

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALSİNE EDİLMİŞ DOĞAL PUZOLAN ESASLI GEOPOLİMER HARÇ GELİŞTİRİLMESİ

Halil İbrahim BAŞÇIK

Danışman: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2019

Halil İbrahim BAŞÇIK tarafından **Yüksek Lisans tezi** olarak sunulan **“KALSİNE EDİLMİŞ DOĞAL PUZOLAN ESASLI GEOPOLİMER HARÇ GELİŞTİRİLMESİ”** başlıklı bu çalışma, E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 05/09/2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday jüri tarafından değerlendirilerek oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı

:Prof. Dr. Şemsi YAZICI

Raportör Üye

:Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Üye

:Dr. Öğr. Üyesi Murat TUYAN

.....

.....

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“KALSİNE EDİLMİŞ DOĞAL PUZOLAN ESASLI GEOPOLİMER HARÇ GELİŞTİRİLMESİ”** başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, döküman, bilgi ve belgeleri bizzat bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

05/09/2019

Halil İbrahim BAŞÇIK

ÖZET**KALSİNE EDİLMİŞ DOĞAL PUZOLAN ESASLI
GEOPOLİMER HARÇ GELİŞTİRİLMESİ**

BAŞÇIK, Halil İbrahim

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Eylül 2019, 69 sayfa

Bu tezde, doğal puzolan olan tras ve zeolit in belirli sıcaklık ve sürede kalsine edilip kristal yapıdan amorf yapıya geçmesi sağlanmıştır. Üretilen geopolimer harçların basınç dayanımları ve kalsinasyon için gereken enerji sarfıyatı dikkate alınarak trasın kullanılmasına karar verilmiştir. Tras için en uygun kalsinasyon sıcaklığının 550°C, kalsinasyon süresinin de 6 saat olduğu saptanmıştır. Traslı geopolimer harçlarında en uygun M_s (SiO_2/Na_2O) oranı 1.6, en uygun kür koşulunun ise 90°C’de 3 gün olduğu belirlenmiştir. Optimum kalsinasyon sıcaklık ve süresi, optimum alkali konsantrasyonu ve optimum kür koşulunda hazırlanan traslı geopolimer harç, aynı basınç dayanımında olan geleneksel çimento harcı ile kıyaslanmıştır.

Hazırlanan karışımların taze hal özelliklerinden yayılma çapı ve birim hacim ağırlığı, sertleşmiş hal özelliklerinden basınç ve eğilme dayanımı, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık direnci, klor ion geçirimsizliği, kapiler su emme kapasitesi ve ultrases geçiş hızı incelenmiştir.

Kalsinasyon işleminin dayanımları iki kat arttırdığı görülmüştür. Geopolimer harçlar, çimento harcına kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı, daha fazla yüksek sıcaklık ve donma-çözülme direnci göstermiştir. Ancak, geopolimer harcın işlenebilirliğinin düşük olması ve kalsinasyon işleminin zorluğu bu karışımın olumsuz özelliği olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tras, zeolit, kalsinasyon, geopolimer harç, taze hal, mekanik ve durabilite özellikleri



ABSTRACT**DEVELOPMENT OF CALCINED NATURAL
POZZOLAN-BASED GEOPOLYMER MORTAR**

BAŞÇIK, Halil İbrahim

MSc. in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

September 2019, 69 pages

In this thesis, two natural pozzolans (zeolite and trass) were calcined at different temperatures in different periods to transform from their crystal structure to amorphous structure. Regarding the compressive strength of the geopolymer mortar and energy consumption required for calcination, trass was selected to be used in this thesis. The optimum calcination temperature and duration for trass were determined as 550°C and 6 hours, respectively. The most appropriate M_s (SiO_2/Na_2O) ratio and curing period for geopolymer mortar were found to be 1.6 as well as 90°C and 3 days, respectively.

The calcined trass-bearing geopolymer mortars containing optimum amount of alkaline solution were prepared and cured at optimum conditions. The fresh and hardened properties of geopolymer mortar were compared with those of a conventional cement mortar having same strength as that of the geopolymer.

The flow and unit weight of the fresh mixtures as well as compressive and flexural strength, freezing-thawing and high-temperature resistance, chloride ion penetration depth, sorptivity and ultrasound pulse velocity of the mortar mixtures were investigated.

According to the experimental results, calcination process increased the compressive strength of the geopolymer mortar mixtures up to around 2 times. It was found that the geopolymer mortar was superior to the conventional mortar from freezing-thawing, high-temperature resistance and flexural strength view points. However, low workability and difficulty of preparation of these mixtures are the main deficiencies of the geopolymer mortar.

Keywords: Trass, zeolite, calcination, geopolymer mortar, fresh state, mechanical and durability properties.



ÖNSÖZ

Küresel ısınma içinde yaşadığımız dünyayı ve hayatı çarpıcı şekilde tehdit etmektedir ve küresel ısınma etkisini son birkaç on yıldır daha fazla göstermektedir. Sadece çimento üretiminden kaynaklı doğaya salınan CO₂ miktarı yaklaşık %5 civarındadır. Bu oranı düşürmek için çimentoya alternatif bir yapı malzemesi geliştirmek artık kaçınılmaz olmuştur.

Bu tez çalışması esnasında, elimizde hazır bir bağlayıcı ürün olmadığı için baştan sona zahmetli bir süreç beni bekliyordu. Malzemenin temini, öğütülmesi, elenmesi, kalsine edilmesi, harç haline getirilmesi ve çeşitli özelliklerine bakılması fiziki zorluğun yanında zamansal bir zorluk da yarattı diyebilirim. Deneyisel kısım sonunda anlamlı bir iş yapmamız, geride yaşadığım tüm zorlukları bana unutturdu. Bu tez sonrasında daha ileri çalışmaları gerçekleştirmek için şimdiden sabırsızlanıyorum

İZMİR

05/09/2019

Halil İbrahim BAŞÇIK



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	<i>vii</i>
ABSTRACT	<i>ix</i>
TEŞEKKÜR	<i>xi</i>
ŞEKİLLER DİZİNİ	<i>xvii</i>
TABLolar DİZİNİ.....	<i>xx</i>
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Geopolimer Bağlayıcı Sistemler.....	3
2.1.1. Geopolimerin tanımı ve isimlendirmesi	3
2.1.2. Geopolimerin tarihsel gelişimi	5
2.1.2.1. Türkiye’de geopolimer üzerine yapılan çalışmalar	6
2.1.3. Geopolimerizasyon mekanizması.....	6
2.1.4. Geopolimer avantaj ve dezavantajları	14
2.1.5. Geopolimer kullanım alanları	14
2.2. Geopolimer Bileşiminde Kullanılan Malzemeler	17
2.2.1. Bağlayıcı toz malzemeler	17
2.2.1.1. Tras	17
2.2.2. Alkali aktivatörler	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.2.2.1. Sodyum hidroksit	18
2.2.2.2. Sodyum silikat.....	19
2.3. Geopolimer Bağlayıcıların Mekanik ve Durabilite Özellikleri.....	19
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	23
3.1. Amaç	23
3.2. Kapsam.....	23
3.3. Deney Programı	24
3.4 Deneyde Kullanılan Malzemeler	24
3.4.1 Bağlayıcı toz malzemeler.....	24
3.4.2. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat.....	25
3.4.3. Agrega.....	26
3.5. Yöntem.....	26
3.5.1 Karışımların hazırlanması	26
3.6. Taze ve Sertleşmiş Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler	28
3.6.1. Yayılma deneyi	28
3.6.2. Birim hacim ağırlık deneyi	29
3.6.3. Tek eksenli basınç deneyi	30
3.6.4. Eğilme dayanımı deneyi.....	30
3.6.5. Ultrases geçirgenlik hızı deneyi.....	30

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.6.6. Kılcal yolla su emme deneyi	31
3.6.7. Hızlı klor iyon geçirimsilik deneyi	33
3.6.8 Yüksek sıcaklık direnci deneyi.....	33
3.6.9 Donma çözülme deneyi	34
3.7. Hazırlanan Karışımlar.....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
4.1. Doğal Puzolan Esaslı Geopolimer Harç Geliştirilmesi	37
4.1.1. Doğal puzolanın seçimi	37
4.1.2. Optimum kalsine sıcaklığı ve süresinin belirlenmesi	39
4.1.3. Optimum alkali aktivatör çözeltisin belirlenmesi.....	40
4.1.4. Optimum kür koşulunun belirlenmesi	41
4.1.5. Tras ile zeolitin priz süresi.....	42
4.2. Tras Esaslı Geopolimer Harç ile Çimento Harcının Taze Hal, Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Karşılaştırılması	44
4.2.1. Yayılma deneyi sonuçları	44
4.2.2. Birim hacim ağırlık deneyi sonuçları	45
4.2.3. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları	47
4.2.4. Kapiler su emme deneyi sonuçları.....	47
4.2.5. Ultrases geçirgenlik (UPV) deneyi sonuçları	49
4.2.6. Hızlı klorür iyonu geçirgenlik deneyi sonuçları	50

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2.7. Yüksek sıcaklık deneyi sonuçları.....	51
4.2.8. Donma-çözülme deneyi sonuçları.....	53
5. SONUÇLAR	55
6. ÖNERİLER.....	57
7. KAYNAKLAR	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Geopolimer ve zeolitin Si/Al oranına bağlı olarak kristal yapıya geçme sıcaklığı (Davidovits, 1991)	4
Şekil 2.2. Tipik geopolimer sentez süreci.....	5
Şekil 2.3. Alkali ortamda katı parçaların çözülmesi sırasında açığa çıkan ani ısı(I.pik) ve bu ısının aktive edilmiş çözeltinin pH'ı ile ilişkisi(Zhang, 2012).	8
Şekil 2.4. Geopolimer oluşum süreci (Duxson et al., 2007a).....	10
Şekil 2.5. Tepkimemiş katı parçacıklara sahip bir geopolimerin SEM mikrografı (Duxson, 2006).	11
Şekil 2.6. Mikrodalga (MW) ve ısıl kürlemenin farklı NaOH içeren karışımların dayanımına etkisi (Somaratna, 2010)	21
Şekil 3.1. Yüksek sıcaklık fırını	27
Şekil 3.2. Yayılma tablası düzeneği	29
Şekil 3.3. Ultrases geçiş hızı deney cihazı.....	31
Şekil 3.4. Kılcal su emme deney düzeneği	32
Şekil 3.5. Kılcal su emme deneyine tabi tutulan numuneler	32
Şekil 3.6. Hızlı klorür iyonu geçirimsizlik deney cihazı.....	33
Şekil 3.7. Yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan numuneler.....	34
Şekil 3.8. Donma-çözülme deneyine tabi tutulan numuneler.....	35
Şekil 4.1. Zeolit ve trasın kalsinasyonunun geopolimer harç dayanımına etkisi...	39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sayfa

Şekil 4.2. Kalsinasyon sıcaklık ve süresinin traslı geopolimer harcı basınç dayanımına etkisi	41
Şekil 4.3. M_s oranının tras içeren geopolimer harçlarının basınç dayanımına etkisi	42
Şekil 4.4. Kür sıcaklık ve süresinin traslı geopolimer harcın basınç dayanımına etkisi..	43
Şekil 4.5. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın yayılma çapları karşılaştırması.....	46
Şekil 4.6. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın birim hacim ağırlığı.....	47
Şekil 4.7. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın eğilme dayanımı ve eğilme/basınç dayanım oranı	48
Şekil 4.8. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın kılcal yolla su emme hızları	50
Şekil 4.9. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın ultrases geçiş hız	51
Şekil 4.10. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın hızlı klorür iyonu geçirimsizliği	52
Şekil 4.11. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın yüksek sıcaklık direnci.....	53
Şekil 4.12. 900°C sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç (üstte) ve çimento harç numuneleri (altta).....	53

Şekil 4.13. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın donma-çözülme direnci	54
--	----



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Si:Al oranına bağlı geopolimer malzemelerin uygulamaları (Davidovits, 1999).....	15
Tablo 2.2. Geopolimer Uygulamaları (Sanjay Kumar).....	16
Tablo 3.1. Bağlayıcı toz malzemelerin kimyasal analizleri	25
Tablo 3.2. Bağlayıcı toz malzemelerin fiziksel özellikleri	25
Tablo 3.3. Kullanılan ince agreganın elek analizi sonuçları	26
Tablo 3.4. Kullanılan ince agreganın fiziksel özellikleri	26
Tablo 3.5. Tez kapsamında hazırlanan numuneler ve uygulanan deneyler	36
Tablo 3.6. 1 dm ³ geopolimer harçların karışım oranları.....	36
Tablo 4.1. Farklı puzolanların sabit parametler altında kalsinasyon sıcaklığı ve süresi incelenen geopolimer harç karışımlarının basınç dayanımı	39
Tablo 4.2. Karışımların priz süresi sonuçları	44
Tablo 4.3 : Harç karışımlarında dikkate alınan parametreler.....	45



1.GİRİŞ

Doğada her yönden avantajlı veya dezavantajlı sayılacak malzeme bulunmamaktadır. Bazı yönlerden avantajlı olan malzeme diğer yönlerden dezavantajlı olabilmektedir. Çimento da bu malzemelerden biridir. Çok geniş kullanım alanına sahip olan çimentonun, medeniyetin gelişmesinde katkısı göz ardı edilemez. Çok yüksek oranda çimentonun kullanımı son yıllarda birçok problem meydana getirmiştir. 2000’li yıllardan sonra etkisini çarpıcı şekilde gösteren küresel ısınma, içinde yaşadığımız dünyayı ve hayatı tehdit etmeye başlamıştır. Küresel ısınmanın en büyük sebeplerinden biri doğaya salınan CO₂ gazıdır. Sadece çimentodan kaynaklı doğaya salınan CO₂ miktarının yaklaşık %5 civarında olduğu belirtilmiştir (Kara vd., 2018).

Çimentoya alternatif bir bağlayıcı bulmak artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Çünkü çimentonun hammaddesi olan klinkerin üretiminde 1500°C’lere varan sıcaklık gerektiğinden enerji tüketimi çok fazla olmaktadır. Daha düşük sıcaklık ve sürelerde elde edilebilecek bir bağlayıcı doğaya daha az zarar demektir. Çimentonun bir bölümü yerine, doğada bulunan zeolit, kil ve tras gibi bazı maddeler kalsine edilip bağlayıcı olarak kullanılabilir. Bu maddeler uygun alkali çözeltileri ile birleştğinde bağlayıcı özellik gösterebilmektedir. Davidovits tarafından patenti alınan ve geopolimer olarak adlandırılan bu bağlayıcılar 1970’li yıllardan beri bilinmektedir.

Portland çimentolu sitemlere kıyasla, geopolimerlerin kimyasal etkiler ve yüksek sıcaklıklara daha dirençli olduğu, boyutsal kararlılıkların ise daha yüksek olduğu bilinmektedir. Ancak, geopolimer karışımların özelliklerinin çok değişken olması, bu karışımlar ile ilgili uluslararası kabul gören standartların bulunmaması, işlenebilirliklerinin az olması ve yüksek sıcaklıklarda kür gereksinimleri dezavantajlı yönleridir.

Bu tezde, doğal puzolan olan tras ve zeolitten geopolimer harç elde edilmesi konusu araştırılmıştır. Tez iki aşamadan oluşmaktadır:

1.Aşama: En uygun kalsinasyon sıcaklığı, kalsinasyon süresi, alkali aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve kür süresinin saptanması.

2.Aşama: 1. aşamada belirtilen en uygun parametler ile üretilen geopolimer harç karışımı taze hal, mekanik ve durabilite özelliklerinin aynı basınç dayanıma sahip imento harcı özellikleri ile kıyaslanması.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Geopolimer Bağlayıcı Sistemler

Çimento kaynaklı çevresel sorunlar son yıllarda hızla artmaktadır. Başta sera gazı salınımı, enerji tüketimi ve doğal hammaddenin kullanımı gibi sorunların ortaya çıkması, çimento endüstrisinde bir değişim ihtiyacı sinyali vermesine sebep olmuştur. Bu değişim çimento dışı bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesini tetiklemektedir. Geopolimer bağlayıcı sistemler, yukarıda bahsedilen çimento kaynaklı sorunları azaltmayı sağlayacak alternatif bağlayıcı sistemlerdir. Bu bölümde geopolimer bağlayıcı sistemlerin tanım ve isimlendirmesi, tarihsel gelişimi, kullanım alanları, avantaj-dezavantajları ve geopolimerizasyon mekanizması incelenmiştir.

2.1.1. Geopolimerin tanımı ve isimlendirmesi

Çok sayıda monomerin bir araya gelmesi sonucu büyük moleküllerin oluşturduğu malzemeye polimer adı verilir. Moleküllerin molekül yapısı, oluşan polimerin özelliklerini belirlemektedir (Bentur., Mindess et al., 1998). Doğal minerallerin kimyasal kompozisyonlarının ve kristal yapılarının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesi sonucu üretilen malzemelere "geopolimer" adı verilir. İnorganik polimer olarak da adlandırılan geopolimerler hem kristalin, hem de amorf yapıya olabilmektedir (Xu et al., 2000).

Geopolimerler, zeolite benzer polimerik Si-O-Al çerçeve sistemine sahiptir. Geopolimerleri zeolitten ayıran en önemli özelliği kristal yapı yerine amorf yapıya sahip olmasıdır. Nanometre ölçeğinde geopolimerlerin mikro-yapısında dağınık halde yüksek boşluk içeren alüminosilikat kümeleri gözlemlenmiştir. Bu kümelenmiş alüminosilikatların boyutları 5 ile 10 nanometre arasındadır (Pimraksa, K., 2011)

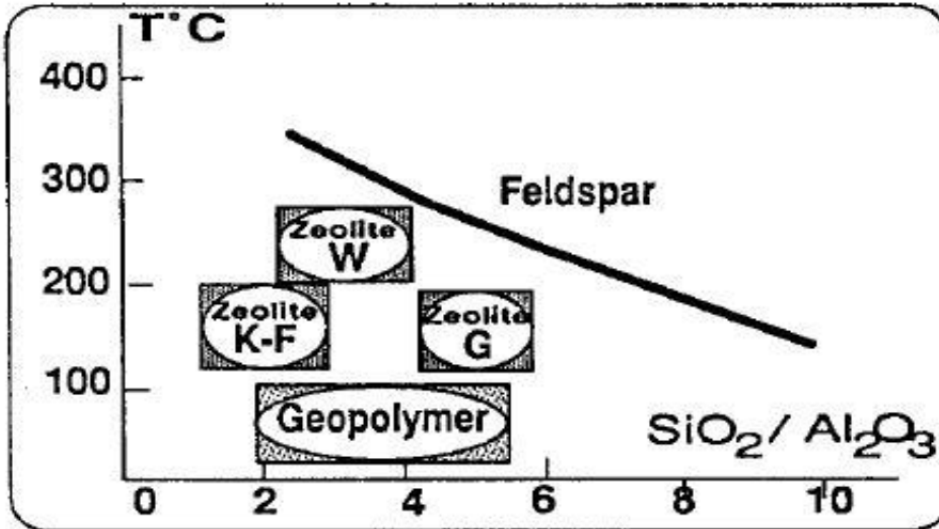
Geopolimer reaksiyonu SiO_2 ve AlO_4 ürünlerini oluşturur. Sistemdeki $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranına bağlı olarak oksijenin tetra hedral çerçeve sisteminde kullanılması sonucu kovalent bağlar oluşur. Bu yüzden geopolimerler 3 boyutlu yarı kristal alüminosilikat mikro-yapısından kaynaklı yoğun amorf faz gibi algılanır. Geopolimerler, tetrahedral alüminyum ve alkali metal iyon dengesinin silikat yoğunlaşması sonucu oluşan çerçeve sistemi yapılarıdır. Genel olarak geopolimerler alkali çözelti (genellikle çözünebilen silikat) ve katı

alüminosilikatlardan oluşan iki ayaklı bir malzemedir. Geopolimerizasyon işlemi ortam sıcaklığında ya da az yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Alkali çözelti içerisinde alüminosilikat malzemelerin çözülmesi ile jel fazında artış görülür. Bu aşamayı çekirdek oluşumu ve yoğunlaşma takip eder (Feng, D., 2012).

Davidovits, geopolimerleri 1978'de ilk olarak tanımlamış ve sınıflandırmıştır. Geopolimer adını uygun görmesinin nedeni meydana gelen reaksiyonun termoset polimerlerin polikondansasyon reaksiyonuna benzerliğidir.

Polikondansasyon, çeşitli ısı ve kimyasal etkilerle monomerler arasındaki bağların ve moleküller içindeki atomların enerji düzeylerinin değişmesi ile gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklara çıkılarak ergitme söz konusu değildir. Polimerleşme süreci olan geopolimer prosesi, bir füzyon sinterleme ya da eritme işlemi değildir. Bu nedenle yakıt gereksinimi ve CO₂ emisyonu açısından benzerlerinden avantajlıdır. Polimerizasyon alkali ortamda Si-O-Al ve Si-O-Si kovalent bağ oluşumları ile ilerler (Xu et al., 2000).

Alkali aktive edilmiş çimento genelde zeolitik malzeme tarafından temsil edilir. Bu malzemelerin katı hale gelip dayanım kazanması için 150 ile 180°C arasında kür edilmesi gerekmektedir. Diğer taraftan geopolimer beton 90°C'den daha düşük sıcaklıklarda kür edilince yeterli dayanım vermektedir (Şekil 2.1) (Davidovits, 1991).



Şekil 2.1. Geopolimer ve zeolitin Si/Al oranına bağlı olarak kristal yapıya geçme sıcaklığı (Davidovits, 1991)

Geopolimer üretimi genellikle Şekil 2.2'deki gibi gerçekleşir. Bağlayıcı toz malzemelerin alkali çözeltileri ile bir araya gelerek geopolimer hamuru oluşmakta, bu hamurun ısıtılma işlemi sonunda sertleşmiş geopolimer ürünü meydana gelmektedir (Davidovits, 2002).



Şekil 2.2. Tipik geopolimer sentez süreci (Davidovits, 2002)

2.1.2. Geopolimerin tarihsel gelişimi

Sertleşmiş portland çimentosuna alternatif olan alümina ve silikat içeren malzemelerin alkali ortamda reaksiyonu sonucu oluşan katı formun patentini 1908 yılında Alman kimyager ve mühendis olan Köhl, alkali sülfat, cüruf ve hidroksit malzemelerini kullanarak almıştır. 1940 yılında Purdon çimento dışı bağlayıcı geliştirmek yolunda önemli adımlar atmıştır. Araştırmacı, farklı yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit çözeltisi ve farklı sodyum tuzlarını kullanarak ürettiği karışımların mukavemetlerini portland çimentosu ile ürettiği karışımlarla karşılaştırmıştır (Purdon, 1940).

1950'li yılların sonlarında Glukhovsky düşük kalsiyum içeren alüminosilikat ve alkali metal çözeltilerini kullanarak ürettiği bağlayıcılara "zemin çimentoları" (soil cements) ve sertleşmiş katı formuna "zemin silikatları" (soil silicates) adını vermiştir (Glukhovsky et al., 1959). Fakat 25-30 yıl boyunca konu ile ilgili kayda değer bir ilerleme olmamıştır. 1970'li yılların sonunda Fransız Kimya Mühendisi Davidovits metakaolin bazlı alkali aktive edilmiş bağlayıcıları geliştirmek için bu alandaki ilgiyi tekrar alevlendirmiştir ve ürünlerine "geopolimer" adını vermiştir (Davidovits, 1979). Bu ürünlerin ilk başlarda yangın direnci dikkat çekmiştir; fakat alkali aktivasyonun priz kontrol katkılarıyla düzenlenmesi ve geopolimerin yüksek erken dayanım göstermesi Amerika'da hükümet ve endüstriyel organizasyonların dikkatini çekmiştir. 1980'li yılların ortalarında Davidovits, Pyrament adlı alkali aktive edilmiş portland çimentosu üretmiştir ve bu konuyla ilgili Fransa ve Avustralya'da çeşitli konferanslar vermiştir (Davidovits, 1984).

Malek et al. (1986), bazı radyoaktif atıkların katılaşması sonucu oluşan malzemeyi alkalilerle aktive ederek bağlayıcı malzeme üretmiştir. Krivenko (1994), silikatların, alüminatların ve alüminosilikatların, alkali konsantrasyonu yeterli olan ortamda alkalilerle reaksiyona girdiğini belirtmiştir.

1988 yılından itibaren alkalilerle aktive edilen bağlayıcılarla ilgili konferanslar düzenlenmeye başlanmıştır. Ukrayna’da bulunan Kiev Ulusal Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık Bölümü, alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcı ve betonlar üzerine iki adet uluslararası konferans organize etmiştir (Krivenko, 1994; Krivenko, 1999). Bunun yanında 2009 yılından bu yana her yıl Fransa’da bulunan Geopolimer Enstitüsü tarafından ‘‘ Geopolymer Camp’’ isimli bilimsel toplantılar gerçekleştirilmektedir (Tuyan, 2017).

2.1.2.1. Türkiye’de geopolimer üzerine yapılan çalışmalar

Türkiye’de 2000li yıllardan itibaren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar üzerine birçok lisansüstü tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan birkaç örnek vermek gerekirse metakaolin (Girgin, 2016), uçucu kül, atık tuğla tozu, taban külü ve doğal puzolan (Tuyan, 2017), yüksek fırın cürufu (Aydın, 2010; Özodabaş, 2014), ve ferrokrom cürufunun (Maraş, 2013; Mahmut, 2016) alkalilerle aktive edilmesiyle bu bağlayıcıların taze hal, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır.

Geopolimerler üzerine Türkiye’de gerçekleştirilen bazı çalışmalar uluslararası literature girmiştir. Yüksek fırın cürufu (Altan ve Erdoğan, 2012), uçucu külün (Görhan vd., 2016) ve atık tuğla tozunun (Tuyan vd., 2018) alkalilerle aktive edilmesi sonucu ortaya çıkan geopolimerin mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Ayrıca doğal puzolan (Erdoğan, 2015) esaslı geopolimer bağlayıcılar üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.1.3. Geopolimerizasyon mekanizması

Geopolimerlerin termal davranış özelliklerini anlamak için geopolimerizasyon (geopolimer oluşumundaki karmaşık süreç) sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonları anlamak gerekir (Duxson et al., 2007). Bu mekanizma üzerinde uzun yıllar çalışılmasına rağmen tam anlaşılamamıştır (Provis ve van Deventer, 2009). Geopolimerizasyon süreci, yüksek alkali ortamda bazı Si ve Al minerallerinin son derece hızlı bir kimyasal tepkimesini

içermektedir. Bu tepkime sonucu Si-O-Al-O bağlarından meydana gelen polimerik zincir aşağıda verilmiştir.



M: sodyum, potasyum gibi bir alkali veya kalsiyum gibi toprak alkali element,

n: polimerizasyon derecesi,

z: atomik Si/Al oranı

w: suyun molar miktarıdır.

Glukhovsky (1959), geopolimerizasyonu alkali-alimünosilikat malzemelerin oluşumunu kontrol eden süreci genel bir model olarak öne sürüp açıklamaya çalışmıştır. Bu model üçe ayrılır;

- çözülme-pıhtılaşma (topaklanma)

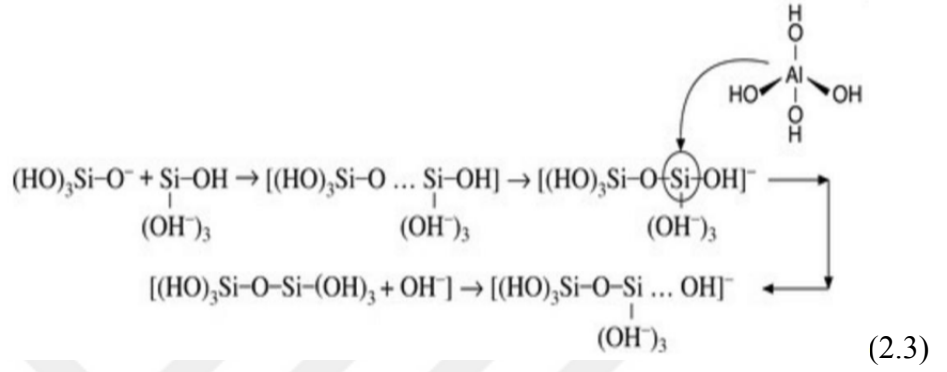
- pıhtılaşma-yoğuşma

-yoğuşma-kristalleşme

Bu süreç Si ve Al mineralleri ile beraber alkalilerin tepkimesini içerir ve oldukça hızlı bir kimyasal reaksiyon içeren bu süreç Si-O-Al-O bağlarından oluşan üç boyutlu polimerik zincirsel yapının meydana gelmesine sebep olur (Davidovits, 1994).

Birinci aşamada (Bkz. Denklem 2.2), ana malzemedeki Si-O-Si, Al-O-Al ve Al-O-Si bağlarının kırılarak katı alimünosilikat malzemenin çözülmesi ile başlamaktadır. Si-O-Si ve Al-O-Al bağlarının kırılması sadece güçlü bir alkali ortamda gerçekleşebilir. Si-O-Si bağlarının kırılması alkali ortamdaki hidroksil iyonu (OH⁻) bulunmasından kaynaklanır. Sonuçta, silanol (Si-OH) ve sialat (Si-O⁻) molekülleri oluşur. Si-O⁻ ile Na⁺ iyonları arasında Si-O-Na bağ oluşumu, tekrardan siloksana (Si-O-Si) dönüşümü engellerken, alkali metal katyonunda bulunan alkali ortam negatif yükü dengeler (Provis ve van Deventer, 2009).

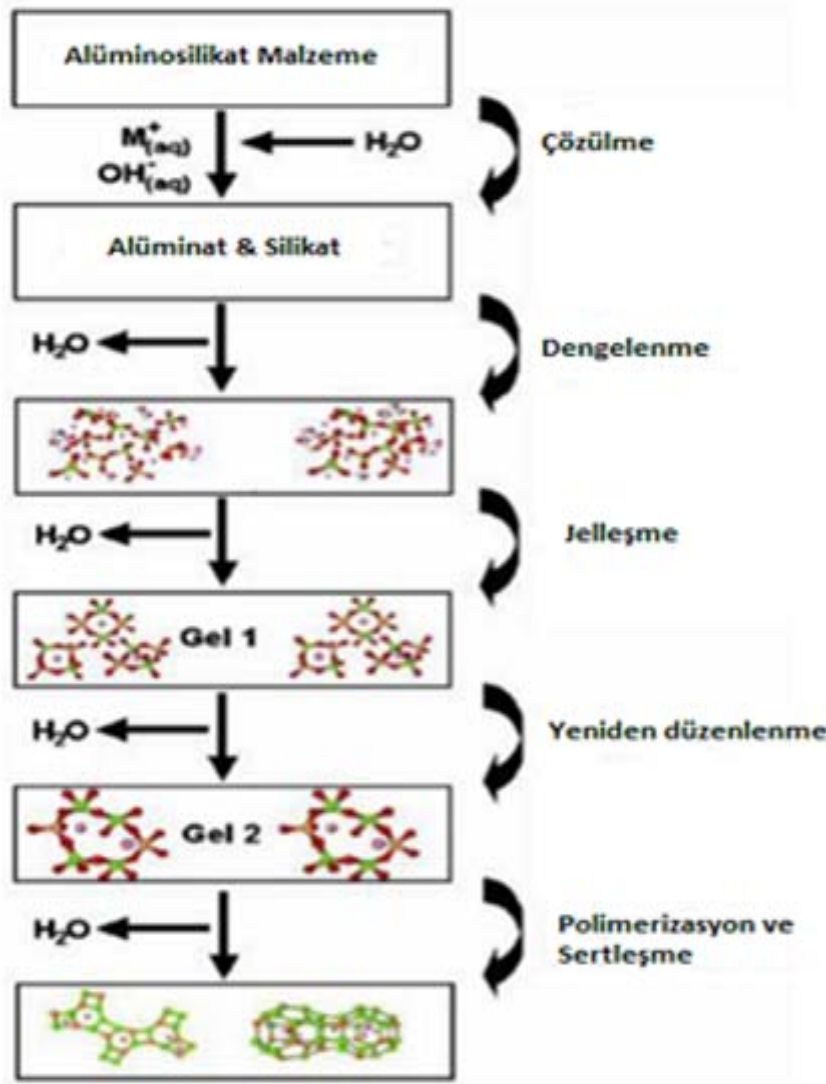
basamakta kopan Si-O-Si bağları karmaşık Si(OH)_4 'leri oluştururlar. İkinci basamakta yeni Si-O-Si bağlarını oluşturmak için Si(OH)_4 'ler yoğunlaşır ve aşağıdaki molekülleri oluştururlar (Bkz. Denklem 2.3). Aynı zamanda alüminat bu polimerizasyon reaksiyonunun bir parçasıdır. İlk aşama olan çözülme aşamasında katalizör gibi görev yapan OH^- 2. ve 3. aşamalarda yapısal bir bileşen olarak davranır (Provis ve van Deventer, 2009).



Üçüncü aşamada geopolimer oluşumunu ayrıntılı olarak açıklamak için, birçok yazar yakın zamanda Gluhovsky modelini genişletmiş ve zeolit sentezinde gözlemlenen benzer bir model sunmuştur (Provis, van Deventer, Duxson, Lukey, 2007a; Fernandez-Jimenez, Palomo ve Criado, 2005). Bu model zeolit sentezinde bulunan iki aşamayı içermektedir:

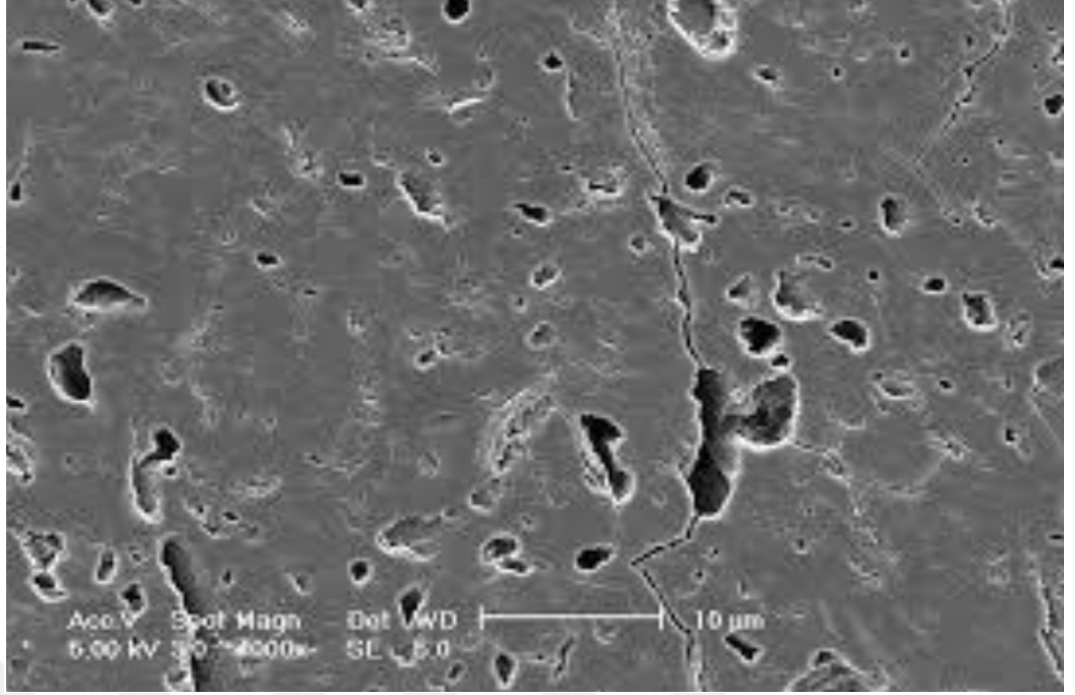
İlk olarak, çekirdek oluşum aşamasında, kaynak materyalden alınan alüminosilikatlar alkalın ortamda ayrışarak zeolit öncüllerinin oluşmasına neden olur. İkinci aşamada ise, birkaç çekirdek kritik bir boyuta ulaşacak şekilde büyür ve kristal oluşumunu başlatır.

Şekil 2.4'te alüminosilikatlara kaynak olan malzemelerin alkalınle aktive edilmiş bir geopolimer haline dönüştürülmesinde rol oynayan farklı aşamalar gösterilmiştir. Aşamaların keskin olarak gösterilmesine rağmen, eşzamanlı olarak oluşabilmesi için bu aşamaların ayrılmalrı gerekir (Yao vd, 2009). Kaynak maddesinin yüzeyinde çözünen katı parçacıklar, geopolimerizasyon sürecinde katı parçacığın dönüşümünü yöneten mekanizmadır. Bunun sonucunda alüminosilikat türleri monomer olarak alkali çözeltisine salınır (Duxson et al., 2007a).



Şekil 2.4. Geopolimer oluşum süreci (Duxson et al., 2007a)

Bu monomerler kendi aralarında tepkimeye girerek dimerleri, dimerler monomerlerle tepkimeye girerek trimerleri ve böyle ilerleyen süreç büyük moleküllerden olan polisiloksonat (Si-O-Si-O), polisialat (Si-O-Al-O) ve polisialat-disiloksoları (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O) oluşturur. Bu çözelti fazda jelleşme sürecinin bir sonucu olarak çözelti doymuş hale geldiğinde, alüminosilikat jelin çökmesine neden olur. Bu işlem alüminosilikat türünün katı parçacık yüzeylerinden gelen geopolimerin daha fazla çözülmesini büyük ölçüde engeller. Böylece kaynak malzemede bulunan reaksiyona girmemiş alüminosilikat bağlayıcı bünyesinde yer alır (Provis et al., 2006). Aşağıda Şekil 2.5'te gösterilen geopolimer bir numune örneğinde boşluklar ve tepkimeye girmemiş parçacıkların görüntüsü verilmiştir (Duxson, 2006).



Şekil 2.5. Tepkimemiş katı parçacıklara sahip bir geopolimerin SEM mikrografı (Duxson, 2006)

Jel1 olarak adlandırılan (Bakınız Şekil 2.4) jel, alüminyum bakımından oldukça zengindir. Reaksiyon ilerledikçe, katı kaynağından daha fazla silisyum süzülür. Böylece Jel2'nin oluşumuna yol açan bir silisyum konsantrasyonu oluşur. Bu süreç birçok araştırmacı tarafından (Provis ve van Deventer, 2009; Oelkers, Schott, Devidal, 1994; Oelkers ve Gislason, 2001) alkalın ortamda ilk aşamada Al^{+3} iyonlarının yüksek bir konsantrasyonuna sahip olduğu doğrulanmıştır. Fernandez-Jimenez et al., (2006), doğası gereği Al-O bağlarının Si-O bağlarından daha zayıf olması, silisyum üzerindeki alüminyumun hızla çözülmesini ve bu nedenle bu bağların yıkılmasının daha kolay olduğunu belirtmiştir. Jelleşmeden sonra sistem yeniden düzenlenmeye devam eder, bu da jel ağının artışı ve sonuç olarak sertleşmeye neden olur. Bu aşamada geopolimer malzemelere atfedilen üç boyutlu bir alüminosilikat ağı oluşur (Duxson et al., 2005).

Geopolimer için ana malzemelerden herhangi birinden (metakaolin, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu) silis (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) ana bileşenleri güçlü alkalın solüsyonlarında çözünür. Böylece (potasyum / sodyum hidroksit ve potasyum / sodyum silikat) Si-O-Al, (Sialat zinciri) polimerini oluşturur. (Duxson, 2007a; Davidovits, 1991). Birçok araştırmacı tarafından farklı şekilde adlandırılrsa da (alkalınle aktive edilmiş çimento, hidroseramik, geokimyasal, inorganik polimer beton ve düşük sıcaklık alüminosilikat cam gibi) geopolimerler terimi bu

bağlayıcı teknolojisini adlandırmak için halen yaygın olarak kullanılmaktadır (Davidovits, 2011; Petermann, 2010).

Geopolimerlerin 90°C'nin altındaki sıcaklıkta poli-yoğunlaşması mümkün olduğundan, seramikler gibi daha yüksek kürleme sıcaklığına ihtiyaç duyulmaz (Davidovits, 1991). Isı, geopolimerik reaksiyonu hızlandırmak için hayati bir faktör olduğundan, geopolimer karışımı, 6 ila 48 saatlik bir periyot boyunca, sıcaklık kontrollü bir fırında 40 ila 90°C'lik bir sıcaklıkta kür edilir (Chindaprasirt et al., 2007).

2.1.4. Geopolimer avantaj ve dezavantajları

Doğada her nesnenin avantajlı ve dezavantajlı yönleri vardır. Geopolimerlerin de olumlu yanları olduğu gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Geopolimer bağlayıcı sistemlerin ekolojik, ekonomik ve teknik açıdan pek çok üstünlüğü bulunmaktadır. Geopolimer bağlayıcılar genelde endüstri yan ürünü olduğundan bu tür bağlayıcı sistemler çimentoya göre daha ekonomiktir. Ayrıca çimento üretimi esnasında sıcaklık 1450-1500°C'ye varan sıcaklık gereksiniminden yüksek enerji sarfıyatı dolayısıyla yüksek bedele mal olmaktadır. Geopolimer bağlayıcı madde üretimi için gerekli toz malzemenin daha ekonomik bir şekilde elde edilmesi, geopolimer bağlayıcıların çimentoya göre en önemli avantajlarından birisidir (Juenger et al., 2011).

Geopolimer bağlayıcıların ekolojik olarak da önemli bir üstünlüğünden bahsedilirse, geopolimer bağlayıcılar endüstri atığı olduğu için bu ürünlerin değerlendirilmesi ekolojik yönden önem arz etmektedir (Gartner, 2004). Buna ilaveten geopolimer hammadde olan toz malzeme daha düşük sıcaklık ve sürede kalsine edildiği için çevreye daha az CO₂ salmaktadır. Çimento üretimi için gereken sıcaklık 1450°C olmasına karşın, geopolimer ürünlerde bu sıcaklık 550-850°C arasında gerçekleşmektedir (Snellings et al., 2012).

Geopolimer bağlayıcıların mühendislik açısından birçok olumlu özelliğe sahip olduğu söylenebilir. Bu olumlu özelliklerden birisi geopolimer bağlayıcı sistemlerin bağlayıcı ürününde kalsiyum hidroksit ve monosülfat bulunmadığı için sülfat direnci oldukça yüksektir (Chindaprasirt et al., 2014). Ayrıca çimentoda bulunan alkaliler, reaktif silis içerikli agregalarla alkali-silis reaksiyonu gösterebilmektedir. Geopolimer bağlayıcı sistemlerin toz malzemesi alkali içermediği için agrega seçiminde silis içerikli agregaların olmasının olumsuz bir

etkisi bulunmamaktadır (Garcia-Lodeiro et al., 2007). Geopolimer bağlayıcıların başka bir avantajı ise yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmasıdır. Düşük CaO içeren alüminosilikat maddeler alkalilerle bağ kurduğundan kararlı yapıya geçip dolayı yüksek sıcaklık direncine sahip olabilmektedir. Geopolimer betonun 1200°C bile kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Geleneksel betonda aşırı sıcaklık parçalanmaya ve C-S-H jelinin ayrışmasına sebep olur. Geopolimer betonda ise 1200°C civarında herhangi bir yıpranma görünmez (Lyon et al., 1997).

Geopolimer beton geleneksel betona göre daha yüksek basınç dayanımı vermektedir. Ayrıca çok hızlı bir biçimde dayanım kazanabilmekte ve çok kısa sürede kür işlemi tamamlanabilmektedir. Bu özellikler de hızlı inşaat için olağanüstü avantaj sağlamaktadır. Geopolimer beton yüksek çekme dayanımından dolayı geleneksel betona göre daha az gevrek özellik göstermektedir (Provis ve van Deventer, 2014).

Büzülme, betondan buharlaşan suyun veya betonun kuruma ve ısınmasından kaynaklı ciddi ve tehlikeli çatlamalara sebebiyet vermektedir (Erdoğan, 2012). Geopolimer beton hidrate olmadığından; geleneksel betona göre daha az geçirgen olup kayda değer büzülme göstermemektedir (Provis ve van Deventer, 2014).

Geopolimer beton güçlü kimyasal saldırılara karşı dirençlidir. Asitler, zehirli atıklar ve tuzlar geopolimer betonu daha az etkilemektedir. Ayrıca donatı paslanması da geleneksel betona kıyasla daha az olmaktadır (Provis and van Deventer, 2014).

Geopolimer bağlayıcı sistemlerin olumsuz özelliklerinden bahsedilirse, en önemli dezavantajlarından birisi, bağlayıcı olan toz malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin sürekli değişebilmesidir. Çünkü endüstri yan ürünü olan toz malzemelerin özellikleri, kullanılan hammadde ve üretim süreciyle ile oldukça değişmektedir (Pacheco-Torgal et al., 2015). Böylece, tesise gelen her malzemenin özelliklerini inceleme gereğine, bu da kalite kontrol için maliyet artışına sebep olmaktadır.

Geopolimer bağlayıcı sistemlerin başka bir dezavantajı ise, taze hal özelliklerinden olan işlenebilirliğinin çimentolu sistemlere göre çok daha düşük olmasıdır. Çözeltilerin yüksek viskozitesinden dolayı karıştırma kabına ve çubuğuna yapışması da bağlayıcıların iyi karışmasını engellemektedir. Bu sorunu

çözmek için genelde karışıma su eklenmektedir. Bu durumda karışımın mekanik ve durabilite özellikleri olumsuz etkilenmektedir.

Geopolimer bağlayıcıların başka bir dezavantajı ise çiçeklenme probleminin olmasıdır. Alkaliler geopolimerizasyon aşamasında karışımın bünyesinde tamamen tükenmediğinden çiçeklenme meydana gelebilmektedir. Yüksek permeabilite ve kılcal su emmeye sahip geopolimer harç veya betonlarda su ile beraber alkaliler de katı haldeki geopolimer yüzeyine hareket etmektedir. Bu durumu kontrol altına alabilmek için az geçirimli geopolimer üretmek, değişik katkı maddeleri kullanılarak su emme kapasitesini azaltmak, alkali aktivatörün kimyasal yapısını değiştirmek ve tepkime esnasında farklı kür koşullarına maruz bırakmak gibi yöntemler kullanılabilir (Pacheco-Torgal et al., 2015).

2.1.5. Geopolimer kullanım alanları

Geopolimer teknolojinin kullanımı, özellikle portland çimentosunun çevresel etkisini düşürmeye yardımcı olmaktadır. Fakat geopolimerlerin Tablo 2.1. ve 2.2.'de de gösterildiği üzere inşaat mühendisliği alanından otomobil ve havacılık endüstrisine kadar birçok alanda uygulamaları olmaktadır. Örneğin Fransız havacılık şirketi olan Dassault Aviation 1986'dan beri geopolimer kalıp ve materyallerini kullanarak "Rafale" adında savaş uçağı geliştirmektedir. Ayrıca, Benetton Formula 1 takımı, 1994 ve 1995 Grand Prix yarışlarında geopolimer kompozitten üretilmiş termal koruyucu paneller üretmiştir. Davidovits'e göre geopolimerik malzemenin uygulama alanları Tablo 2.1.'deki gibi Si:Al oranına göre olmaktadır (Davidovits, 1999). Tablodan görüldüğü üzere düşük Si:Al oranı inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir.

Tablo 2.1. Si:Al oranına bağı geopolymer malzemelerin uygulamaları (Davidovits, 1999)

Si:Al oranı	Uygulamalar
1	-Tuğla -Seramik -Yangından koruyucu ürünler
2	-Radyoaktif ve zehirli atıkların istiflenmesi
3	-Yangın koruyucu fiber cam malzemesi -Döküm malzemeleri -Isıya dayanıklı kompozit, 200-1000°C -Titanyum kaplama ürünleri
>3	-Dolgu malzemesi, 200-600°C -SPF alüminyum ürünleri
20-35	-Yangın ve suya dayanıklı fiber -Kompozit ürünler

Tablo 2.2. Geopolimer Uygulamaları (Sanjay Kumar)

Sektör	Uygulamalar
İnşaat Mühendisliği	Düşük CO ₂ , hızlı priz alan çimento, prefabrik beton ürünler ve hazır karışım betonlar
Yapı Malzemeleri	Tuğla, döşeme, parlak fayans, akustik panel, boru
Arkeoloji	Arkeolojik eser, Onarım ve Restorasyon
Kompozit Malzeme	Havacılık sektörü için seramik kaplama malzemeleri
Yangın Koruyucu	Yangın ve ısıya dayanıklı fiber kompozit malzemesi
Malzeme	Karbon fiber malzemesi
Refrakter	Metal dökümler için refrakter kalıplar
Uygulamaları	
Atık Kullanım	Geopolimer ürünler için uçucu kül, cüruf ve puzolanların
Uygulamaları	kullanımında
Zehirli Atıkların	Zararlı radyoaktif malzemelerin kaplanması
İstiflenmesi	
Diğer	Boyama,kaplama,yapıştırma

1980-1990 yıllarında satışa sunulan Pyrament adlı çimento, standart kür koşullarında 4 saat zaman zarfında 20 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Bu ürün, askeri havaalanı pistinde -2°C'de 4 saat gibi kısa bir sürede yeterli dayanımı göstermiş ve pist uçuşlara açılmıştır. Yine 1991'de Körfez Savaşı'nda otoyolların hızlı inşasında etkili olmuştur. 1993'te Pyrament, Amerika'da 50 endüstriyel tesiste, 57 Amerikan askeri tesisinde ve yedi farklı ülkede kullanılmıştır. Fakat, 1996'da Pyrament'in üreticisi olan ana firma tarafından üretimi durdurulmuştur. Pyrament, portland çimentosuna göre yaklaşık olarak iki kat daha pahalı olduğu ve saf alkali aktive edilmiş alüminosilikat sistemine göre yüksek klinker içeriğine sahip olduğu bilinmektedir. Pyrament'te düşük CO₂ salınımı ve ucuz maliyetten ziyade yüksek dayanım hedeflenmiştir (Davidovits, 1984).

Diğer taraftan Balaguru (1997), karbon fiber ve geopolimer ile hazırlanmış betonarme kirişlerin dayanımlarının davranışları üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada organik polimer olan karbon fiberin yerine kullanılan geopolimerin etkisini kanıtlamıştır. Beton yüzeylerde mükemmel yapışma gözlemlenmiştir. Ayrıca geopolimer yangına karşı dayanım göstermiş ve UV ışınları altında zarar

görmemiştir. Sonuç olarak geopolimerlerin kullanımı onarım ve iyileştirmede oldukça uygundur.

2.2. Geopolimer Bileşiminde Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Bağlayıcı toz malzemeler

Geopolimer bağlayıcı sistemler için kullanılan toz malzemenin içeriğinde silis ve alumina bulunan amorf yapılı malzemeler bağlayıcı diye nitelendirilebilir. Geopolimer sistemler için en çok kullanılan toz malzemeler yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve kalsine edilmiş kil çeşidi olan metakaolindir. Tez kapsamında kullanılan tras ve zeolit ile ilgili aşağıda detaylı bilgi verilmiştir.

2.2.1.1. Tras (doğal puzolan)

Yalnız başına kullanıldığı zaman bağlayıcı madde olmayan fakat kireç veya çimento ile nemli ortamda yaptığı reaksiyon sonunda bağlayıcı özelliği kazanan maddelere puzolan denilmektedir (Kandemir, 1993).

Yapımında bağlayıcı olarak tras kullanılan birçok yapı hala hizmet vermektedir. Bunlardan bazıları; Romalılar tarafından 2000 yıl önce tras ve kireç karışımının çimento yani bağlayıcı olarak kullanılması ile yapılmış olan Rhine Nehri boyundaki su kanalı, 1910-1920 tarihleri arasında Idaho'da inşaa edilen Arrowrock Barajı, New Mexico'da San Francisco Haliç Köprüsü, Oregon'da Bonneville Barajı, California'da Friant Barajı, Los Angeles'de su kanalı, Neuwied Ren Köprüsünün ayakları, Agger Barajı, Saldenbach Barajı şeklinde sıralanabilir.

Puzolanları doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Doğal puzolanlar olarak bilinen maddeler volkanik tüfler, killi şist, diatome toprağı ve pomza taşıdır (Baltacı, 1989). Bunlar dünyanın belli bölgelerinde bulunmaktadır. Doğal puzolanların en önemlisi Almanya'da Ren vadisinde çıkarılan ve tras adı verilen puzolandır. Bu puzolan gayet üstün özelliklere sahip olduğundan bir çok ülkede ve ülkemizde traslı çimento üretiminde kullanılmaktadır.

Dünyada bilinen ikinci önemli puzolan yatağı ise İtalya'da Roma ve Napoli arasında yer almaktadır. Nitelikli puzolanların bulunduğu bir diğer yer de Ege

denizinde Yunanistan'a bağlı Santorini adalarıdır. Ülkemizde de çok değişik bölgelerde puzolan yatakları bulunmaktadır.

2.2.2 Alkali aktivatörler

Geopolimer üretiminde bağlayıcı madde ile kullanılan bir diğer ürün de alkali aktivatördür. Genel olarak kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat ile potasyum silikat gibi hidroksit ve silikatlardır (Davidovits, 1999). Sodyum hidroksitin potasyum hidroksite göre daha fazla kullanılmasının sebebi toz malzemedeki minerallerin daha fazla çözmesinden kaynaklanmaktadır (Xu and Deventer, 2000).

2.2.2.1 Sodyum hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit kimya endüstrisinde kullanılan önemli temel bir birleştiktir. Sodyum hidroksitin diğer adı kostik tir. Beyaz renkte olup nem çekici özelliği olan bir maddedir. Suda kolaylıkla çözölmektedir. Yumuşak, kaygan ve sabun hissi veren bir yapıdadır. Sıvı ve katı halde bulunmaktadır. Herhangi bir kokusu da yoktur. Katı olanı payet, boncuk gibi şekillerde olurken sıvı olanı, sulu çözelti şeklinde bulunmaktadır.

Sodyum hidroksit 1807 yılında İngiltere de Humphrey Day tarafından keşfedilmiş olup, keşfin nasıl gerçekleştiği tam olarak bilinmemektedir. Sodyum Hidroksit kendiliğinde doğal bir şekilde meydana gelmez, fakat üretimi çok kolaydır. Basit sofra tuzunun elektrolizi sonucunda %50 lik bir çözelti şeklinde üretilmektedir. Sodyum hidroksit kağıt, boya, yapay ipek, alüminyum ve deterjan üretimi gibi birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. En büyük kullanım alanı kimyasal endüstridir, deterjan ve boya daha sonra kağıt sektöründe kullanılır.

Sodyum hidroksit konsantrasyonun geopolimer bağlayıcı üzerinde etkisi incelendiğinde uçucu kül kullanılan numunelerde en uygun sodyum hidroksit konsantrasyonun 8M olduğu görölmüşür. Daha düşük sodyum hidroksit kullanımı, toz malzemelerde bulunan silis ve alüminayı hidroliz etmekte yetersiz kalmaktadır. Alkali aktivatör oranının artması ile geopolimerde oluşan bağlar daha yoğun hale gelmektedir (Fernandez-Jimenes and Palomo, 2005).

2.2.2.2. Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

Sodyum silikat, $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ formülüne sahip bir kimyasal bileşendir. Sodyum silikat, cam suyu olarak bilinen maddedir. Genel biçimi renksiz halledir, ancak ticari olarak kullanılan türevlerinde yabancı maddelerle birlikte yeşil veya mavi renk alabilirler. Sodyum silikat, çimento sektöründe, tekstilde, kereste işleme sanayinde, otomobillerde ve refrakter özellikli malzemelerde sıklıkla kullanılır. Sodyum karbonat ve silikon dioksit maddelerinin tepkimesi sonucu ortaya çıkabilir.

Sodyum silikat, geopolimer üretiminde alkali aktivatör olarak da kullanılmaktadır. Genelde 3 modül ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3$) sodyum silikat kullanılır. Çözeltide bulunan çözünebilir silisin varlığı karışımın işlenebilirliğini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir (Tuyan, 2017). Aynı zamanda çözeltide bulunan sodyum silikat konsantrasyonunun çok yüksek olması, bağlayıcının pH'ını düşürmekte ve çözeltinin daha viskoz olmasını sağlayarak toz malzeme ile çözeltinin tepkimeye girme oranını düşürmektedir. Başka bir araştırmacı, alüminosilikatların alkali aktivatörlerle tepkimeye girmesi için en uygun silikat modülünün ($M_s=\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 1 ila 1.5 arasında olduğunu belirtmiştir (Duxson, 2005).

2.3. Geopolimer Bağlayıcıların Mekanik ve Durabilite Özellikleri

Uçucu kütle üretilen geopolimer betonda kür işlemi genelde 40-90°C arasında olmaktadır. Normal oda sıcaklığında uçucu kül esaslı geopolimer betonda sıkıştırma ve perdahlama işlemlerinin iki saat içinde yapıldığı ve karışımda herhangi bir kıvam kaybının olmadığı gözlemlenmiştir (Hardjito, 2005).

Bağlayıcı malzeme olan alüminosilikatların tane boyutu geopolimerizasyon sürecinde önemli bir parametredir. Daha ince tane boyutuna sahip uçucu kül ile 60 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer harç üretilmiştir (Palomo, 2003).

Diğer bir çalışmada uçucu kül esaslı bağlayıcı madde kullanılarak üretilen geopolimer harçlarda NaOH konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Çalışmada 3 farklı NaOH konsantrasyonu (3, 6 ve 9 M) kullanılarak oluşturulan geopolimer harçların basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. En yüksek dayanımı veren NaOH konsantrasyonun 6M olduğu tespit edilmiştir. 3M NaOH konsantrasyonunda

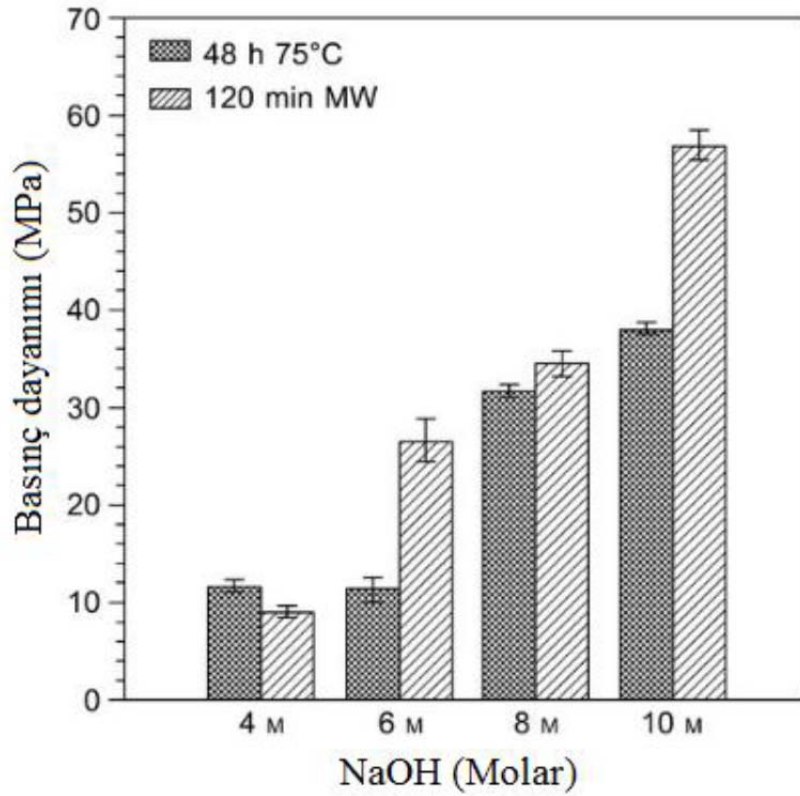
yeterli kimyasal tepkimenin gerçekleşmediği, 9M NaOH konsantrasyonunda ise silisin erken topaklanmasından kaynaklı daha düşük basınç dayanımı gözlemlenmiştir (Görhan ve Kürklü, 2014).

Bondar (2011), kalsine edilmiş ve edilmemiş doğal puzolan ile ürettiği geopolimer harçlarda alkali aktivatör türü ve dozajının basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Bunun için en uygun alkali aktivatör türünün potasyum hidroksit ve sodyum silikat olduğu, en uygun M_s (SiO_2/Na_2O) oranının ise 2.1 olduğu tespit edilmiştir.

Geopolimer betonun işlenebilirliği portlant çimentolu sistemlere göre daha düşük olduğundan karışıma bir miktar su koymak işlenebilirliği arttırmaktadır. Suyun kullanılmadığı durumlarda hamur karışımının tam bir kohezif özellik göstermediği, gereğinden fazla kullanılması durumunda ise kılcal boşluklar yaratarak dayanım kaybına sebep olduğu bilinmektedir (Pacheco-Torgal, 2015).

Başka bir çalışmada, kür sıcaklığı ve süresinin geopolimer harç üzerinde etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Uçucu kül içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı, kür sıcaklığının artışı ve kür süresinin uzatılması ile arttığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, sıcaklığın süreden daha önemli bir parametre olduğu açıklanmıştır (Palomo, 2004).

Geopolimer bağlayıcıların kürleme işlemi belirli sıcaklıklarda belirli sürelerde ısıtılmış fırınlarda olmaktadır. Somaratna et al. (2010), kür işlemine farklı bir yaklaşım getirerek uçucu kül ile elde edilen geopolimer harç üretiminde mikrodalga kürleme yöntemi ile daha yüksek dayanım elde etmiştir. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere 4M NaOH konsantrasyonda mikrodalga ile normal ısıl kürlemenin basınç dayanımlarına etkisi görülmemiştir. NaOH konsantrasyonun 6M ve üzeri olması basınç dayanımlarını önemli ölçüde arttırmıştır. Yine mikrodalga kürlemenin etkisi de 6M NaOH ve üzeri konsantrasyonlarda basınç dayanımına etkisi olumlu yönde olmuştur. Örneğin, 10M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer harç numunelerinde, normal ısıl kürleme yapılarak (48 saat 75°C) 37 MPa dayanım elde edilirken, mikrodalga kürleme yapılırca (2 saat) yaklaşık olarak 60 MPa dayanım elde edilmiştir.



Şekil 2.6. Mikrodalga (MW) ve ısıl kürlemenin farklı NaOH içeren karışımların dayanımına etkisi (Somaratna et al., 2010)

Geopolimer sistemlerin iç yapısı genelde reaksiyon ürünleri, reaksiyona girmeyen tanecikler ve boşluklardan oluşmaktadır (Pacheco-Torgal et al., 2015). Portland çimentolu sistemlerde olduğu gibi, geopolimer karışımlarda da boşluk yapısının dayanımı etkilediği bilinmektedir. Karışıma ilave edilen ekstra su poroziteyi etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

Boşluk yapısını etkileyen diğer bir parametre ise kür koşuludur. Daha az sürede düşük sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer numuneler, tepkimeye girmeyen tanecikler nedeniyle daha az reaksiyon ürünleri oluşacağından istenilen özelliklere ulaşamamaktadır (Criado et al., 2012).

Bondar et al. (2011) doğal puzolan ile kalsine edilmiş doğal puzolan esaslı geopolimer harçların klor iyon geçirirliliğin çimentolu sistemlere göre daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Bu durum, geopolimer içerisinde bulunan yüksek alkali konsantrasyonundan kaynaklı elektrik iletkenliğinin artmasıdır.

Geopolimer sistemler ısırl kürleme işlemine tabi tutulduğunda bünyelerindeki suyu kaybetmektedir. Bu nedenle, çimentolu sistemlere göre çok daha düşük kuruma büzülmesi göstermektedir (Davidovits, 1999).

Geopolimer sistemleri donma-çözülme deneyine tabi tutan çeşitli araştırmacılar geleneksel portland çimentolu sistemlere benzer sonuçlar elde etmiştir. 300 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılan F tipi uçucu kül esaslı geopolimer sistemlerde ağırlık kaybı ve basınç dayanımında kayda değer düşüş olmamıştır (Brooks et al., 2010).

Yüksek sıcaklık direnci açısından geopolimer sistemler farklı davranışlar gösterebilmektedir. 800°C'ye maruz bırakılan uçucu kll geopolimerin dayanımında artış, metakaolin içerikli geopolimerde ise düşüş gözlemlenmiştir. Bunun sebebi de muhtemelen uçucu külün boşluklarından nemin rahatça çıkmasının dayanım artışına yol açtığıdır (Kong et al., 2010).

Alkali-silis reaksiyonu açısından geopolimer sistemler, çimentolu sistemlere göre mkemmek sonuç vermektedir. Garcia-Lodeiro et al. (2007), uçucu kül esaslı geopolimer harcın alkali silis reaksiyon genleşmesini araştırmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, geopolimer sistemlerin içerisinde kalsiyum olmadığı ve bunun sonucu olarak alkali-silis ürünlerin genleşmeye sebep olmadığı belirtilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmanın amacı, deney programı, geopolimer harç elde edilmesinde kullanılan malzemelerin özellikleri, karışımların hazırlanması ve elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.1. Amaç

Tez kapsamında kalsine edilen iki doğal puzolanın (tras ve zeolit) geopolimer harç geliştirilmesine uygunluğunu belirlemek amaçlanmıştır. Deneme dökümleri sonucunda bulunan en uygun geopolimer bağlayıcı esaslı harç numunelerinin, aynı basınç dayanımına sahip çimento harcına karşı taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine etkilerini incelemek ve aralarında karşılaştırma yapmaktır.

3.2. Kapsam

Zeolit ve tras 2 farklı sıcaklık (550 ve 850°C) ve 2 farklı sürede (2 ve 6 saat) kalsine edilmiştir. Kalsine edilmiş ve edilmemiş toz malzemeler ile üretilen geopolimer harç numuneleri sabit alkali aktivatör konsantrasyonu ile sabit su/bağlayıcı oranında üretilmiş ve belirli kür koşuluna tabi tutulmuştur.

Geopolimerlerin basınç dayanımı baz alınarak trasın amaca daha uygun olduğu saptanmıştır.

Tras, 450 ile 850°C arasında 5 farklı sıcaklık ve 3 farklı süre (2, 4 ve 6 saat) kalsinasyona tabi tutulmuş ve tras esaslı geopolimer harçlarda en uygun kalsinasyon sıcaklığı ve süresi tespit edilmiştir.

Seçilen tras ile geopolimer üretimi için 6 farklı aktivatör konsantrasyonu denenmiştir. Uygun görülen aktivatör konsantrasyonu ile üretilen geopolimer karışımları 4 farklı sıcaklık (80 ile 110°C arasında) ve 5 farklı sürede (1 gün ile 7 gün arasında) kür edilerek, en uygun kür koşulu belirlenmiştir.

Çalışmanın bu aşamasına kadar elde edilen veriler ile üretilen en uygun geopolimer karışımın yayılma çapı, birim hacim ağırlığı, eğilme ve basınç dayanımı, kılcal su emme kapasitesi, ultra ses geçiş hızı, hızlı klor iyon

geçirirliiliği, yüksek sıcaklık direnci ve donma-özölme direnci aynı basınç dayanımına sahip imento harcı özellikleri ile kıyaslanmıştır. Tezin bu aşamasında 135 adet numune deneye tabi tutulmuştur.

3.3. Deney Programı

Tezin deneysel çalışma kısmı iki aşamadan oluşmaktadır.

1. aşamada, geopolimer sistemler için doğal puzolan esaslı bağlayıcı türü, kalsinasyon sıcaklığı ve süresi, alkali aktivatör konsantrasyonu ve kür koşulunun etkisi belirlenmiştir.

2. aşamada, en uygun bağlayıcı türüne ve alkali aktivatör konsantrasyonuna sahip geopolimer karışım, en uygun kür koşuluna tabi tutulmuştur. Oluşturulan geopolimer harcın taze hal, mekanik ve durabilite özellikleri, aynı dayanıma sahip portland imentosu harcıyla kıyaslanmaştır.

3.4. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Tez kapsamında kullanılan bağlayıcı toz malzemeler, alkali aktivatörler (sodyum hidroksit ve sodyum silikat) ve agrega bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.4.1 Bağlayıcı toz malzemeler

Tez kapsamında kullanılan alüminosilakat toz malzemelerin türü, kısaltması ve bulunduğu yeri aşağıda belirtilmiştir.

- Tras (TR) İzmir Cumaovası yöresi,
- Zeolit (ZE) Balıkesir Bigadiç yöresi.

Tras temin edildiğinde toz halde olmadığı için bilyeli öğütücü yardımıyla toz haline getirilmiştir. Zeolit ise toz halde temin edildiği için öğütme işlemine tabi tutulmamıştır. Toz malzemelerin 0.125 mm elekten geçen kısmı kullanılmıştır.

Çimento harcı üretimi için Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayii A.Ş. fabrikasından CEM I 42.5 R tipi çimento sağlanmıştır.

Tez kapsamında kullanılan tras, zeolit ve çimentonun kimyasal analizi ile bazı fiziksel özellikleri Batıçim laboratuvarında belirlenmiştir. Bağlayıcı malzemelerin XRF yöntemi ile belirlenen kimyasal kompozisyonları Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Bağlayıcı toz malzemelerin kimyasal analizleri

Bileşen (%)	Tras (TR)	Zeolit (ZE)	Çimento
SiO ₂	68.15	64.59	18.39
Fe ₂ O ₃	2.07	1.40	3.24
Al ₂ O ₃	13.1	11.09	4.20
CaO	1.98	3.59	64.53
MgO	0.74	2.94	1.32
Na ₂ O	1.84	0.00	0.55
K ₂ O	4.11	3.45	0.76
SO ₃	0.08	0.15	3.46
Kızdırma kaybı	6.42	5.17	1.42

Trasın inceliğinin çimentoya yakın olması amacıyla öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra eleme işlemine tabi tutulmuştur. Zeolit ise toz şeklinde geldiğinden sadece eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Genel kıstas olarak bağlayıcı malzemelerin 0.125 mm boyutunun altı olması hedeflenmiştir. Malzemelerin özgül ağırlık ve incelik değerleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Bağlayıcı toz malzemelerin fiziksel özellikleri

Özellik	Tras (TR)	Zeolit (ZE)	Çimento
Özgül ağırlık	2.42	2.30	3.10
Özgül yüzey (cm ² /g)	4620	6300	3210
0.125 mm elek üstü (%)	0.00	0.00	0.00
0.090 mm elek üstü (%)	8.7	4.3	0.5
0.045 mm elek üstü (%)	22.2	17,8	7.8

3.4.2 Sodyum hidroksit ve sodyum silikat

Tez kapsamında alkali aktivasyonu sağlamak amacıyla sodyum hidroksit ve sodyum silikat kimyasalları kullanılmıştır. Harç karışımlarının oluşturulması için Tekkim firması tarafından üretilen, %97 saflıkta ve granül halde bulunan sodyum hidroksit temin edilmiştir. 3 modül (SiO₂/Na₂O ≈ 3) sodyum silikat Merck firması

tarafından üretilmiş olup kimyasal kompozisyonu yaklaşık olarak %8 Na₂O, %27 SiO₂ ve %65 H₂O'dan oluşmaktadır.

3.4.3 Agrega

Deneysel çalışmada bir tip kırma kireçtaşı ince agregası kullanılmıştır. Bu agrega 0-3 mm tane büyüklüğüne sahip fraksiyonundan elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan ince agrega en büyük tane boyutu 4 mm olup, gradasyonu TS EN 196-1 standardına uygun seçilmiştir. Kullanılan ince agrega elek analizi sonucu Tablo 3.3'te, fiziksel özellikleri ise Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Kullanılan ince agreganın elek analizi sonuçları

Elek göz açıklığı (mm)	Geçen (%)
8	100
4	100
2	69
1	45
0.50	22
0.25	7
0.125	1

Tablo 3.4. Kullanılan ince agreganın fiziksel özellikleri

Özellik	İnce agrega
Kuru özgül ağırlık	2,60
Su emme (%)	0,67

3.5. Yöntem

Tez kapsamında üretilen geopolimer harçlar üzerinde gerçekleştirilen deney yöntemleri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

3.5.1 Karışımların hazırlanması

Tez kapsamında kullanılan tras bilyalı öğütücüde toz haline getirilip daha sonra 0.125 mm çaplı elekten elendikten sonra kalsine olması için yüksek sıcaklık fırınına konulmuştur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yüksek sıcaklık fırını

Sıcaklığı dakikada kademeli olarak 20°C artan fırında istenilen sıcaklıklara ulaşıncaya kalsinasyon süresi başlamıştır. Kalsinasyon süresi biten toz bağlayıcılar fırından çıkartılarak, oda sıcaklığına ulaşınca kadar soğutulmuştur.

Harç karışımları için tüm harç bileşenleri 0.1 g hassasiyetli tartıda tartılmıştır. Homojen bir kuru karışım elde etmek amacıyla öncelikli olarak bağlayıcı malzeme ve ince agregası kendi arasında 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra bir gün önceden hazırlanan alkali aktivatör çözeltisi karışıma ilave edilmiştir. Çözeltinin ilavesinden sonra 2 dakika düşük devirde, 2 dakika yüksek devirde olmak üzere toplam dört dakika karıştırma yapılarak karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar uygulanan deney standardına uygun olarak 50 mm ayrıtlı küp veya 40x40x160 mm boyutlu prizmatik kalıplara tek katmanda doldurulmuştur. Karışım 25 tokmak darbesi ile sıkıştırıldıktan sonra 50 defa sarsma tablasında düşürülmüştür. Geopolimer numuneler, herhangi bir ön bekleme süresi olmaksızın belirli sıcaklıktaki fırında belirtilen sürelerde kür edilmiştir. Kür süresi biten numuneler kalıplardan çıkarılarak oda sıcaklığına getirilmiştir.

TS EN 196-1 standartına uygun olarak hazırlanan çimento harçları 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saat sonra kalıptan alınan numuneler deney gününe kadar su kürüne tabi tutulmuştur. Zeolit ve tras esaslı geopolimer harç numuneler ise kalıplara yerleştirildikten sonra hemen ısıtılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Kür süresi biten geopolimer harç numuneler kalıplardan çıkarılarak oda sıcaklığına getirilmiştir.

3.6. Taze ve Sertleşmiş Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Tras ile elde edilen geopolimer harç ve geleneksel çimento harç numuneleri, taze halde yayılma ve birim hacim ağırlık deneylerine; sertleşmiş halde ise eğilme, basınç dayanımı, kılcal yolla su emme, donma-çözülme, yüksek sıcaklık, ultrases geçiş hızı ve hızlı klorür iyonu geçirimsizlik deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneyler ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

3.6.1. Yayılma deneyi

Harç karışımlarının yayılma değeri ASTM C230 (2014) standardına göre belirlenmiştir. Karışım yayılma tablasında 15 saniye içerisinde 25 kez düşürüldükten sonra birbirine dik doğrultudaki iki çapı ölçülmüş ve yayılma çapı değeri olarak bu iki değer ortalama alınmıştır. Deneyde kullanılan ASTM C 230 standartına uygun olan cihaz, Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Yayılma tablası düzeneği

3.6.2. Birim hacim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık, belirli bir hacimdeki malzeme ağırlığıdır. Bu büyüklük karışımın gerçek oranlarını belirtmek için kullanılır. Aşağıda formülize edilen adımlar ile harç karışımlarının birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır.

A: Boş kalıbın ağırlığı (kg)

B: Dolu kalıbın ağırlığı (kg)

V: Kalıbın hacmi (m^3)

BHA: Birim hacim ağırlık (kg/m^3)

$$BHA = \frac{B-A}{V}$$

3.1

3.6.3. Tek eksenli basınç deneyi

Tek eksenli basınç deneyi 200 ton kapasiteli hidrolik beton presi ile gerçekleştirilmiştir. Harç numunelerin basınç dayanımı ASTM C109 (2016) standardına göre 50 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Yükleme hızı harç numuneleri için 0.9 kN/s olarak ayarlanmıştır.

3.6.4. Eğilme deneyi

Eğilme deneyi TS EN 12390-5 (2010) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deneyde 10 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Harç numunelerin eğilme dayanımı 40x40x160 mm boyutlu prizmatik numuneler üzerinde 120 mm mesnet açıklığında üç noktalı yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde numuneler 3 kN/s hızla yüklenmiştir. Harç numunelerin eğilme dayanımı aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\text{Eğilme Dayanımı (MPa)} = \frac{Mc}{I} \quad 3.2$$

Burada; M: Maksimum moment (N.mm), c: Tarafsız eksen ile giriş yüksekliğinin en üst noktası arasındaki uzaklık (mm), I: Atalet momenti (mm⁴)'dir.

3.6.5. Ultrases geçiş hızı deneyi

Harç numunelerin ultrases geçiş hızı ASTM C597 (2016) standardına göre 50 mm boyutlu küp numuneler üzerinde Şekil 3.3'te görülen Proceq marka Pundit cihazı ile belirlenmiştir. Numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmadan önce cihaz kalibrasyon çubuğu ile kalibre edilmiştir. Ultrases geçiş hızı ölçümleri numunenin döküm yönüne dik olacak şekilde ve numunenin düzgün yüzeylerinde gerçekleştirilmiştir.



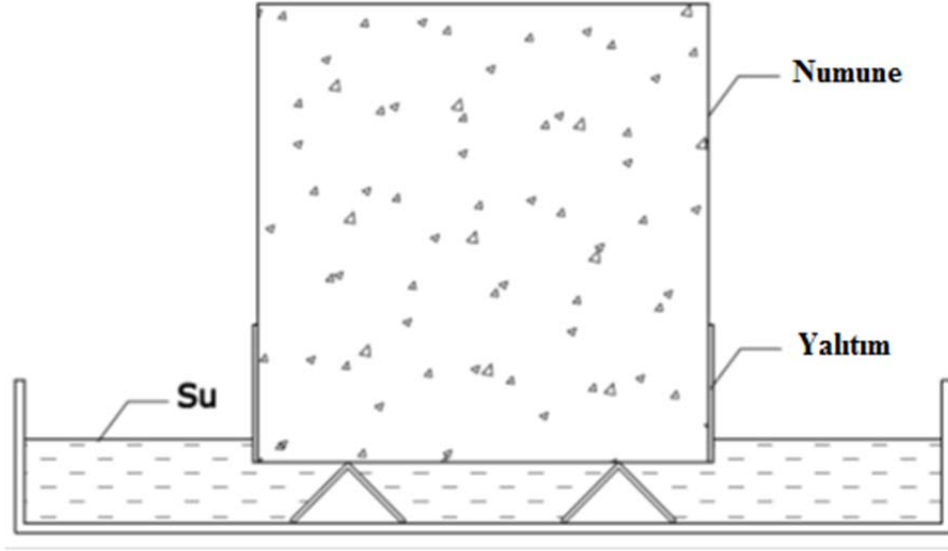
Şekil 3.3. Ultrases geçiş hızı deney cihazı

3.6.6. Kılcal yolla su emme deneyi

Harç numunelerin kılcal yolla su emme değerleri ASTM C1585-13 standartına göre 50 mm boyutlu küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Numuneler, öncelikle etüvde 105°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuş ve numuneler soğuduktan sonra yan yüzeyleri akrilik kopolimer esaslı bir yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi numunelerin alt yüzeyleri aşağıda olacak şekilde bir kabın içerisinde destek çubuklarının üzerine konulmuştur. Numune yan yüzeyleri 3 mm suyun içerisinde olacak şekilde kaba su doldurulmuştur. Deney standardının belirlediği sürelerde numunelerin ağırlık ölçümü gerçekleştirilmiştir. 1 dakika ile 6 saat arasındaki kılcal yolla su emme miktarı, başlangıç su emme hızı ($\text{mm/s}^{1/2}$) olarak tanımlanmıştır. Numunelerin başlangıç hızı I - $s^{1/2}$ grafiğindeki eğrilerin eğimi olarak belirlenmiştir. I değerleri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 3.5'te geopolimer harç numunelerinin ve çimento harcı numunelerinin kılcal yolla su emme deney esnasındaki görüntüleri verilmiştir.

$$I = m_t / (a/d)$$

Burada; I : Kılcal yolla su emme (mm), m_t : Belirtilen zaman aralığında numunenin ağırlık değişimi (g), a : Numunenin suya maruz kalan yüzeyinin alanı (mm^2), d : Suyun yoğunluğu (g/mm^3)'dur.



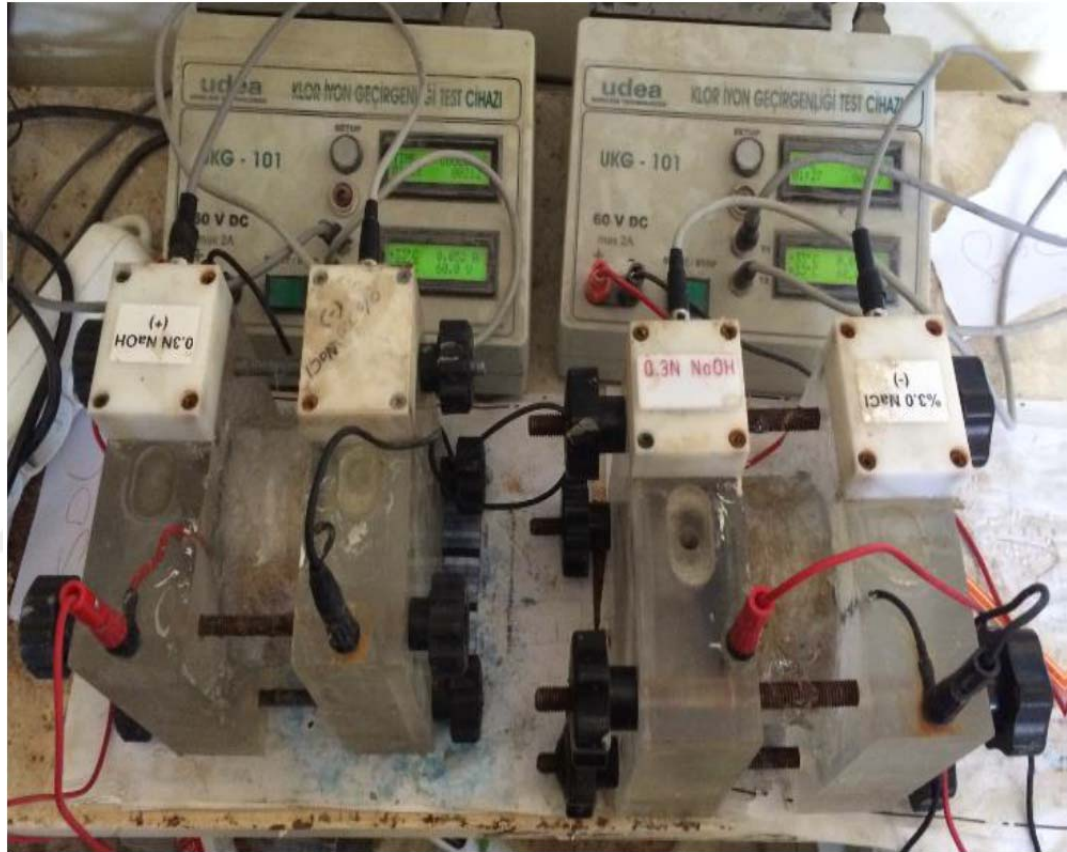
Şekil 3.4. Kılcal su emme deney düzeneği



Şekil 3.5. Kılcal su emme deneyine tabi tutulan numuneler

3.6.7. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik deneyi

Hızlı klorür iyonu geçirimsilik deneyi ASTM C1202 (2012) standardına göre gerçekleştirilmiştir. 100 mm çap ve 50 mm yüksekliğe sahip beton numuneler üzerinde 6 saat boyunca 60 V potansiyel uygulayarak coulomb biriminde elektrik yükü geçişi kaydedilmiştir. Şekil 3.6'da görülen deney düzeneğindeki hücrelerin birinde %3 NaCl çözeltisi ve metal elektrot, diğerinde ise 0,3 M NaOH çözeltisi ve metal elektrot bulunmaktadır.



Şekil 3.6. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik deney cihazı

3.6.8. Yüksek sıcaklık direnci deneyi

Yüksek sıcaklık direnci deneyi, 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca kurutulan 50 mm ayrıtlı küp harç numunelerin 5°C/dakika hızla ısıtılarak ve 150°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara 3 saat maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Şekil 3.7'de gösterilen yüksek sıcaklık fırınında, numuneler yüksek sıcaklıklara maruz bırakılıp test edilmiştir



Şekil 3.7. Yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan numuneler

3.6.9. Donma-çözülme deneyi

Donma-çözülme deneyi, ASTM C666 (1998) standardına göre 100 mm boyutlu küp beton numuneler üzerinde günde bir çevrim yapacak şekilde -20°C ile $+20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve suda çözünme olacak şekilde gerçekleştirilir. Ancak, tez kapsamında 50 mm boyutlu küp harç numuneler üzerinde günde üç çevrim olacak şekilde -15°C ile $+15^{\circ}\text{C}$ aralığında deney gerçekleştirilmiştir. Harç numuneleri toplamda 150 çevrim donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Her 30 çevrim sonunda numunelerin doygun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Şekil 3.8’de gösterilen deney düzeneğinde numuneler donma-çözülme etkisinde kalmışlardır.



Şekil 3.8. Donma-çözülme deneyine tabi tutulan numuneler

3.7. Hazırlanan Karışımlar

Bir önceki bölümde bahsedilen deneylerin gerçekleştirilmesi için oluşturulan numunelerin boyutu ve sayısı ile ilgili standartlar Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Tez kapsamında hazırlanan numuneler ve uygulanan deneyler

Uygulanan Deney	Numune Boyutları	Numune Sayısı
Kalsinasyon sıcaklık ve süre tayini	50x50x50 mm	72
Aktivatör konsantrasyonunun etkisi	50x50x50 mm	18
Kür koşulunun etkisi	50x50x50 mm	45
Eğilme dayanımı	40x40x160 mm	6
Kılcal yolla su emme	50x50x50 mm	6
Hızlı klörür iyonu geçirimsizliği	100x200 mm silindir	6
Yüksek sıcaklık direnci	50x50x50 mm	30
Donma-çözülme direnci	50x50x50 mm	6
Ultra-ses geçirgenlik hızı	50x50x50 mm	6

Geopolimer harç geliştirilmesi için toplam 183 adet 50 mm ayrıtlı küp numune, 6 adet 40x40x160 mm prizmatik numune ve 6 adet 100x50 mm silindir numune dökülmüştür. Tablo 3.6'da geopolimer harçların karışım oranları verilmiştir. Karışımlara ilave su, işlenebilirliği artırmak amacıyla konulmuştur.

Tablo 3.6. 1dm³ geopolimer harçların karışım oranları

Na ₂ O (%)	M _s (SiO ₂ /Na ₂ O)	Agrega (g)	Toz malzeme (g)	Sodyum silikat (g)	Sodyum hidroksit (g)	İlave su (g)	Su/bağlayıcı oranı
10	0	1254	456	0	60,6	208	0.46
10	0.4	1254	456	75	52.7	159	0.46
10	0.8	1254	456	140	45.7	117	0.46
10	1.2	1254	456	205	38.8	75	0.46
10	1.6	1254	456	265	32.5	36	0.46
10	2.0	1254	456	300	23.3	13	0.46

* Su/bağlayıcı oranı hesaplamasında ilave su ve sodyum silikattan gelen su dikkate alınmıştır.

Tüm karışımların toz malzeme, agregası ve su/bağlayıcı oranları sabit tutulmuştur. Agregası miktarı toz malzeme miktarının 2.75 katı olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Alkali aktivatör konsantrasyonu, kalsinasyon esnasında uygulanan sıcaklık ve süre ile kür koşulunun etkisini incelemek amacıyla tüm karışımların su/bağlayıcı oranı 0.46 olarak sabit tutulmuştur. En uygun geopolimer karışımın dayanımına eşit dayanıma sahip portland çimentosu harç numuneleri üretilmiştir. Portland çimentosu harç karışımı oranları 3:1:0.6 olacak şekilde deneme dökümleri yapılarak belirlenmiştir. Burada üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımı, geopolimer karışımından elde edilen 40 MPa'a yakın olması hedeflenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin bulguları ve bu bulgular üzerine tartışmalar bu bölümde belirtilmiştir. Deneysel çalışma genel anlamda iki başlık altında toplanmıştır. Bunlar;

- Doğal puzolan esaslı geopolimer harç geliştirilmesi,
- Geopolimer harç ile çimento esaslı sistemlerin taze hal, mekanik ve durabilite yönünden karşılaştırılması.

4.1. Doğal Puzolan Esaslı Geopolimer Harç Geliştirilmesi

Doğal malzemelerle geopolimer harç geliştirilmesi amacıyla tez kapsamında iki farklı alüminosilikat toz malzeme (tras ve zeolit) kullanılmıştır. Bu amaçla, optimum alkali aktivatör tipi ve dozajı sabit tutularak, kalsinasyon sıcaklık ve süresi tespiti yapabilmek için dayanım açısından kıyaslama yapılmıştır. Bunun için öncelikli olarak deneme harç karışımları oluşturulmuş ve daha sonra alkali aktivatör konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Bu aşamadan sonra, geopolimer harç karışımlarının diğer parametreleri sabit tutularak kür koşulları incelenmiştir.

4.1.1. Doğal puzolanın seçimi

Alüminosilikat malzemelerden olan zeolit ve trasın kalsinasyon sıcaklık ve süresi için deneme dökümleri hazırlanarak tezin hangi puzolan ile devam edileceği, karışımların basınç dayanımları dikkate alınarak karara bağlanmıştır. Geriye kalan s/b oranı, alkali aktivatör dozajı ve konsantrasyonu, kür koşulları gibi parametreler sabit tutularak sadece kalsinasyon etkisi incelenmiştir.

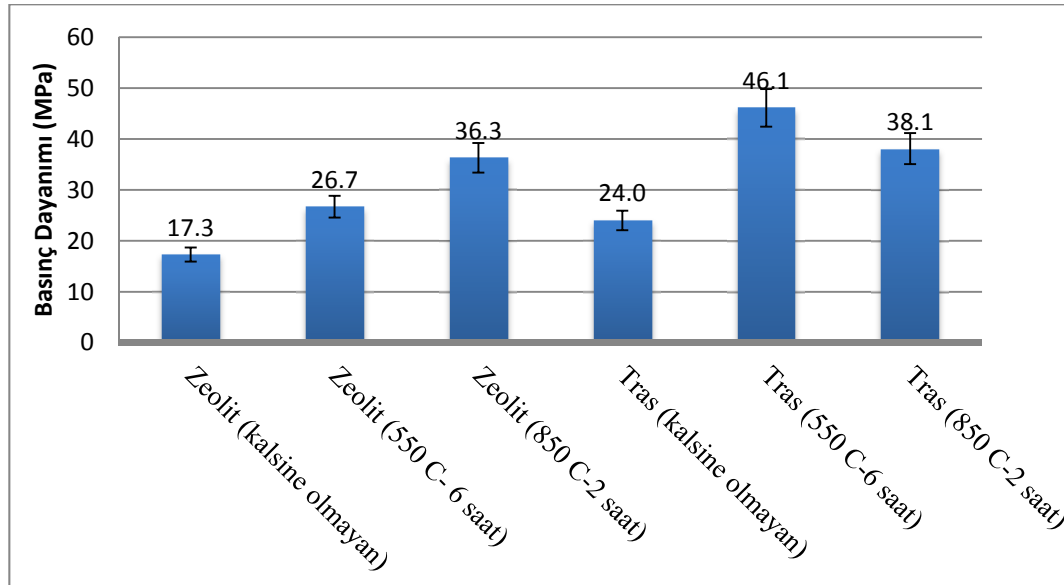
Çalışmada alkali aktivatör konsantrasyonunun sınır değerleri belirlenirken Na_2O oranının %10'a kadar kullanılmasına karar verilmiştir. Na_2O oranının %10'dan fazla kullanımının ekonomik bir karışım oluşturmaktan uzaklaşılacağı sonucuna varılmıştır. Deneme karışımlarında M_s oranının 1.6'nın üzerinde kullanımının karışımların dayanım performansı açısından optimum değerlerde kalacağı belirlenmiş ve bu sınırlar dâhilinde çalışılmasına karar verilmiştir (Tuyan, 2017).

Geopolimer üretimi için iki farklı alüminosilikatın deneme karışımı oluşturularak uygun puzolan ile yola devam etme kararı alınmıştır. Alüminosilikat

malzemenin uygunluğu, oluşturulan geopolimer harçların tek eksenli basınç dayanımına göre karara bağlanmıştır. Alkali dozajı ve konsantrasyonu, kür sıcaklık ve süresi ile su/bağlayıcı oranı sabit tutularak sadece iki farklı malzemenin (zeolit ve trasın) kalsinasyon sıcaklık ve süresi tespit edilmiştir. Tablo 4.1 ve Şekil 4.1’de görüldüğü gibi tras 550°C’de 6 saat kalsine edildiğinde en yüksek dayanımı sağlamıştır. Burdan yola çıkarak tezin devamında üretilen geopolimer harçlarda toz alüminosilikat kaynağı olarak tras kullanımına karar verilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı puzolanların sabit parametler altında kalsinasyon sıcaklığı ve süresinin geopolimer harç karışımlarının basınç dayanımına etkisi

Toz malzeme	Kalsinasyon sıcaklığı (°C)	Kalsinasyon süresi (saat)	Na ₂ O (%)	M _s	Kür sıcaklığı (°C)	Kür süresi (gün)	Basınç Dayanımı (MPa)
Zeolit	-	-	10	1.6	90	5	17.3
Zeolit	550	6	10	1.6	90	5	26.7
Zeolit	850	2	10	1.6	90	5	36.3
Tras	-	-	10	1.6	90	5	24
Tras	550	6	10	1.6	90	5	46.1
Tras	850	2	10	1.6	90	5	38.1



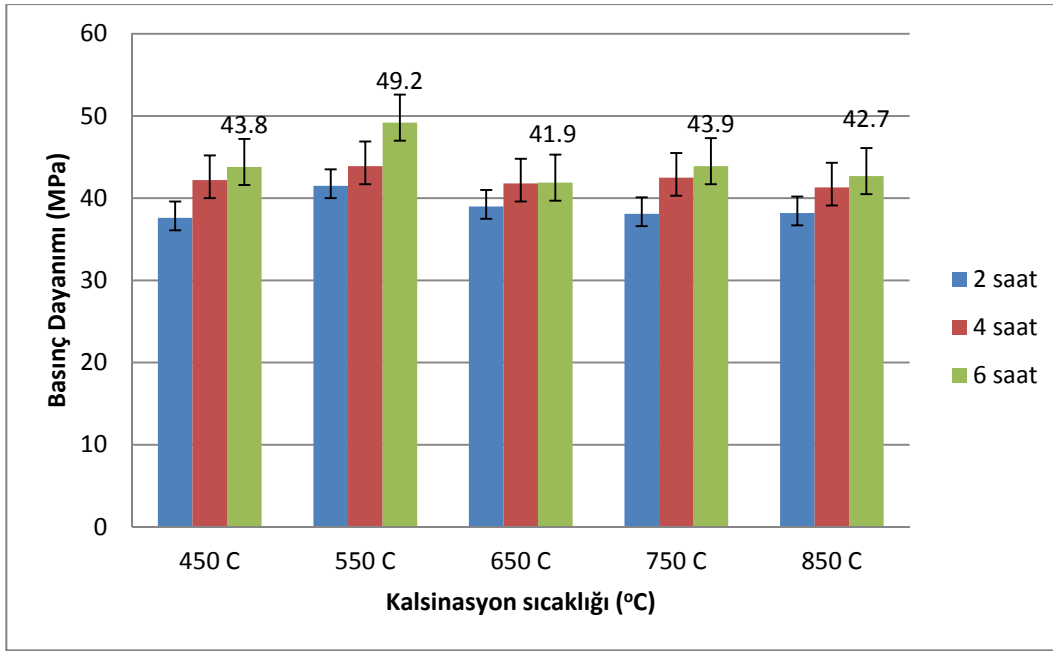
Şekil 4.1. Zeolit ve trasın kalsinasyonunun geopolimer harç dayanımına etkisi

4.1.2. Trasın kalsinasyon sıcaklık ve süresinin belirlenmesi

Trasın en uygun kalsinasyon sıcaklığı ve süresini belirlemek için geopolimer harç karışımları oluşturulmuştur. Bu karışımlarda alkali konsantrasyonu %10 Na₂O (trasın ağırlıkça yüzdesi), su/bağlayıcı oranı 0.46 ve M_s oranı 1.6 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Ayrıca, tüm karışımlar 90°C etüvde 5 gün boyunca küre tabi tutulmuştur.

Tras esaslı geopolimer harçlarda kalsinasyon sıcaklığın ve süresinin etkisi Şekil 4.2’te gösterilmiştir. Tras ile üretilen geopolimer harçlarda, sıcaklık ve sürenin artması ile dayanımda belli bir değere kadar artış görülmüştür. Sıcaklığın 450°C’den 550°C’ye çıkması ile dayanım artışı görülürken 550°C üstüne çıkılan sıcaklıklarda dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Örneğin, 450°C’de 6 saat kalsine edilen trasla üretilen geopolimer harcın basınç dayanımı 43 MPa çıkarken 550°C’de 6 saat kalsine edilen harç numunelerin basınç dayanımı 49 MPa olmuştur. 650°C’de 6 saat kalsine edilen harç numunelerin basınç dayanımı ise 42 MPa’a düşmüştür. Bu durumun, 650°C’de trasın tekrar kristalleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kalsinasyon süresinin uzatılması düşük sıcaklıklarda daha etkili olduğu sonucunu da göstermiştir.

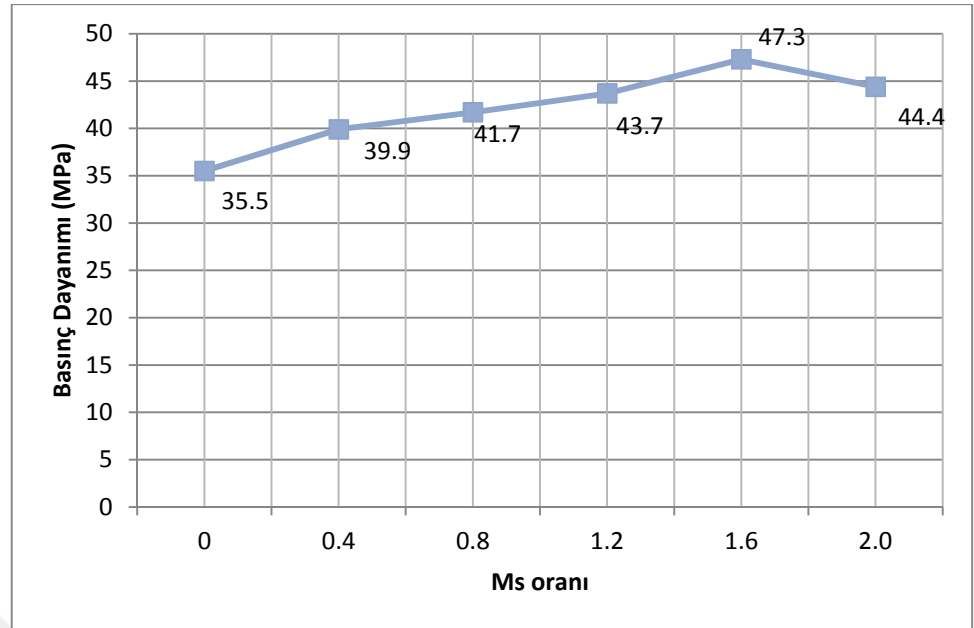
Kalsinasyon süresinin etkisine bakılacak olunursa, bağlayıcı toz malzemenin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılma süreleri artarken dayanım artışı da gözlemlenmiştir. 550°C’de 2 saat kalsine edilen trasın ortalama basınç değeri 41 MPa civarındayken aynı sıcaklık değerinde 6 saat kalsine işlemine tabi tutulan geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı yaklaşık 49 MPa’a çıkmıştır. Yine aynı şekilde 450°C’de 2 saat kalsine edilen traslı geopolimer harcın basınç dayanımı 37 MPa olurken aynı sıcaklıkta 6 saat kalsine edilen geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 44 MPa’a çıkmıştır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda kalsinasyon süresinin uzatılması daha fazla etkili olmuştur.



Şekil 4.2. Kalsinasyon sıcaklık ve süresinin traslı geopolimer harcı basınç dayanımına etkisi

4.1.3. Optimum alkali aktivatör çözeltisinin belirlenmesi

Tras esaslı geopolimer harçlarda M_s ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) oranı etkisi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Hazırlanan karışımlarda Na_2O konsantrasyonu (%10), su/bağlayıcı oranı (0.46) sabit tutulmuştur. Ayrıca 550°C 'de 6 saat kalsine edilen trastan üretilmiş geopolimer numuneler 90°C 5 gün kür işlemine tabi tutulmuştur. Söz konusu harç karışımlarda M_s oranı 0 ile 2 arasında değiştirilmiştir. M_s oranı artışının geopolimer harcın basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Tras ile üretilen geopolimer harçlarda belli bir değere kadar M_s oranının artmasıyla karışımların basınç dayanımı da artış göstermiştir. Aynı Na_2O oranına sahip karışımlar için M_s oranının 0'dan 1.6'ya artması, karışımların basınç dayanımında önemli bir miktarda artışa sebep olmuştur. Bunun sebebi olarak Tuyan (2017), karışımların M_s oranının 0'dan 1.6'ya çıkarılması ile reaksiyona giren ürünlerin arttığı ve daha yoğun ve boşluksuz bir yapının oluşmasından kaynaklandığını belirtmiştir. M_s oranının 1.6'nın üstüne çıktığı zaman ise karışımların basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Bunun tam olarak kesin nedeni bilinemese de fazla miktarda sodyum silikatın bağlayıcı toz malzemenin etrafını sararak tepkimeye girmeyen parçacıkların oluşmasını tetiklemiş olabilir.

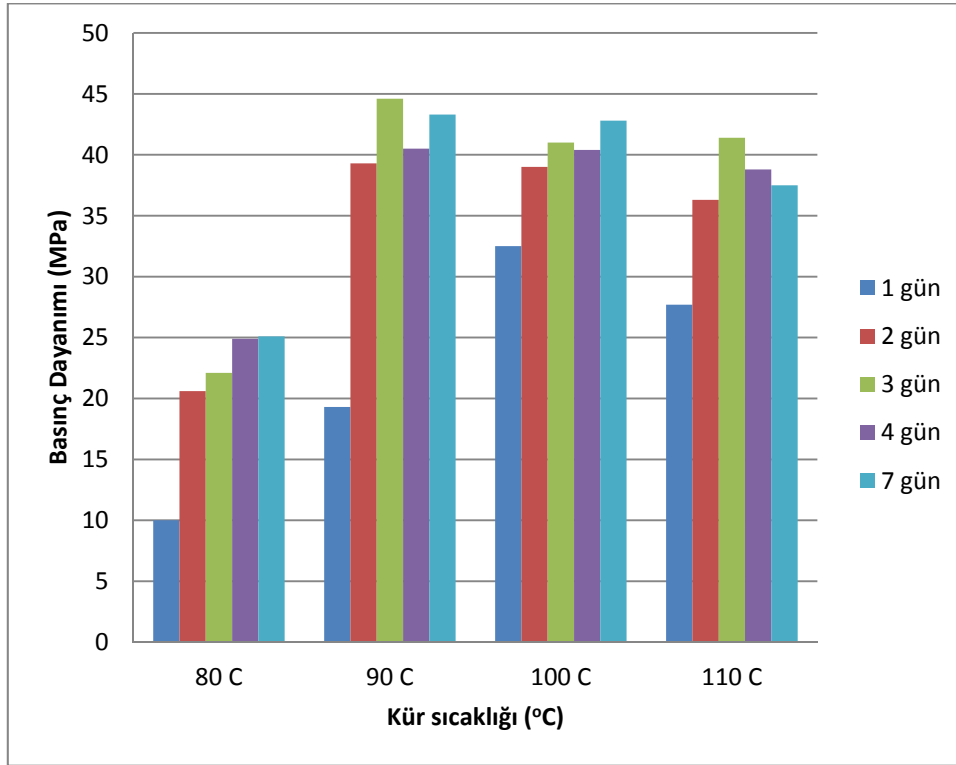


Şekil 4.3. M_s oranının tras içeren geopolimer harçlarının basınç dayanımına etkisi

4.1.4. Optimum kür koşulunun belirlenmesi

Trasla geopolimer harç geliştirilmesi için diğer bir etkin parametre en uygun kür koşulunun belirlenmesidir. Çimentolu sistemlerde genelde kür işlemi suda veya nemli ortamda yapılmaktadır. Ancak geopolimer sistemlerin kür işlemi oda sıcaklığının üstünde belirli bir süre bekleterek gerçekleştirilmektedir (Davidovits, 1991). Gereğinden fazla kür sıcaklığı ve süresi enerji sarfıyatı açısından olumsuz bir durum yaratacağından, optimum sıcaklık ve sürenin belirlenmesi geopolimer üretimi için önemli bir adımdır. Uygun sıcaklık (550°C) ve sürede (6 saat) kalsine edilen tras kullanılarak, M_s oranı 1.6 ve Na_2O konsantrasyonu %10 olan geopolimer harç karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlar $80, 90, 100$ ve 110°C 'de, 1, 2, 3, 4 ve 7 gün boyunca kür işlemine tabi tutulmuştur. Kür işleminin tras esaslı geopolimer harçlara etkisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Sıcaklık etkisine bakılacak olunursa, 80°C 'de 1 gün boyunca kür işlemine tabi tutulan numunelerin basınç dayanımı 10 MPa civarında iken 90°C 'de 1 gün kürlenmiş harç numunelerin basınç dayanımı 19 MPa çıkmıştır. Yine 100°C 'de 1 gün kür işlemine tabi tutulan harçların basınç dayanımları artarak 32 MPa civarında olmuştur. Fakat sıcaklığın 110°C , kür süresinin 1 gün olduğu durumda dayanım düşüşü gözlemlenmiştir (27 MPa). Geopolimer harçların kür işlemine maruz bırakılan sürelerini kıyaslarsak 90°C 'de 1 gün kürlenmiş geopolimer harçların basınç dayanımı 19 MPa iken aynı

derecede 3 gün kürlenene numuneler 45 MPa basınç dayanımı vermiştir. Ancak 90°C’de 3 günden daha fazla kür işlemine tabi tutulan numunelerde dayanım artışı gözlemlenmemiştir. 110°C’de 1 gün kür işlemine tabi tutulan numuneler 27 MPa dayanım gösterirken, aynı sıcaklıkta 2 gün kür edilen numuneler 39 MPa basınç dayanımı vermiştir. 2. günden sonra kür edilen numuneler kayda değer dayanım artışı göstermemiştir.



Şekil 4.4. Kür sıcaklık ve süresinin traşlı geopolimer harcın basınç dayanımına etkisi

4.1.5. Tras ile zeolitin priz süresi

Kalsine edilen tras ve zeolitten üretilen geopolimer hamurların priz süresi Vicat aparatı kullanılarak ölçülmüştür. Hamur karışımları optimum aktivatör konsantrasyonunda hazırlanmıştır. Vikat iğnesinin numune altında yer alan camdan 5-7 mm üstünde kaldığı durum priz başlangıcı, iğnenin numuneye batmadığı süre ise priz bitişi olarak kabul edilmiştir. Numuneler 20°C ve 90°C sıcaklıklarda deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Karışımların priz süresi sonuçları

Deney koşulu	Priz süresi (dakika)	
	Tras	Zeolit
20 °C’de priz başlangıç	-	-
20 °C’de priz bitiş	-	-
90 °C’de priz başlangıç	45	40
90 °C’de priz bitiş	60	55

Sonuçta 20°C ortam sıcaklığında tras ve zeolit esaslı geopolimer karışımların 24 saat sonunda priz almadığı gözlemlenmiştir. Ancak 90°C’de bekletilen numuneler belirli sürelerde priz aldığı görülmüştür. Priz süresi bakımından geopolimerin içerdiği toz malzemenin kayda değer etkisi olmadığı anlaşılmıştır.

Tez kapsamında doğal malzemelerle geopolimer harç geliştirilmesi hususunda yapılan çalışmalarda şu sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- Bağlayıcı toz malzemelerin (tras ve zeolit) kalsine edilmesi geopolimer harç dayanımlarını önemli ölçüde arttırmıştır.
- Toz malzemenin özelliklerine bağlı olarak optimum kalsinasyon sıcaklığı ve süresi değişmiştir. Oluşturulan geopolimer harç karışımların dayanımı dikkate alınarak tezin devamında toz malzemesi olarak trasın kullanımına karar verilmiştir.
- Trasla elde edilen geopolimer harçlarda M_s oranının önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Genel olarak M_s oranı 1.6 olan karışımların basınç dayanımları diğer karışımlara göre daha yüksek olmuştur. Bunun üstündeki M_s değerleri dayanımı azaltmıştır. Bu düşüşün nedeni farklı araştırmacılar tarafından farklı şekilde açıklanmıştır:
 - Law et all. (2015), yüksek alkali ortamda reaksiyon hızının artmasıyla hızlı bir şekilde oluşan reaksiyon ürünlerinin reaksiyona girmeyen parçacıkların alkali çözelti ile temasını engellemesinden kaynaklandığını söylemiştir.
 - Duxson (2005) tarafından yapılan çalışmada ise M_s oranının artması ile çözeltinin pH’ının azaldığı ve bunun sonucunda reaksiyon derecesinin düştüğü belirtilmiştir.

- Barbosa (2000) ise, aşırı miktarda sodyum silikatın, polikondensasyon işlemi sırasında suyun buharlaşmasını ve geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumunu engelleyebileceğini belirtmiştir.
- Tras esaslı geopolimer harçların optimum kalsinasyon sıcaklığı 550°C, kalsinasyon süresi 6 saat, M_s oranı 1.6, kür işlemi sıcaklığı ve süresi 90 °C ile 3 gün olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda üretilen geopolimer harcın 41 MPa basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Tras Esaslı Geopolimer Harç ile Çimento Harcının Taze Hal, Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Karşılaştırılması

Tras ile üretilen geopolimer harç numunelerin eşit dayanıma sahip çimento harcına göre taze hal, mekanik ve durabilite özellikleri kıyaslanmıştır. Bu bağlamda yayılma çapı ve birim hacim ağırlığı, klor iyon geçirgenliği, ultra-ses geçirimsizliği, kapiler su emme kapasitesi, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme direnci gibi özellikler karşılaştırılmıştır.

Geopolimer harcı dayanımına (41MPa) yakın 28 günlük basınç dayanımına sahip çimento harcı üretilmiştir. Çimento harcında hedeflenen basınç dayanımı yakalamak için deneme dökümleri yapılmıştır. 28 gün suda kürlenmiş 50 mm ayrıtlı küp numunelerde 41 MPa 28 günlük basınç dayanımı, karışım oranları 3:1:0.6 (3 birim standart kum, 1 birim çimento ve 0.6 birim su) olan harçta elde edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla üretilen harç karışımların önemli özellikleri Tablo 4.3'te özetlenmiştir.

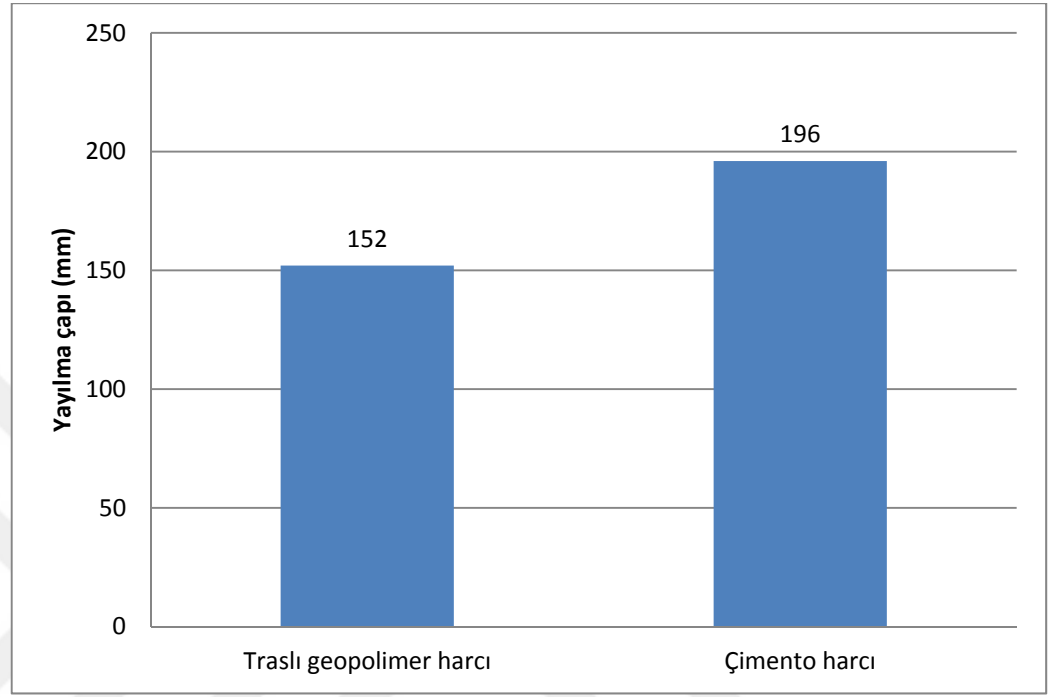
Tablo 4.3. Harç karışımlarında dikkate alınan parametreler

Toz malzeme	Kalsinasyon sıcaklığı (°C)	Kalsinasyon süresi (saat)	s/b oranı	M_s	Kür sıcaklığı (°C)	Kür süresi (gün)	Kür tipi
Tras	550	6	0.46	1.6	90	3	Etüv
Çimento	-	-	0.6	-	20	28	Su

4.2.1. Yayılma çapı deneyi sonuçları

Tez kapsamında incelenen tras esaslı geopolimer harcı ve aynı basınç dayanımına sahip çimento harcının yayılma değerleri Şekil 4.5'te yapılmıştır.

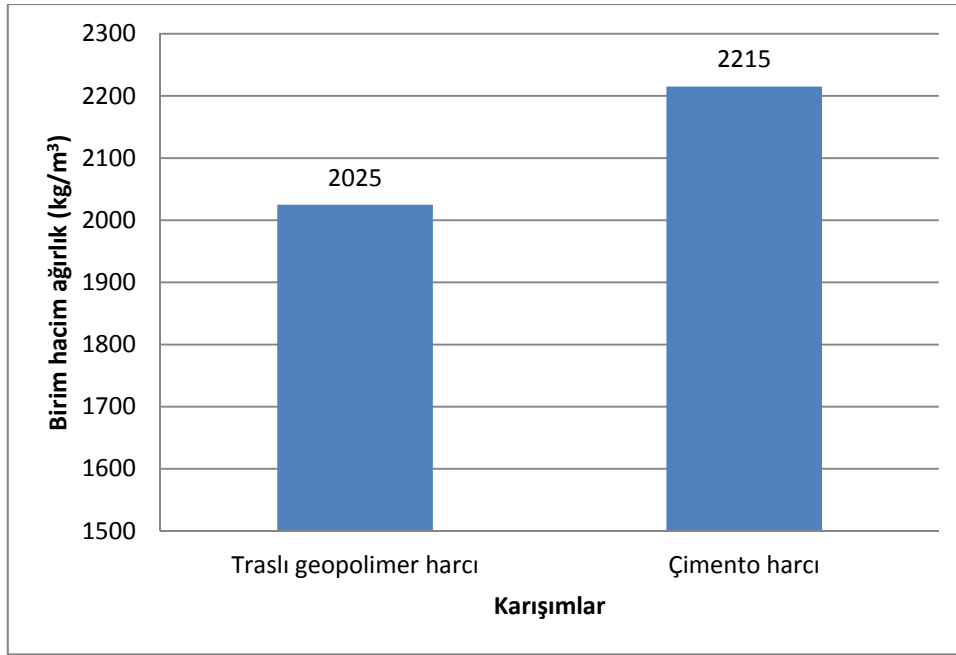
Çimento harcının traslı geopolimer harcına kıyasla daha yüksek yayılma çapı saptanmıştır. Bu durum bir ölçüde çimento harcının daha yüksek su/bağlayıcı oranından, bir ölçüde de geopolimer harcın daha kohesif olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.5. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın yayılma çapları karşılaştırması

4.2.2. Birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

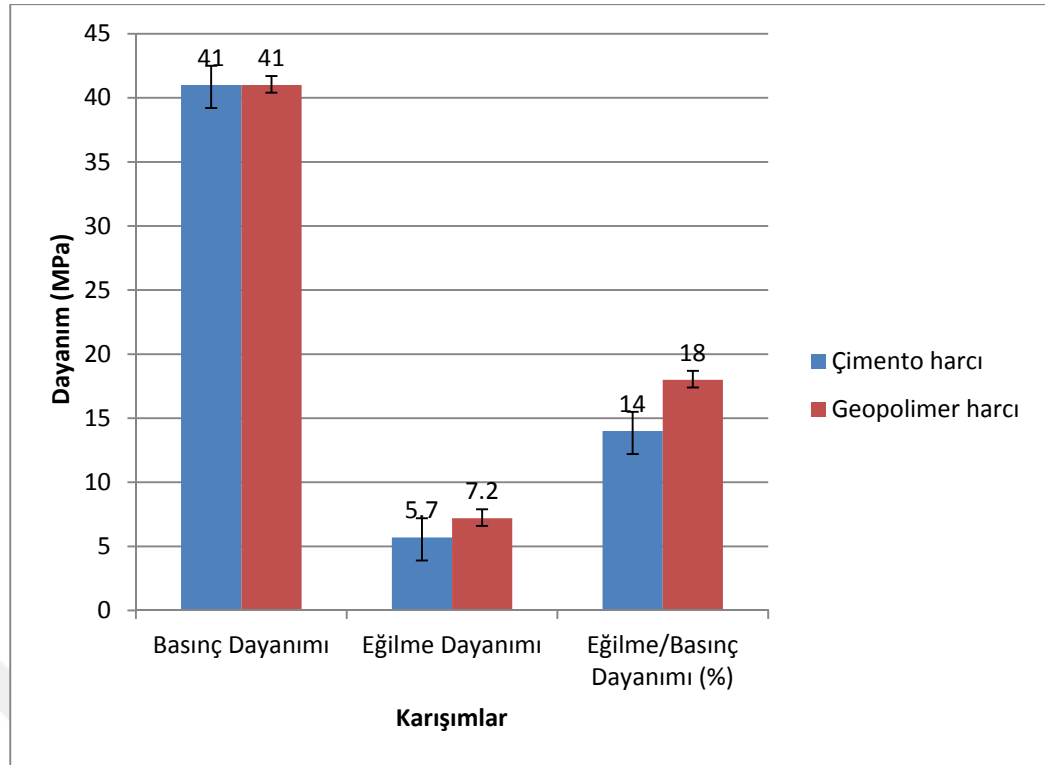
Şekil 4.6’da görüldüğü üzere çimento esaslı harcın taze birim hacim ağırlığı tras esaslı geopolimere göre daha fazladır. Çimento harcının birim hacim ağırlığı 2215 kg/m^3 iken trasın birim hacim ağırlığı 2025 kg/m^3 çıkmıştır. Bunun en önemli nedeni, trasın birim hacim ağırlığının (2.4) çimentonunkinden (3.1) düşük olması denilebilir.



Şekil 4.6. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ve çimentolu harcın birim hacim ağırlığı

4.2.3. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları

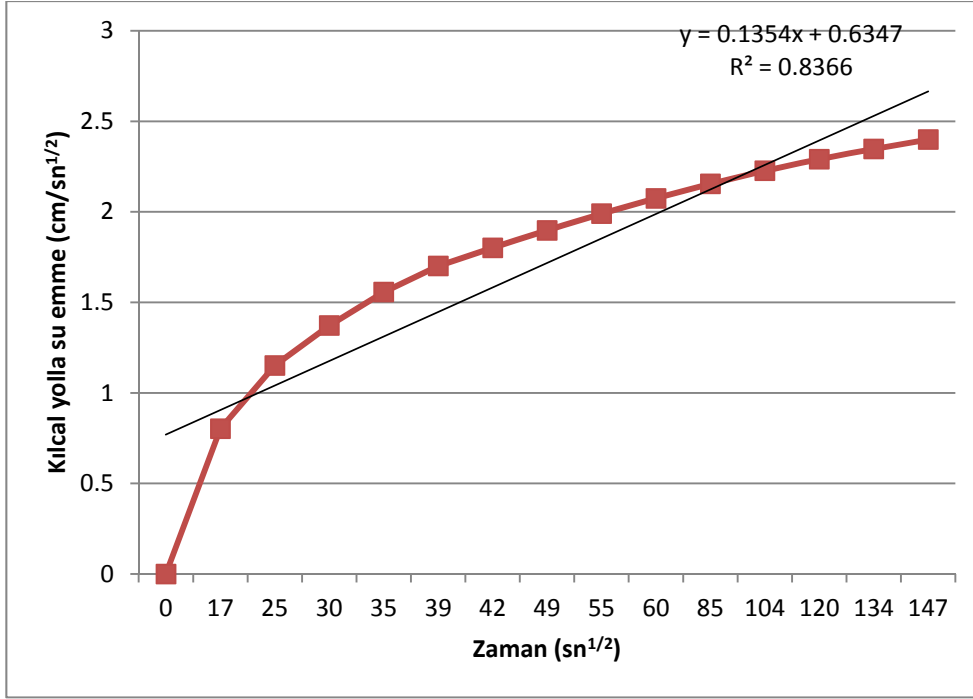
Harç numunelerin eğilme dayanımları Şekil 4.7’de gösterilmiştir. 28 gün suda kürlenmiş çimento harcının eğilme dayanımı 5.7 MPa ölçülürken geopolimer harcın 90°C sıcaklıkta 3 gün kürleme sonrası eğilme dayanımı 7.2 MPa olarak bulunmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere, harçların basınç dayanımları çok yakın olmalarına rağmen (41MPa) eğilme dayanımları farklılık göstermiştir. Geopolimer harcın eğilme/basınç dayanımı %18 ölçülürken çimento harcın eğilme/basınç dayanımı %14 ölçülmüştür. Traslı geopolimer harcın geleneksel çimento harcına göre daha fazla eğilme dayanımı göstermesinin bir sebebi, trasın gözenekli yapısından dolayı daha güçlü bir ara yüzeye neden olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Mindess et al., (2003) ve Tüyan (2017), güçlü ara yüzeyin eğilme ve çekme dayanımına etkisinin, basınç dayanımına etkisinden daha fazla olduğunu belirtmiştir.



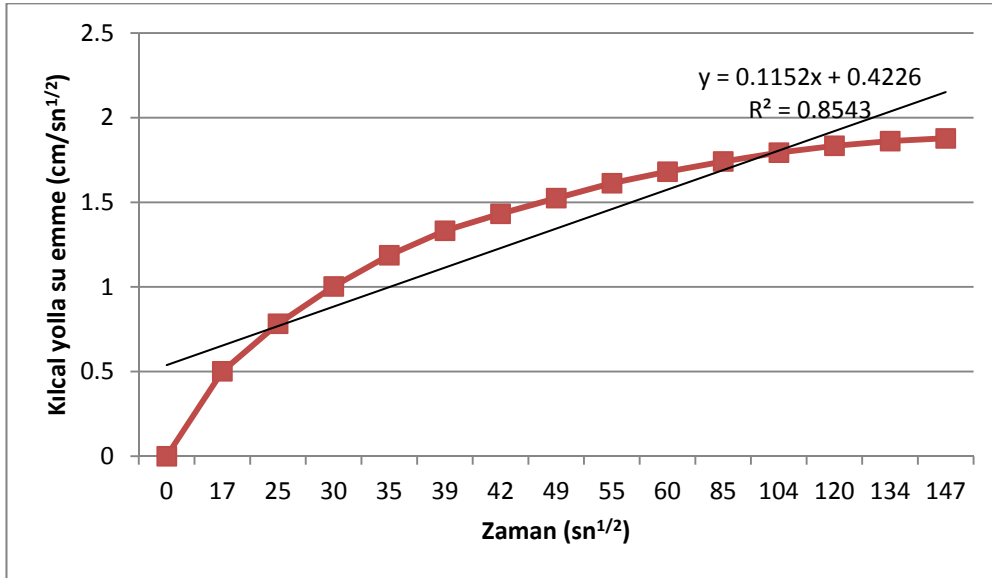
Şekil 4.7. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın eğilme dayanımı ve eğilme/basınç dayanım oranı

4.2.4 Kapiler su emme deneyi sonuçları

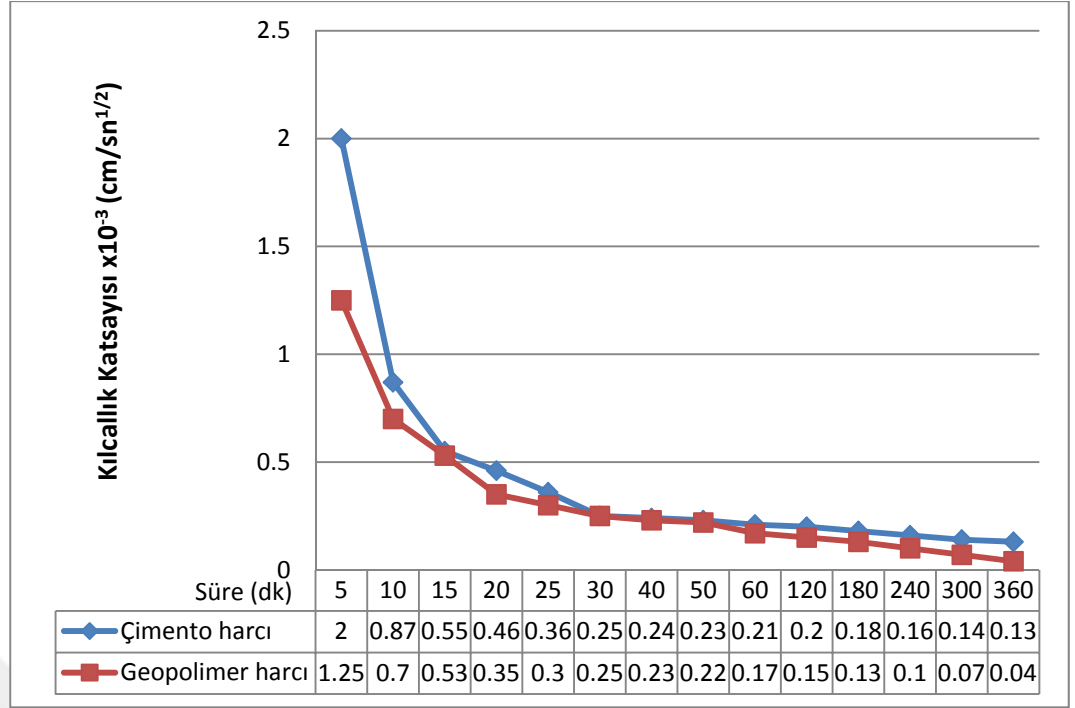
3 gün boyunca 90°C etüvde kürlenmiş geopolimer ve 28 gün standart su kürüne tabi tutulan çimento harcı karışımlarının birincil kılcal yolla su emme hızları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, geopolimer harcın kılcal su emme hızı geleneksel çimento harcına göre daha düşük olmuştur. Özellikle, deneye tabi tutuldukları ilk anlarda, çimento harcının geopolimer harcına göre yaklaşık 2 kat daha fazla kılcal geçirimsiliğe sahip olduğu söylenebilir. Geopolimer harcın çimento harcına göre daha düşük kılcal su emme hızına sahip olması, daha düşük su/bağlayıcı oranından kaynaklanmış olabilir. Şekil 4.8’de gösterilen grafiklerde numunelerin kılcal su emme hızları gösterilmiştir.



a) 28 gün su kürüne tabi tutulan çimento harcının kılcal su emme hızı



b) 3 gün boyunca 90°C etüvde kürlenmiş geopolimer harcın kılcal su emme hızı

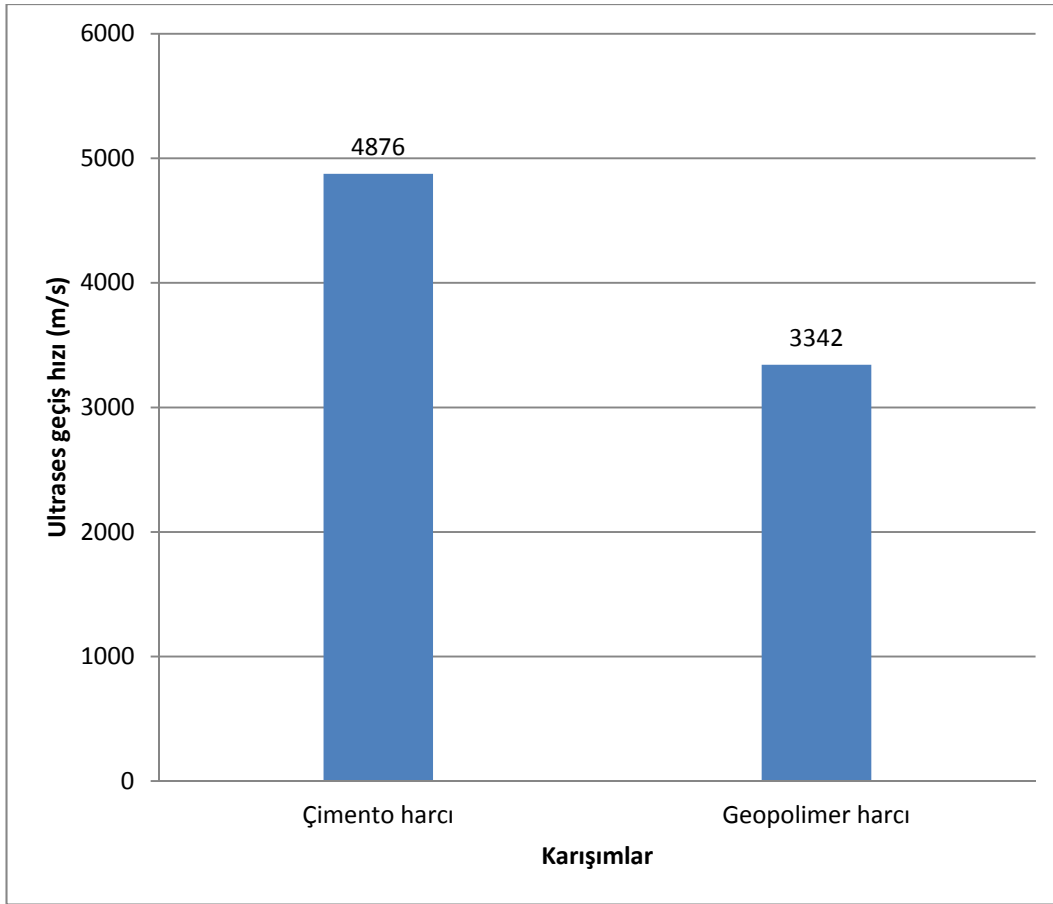


c) Geopolimer harcı ile çimento harcının birbirlerine kıyasla kılcal su emme hızları

Şekil 4.8. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile portland çimentolu harcın kılcal yolla su emme hızları

4.2.5. Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları

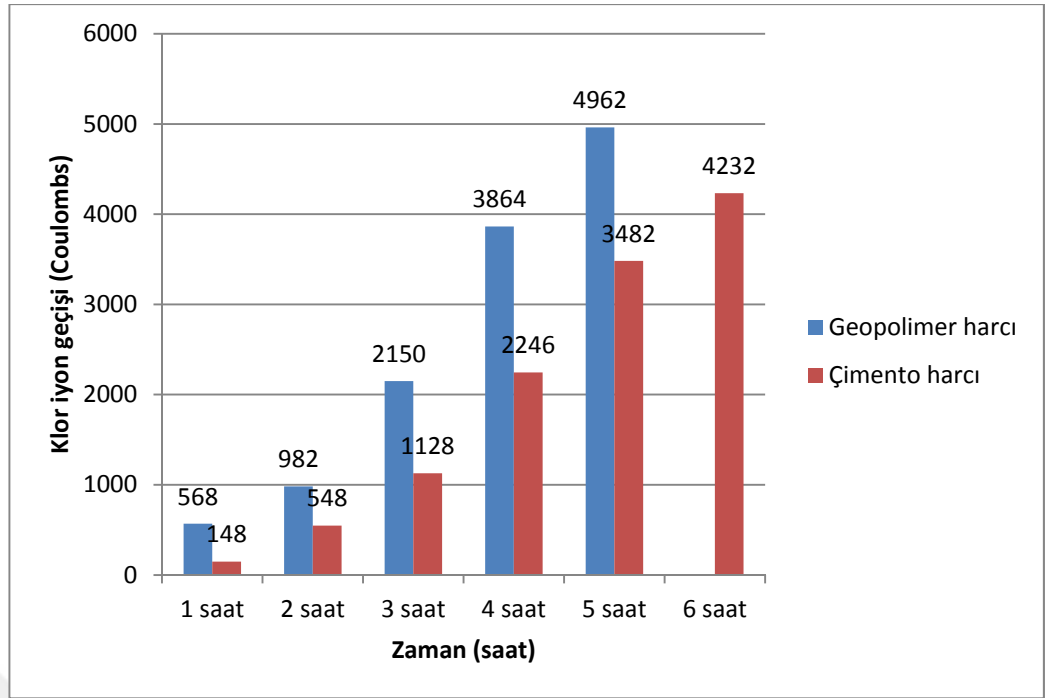
Üretilen harçların ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Deney sonuçlarından da görüleceği üzere, geleneksel çimento harcının ultrases geçiş hızının, geopolimer harcinkinden daha yüksek olduğu ölçülmüştür. 28 gün suda kürlenmiş portland çimentosu harcının ultrases geçiş hızı 4876 m/s ölçülürken 3 gün boyunca 90°C etüvde kürlenmiş geopolimer harcının ultrases geçiş hızı 3342 m/s çıkmıştır. Yüksek sıcaklıkta kürlenme sonucunda geopolimer harcın bünyesinde daha fazla boşluk olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Geopolimer ve çimento harcının basınç dayanımı aynı olmasına karşın (41 MPa) ultrases geçiş hızı farklı çıkmıştır. Dolayısıyla, kıyaslanan malzemeler farklı olduğu gerçeği de dikkate alınarak, basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında anlamlı bir ilişki bulunmadığı kanısına varılmıştır.



Şekil 4.9. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın ultrases geçiş hızı

4.2.6. Hızlı klörür iyonu geçirimsilik deneyi sonuçları

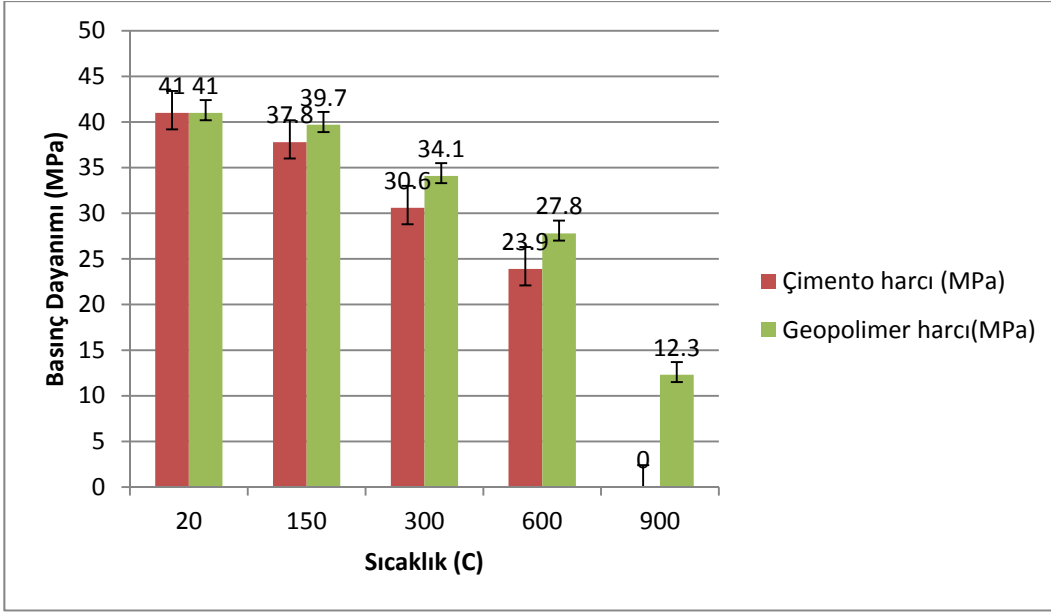
Harçların klor iyon geçirimsilik deneyi sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, tüm deney süresi boyunca geopolimer harcın klor iyon geçirimsiliği geleneksel çimento harcına göre daha fazla olmuştur. Geopolimer çimento harcı numunesinden 5.saat sonrası sıcaklığın 75°C'lere çıkması sonucu veri alınamamıştır. Geopolimer harçta 5 saatte 4962 Coulombs elektrik yükü geçişi olurken aynı sürede çimento harcında 3482 Coulombs elektrik yükü geçmiştir. Bu sonucun, geopolimer harcın içinde bulunan alkali çözeltilerin elektrik yük geçişini kolaylaştırdığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.10. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın hızlı klor iyonu geçirimsizliği

4.2.7. Yüksek sıcaklık direnci deney sonuçları

Tez kapsamında üretilen harçların yüksek sıcaklık etkisi sonucunda meydana gelen basınç dayanımları değişimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Her iki harcın oda sıcaklığında basınç dayanımları 41 MPa olarak ölçülmüştür. Sıcaklığın 150°C’ye getirilmesi ile her iki numunede de kayda değer bir düşüş gözlemlenmemiştir. 300°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımı çimento harcında 30.6 MPa’a, geopolimer harcında ise 34 MPa’a düşmüştür. Sıcaklığın 600°C olduğu durumda ise basınç dayanımları düşüşü daha fazla olmuştur. Çimento harcı yaklaşık %50 dayanım kaybı yaşarken geopolimer harçta bu oran %32 civarında olmuştur. Sıcaklığın 900°C olduğu durumda iki harcın da basınç dayanımı dramatik bir şekilde düşmüştür. Bu sıcaklığa maruz kalan çimento harcı herhangi bir basınç dayanımı göstermezken geopolimer harç, 12 MPa dayanım vermiştir. Şekil 4.12’de görüldüğü üzere çimento esaslı harçlarda herhangi bir bağlayıcılık özelliği kalmazken, geopolimer harçlar nispeten daha kararlı kalmıştır.



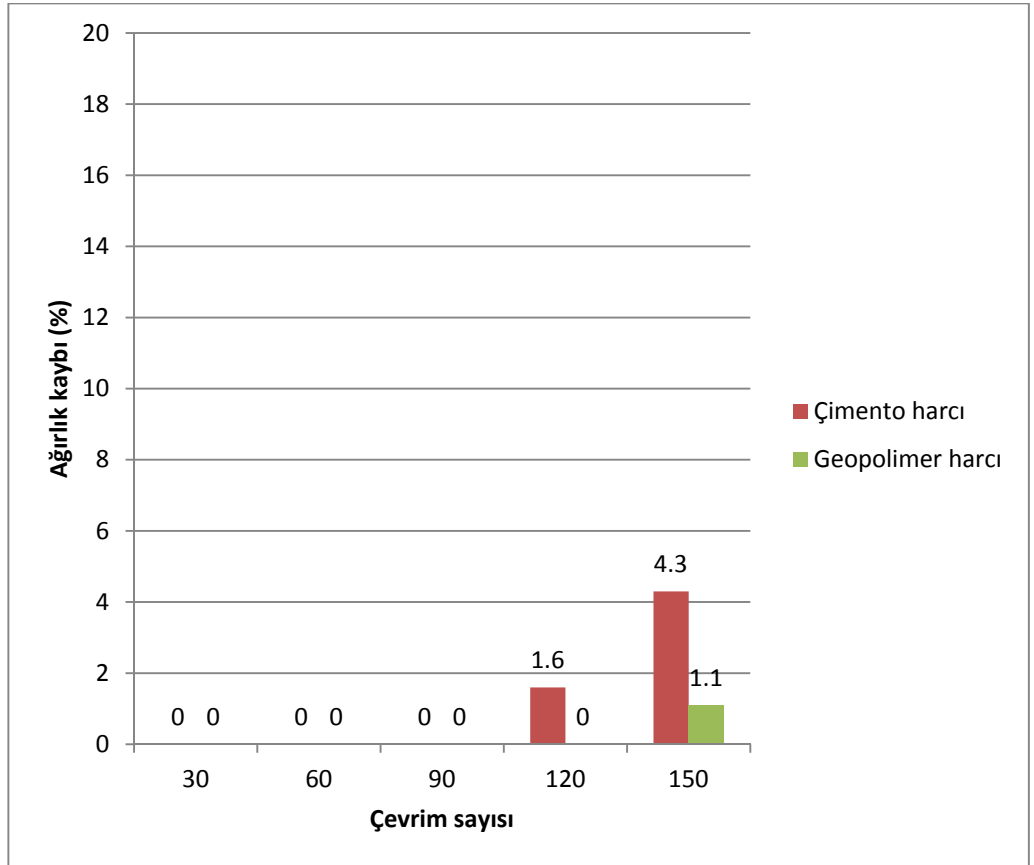
Şekil 4.11. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın yüksek sıcaklık direnci



Şekil 4.12. 900°C sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç (üstte) ve çimento harç numuneleri (altta)

4.2.8. Donma-çözülme deneyi sonuçları

Üretilen harçların 150 çevrim donma-çözülme deneyi sonucunda meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 4.13’de verilmiştir. İlk 30 çevrim sonunda hem geopolimer harçta hem de çimento harcında herhangi bir ağırlık kaybı gözlemlenmemiştir. Çevrim sayısının ilerlemesiyle çimento harcında ağırlık kayıpları meydana gelmeye başlamıştır. 120 donma-çözülme çevrimi sonunda çimento harcında %1.6 ağırlık kaybı yaşanırken geopolimer harçta herhangi bir ağırlık kaybı gözlemlenmemiştir. Donma-çözülme çevrimi arttıkça çimento harcı ile geopolimer harcı arasındaki ağırlık kaybı miktarı artmıştır. 150 çevrim sonunda çimento harcındaki ağırlık kaybı %4.3 olurken geopolimer harçta bu oran %1.1’de kalmıştır. Traslı geopolimer harcın boşluk yapısı sayesinde, daha yüksek donma-çözülme direnci gösterdiği düşünülmektedir. Çimento harcının daha düşük donma-çözülme direnci göstermesi bir ölçüde de geopolimer harcından daha yüksek su/b oranına sahip olduğundan kaynaklanabilir.



Şekil 4.13. Aynı basınç dayanımına sahip traslı geopolimer harç ile çimentolu harcın donma-çözülme direnci



5. SONUÇLAR

Tez kapsamında kullanılan malzeme ve uygulanan deney yöntemlerine göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

Kalsine edilmiş tras ve zeolit içeren geopolimer harçların, kalsine edilmemiş tras ve zeolit içeren geopolimer harçlara göre yaklaşık iki kat daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir.

Kullanılan toz malzemelerin kendine has optimum kalsinasyon sıcaklığı ve süresi olduğu saptanmıştır. Optimum kalsinasyon sıcaklığı ve süresi tras için 550°C ve 6 saat iken zeolit için bu değer 850°C ve 2 saat olduğu belirlenmiştir.

Geopolimer harcı basınç dayanımı dikkate alınarak geopolimer üretimi için kalsine edilmiş trasın zeolitten daha elverişli olduğu saptanmıştır. Tez kapsamında trasın kullanılmasına karar verilmiştir.

Daha az enerji sarfıyatı ve yüksek basınç dayanımından dolayı tras ile yola devam edilmiştir. Tras için en uygun kalsinasyon sıcaklığı 550°C, kalsinasyon süresi ise 6 saat olarak belirlenmiştir.

Üretilen geopolimer harçlarda en yüksek dayanımı veren alkali konsantrasyonu %10 Na₂O ve Ms (SiO₂/Al₂O₃) 1.6 olmuştur. En uygun kür sıcaklığı ve süresi ise 90°C ve 3 gün olduğu saptanmıştır.

Geopolimer harçlar oda sıcaklığında 24 saat boyunca priz alamamıştır.

Tras ile üretilen geopolimerler yüksek sıcaklık, donma-çözülme, kılcal su emme ve dayanım kazanma hızı konusunda geleneksel çimento harcına göre daha iyi sonuç vermiştir.

Aynı basınç dayanımına sahip çimento harcına kıyasla traslı geopolimerin yüksek sıcaklık, donma-çözülme, kılcal su emme ve dayanım kazanma hızı konusunda daha üstün özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ancak, toz malzeme üretimi için kalsinasyon sürecinin belirli bir zaman alması, eleme işleminin zahmetli olması ve alkali çözeltinin hazırlanıp 1 gün bekletilmesi ve taze harç karışımının işlenebilirliğinin düşük olması traslı geopolimer üretiminin olumsuz yönlerinden olmuştur.



6. ÖNERİLER

Gelecekteki konu ile ilgili yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıda sıralanmıştır:

Doğal puzolanlarla elde edilen geopolimerlerin en büyük problemi işlenebilirliğin çok düşük olmasıdır. Bunun için uygun kimyasal katkı geliştirilmelidir.

Tez kapsamında kullanılan alüminosilikat toz malzemeler potasyum hidroksit ve potasyum silikat gibi farklı alkalilerle aktive edilip bu tür bağlayıcıların performansı belirlenebilir.

Geopolimer harç numunelerinde denenen trasın, geopolimer beton üretiminde nasıl bir davranış göstereceği araştırılmalıdır.

Trasın kalsinasyonu sonunda uygulanan soğutma işleminin hızı, oluşan trasın yapısına ve üretilen geopolimerin özelliğine etkisi araştırılabilir.

Geopolimer üretilirken uygulanan ısıl kürleme işlemine alternatif olarak mikrodalga kürleme işlemi araştırılmalıdır.

Geopolimer üretiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, tras ve zeolit gibi birden fazla toz malzemenin birlikte kullanımı incelenebilir.

Geopolimer üretim aşamalarından olan ısıl kürleme işlemlerinde numuneler etüve konulmadan önce yüzeyi kopolimer esaslı yalıtım malzemesi ile kaplanıp su kaybı önlenerek reaksiyon ürünlerinin daha fazla oluşması sağlanabilir.



7. KAYNAKLAR DİZİNİ

ASTM C109, 2016, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, Annual Book of ASTM Standard, USA.

ASTM C1585-13, 2014, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, Annual Book of ASTM Standard, USA

ASTM C230, 2014, Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, Annual Book of ASTM Standard, USA.

ASTM C597, 2016, Standard test method for pulse velocity through concrete, Annual Book of ASTM Standard, USA.

ASTM C642, 2013, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, Annual Book of ASTM Standard, USA.

ASTM C666, 1998, Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing, Annual Book of ASTM Standard, USA.

ASTM C1202, 2012, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Annual Book of ASTM Standard, USA.

Altan, E., Erdoğan, S.T., 2012, Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures, Cement and Concrete Composites, 34(2):131-139pp.

Aydın, S., 2010, Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye, 330s.

Aykut, C., 2017, Bayburt taşı atıklarının geopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bayburt, Türkiye, 110s.

Balaguru, P., (1997), "Geopolymer-carbon composite for repair and rehabilitation of reinforced concrete beams." Rutgers The State University of New Jersey, Piscataway, NJ -08855-0909, U.S.A.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Baltacı, F. 1989. İnşaatlarda traslı çimentonun kullanılabilirliği., DSİ, TAKK yayınları, Ankara, 55-57s.

Bondar, D., 2011, Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans, Cement and Concrete Composites, 33(2):251-260pp.

Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., 2011, Oxygen and chloride permeability of alkali-activated natural pozzolan concrete, ACI Materials Journal, 109(1):53-61pp.

Brooks, R., Bahadory, M., Tovia, F., Rostami, H., 2010, Properties of alkaliactivated fly ash: high performance to lightweight, International Journal of Sustainable Engineering, 3(3):211-218pp.

Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., 2007, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, Cement and Concrete Composites, 29(3):224-229pp.

Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., Rattanasak, U., 2014, Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fumealkali-activated composite, Advanced Powder Technology, 25(3):1087-1093pp.

Criado, 2012, Effect of relative humidity on the reaction products of alkali activated fly ash, Journal of the European Ceramic Society, 32:2799-2807pp.

Davidovits J., 1978, Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center; 151-152pp.

Davidovits, J., 1984, Biography of Davidovits, <https://www.davidovits.info/joseph-davidovits-biography/>(Erişim Tarihi:27.03.2019)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Davidovits, J., 1994, Properties of geopolymer cements, 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 131-149pp.

Davidovits, J., 1991. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633-1656pp.

Davidovits, J.,1994, Conference: 5. global warming, c. policy international, and S. F. C. A. A. expo, "Global warming impact on the cement and aggregates industries," World Resource Review, vol. 6:2, 263-278pp.

Davidovits, J., 1999, Chemistry of geopolymeric systems, terminology, Géopolymère'99 International Conference, Saint-Quentin, France, 9-22pp.

Glukhovsky, V.D., 1959, Soil silicates, Gostroiizdat Publish, Kiev, USSR.

Glukhovsky, V.D., 1994, Ancient, modern and future concretes, 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 1-9pp.

Duxson, P., Provis, J., Grant, L., Mallicoat, S., Kriven, W., van Deventer, J.S.J., 2005, Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 269:47-58pp.

Duxson, P., A. Fernández-Jiménez., A., J. L. Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J., 2007a "Geopolymer technology: the current state of the art," J Mater Sci Journal of Materials Science : Full Set - Includes 'Journal of Materials Science Letters', vol. 42, 2917-2933pp.

Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M., van Deventer, J.S.J., 2007b, The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin based geopolymers, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 292, 8-20pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Erdoğan, S.T., 2015, Inexpensive intumescent alkali-activated natural pozzolan pastes, Journal of the European Ceramic Society, 35(9):2663-2670pp.

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., 2005, Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator, Cement and Concrete Research, 35(10):1984-1992pp.

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., Sanz, J., 2006a, The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes, Microporous and Mesoporous Materials, 91:111-119pp.

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., López-Hombrados, C., 2006b, Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete, ACI Materials Journal, 103(2):106-112pp.

García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., 2007, Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems, Cement and Concrete Research, 37(2):175-183pp.

Gartner, E., 2004, Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements, Cement and Concrete Research, 34(9):1489-1498pp.

Glukhovskiy vd., 1959, Soil silicates. Kiev, USSR: Gostroiizdat Publish

Girgin, S., 2016, NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, Türkiye, 81s.

Kandemir, N., 1993., Pozzolanik cement (Tez), Middle East Technical University, Ankara

Kara G., İbiç A. , Yağcıoğlu E., 2018, Çimento sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları, Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, Sayı 1(2): 87-90pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Görhan, G., Aslaner, R., Şinik, O., 2016, The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste, *Composites Part B: Engineering*, 97:329-335pp.

Hardjito, D., 2005, Studies on fly ash based geopolymer concrete, PhD Thesis, Curtin University of Technology, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Computing, Perth, Australia, 102p.

Krivenko, P.V. 1994. "Alkaline cements", 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 1,11-130pp.

Krivenko, P.V., 1999, Alkaline cements and concretes: Problems of durability, 2nd International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Krivenki, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 3-43pp.

Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., 2010, Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete, *Cement and Concrete Research*, 40:334-339pp.

Law, D., Adam, A., Molyneaux, T., Patnaikuni, I., Wardhono, A., 2015, Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete, *Materials and Structures*, 48:721-731pp.

Lyon, R.E., Balaguru,P.N., Foden,A., Sorathia,U., Davidovits,J., Davidovics, M., 1997, Fire-resistant aluminosilicate composites, *Fire and Materials*, 21(2):67-73pp.

Mahmut, O., 2016, Geopolimer harç üretiminde Elazığ ferrokrom cürufu kullanımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce, Türkiye, 53s.

Malek, R.I.A., Licastro, P.M., Roy, D.M., Langton, C.A., 1986, Slag cement low level radioactive waste forms at Savannah River Plant, *Ceramic Bulletin*, 65:1578-1583pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Maraş, M.M., 2013, Elazığ Ferrokrom cürufundan üretilen geopolimer çimentolu betonların sülfat direncinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, Türkiye, 185s.

Oelkers, E.H., Schott, J., Devidal, J-L., 1994, "The effect of aluminum, pH, and chemical affinity on the rates of aluminosilicate dissolution reactions," GCA Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 58, 2011-2024pp.

Oelkers, E.H., ve Gislason, S.R., 2001 "The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH = 3 and 11," GCA Geochimica et Cosmochimica Acta, (65), 3671-3681pp.

Özodabaş, A., 2014, Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların performansının geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye, 220s.

Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindapasirt P., 2015, Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 852p.

Palomo, A., Alonso, S., Fernández-Jiménez, A., Sobrados, I., Sanz, J., 2004, Alkaline activation of fly ashes: a NMR study of the reaction products, Journal of American Ceramics Society, 87:1141-1145pp.

Petermann, J.C., Saeed, A., Hammond M. I., 2010, "Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review," Defense Technical Information Center: Fort Belvoir, VA, USA.

Provis, J., van Deventer, J.S.J., 2009, Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 464pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Purdon AO., 1940, The action of alkalis on blast furnace slag, Journal of the Society of Chemical Industry 59: 191- 202pp.

Somaratna, J., Ravikumar, D., Neithalath, N., 2010, Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing, Cement and Concrete Research, 40(12):1688-1696pp.

TS EN 12390-5, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinde eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 196-1, 2016, Çimento deney metotları – Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

Tuyan, M., 2017, "Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi", Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye, 259s.

Tuyan, M., Andiç. Çakır Ö., Ramyar K., 2018, "Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer", Composites Part B: Engineering, (135), 242-252pp.

Xu, H., Van Deventer, J.S.J., 2000, The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, International Journal of Mineral Processing, 59:247-266pp.

Yao, X., Zhang. Z., Zhu, H., Chen, Y., 2009, "Geopolymerization process of alkalimetakaolinite characterized by isothermal calorimetry," Thermochimica Acta Thermochimica Acta, 493(2009), 49-54pp.

Z. Zhang, H. Wang, J. L. Provis, F. Bullen, A. Reid, and Y. Zhu, 2012, "Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide," TCA Thermochimica Acta, 539(2012), 23-33pp.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince ve bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli ve danışman hoca statüsünü hakkıyla yerine getiren Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Yine çalışmamda aramızda binlerce mil mesafe ve saat farkı bulunmasına rağmen konu, kaynak ve yöntem açısından bana sürekli yardımda bulunarak yol gösteren ve gelecekteki hayatında çok daha başarılı olacağına inandığım kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat TUYAN'a da sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sadece tez çalışmamla değil eğitimimin her safhasında maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen ve bu tezi bitirmeme büyük yardımı olan babam Hüseyin'e, okula gidip gitmediğimi her gün soran annem Sabahat'a ve beni her zaman motive eden biricik eşim Didem'e teşekkürlerimi sunarım.



ÖZGEÇMİŞ

Halil İbrahim BAŞÇIK, 14.02.1990'da Bingöl'de doğdu. İlk öğrenimini Bingöl'de, orta öğrenimini Diyarbakır'da bitirdi. Lisans eğitimini 2014 yılında Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2015 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. İleri seviyede İngilizce, orta seviyede Almanca bilmektedir.

