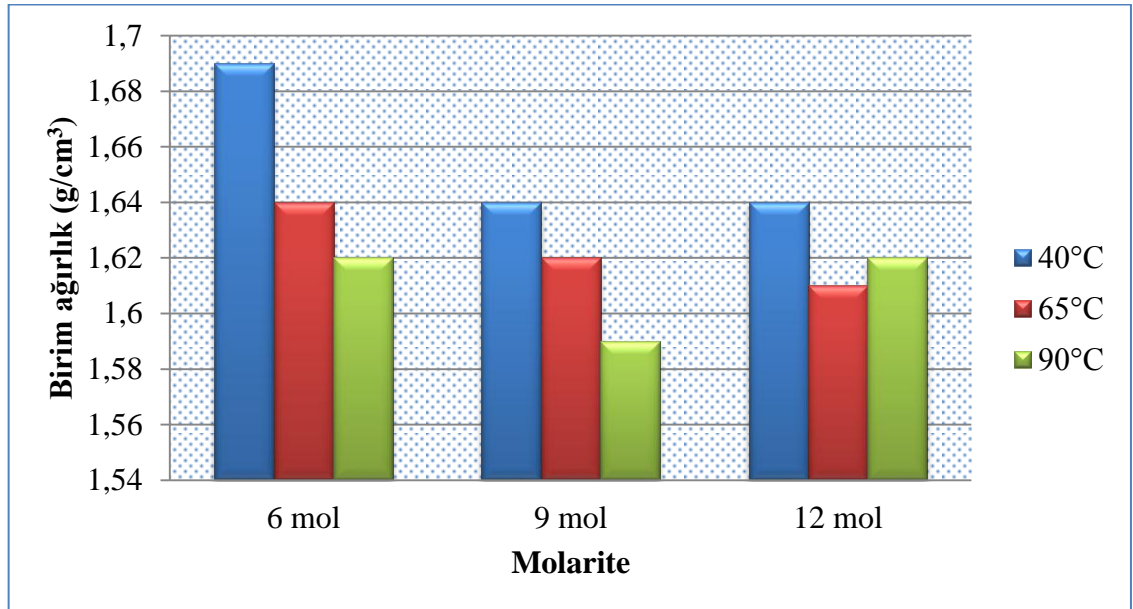
Priz başlama ve sona erme süresinin tayini için aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

Çizelge 3.1. Priz başlama ve sona erme süresinin tayini

Molarite (mol/lt)	Priz başlangıç süresi (dk)	Priz sona erme süresi (dk)
6 Mol	70-135	510-600
9 Mol	60-120	480-600
12 Mol	50-100	450-550

3.3. BİRİM AĞIRLIK DENEY SONUÇLARI

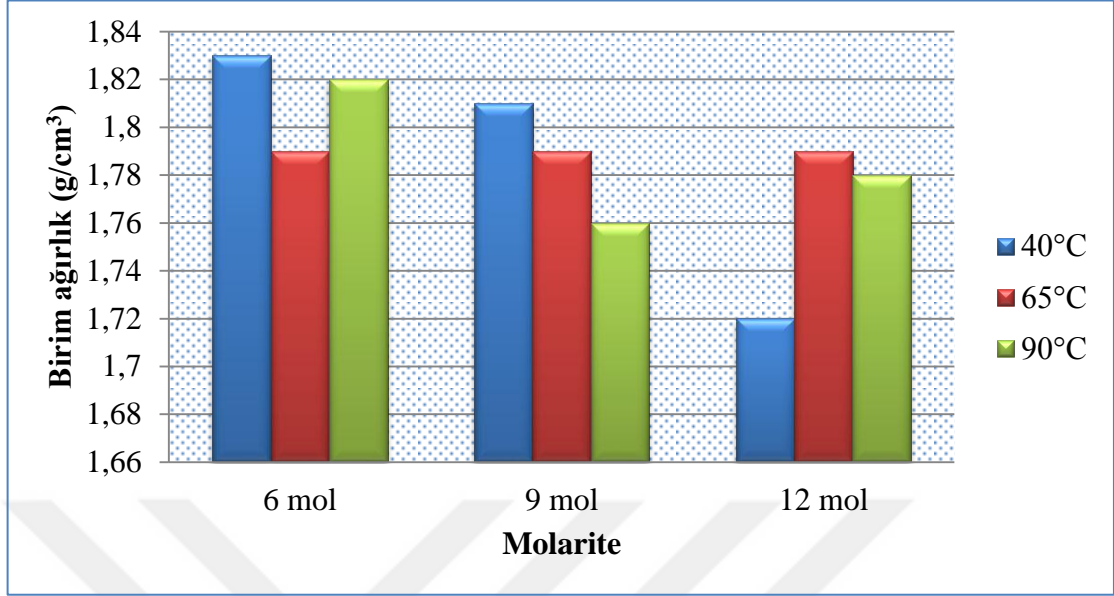
1 gün sıcaklığa maruz kalmış numune için birim ağırlık deney sonuçları Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Birim ağırlık deney sonuçları

1gün sıcaklığa maruz kalmış numune için birim ağırlık deneyi sonuçları şekilde (Şekil 3.1) gösterilmektedir. Belirtildiği üzere sıcaklık faktörünün oranları azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir.

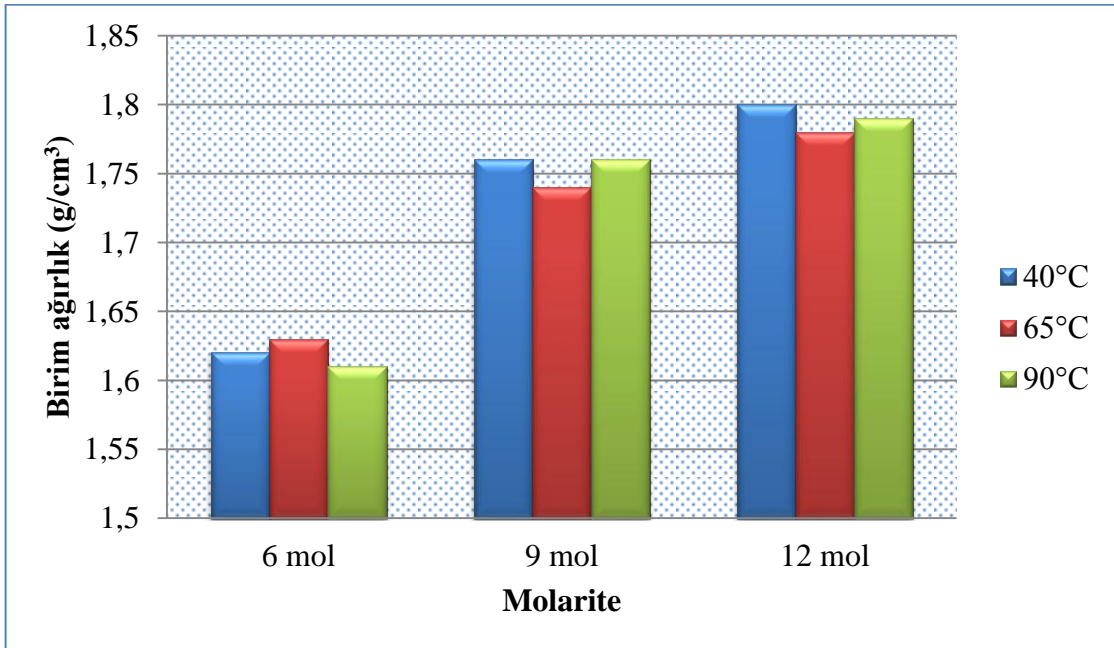
2 gün sıcaklığa maruz kalmış numune için birim ağırlık deney sonuçları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Birim ağırlık deney sonuçları

Şekil 3.2 incelendiğinde, 6 ve 9 molariteye sahip 2 gün süresince sıcaklığa maruz kalmış numunelerin birim ağırlık değerleri aktivasyon sıcaklığındaki artışa bağlı olarak azalmaktadır. Sıcaklıktaki artışa bağlı olarak numune bünyesindeki su buharlaşmış olduğu ve böylece numunelerin birim ağırlık değerlerin de azalma olduğu söylenebilir.

4 gün süresince belirlenen sıcaklıklarda aktive edilmiş numuneler üzerinde tespit edilen birim ağırlık deney sonuçları Şekil 3.3.’de verilmiştir.



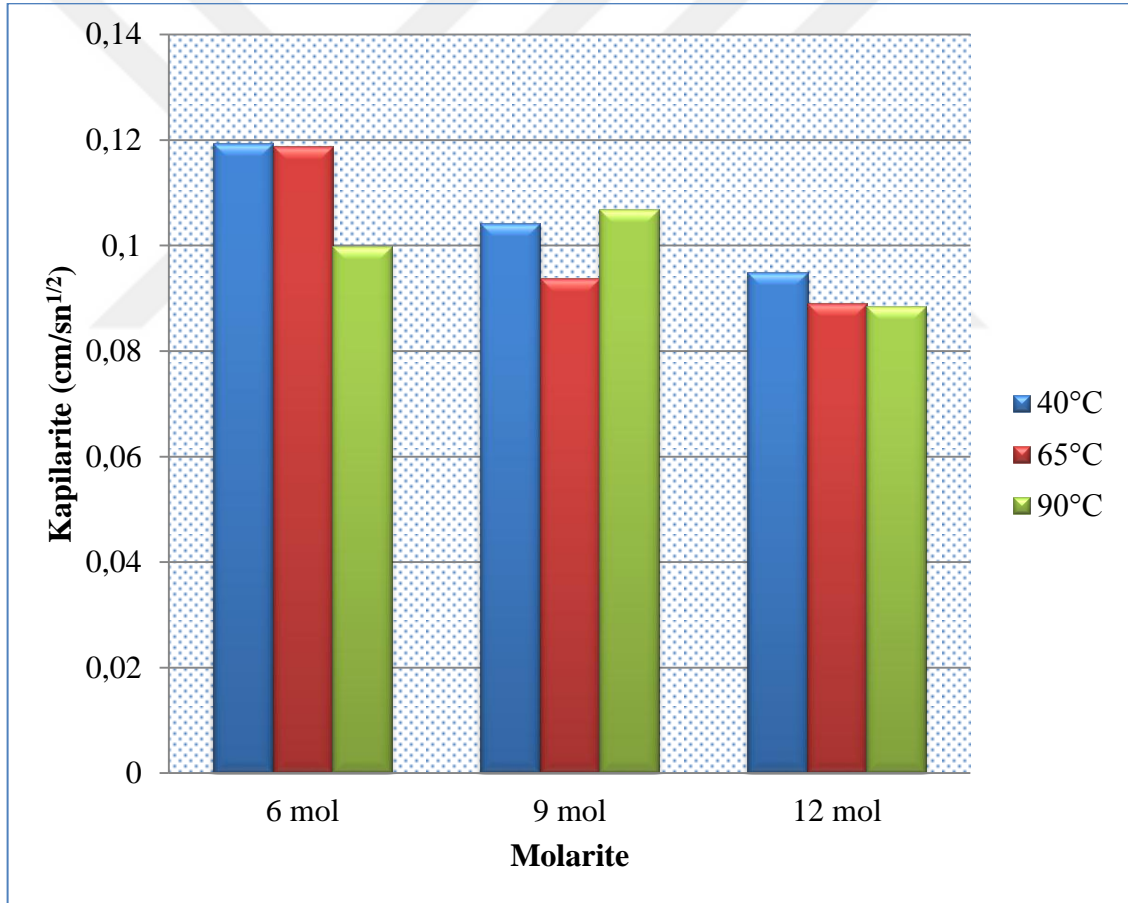
Şekil 3.3. Birim ağırlık deney sonuçları

4 gün süresince 40, 65 ve 90°C aktivasyon sıcaklığına maruz kalmış numunelerin birim ağırlık değerleri incelendiğinde, kullanılan aktivatörün mol değerlerindeki artışa bağlı olarak birim ağırlık değerleri de artış göstermiştir.

Birim ağırlık deneyi sonucu genel olarak elde edilen veriler şöyledir; 6 mol numunelerinde en yüksek birim ağırlık değeri 1,63 g/cm³ ile 65°C'de etüvlenmiş numunede elde edilirken 9 ve 12 mollük numunelerde en yüksek birim ağırlık değerleri sırasıyla 1,76 ve 1,80 değerleri ile 40°C'de etüvlenen numunede elde edilmiştir.

3.4. KAPİLARİTE DENEY SONUÇLARI

1 gün sıcaklığa maruz kalmış numunelere ait kapilarite katsayısı deney sonuçları Şekil 3.4'de verilmiştir.



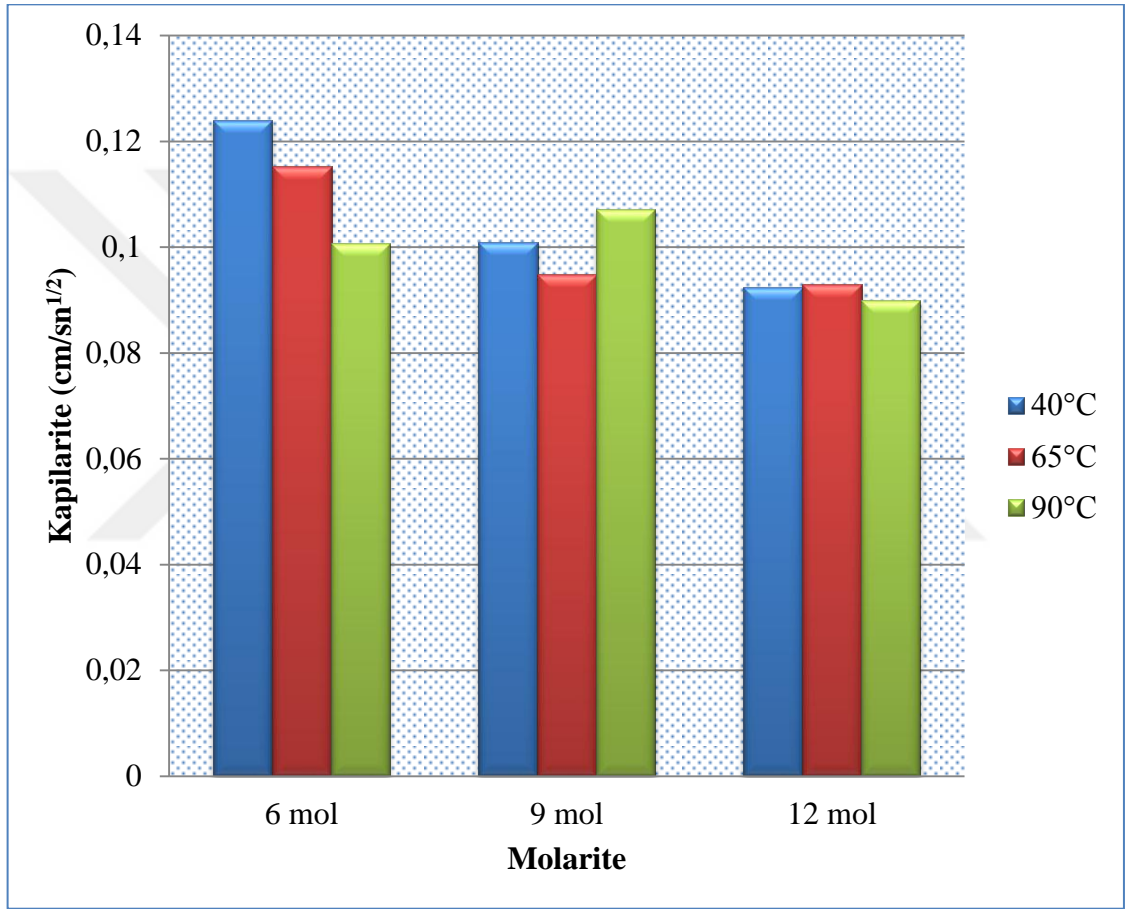
Şekil 3.4. Kapilarite deney sonuçları

Bir gün süresince sıcaklık ile aktive edilmiş numuneler incelendiğinde, sıcaklıktaki artışa bağlı olarak kapilarite katsayısı değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Alkali

aktivatör karışımının mol değerindeki artışa bağlı olarak da numunelerin kapilarite katsayısı değerleri azalma göstermiştir.

En yüksek kapilarite katsayısı değerleri 6 mol oranındaki molariteye sahip numunelerinden elde edilirken en düşük kapilarite katsayısı değerleri ise 12 molluk numunelerden elde edilmiştir.

2 gün sıcaklığa maruz kalmış numunelere ait kapilarite katsayısı deney sonuçları Şekil 3.5.'de verilmiştir.

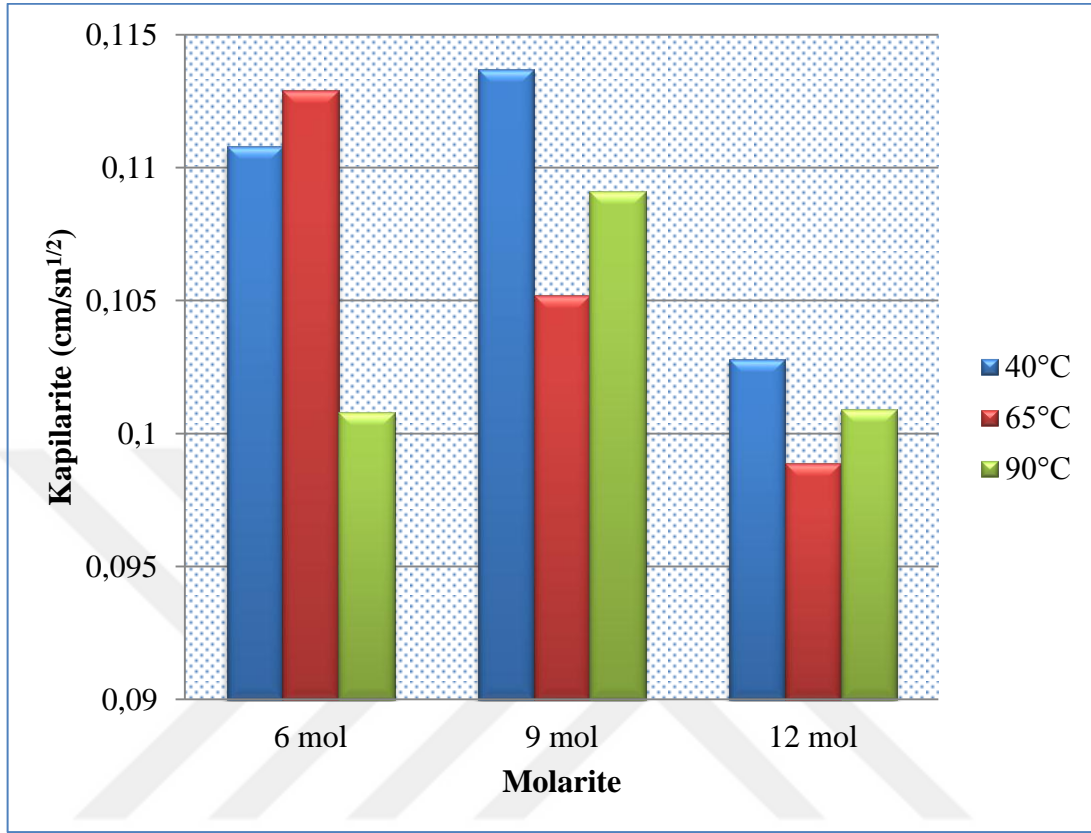


Şekil 3.5. Kapilarite deney sonuçları

1 gün sıcaklık aktivasyonuna benzer şekilde 2 gün süresince etüvde sıcaklık uygulanan numunelerin kapilarite değerleri sıcaklık ve mol değerlerindeki artışa bağlı olarak azalma gösterdiği gözlenmiştir.

Sıcaklık ve mol değerlerindeki artışa bağlı olarak benzer şekilde, en yüksek kapilarite katsayısı değerleri 6 mol molariteye sahip numunelerinden elde edilirken en düşük kapilarite katsayısı değerleri 12 molluk numunelerden elde edilmiştir.

4 gün sıcaklığa maruz kalmış 6, 9 ve 12 molluk aktivatör madde kullanılarak ve 40, 65, 90°C aktivasyon sıcaklığında oluşturulan numunelere ait kapilarite katsayısı deney sonuçları Şekil 3.6. 'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Kapilarite deney sonuçları

4 gün sıcaklığa maruz kalmış numune için kapilarite deney sonuçları incelendiğinde, 1 ve 2 günlük kür sürelerinde elde edilen değerlere göre daha düşük kapilarite değerleri elde edilirken, mol ve sıcaklık değişimine göre deney sonuçlarının değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Mol değerindeki artışa göre kapilarite katsayısı değerinde meydana gelen azalmanın 65°C'de etüvlenen numunelerde daha net gözlemlendiği tespit edilmiştir.

Deneyde kullanılan numuneler incelendiğinde, 6 mol değeri referans alındığında, mol değerinin 9 ve 12'ye çıkması durumunda numunelerin kapilarite katsayısı değerleri sırasıyla %6,82 ve %11,24 oranında azalma göstermiştir.

3.5. ULTRASES GEÇİŞ HIZI DENEY SONUÇLARI

Ultras ses geçiş hızı deneyi için numuneler ayrı ayrı deneye tabii tutulmuştur. Deney sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları

Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (km/sn)				
°C	Gün	6 Mol	9 Mol	12 Mol
40°C	1.	2,52	1,91	1,85
	2.	2,34	2,08	2,23
	4.	2,47	2,31	2,84
65°C	1.	2,52	2,50	1,78
	2.	2,00	2,50	2,47
	4.	2,25	2,51	2,41
90°C	1.	2,21	2,31	2,94
	2.	2,46	2,21	1,93
	4.	2,14	2,06	2,11

Çizelgede belirtilen (Çizelge 3.2.) sonuçlar değerlendirildiğinde mol değerindeki artışa bağlı olarak ultrases geçiş hızı değerleri azalma göstermiştir. Bu durum mol değerindeki artışın numunelerin boşluk oranlarında azalmaya neden olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Çizelgede belirtilen değerlerden yola çıkılarak değerlendirme yapıldığında en yüksek sonuca 90°C de ve 12 molaritedeki numunelerde rastlanmıştır (2,94 km/sn). En düşük değer ise 65°C ve 12 molaritedeki numunesinden elde edildiği tespit edildiği gözlenmektedir (1,78 km/sn).

3.6. BASINÇ DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI

Basınç dayanımı deneyi yapılan numuneler belirtilmiş olan sıcaklık ve molaritelerde hazırlanmış olup ayrı ayrı deneye tabii tutulmuştur. Deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3'de verilmiştir.

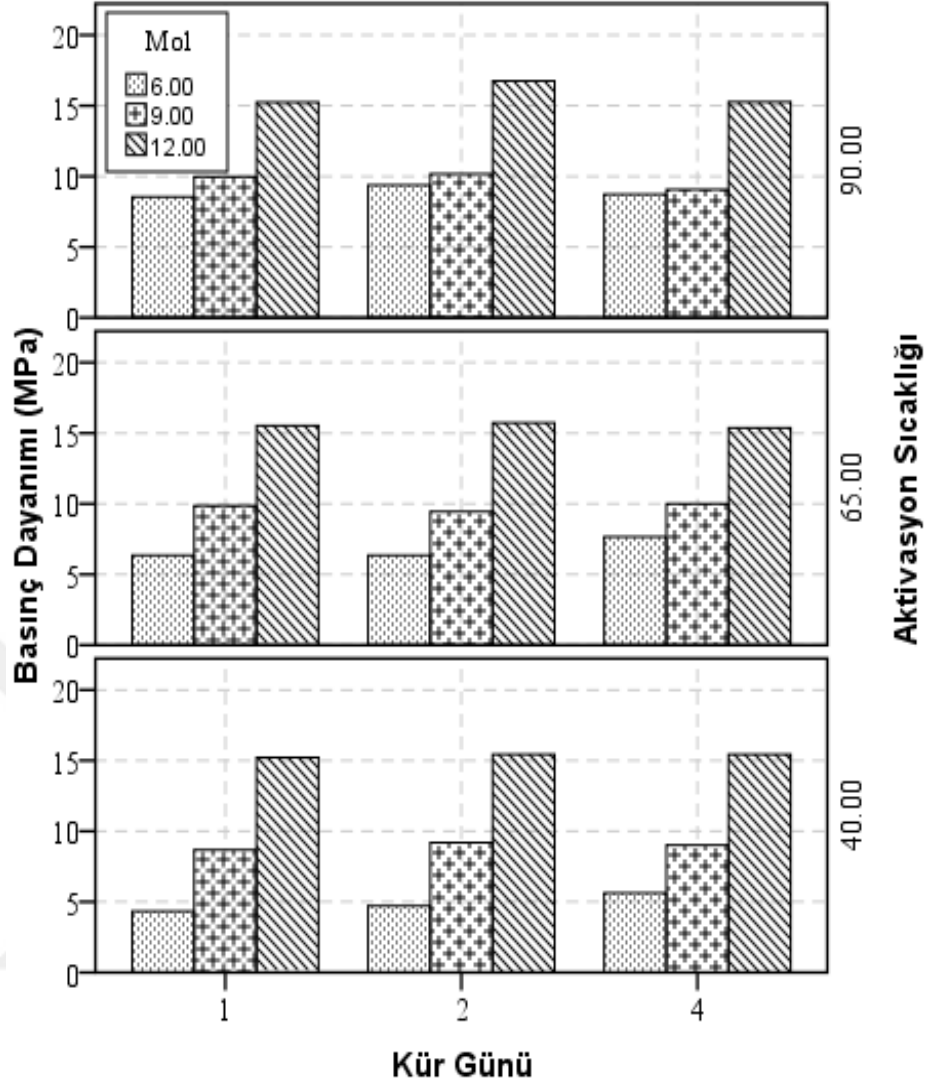
Çizelge 3.3. Basınç dayanımı deneyi sonuçları

		Basınç Dayanımı (MPa)											
		6 Mol				9 Mol				12 Mol			
°C	Gün	1	2	3	Ort.	1	2	3	Ort.	1	2	3	Ort.
40°C	1.	4,32	4,48	4,20	4,33	8,48	9,24	8,28	8,66	15,20	15,40	15,04	15,21
	2.	4,96	4,28	4,92	4,72	8,76	9,40	9,44	9,20	15,64	15,32	15,36	15,44
	4.	5,88	5,72	5,24	5,61	9,76	8,48	8,80	9,01	14,88	15,92	15,52	15,44
65°C	1.	6,44	6,08	6,56	6,36	9,36	9,80	10,44	9,86	16,12	14,96	15,48	15,52
	2.	6,80	5,76	6,48	6,34	9,04	9,20	10,08	9,44	15,96	15,40	15,84	15,73
	4.	7,20	8,04	7,72	7,65	10,12	9,92	9,96	10,00	15,84	14,68	15,60	15,37
90°C	1.	8,88	8,08	8,68	8,54	10,24	10,12	9,56	9,97	15,00	15,08	15,68	15,25
	2.	8,52	9,40	10,24	9,38	10,68	9,88	9,96	10,17	16,32	16,84	17,12	16,76
	4.	8,72	8,56	8,88	3,72	8,92	8,60	9,64	9,05	14,92	15,56	15,32	15,26

Genel olarak her kür sıcaklığında molarite değerlerindeki artışa bağlı olarak numunelerin basınç dayanımları artış göstermiştir. 6 ve 9 molluk numunelerin basınç dayanımları kür gününe bağlı olarak artış eğilimi göstermektedir.

6 molluk karışımlarda sıcaklığın artması ile basınç dayanımı değerleri artış göstermiştir. Ayrıca basınç dayanımındaki değişimin 12 molluk numunelerde kısıtlı kaldığı ve sıcaklık ile kür günündeki artışın numunelerin basınç dayanımı değerlerini daha az etkilediği gözlenmiştir.

(Şekil 3.7.)’de kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molariteye göre basınç dayanımındaki değişim ifade edilmiştir.



Şekil 3.7. Basınç dayanımı değerlerinin kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molariteye göre değişimi.

Şekil (3.7.)’den görüldüğü üzere en yüksek basınç dayanımı değerine 90°C de ve 12 molaritedeki 2 gün süresince kürlenmiş numunelerde ulaşılmıştır (16,76 MPa). En düşük basınç dayanımı değeri ise 90°C de ve 6 molaritedeki 4 günlük geopolimer numunesinden elde edilmiştir (3,72 MPa).

Basınç dayanımı ile, kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molarite arasındaki ilişkiyi modellemek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Çoklu regresyon modelinde, Eşitlik 1’deki denklem kullanılmıştır.

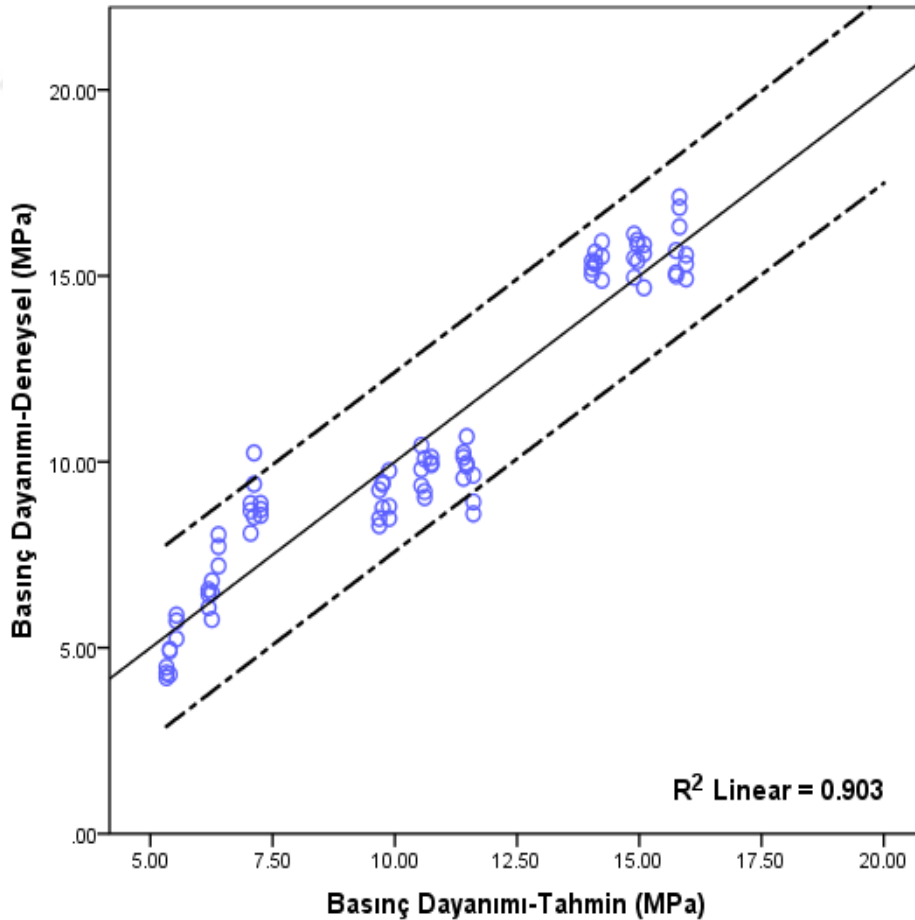
$$BD = a + b \times AS + c \times KG + d \times Mol \quad (1)$$

Burada; BD, basınç dayanımı (MPa), KG, kür günü, Mol, molarite, AS, Aktivasyon sıcaklığı (°C) ve a, b, c, d ise model sabitleridir. Çoklu doğrusal regresyon analizi model sonuçları Çizelge 3.4.’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çoklu doğrusal regresyon analizi model özeti

Regresyon İstatistikleri					
Pearson Korelasyon Katsayısı (R)	0,950				
Regresyon Katsayısı (R ²)	0,903				
Düzeltilmiş R ²	0,899				
Tahminin Standart Hatası	1,22003				
Varyans Analizi					
Varyansın Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Testi	Anlamlılık Düzeyi
Regresyon	3	1062,922	354,307	238,035	0,0001
Rezidüel	77	114,612	1,488		
Toplam	80	1177,534			
Regresyon Analizi					
Kaynak	Katsayılar	Standart Hata	T İstatistiği	Anlamlılık Düzeyi	
a	-4,817	0,719	-6,699	0,0001	
b	0,034	0,007	5,184	0,0001	
c	0,068	0,109	0,623	0,535	
d	1,450	0,055	26,208	0,0001	

Regresyon modeli ardından tahmin edilen basınç dayanımları ile deneysel basınç dayanımı deney sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Deneysel ve tahmini basınç dayanımları arasındaki ilişki

Sonuç olarak çoklu doğrusal regresyon analizi doğrultusunda, Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak elde edilen geopolimer harçların basınç dayanımlarının kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molarite değerleri ile yüksek derecede ilişkili olduğu ve elde edilen regresyon modelinin yüksek korelasyona sahip olduğu ($R=0,950$) tespit edilmiştir.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Yapılan deney ve analizler sonucu olarak elde edilen veriler genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Na_2SiO_3 (sodyum silikat- sıvı halde) ve NaOH (sodyum hidroksit- katı halde) Kimyasal katkı maddelerinin belirtilen molarlarda birlikte kullanılması sonucu tepkime oluşturup bağlayıcılık kazanarak geopolimer oluşumunun sağlandığı tespit edilmiştir.
- Karışımlarda aktivatör malzemelerinin mol değerlerinin artması ile yayılma çapı değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir.
- Karışımların molarite miktarlarındaki artışa bağlı olarak priz başlangıç ve priz sona erme süreleri azalmıştır.
- Tüm karışımların yoğunluklarının 1800 kg/m^3 değerinden düşük olduğu gözlenmiştir.
- Karışımların bir günlük birim ağırlık değerlerinin molarite ve sıcaklık değerlerindeki artışa bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir.
- Tüm kür günlerinde en düşük kapilarite değerleri 12 mol aktivatör kullanılan numunelerden elde edilmiştir.
- Ultrases geçiş hızı değerleri sıcaklık ve molar değerlerinin artmasına bağlı olarak artış göstermiştir.
- Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak, çimento kullanmaksızın 15 MPa'nın üzerinde geopolimer harç karışımlarının elde edildiği gözlenmiştir.
- Genel olarak molaritenin artması ile geopolimer numunelerin basınç dayanımları artış göstermiştir. En yüksek ve en düşük basınç dayanımı değerleri sırasıyla en yüksek değere 90°C de ve 12 molaritedeki 2 gün numunelerinde, en düşük değere ise 90°C de 6 molaritedeki 4 günlük numunelerinden elde edilmiştir.
- Kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molarite değerleri kullanılarak geopolimer betonların basınç dayanımlarını tahmin etmek için kullanılan çoklu doğrusal regresyon analizi sonucunda basınç dayanımı değerlerinin yüksek korelasyon ile tahmin edilebildiği tespit edilmiştir.
- Sertleşmiş harç numunelerinin nemli veya sulu ortamlarda bekletildiğinde yüzeylerinde beyaz renkte kabarmış leke oluştuğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki öneriler sıralanabilir:

- Elazığ ferrokrom cürufunun kullanılacağı geopolimer karışımlarında uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolanların birlikte kullanımının fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.
- Silis kumu dışında dane çapı farklı olan agregaların kullanılması araştırmacılar tarafından çalışılabilir,
- Numunelerin daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun sürelerde bekletilmesinin olumlu etki sağlayacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Akman M.S., Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi, TMH - *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426 - 2003/4 (2003) 32-33.
- Allahverdi A., Kani E.N., Yazdanipour M., Effects Of Blast-Furnace Slag On Natural Pozzolan-Based Geopolymer Cement. , *Ceramics-Silikaty*, 55(1) (2011) 68–78.
- Alpaslan L., Atık Lastik Ve Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yüzey Özelliklerinin Çimento Harçlarının Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Düzce Üniversitesi, (2012).
- Anonim, <https://M.kutluhanErgin.wordpress.com/2014/11/21/geopolimer-beton/>, (Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2014a).
- Anonim, http://kisi.deu.edu.tr/burak.felekoglu/08_geopolimer.pdf, (Erişim Tarihi: 13 Mart 2014b).
- Anonim, <https://plus.google.com>, *ASKimya Sanayi/posts /9zLgq8oXBKZ#+ ASKimya Sanayi /posts/9zLgq8oXBKZ*, (Erişim Tarihi: 28 Mart 2014c).
- Anonim, <https://tr.wikipedia.org/wiki/>, *Sodyum hidroksit*, (Erişim Tarihi: 28 Mart 2014d).
- Anonim, http://tr.etikrom.com/uploads/pdf/etikrom_cevre_durum_raporu_2012.pdf, *etikrom cevre durum raporu*, (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2015a).
- Anonim, <http://www.limakbatiçimento.com>, (Erişim Tarihi: 8 Nisan 2015b).
- Binici H., Eken M., Aksoğan O., Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik Ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Toros Üniversitesi, *İnşaat Mühendisliği Bölümü*, (2012).
- Castel A., Foster S. J., Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement, *Materials and Design* 56 (2014) 833–841.
- Canbaz M., Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçların Özellikleri, Dumlupınar Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Doktora Tezi*, Tez No: 199133, Subat (2007).

- Embong R., Kusbiantoro A., Shafiq N., Nuruddin M. F., Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and water-absorptive aggregate, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 816-822.
- Erdoğan A., Gök M.S., Kocabaş F., Ferrokrom Cürufunun Mikro Ölçekli Abrasyon Testi İle Aşındırma Özelliklerinin Araştırılması, *Mühendislik ve Teknolojik Bilimler Dergisi*, (2014).
- Erdoğan T.S., Erdoğan T.Y., Kimyasal Katkı Maddeleri ve Tarihi Geçmişleri, II. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, (2007) 23-34.
- Erdoğan S.T., Öğütülmüş Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Harç ve Hamur Yapımı. 8. *Ulusal Beton Kongresi proceedings*, İzmir, Türkiye, pp. (2011) 631-640.
- Erdoğan T.Y., Beton, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ.*, Ankara, (2010).
- İlkkentapar S., Kimyasal Katkı İçeren Alkali İle Active Edilmiş Cüruf Harçlarının Farklı Kür Koşulları Altındaki Özellikleri, Erciyes Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Temmuz (2013).
- Koluçolak M., Yüksek Fırın Cürufu Ve Bazaltik Pomza Katkılı Beton Boruların Tepe Yüğü Dayanımları Ve Durabilite Özellikleri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, (2012).
- Karakoç M.B., Türkmen İ., Maraş M.M., Kantarcı F., Demirbag R., Toprak M.U., Ferro Krom Cürufu İçeren Geopolimer Harçların Ve Pastaların Mekanik Özellikleri İle Piriz Süreleri Tayini, İnönü üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, (2014).
- Kantarcı F., Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, İnönü Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Tez No:341550, (2013).
- Karataş S., Beton Harcının Basma Ve Eğme Davranışlarına Ferro-Krom Cüruf Katkısının Etkisi, Fırat Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Tez No:232098, (2008).

- Luukkonen T., Sarkkinen M., Kempainen K., Lassi J. R.U., Metakaolin geopolymer characterization and application for ammonium removal from model solutions and landfill leachate, *Applied Clay Science* 119 (2016) 266–276.
- Lind B.B., Fallman A. M., Larsson L. B., “Environmental Impact of Ferrochrome Slag in RoadConstruction”, *Waste Management*, 21 (2001) 255-264.
- Mane S., Jadhav H.S., Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete Under High Temperature, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 2, Issue 12, December, (2012) 384-390.
- Maraş M.M., Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması, İnönü Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Tez No:341546, Temmuz, (2013).
- Özkan Ş., Kimyasal Etkilere Dayanıklı Çimento Üretimi Üzerine Bir Araştırma, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2009).
- Öner M., Yüksek Fırın Curuflarının Çimento Üretiminde Kullanımında Öğütmeyle İlgili Parametrelerin Etkilerinin Belirlenmesi, Hacettepe niversitesi, *M.hendislik Fak. Maden M.hendisliği Bölümü*, Beytepe, Ankara, (2001).
- Perna I., Hanzlıcek T., The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influenceof blast-furnace-slag addition and the mixing method, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 1150-1155.
- Shi C., Roy D., Krivenko P., Alkali-Activated Cements and Concretes, *CRC Press*, 392, ISBN 0203390679, 9780203390672, (2006).
- Toprak M.U., Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı:2, Doktora Tezi*, Tez No: 285352, Nisan, (2011).
- TS EN 1097-2, ASTM C 131. Los Angeles Aşındırma test cihazı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2000).
- TS EN 1008, Beton Karma Suyu Standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2003).

- TS EN 12504-4, Beton Deneyle-Bölüm 4:Ultrases Geçiş Hızının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2004).
- TS EN 3526, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık Ve Su Emme Oranı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- TS EN 3529, (ASTM C 29), Beton Agregalarının Sıkışık ve gevşek birim ağırlık tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (1980).
- TS EN-197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002) 3, 5, 8-10.
- TS EN-196-1, 1.Baskı, Çimento Deney Metotları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- TS EN-196-3 Çimento Deney Metodları-Bölüm 3: Priz süresi ve genişleme tayini, *Türk Standartları Enstitüsü (TSE)*, Ankara, (2010).
- Yang T., Yao X., Zhang Z., Geopolymer prepared with high-magnesium nickel slag: Characterization of properties and microstructure. *Construction and Building Materials*, 59 (2014) 188–194.
- Yazıcıoğlu S., Gönen T.ve Çobanoğlu Ö. C., Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi, Fırat Üniversitesi, *Fen ve Müh. Bil. Der.*, 17 (4) (2005) 681-685.
- Yazıcıoğlu S., Arıcı E., Gönen T., Elazığ Ferrokrom Curufunun Betondaki Karbonatlaşmaya Etkisi, Fırat Üniversitesi, *Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü*, Elazığ, (2002).
- Vapur H., Top S., Teymen A., Turkmenoğlu M., Elazığ Ferrokrom Tesisi Curuflarının Agrega Özelliklerinin Arastırılması, Çukurova Üniversitesi, *Muhendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Haziran, 28(1) (2013) 77-88.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MAHMUT, Oğuz
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 20.09.1990, Elazığ
Telefon : 0 (551) 147 17 10
Faks : -
E-posta : oguz-mahmut@hotmail.com

Eğitim

Derece Eğitim Birimi Mezuniyet tarihi

Lisans Fırat Üniversitesi -Teknik Eğitim Fakültesi -Yapı Öğretmenliği Bölümü **2012**
Lise Elazığ Atatürk Lisesi **2007**

İş Deneyimi

Yabancı Dil

İngilizce (ÜDS/KPDS/TOEFL) : ----

Yayınlar; (Oğuz MAHMUT)

Mahmut O., Emiroğlu M., Elazığ Ferrokrom Cürufunun Alakli Aktive Edilmiş Harç Üretiminde Kullanım Potansiyelinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, makale, Mart 28(2), **(2016)**.
1-13