

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEPOLİMER HARÇLARIN REOLOJİK DAVRANIŞI ÜZERİNDE
ZEOLİT ETKİSİNİN İNCELENMESİ

CANER ÖZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MALATYA
MART-2018

Tezin Başlığı: Geopolimer Harçların Reolojik Davranışı Üzerinde Zeolit Etkisinin İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: Caner ÖZER

Sınav Tarihi: 16.03.2018

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnaşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN**
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Kazım TÜRK
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet KARATAŐ
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Geopolimer harçların reolojik davranışı üzerinde zeolit etkisinin incelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Caner ÖZER



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GEOPOLİMER HARÇLARIN REOLOJİK DAVRANIŞI ÜZERİNDE ZEOLİT ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Caner Özer

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

71 + x sayfa

2018

Danışman: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Doğal zeolit doğada bolca bulunan bir mineraldir. Sulu alüminosilikat kaynağı olarak bilinir. Tarım ve hayvancılık alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca çöp alanlarında filtre malzemesi olarak ve yüksek absorbe özelliğinden dolayı CO₂ gibi çevreyi kirlletici gazların emilmesi için kullanılmaktadır. Hem doğal hem de sentetik zeolitler, ağır metallerin, azot içeren atıkların ve atık su arıtımının etkilerini azaltmak için kullanılabilir. İnşaat alanında zeolitlerin kullanılmasına yönelik akademik çalışmalar devam etmektedir. Ancak doğal zeolitin alkali ile aktivasyonu ve aktivasyonu sonucu oluşan geopolimer bağlayıcı madde ile üretilen harçların özellikleri henüz tam olarak bilinmemektedir. Zeolit esaslı geopolimer harçlar hakkında literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, doğal zeolit ve aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) birleştirilerek geopolimer bağlayıcı madde oluşturulmuştur. 3 farklı agrega/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Üretilen numuneler 72 saat 90°C ısı kürüne tabi tutulmuştur. CEM I 42.5 N portland çimentosu yerine %0, %10, %25, %40, %55, %70, %85 ve %100 oranlarında doğal zeolit kullanılmıştır. Numunelerin taze haldeki viskozite değerleri viskozimetre aleti ile ölçülmüştür. Üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımları, birim hacim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri ve mikro yapıları (XRD, SEM-EDX) incelenmiştir.

Doğal zeolit oranının artması ile birlikte viskozitenin genelde arttığı tespit edilmiştir. Agrega/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımlarında artışlar tespit edilmiştir. Sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörü ile üretilen geopolimer harçların, %10 zeolit içeren ve agrega/bağlayıcı oranı 1,75 olan örneklerinin en yüksek basınç dayanımı (78,5 MPa) gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca zeolit miktarının artması ile birlikte harçların birim hacim ağırlıklarında azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, reolojik davranış, zeolit, viskozite.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ZEOLİTE ON RHEOLOGICAL BEHAVİOURS OF GEOPOLYMER MORTARS

Caner ÖZER

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

71 + x pages

2018

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Natural zeolite is a mineral that found abundantly in nature. It is known as the aqueous aluminosilicate source. It is widely used in the fields of agriculture and farming. It is also used as a filter material in garbage areas and for absorbing polluting gases such as CO₂ because of its high adsorbing property. Both natural and synthetic zeolites can be used for reducing impacts of heavy metals, nitrogen-containing wastes and wastewater treatment. Academic studies for the use of zeolites in construction technology are ongoing. However, the activation of natural zeolite with alkali and the properties of mortars produced with geopolymer binding substance as a result of activation with alkali and natural zeolite is not fully known yet.

In this study, geopolymer binding material was made by combining natural zeolite with activator sodium hydroxide (NaOH). 3 different aggregate/binder ratios were used. The cure was selected 72h at 90⁰C temperature. Natural zeolite was replaced with in the ratios of 0%, 10%, 25%, 40%, 55%, 70%, 85% and 100% instead of CEM I 42.5 N. The fresh viscosity values of the samples were measured by a viscometer. 28 days compressive strengths, unit weights, ultrasonic pulse velocity (UPV) values and microstructures (XRD, SEM-EDX) of the samples were investigated.

According to the result of experiments, in general, it was found that viscosity increases with the increase of natural zeolite ratios. As the aggregate/binder ratios increase, increases in compressive strength were observed. Geopolymer mortar produced with sodium hydroxide (NaOH) activator showed the highest compressive strength (78.5 MPa) in samples with containing 10% zeolite and aggregate/binder ratio of 1,75. Moreover, decreases in the unit weight value of the mortars were determined by increasing the amount of zeolite.

Keywords: Geopolymer, rheological behavior, zeolite, viscosity.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konusunu öneren ve çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek tez çalışmamı tamamlamamı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e;

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a, viskozimetre aleti ile okuma ve değerlendirme yapmamda yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Kazım TÜRK'e;

2015/78 numaralı Araştırma Projesi ve 656 numaralı Hızlı Destek Projesi kapsamında bana sağlanan destekten dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Kordinatörlüğüne;

XRD ve SEM-EDX analizlerinin yapımında yardımlarından İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezine;

Laboratuar çalışmalarım süresince her türlü yardımı esirgemeyen İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü teknisyeni Sayın İlhami BAYSAL'a ve Araştırma Görevlisi Fatih KANTARCI'ya ve Araştırma Görevlisi Enes EKİNCİ'ye;

Bu süreçte manevi desteğini benden esirgemeyen mesai arkadaşım Sayın Fevzi Ataman BİLEN'e;

Zeolit temin etmemde bana yardımcı olan Gördes Zeolit Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'ye ve Rota Madencilik A.Ş.'ye;

Teşekkür ederim.

Ayrıca her zaman yanımda olan ve bu süreçte maddi manevi bana destek olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
3. KURAMSAL TEMELLER.....	11
3.1. Viskozite Kavramı.....	11
3.2. Reoloji ve Beton	13
3.3. Zeolit.....	16
3.4. Geopolimer	18
4. MATERYAL ve YÖNTEM	30
4.1. Materyal.....	30
4.1.1. Zeolit.....	30
4.1.2. Çimento	31
4.1.3. Aktivatör.....	31
4.1.4. Agregat	32
4.1.5. Karma suyu.....	33
4.2. Yöntem	34
4.2.1. Harç Numunelerin Hazırlanması ve Bakımı	34
4.2.2. Viskozimetre ile Reolojik Davranışın Tespiti	35
4.2.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri	36
4.2.3.1. Birim Hacim Ağırlık.....	37
4.2.3.2. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)	37
4.2.3.3. Basınç Dayanımı.....	39
4.2.3.4. SEM-EDX	39
4.2.3.5. XRD.....	40
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	41
5.1. Geopolimer Harç Numunelerin Reolojik Davranışları.....	41
5.2. Sertleşmiş Harç Numunelerinin Özellikleri	45
5.2.1. Birim Hacim Ağırlıkları	45
5.2.2. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)	47

5.2.3.	Basınç Dayanımı.....	49
5.2.4.	Mikroyapı Analizi.....	53
5.2.4.1.	SEM – EDX.....	53
5.2.4.2.	XRD.....	58
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	61
7.	KAYNAKLAR.....	63
	ÖZGEÇMİŞ.....	71



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. 0-4 mm tane çaplı ince agrega ve elek analizi	33
Şekil 4.2. Mikser,fırın ve üretilen bazı numuneler	35
Şekil 4.3. Brookfield viskozimetre aleti	36
Şekil 4.4. 1g hassasiyetli terazi ve kullanılan bazı numune örnekleri	37
Şekil 4.5. Ultrases geçiş hızı cihazı ve kullanılan bazı numuneler	38
Şekil 4.6. Basınç dayanım test cihazı.....	39
Şekil 5.1. Z100 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	41
Şekil 5.2. Z85 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	41
Şekil 5.3. Z70 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	42
Şekil 5.4. Z55 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	42
Şekil 5.5. Z40 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	42
Şekil 5.6. Z25 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	43
Şekil 5.7. Z10 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	43
Şekil 5.8. Z0 grubuna ait viskozimetre değerleri.....	43
Şekil 5.9. Farklı zeolit oranlarına göre birim hacim ağırlık değerleri.....	45
Şekil 5.10. Farklı agrega/bağlayıcı oranına sahip numunelerin zeolit oranlarına göre UPV değerleri	47
Şekil 5.11. Agreganın basınç dayanımı üzerine etkisi.....	49
Şekil 5.12. Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki – agrega/bağlayıcı=1.5.....	52
Şekil 5.13. Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki – agrega/bağlayıcı=1.75.....	52
Şekil 5.14. Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki – agrega/bağlayıcı=2.....	52
Şekil 5.15. Agreganın bağlayıcı oranı 1.5 olan Z10 grubuna ait SEM ve EDX analiz verileri	53
Şekil 5.16. Agreganın bağlayıcı oranı 1.75 olan Z10 grubuna ait SEM ve EDX analiz verileri	55
Şekil 5.17. Agreganın bağlayıcı oranı 1.5 olan %100 zeolit içerikli numuneye ait SEM görüntüleri.....	57
Şekil 5.18. Agreganın bağlayıcı oranı 1.75 olan %100 zeolit içerikli numuneye ait SEM görüntüleri.....	57
Şekil 5.19. Agreganın bağlayıcı oranı 2 olan %100 zeolit içerikli numuneye ait SEM görüntüleri.....	58
Şekil 5.20. Z10 grubu karışımında agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan numuneye ait XRD analiz verileri	59
Şekil 5.21. Z10 grubu karışımında agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan numuneye ait XRD analiz verileri	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Zeolit kimyasal bileşimi	30
Çizelge 4.2. Parçacık boyutu analizi sonuçları	30
Çizelge 4.3. Helyum Piknometresi ile bulunan hacim ve gerçek yoğunluk değerleri	30
Çizelge 4.4. Portland Çimentosu (CEM I 42.5 N)'nun kimyasal ve fiziksel özellikleri.	301
Çizelge 4.5. Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	32
Çizelge 4.6. Karışımların üretilmesinde kullanılan agregaya ait özellikler	33
Çizelge 4.7. Harç (1m ³) karışımlarında kullanılan malzeme miktarları	34
Çizelge 5.1. Agregabağlayıcı oranı 1.5 olan Z10 grubuna ait EDX analiz verileri	54
Çizelge 5.2. Agregabağlayıcı oranı 1.75 olan Z10 grubuna ait EDX analiz verileri.....	56



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A/B	Agrega/bağlayıcı oranı
UK	Uçucu Kül
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
D-Ç	Donma – Çözülme
SD	Silis Dumanı
DZ	Doğal Zeolit
PH	Potasyum hidroksit (KOH)
SH	Sodyum hidroksit (NaOH)
SS	Sodyum meta-silikat Na_2SiO_3
Si	Silisyum
SiO_2	Silisyum dioksit
w/b	Su/bağlayıcı oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)
ASR	Alkali silika reaksiyonu
CO_2	Karbon dioksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
s/b	Su/bağlayıcı oranı
Al	Alüminyum
Si	Silisyum
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
τ	Kayma Direnci
τ_0	Kayma Eşiği
$Na_2 SiO_3$	Sodyum Silikat
SiO_4	Silikat
H_2O_2	Hidrojen Peroksit
η_{pl}	Plastik Viskozite
cP	Centipoise
k.b.	Keyfi Birim
Si	Silisyum
CSH	Kalsiyum Silikat Hidrat
F	Kuvvet
M	Molar

1.GİRİŞ

Beton modern altyapıların temel bileşenidir. Bu nedenle sağlamlığı ve dayanıklılığı önemli bir rol oynamaktadır. Çoğu durumda betonun özellikleri, hidrolik bağlayıcı olarak kullanılan portland çimentosuna bağlıdır. Çimentonun puzolanlar ile yer değiştirmesi, beton dayanımında artışlara ve beton yapılarının servis ömründe artışlara neden olduğu bilinmektedir (Markiv *et al.*, 2016).

Portland çimentosu, yüksek mukavemet, uygun dayanıklılık, şekillendirilebilirlik ve ekonomik özellikler gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle dünya çapında uygulanabilir en iyi yapı malzemesidir. Yukarıda bahsedilen avantajlara rağmen, uygulamalar ile ilgili bazı endişeler vardır. Betonun ana bileşeni olan portland çimentosunun imalatından kaynaklı çevre kirliliği son yıllarda problem haline gelmiştir (Ghrici *et al.*, 2006).

Antik Mısırlılarda, olağanüstü mukavemet ve dayanıklılığa sahip yapı bileşenleri imal etmek için organik içeren saman ve nehir çamurunu (örneğin humik materyalleri) kullandıkları bilinmektedir. Roma betonları ayrıca bağlayıcı bir madde olarak çamur içeriyordu. Bu nedenle, geopolimerizasyon sırasında inorganik ve organik türler arasındaki rolü dikkate almak önemlidir (Kim *et al.*, 2009).

Geopolimer betonlar inşaat endüstrisinde oldukça ilgi uyandıran yenilikçi bir teknolojidir. Portland çimentosunun aksine birçok geopolimer, doğal malzemelerin ya da sanayi yan ürünlerinin bağlayıcı madde olarak en az oranla işlenmesi ile meydana gelir. Normal portland çimentosu %85'e varan enerji kapasitesi ve %90'lara varan karbondioksit salınımına sahiptir. Yüksek olan bu karbondioksit salınımını azaltmak amacı ile daha çevreci olan geopolimer betonlar üzerinde çalışmalara yoğunlaşmıştır (Marceau *et al.*, 2007).

Davidovits (2002), 1970-1993 yılları arasında organik plastikten kaynaklı Fransa'da meydana gelen yangınların ardından, yanmayan ve yanıcı olmayan malzemeler üzerinde araştırma yapmanın kendi amacı olduğunu ve günümüzde geopolimer olarak adlandırılan malzemeler ile ilgili şirket kurduğunu belirtmiştir.

Geopolimer, silika ve alümina bakımından zengin mineral bileşimi içeren temel hammaddeler ile üretilebilir. Birçok çalışma, bu malzemelerin beton içinde yararlı kullanımını bildirmiştir. Çalışmaların çoğunda, bir sodyum hidroksit ve sodyum silikat veya bir potasyum hidroksit ve potasyum silikat içeren alkali aktivatörlerin kullanımı araştırılmıştır (Srinivasan ve Sivakumar, 2013).

Geopolimerlerin kullanımı ve özellikleri, organik kimya, fizikokimya, mineroloji, jeoloji ve mühendislik teknolojisi gibi, birçok bilimsel ve endüstriyel alanlarda araştırılmaktadır. Geopolimerlerin uygulama alanları oldukça fazladır. Bunlar özellikle, yangına dayanıklı malzemelerde, dekoratif taşlı eserlerde, düşük enerjili seramiklerde, çimento ve beton üretimlerinde, altyapı ve onarım için kompozit karışımlarda, radyoaktif ve zehirli atık maddelerin değerlendirilmesi gibi birçok alanda kullanılmıştır (Davidovits, 2008).

Zeolit tufu ve kireç İsveç'li mineralog Cronstedt keşfetmiştir ve doğal zeolitleri sınıflandırmıştır. Keşfettiği zeolit ısıtıldığında çok çabuk su kaybeden yapısından dolayı Latince "zeo" ve kaya parçalarının ısıtılmasına da "lithos" denilmesinden dolayı malzemeye zeolit adını vermiştir (Karatüç, 2008).

Doğal zeolitler kristal olmasına rağmen, uygun puzolanik aktivite gösterirler (Najimi *et al.*, 2013).

Bu çalışmanın amacı doğal zeoliti, aktivatör ile geopolimer bağlayıcı yaparak, harç içerisinde çimento yerine kullanmaktır. Ayrıca doğal zeolitin harcın reolojik davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma ile betonda kullanılan çimento miktarını azaltmak, doğada bolca bulunan bu minerali piyasaya kazandırmak ve daha hafif ancak daha yüksek dayanımlı betonlar üretmek hedeflenmiştir. Aktivatör ile bağlayıcılık özelliği kazandırılan doğal zeolit içerikli geopolimer harçların inşaat alanında kullanılabilirliğinin ortaya konulması çalışmanın özgün değerini artırmaktadır. Bu amaç ile çalışmada doğal zeolit %0, %10, %25, %40, %55, %70, %85 ve %100 oranlarında CEM I 42.5 N çimentosunun yerine kullanılmıştır. Ayrıca aktivatör olarak sodyum hidroksit ve agrega olarak 0-4mm tane çaplı dere kumu kullanılmıştır. 3 farklı agrega/bağlayıcı oranı seçilmiştir. Taze haldeki betonun viskozimetre değerleri brookfield viskozimetre aleti ile ölçülmüştür. Üretilen numuneler 3 gün ve 90°C sıcaklıkta küre tabii tutulmuştur. Birim hacim ağırlık değerleri, ultrases geçiş hızı değerleri ve 28 günlük basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca XRD ve SEM-EDX analizleri yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Öz (2006) çalışmasında çimento yerine %10, %20, %30 oranında doğal zeolit kullanmıştır. Karışımlarda doğal zeolit miktarının artması ile basınç dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir. Karışımdaki zeolit miktarı arttıkça ısı iletkenliğinin azaldığını belirtmiştir. Doğal zeolit katkıli numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük kuru birim ağırlık değerlerini tespit etmiştir. 3 günlük %30 doğal zeolit içerikli numunede birim ağırlık değerini 2035 kg/m³ olarak tespit etmiştir. Doğal zeolit katkıli numunelerin basınç dayanımlarının 15.6 MPa ile 38.4 MPa arasında değiştiğini belirtmiştir.

Nagrockiene ve Girskas (2016) çalışmalarında %10 zeolit katkıli betonlarda basınç dayanımının %15 arttığını ve su emmenin 2.3 kat azaldığını belirtmişlerdir. %10 doğal zeolit içerikli betonda 7 günlük basınç dayanımını 63.7 MPa, 28 günlük basınç dayanımını ise 79.4 MPa olarak belirtmişlerdir. Zeolit ilavesinin kullanılan betonların durabilite özelliğine olumlu etki yaptığını ifade etmişlerdir.

Markiv *et al.*, (2016) çalışmalarında doğal zeolit içermeyen, %10 zeolit içeren, süperakışkanlaştırıcı içeren ve içermeyen numuneler üretmişlerdir. Zeolitin betonun işlenebilirliğini düşürdüğünü belirtmişlerdir. İşlenebilirliği artırmak için daha fazla süperakışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Çalışmalarında 90 güne kadar zeolit içermeyen numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. 180 günden sonra ise %10 zeolit içeren betonların basınç dayanımlarının, zeolit içermeyen betonlardan daha yüksek basınç dayanımına sahip olduklarını belirtmişlerdir.

Ramezianpour *et al.*, (2015) çalışmalarında 4 farklı su/bağlayıcı oranı kullanmışlardır. Doğal zeoliti %0, %10 ve %15 oranlarında çimento yerine kullanmışlar ve ürettikleri tüm gruplarda %10 zeolit içerikli betonların basınç dayanımlarının yüksek çıktığını tespit etmişlerdir. %10 zeolit oranında,

su/bağlayıcı oranının artması ile birlikte beton basınç dayanımlarında azalmalar olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek basınç dayanım değerinin 0.35 su/bağlayıcı oranında, 90 günde 70.3 MPa olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca zeolitin, işlenebilirliği azalttığını ve çok miktarda su ihtiyacı olduğunu belirtmişlerdir.

Valipour *et al.*, (2014) çalışmalarında portland çimentosu yerine %10, %20 ve %30 oranında zeolit kullanmışlardır. Su/bağlayıcı oranını 0.4 olarak sabitlemişlerdir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını araştırmışlardır. Şahit numuneye göre her iki yaşta da %10 zeolit eklemenin basınç dayanımını artırdığını, %20 oranındaki zeolit ilavesinin basınç dayanımını önemli oranda etki etmediğini ancak, %30 zeolit ilavesinin betonun basınç dayanımında azalmalar meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Normal çimento ile zeolit kullanımının küresel ısıda indeksini düşürdüğünü belirtmişlerdir ve zeolit içeren betonların daha çevreci olduğunu ifade etmişlerdir.

Sabet *et al.*, (2013) çalışmalarında portland çimentosu yerine %10 ve %20 oranında zeolit ve silis dumanı kullanmışlardır. Zeolit içerikli betonlarda 28 günlük basınç dayanımlarını 57-80.5 MPa, 180 günlük basınç dayanımlarını ise 61-87 MPa olarak belirtmişlerdir. Karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı dozajını %2.1 ve %2.9 olduğunu belirtmişler ve bunun sebebini ise zeolitin çerçeve yapısındaki gözeneklerin büyüklüğü ve zeolitin yüksek yüzey alanı ile alakalı olduğunu ifade etmişlerdir. Doğal zeolitin karışıma katılma oranının artmasının difüzyon katsayısında azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Bunun nedenini ise toplam gözenek içeriğindeki azalma ve agrega ile hamurun arasındaki geçiş yapısının iyileşmesi olarak belirtmişlerdir.

Dousti *et al.*, (2013) çalışmalarında 22°C ile 50°C aralığında değişen sıcaklıklarda doğal zeolit ve silis dumanı ile hazırlanan karışımların, klor difüzyonuna karşı direncini araştırmışlardır. Aynı yüzdeler oranda hazırlanan karışımlarda, zeolitin silis dumanına göre daha yüksek bir dirence sahip olduğunu belirtmişlerdir. %10'luk doğal zeolit ile hazırlanan karışımın aktivasyon enerjisi

değerinin silis dumanı içeren karışıma göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. % 10-20 zeolit içerikli betonlarda, kontrol betonuna kıyasla difüzyon katsayısında belirgin bir azalmanın olduğunu belirtmişlerdir.

Ranjbar *et al.*, (2013) çalışmalarında iki farklı (0.45,0.38) su/bağlayıcı oranında, %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında doğal zeoliti çimento yerine kullanmışlardır. Basınç dayanımı üzerindeki doğal zeolit etkisini su/bağlayıcı oranı ile ilişkilendirmişlerdir. Su/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonların basınç dayanımlarını 13.2 ile 37.2 MPa, su/bağlayıcı oranı 0.38 olan betonların basınç dayanımlarını ise 13.9 ile 53.8 MPa aralığında bulmuşlardır. Beklendiği gibi betonun basınç dayanımının zamanla geliştiğini belirtmişlerdir. Ancak doğal zeolitin puzolanik reaksiyodan dolayı basınç dayanım gelişimini ilerleyen yaşlarda gösterdiğini ifade etmişlerdir. 0.38 su/bağlayıcı oranında %15 zeolit içerikli betonların 3 günlük basınç dayanımlarının şahit numuneye göre %12 daha düşük iken, 90 günlük basınç dayanımlarının %3 daha düşük olduğunu puzolanik yapıya bağlamışlardır.

Valipour *et al.*, (2013) çalışmalarında 4 farklı su/bağlayıcı oranı (0.35, 0.40, 0.45 ve 0.50 (puzolansız)) kullanmışlardır. %5 silis dumanı, %5 metekaolin ve %10 doğal zeoliti çimento yerine kullanmışlardır. Çalışmalarında betonun klor iyon yayılma gücünü incelemişlerdir. Doğal zeolitin betonun durabilite özelliklerine olumlu katkı yaptığını belirtmişlerdir. %10 zeolit içerikli betonlarda 7 günlük basınç dayanım değerini 38 MPa, 28 günlük basınç dayanım değerini 47 MPa olarak belirtmişlerdir.

Najimi *et al.*, (2013) çalışmalarında portland çimentosu yerine %15 ve %30 oranında doğal zeolit kullanmışlardır. %15 zeolit içerikli betonda 28 günlük basınç dayanım değerini 36.6 MPa olarak bulmuşlar ancak bu değer kontrol numunesine göre %3.7 düşük olduğunu belirtmişlerdir. Erken yaşlardaki basınç dayanım değerlerini incelemişler ve %30 zeolit içeren betonların şahit betonlara göre %37.9'a varan dayanım kayıpları olduğunu göstermişlerdir. Yaptıkları

çalışmada tüm yaşlardaki zeolit eklenmiş betonların basınç dayanımlarının, normal betonlara göre düşük olduklarını belirtmişlerdir. Yine aynı şekilde karışımdaki zeolit miktarının artması ile birlikte betonun su ihtiyacının arttığını belirtmişlerdir.

Poon *et al.*, (1999) yapmış oldukları çalışmada portland çimentosu yerine %15 ve %25 oranında doğal zeolit kullanmışlardır. Su bağlayıcı oranını 0.25 ve 0.30 olarak belirlemişlerdir. Düşük su/bağlayıcı oranında daha yüksek dayanım elde ettiklerini belirtmişlerdir. 0.25 su/bağlayıcı oranında, %15 doğal zeolit ilavesi ile hazırlanan betonda 90 günlük basınç dayanım değerini 109.53 MPa, 180 günlük basınç dayanım değerini ise 127.90 MPa olarak tespit etmişlerdir. 3 ile 180 günlük yaş aralıklarını incelemişler ve bu aralıkta %15 zeolit oranının poroziteyi azalttığını ancak %25 zeolit oranının geçilmesi ile porozitenin arttığını belirtmişlerdir.

Chan ve Ji (1999) çalışmalarında portland çimentosu yerine %5, %10, %15 oranlarında zeolit, pulverize yakıt külü ve silis dumanı kullanmışlardır. Su/bağlayıcı oranını 0.28'de sabit tutmuşlardır. %15 zeolit ilavesinin kusmayı azalttığı ve betonun viskozite değerlerini olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca %15 oranında doğal zeolitli karışımın 28 günlük basınç dayanım değerinde %14'lük bir artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Ahmadi ve Shekarchi (2010) değişen oranlarda süperakışkanlaştırıcı ile çimento yerine, %5, %10, %15, %20 oranlarında zeolit ve %5, %10, %12,5 oranlarında silis dumanı kullanmışlardır. Çalışmalarında doğal zeolit ve silis dumanı üzerinde puzolanik reaktiviteyi araştırmak için termo-gravimetrik yöntem kullanmışlardır. Doğal zeolitin, silis dumanı kadar reaktif olmadığını belirtmişlerdir. %20 zeolit içeren betonun 28 günlük basınç dayanım değerini 50 MPa olarak bulmuşlardır. %10 zeolit numunesinin en yüksek su emmeye sahip olduğunu belirtmişlerdir. %5, %10, %15, %20 oranlarında zeolit ile üretilen

betonların basınç dayanımlarının şahit numuneye göre sırası ile %14, %16, %23, %25 daha yüksek çıktığı sonucuna varmışlardır.

Karakurt ve Topçu (2011) çalışmalarında çimento yerine %10, %20, %30, %40 ve %45 oranlarında doğal zeolit, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Zeolit miktarı arttıkça basınç dayanım değerinde azalmalar tespit etmişlerdir. En yüksek basınç dayanım değerine 180 günlük yaşta %20 doğal zeolit eklenmiş betonda 57.1 MPa değeri ile ulaşmışlardır.

Perraki *et al.*, (2010) çalışmalarında 2 farklı çimento tipi (CEM I 42,5 N – CEM I 52,5 N) kullanmışlardır. Çimento yerine ise %0, %10 ve %20 oranında doğal zeolit kullanmışlardır. %20'ye kadar zeolit eklemenin ilk 28 günlük basınç dayanımlarında CEM I 42,5 N ile yapılan betonlarda normal değerleri ancak yakaladığını, ancak CEM I 52,5 N ile yapılan betonlarda ise normal portland çimentosu ile hazırlanan betonlara nazaran biraz daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Priz alma süresinin zeolit miktarı arttıkça uzadığını ve ayrıca su ihtiyacının da artan zeolit miktarı ile arttığını ifade etmişlerdir.

Şahmaran *vd.*, (2008) çalışmalarında zeolit ve süperakışkanlaştırıcı kullanarak çimento esaslı sulu harçların reolojik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında portland çimentosu yerine %20, %30 ve %40 oranlarında doğal zeolit kullanmışlardır. Doğal zeolit eklemenin reolojik ve işlenebilirlik özellikleri üzerine olumlu etki yaptığını belirlemişlerdir. Sabit süperakışkanlaştırıcı içeriğinde zeolit oranı artışının, akma gerilmesi, görünür ve plastik viskozite değerlerini artırdığını ifade etmişlerdir. Ayrıca akışkanlığın azaldığını belirtmişlerdir. Doğal zeolit ile hazırlanmış sulu harçların, plastik ve kayma incelmesine sahip olduğunu belirtmişler ve bunun artan zeolit miktarı ile ilgili olduğunu vurgulamışlardır.

Vyšvail ve Bayer (2016) çalışmalarında portland çimentosu yerine %0 -%20 aralığında zeolit kullanmışlardır. Karışımlara, karışım suyu ile bağlayıcı malzemenin %1-%5 oranı aralığında ağır metal eklemiştirler. %10 zeolit eklenmiş betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin daha yüksek olduğunu ve ayrıca kullanılan ağır metallerin zeolit ile birlikte etkilerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Tydlitát *et al.*, (2014) çalışmalarında portland çimentosu yerine %10, %20, %30, %40 oranlarında zeolit kullanmışlardır. C₃S hidratasyonunun başlaması ve C₃A hidratasyonunun ilk fazının artmasında doğal zeolitin olumlu etkisi olduğunu belirtmişlerdir. %10 zeolit oranını limit değeri olarak tanımlamışlardır. Bu oranın üstünde kalan kısmın doğrudan hidratasyon sürecine etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Bağlayıcıda artan zeolit dozajıyla birlikte 4 saate kadarki ilk zaman periyodunda spesifik hidratasyon ısısının arttığını belirtmişlerdir.

Kücükyıldırım ve Uzal (2014) 2 farklı zeolit üzerinde çalışma yapmışlardır. Zeolitleri yüksek sıcaklara tabi tutup, ısı işlem uygulanmış ve uygulanmamış numuneler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kalsinasyona tabi tutulmuş zeolitlerin, ham halde olan zeolitere göre basınç dayanım performansının daha yüksek olduğunu ve bu betonların daha düşük su gereksinimleri olduğunu belirtmişlerdir. Kalsine edici sıcaklıkların artması ile birlikte zeolitlerin su ihtiyaçlarının azaldığını ifade etmişlerdir. 600°C'de kalsine ettikleri numunelerde 28 günlük basınç dayanımının 60 MPa değerini geçtiğini belirtmişlerdir. Zeoliti yüksek sıcaklıklarda kalsine etmenin olumlu olacağını vurgulamışlardır.

Öcal (2014) çalışmasında yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkılı betonların üzerindeki etkisini incelemiştir. Çimento yerine %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında doğal zeolit kullanmıştır. Doğal zeolit oranı arttıkça birim ağırlığının azaldığını belirtmiştir. Su emme oranının %15 doğal zeolit ilavesinden sonra arttığını tespit etmiştir. Zeolit etkisi ile erken yaşlarda dayanımın azaldığını ancak zeolitin asıl etkisinin ilerleyen yaşlarda kendini gösterdiğini belirtmiştir. İlk

günlerde basınç dayanımının çok düşük değerlerde çıktığını sonraki günlerde ise basınç dayanımının kontrol numunesi basınç dayanımına yaklaştığını belirtmiştir. Kütle beton uygulamalarında zeolitın ortaya çıkan hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla kullanılabilceğini belirtmiştir.

Sarıkaya (2006) çalışmasında zeolit miktarının artması ile birlikte su emme ve ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığını belirtmiştir. Katkılı betonların Schmidt sertliklerinin normal betonlara göre yüksek olduğunu ifade etmiştir. Zeolit miktarının artması ile birlikte Schmidt sertliklerinin azaldığını ve basınç dayanımlarında azalmaların meydana geldiğini belirtmiştir. Ayrıca katkıli betonlarda karışıma katılan zeolit oranının artması ile beraber eğilme dayanımının düştüğünü tespit etmiştir.

Okumuş (2012) çalışmasında çimento yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında zeolit kullanmıştır. %8 sabit ikame oranında silika dumanı kullanmıştır. Su/bağlayıcı oranını 0.4 olarak sabit tutmuştur. Doğal zeolitın %20 oranında mineral katkı olarak çimento yerine kullanılabilceğini belirtmiştir. %10 ve %20 zeolit içeren numunelerin şahit betona göre düşük su geçirgenliği ve yüksek dayanım değeri verdiğini ifade etmiştir. %20'ye kadar olan zeolit katkıli numunelerde basınç dayanımının arttığını, %30 oranında katkının ise şahit betona göre dayanımı düşürdüğünü tespit etmiştir.

3.KURAMSAL TEMELLER

3.1. Viskozite Kavramı

Viskozite, bir sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskozite arttıkça direnç de artar. Tek tek tabakaların birbirine göre hareketini frenleyen kuvvete sıvıların iç sürtünmesi veya dinamik viskozitesi (mutlak viskozite) denir. Değişik sıvıların viskozitesi bu sıvıların iç sürtünme kuvvetlerinin bir ifadesi olarak tanımlanır. Viskozitenin birimi cgs sisteminde poise (P)'dir. Poise, $\text{dincm}^{-2}\text{sn}$ veya $\text{gcm}^{-1}\text{sn}^{-1}$ 'dir. Bunun yüzde biri olan centipoise (cP) daha çok kullanılmaktadır. Uluslararası birim sisteminde (International System of Units-SI) ise, Newton/metrekare (Pascalsaniye=Pas)'dir. Daha çok mili Pascalsaniye (mPas) tercih edilmektedir. Tek tek tabakaların birbirine göre hareketini frenleyen kuvvete sıvıların iç sürtünmesi veya dinamik viskozitesi (mutlak viskozite) denir. Değişik sıvıların viskozitesi bu sıvıların iç sürtünme kuvvetlerinin bir ifadesi olarak tanımlanır (Çelebi, 2009).

Viskozite, bir sıvının laminar akım yani paralel tabakaların birbiri üzerinden kayması şeklinde hareketleri sırasında, komşu tabakaların moleküllerinin birbirini çekmesinden kaynaklanan iç sürtünme özelliğidir. Viskozite katsayısı ne kadar büyükse o sıvının akma kabiliyeti veya hareket etme kabiliyeti o kadar azdır (Özkul ve Sağlam, 2002; Yücel, 1993). Akışlar hakkında şunlar verilebilir.

Plastik akış: Bu akış tipi modern reolojinin araştırmacılarından olan Bingham'ın adına izafeten Bingham akış olarak da adlandırılmaktadır (Çelebi, 2009).

Pseudoplastik akış: Bingham akışın aksine, bu akışta eşik değeri yoktur. Pseudoplastik bir materyalin viskozitesi tek bir nokta ile ifade edilemez. Pseudoplastik bir maddenin viskozitesi kayma hızı arttıkça azalır(Çelebi, 2009).

Dilatant akış: Pseudoplastik akışın tersi davranış gösterir. Kayma gerilimi arttıkça viskozite de artar. Artan hız gradyanı ile akışa karşı direnç de artar (Çelebi, 2009).

Tiksotropi: Zamana bağlı olarak akış özelliğinin değişmesidir. Dispers sistemlerde sıkça meydana gelen bir olaydır. Tiksotropide gerilim ile viskozluğun geri dönüşümlü (reversible) olarak azaldığı görülmektedir. Gerilim kalkınca zamanla eski haline dönerler(Çelebi, 2009).

Sabit kayma oranında tiksotropik sıvıların viskozitesinde azalma olur. Benzer olarak, aynı etki ölçülen kayma gerilmesinin azalması olarak görülür. Kayma gerilmesi, aynı kayma hızında zamanla küçülür. Kayma deformasyon hızı sıfıra geldiğinde malzeme toparlanmaya başlar. Histeresis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları çakışır.Belirli bir süre sonra aynı sonuçlar tekrar edilebilirdir (Bartos, 1992).

Ancak birçok Non-Newtoniyen akışkan zamana bağlı davranış gösterir. Zamana bağlı ise viskozite, $\eta = F$ (veya τ ve t) olacaktır. Bu tür malzemeler tiksotropik ve reopektik malzeme olarak belirlenir (Yücel, 1993).

Reopektik (Tiksotropik olmayan): Kayma deformasyon hızının artması veya azalması çoğu kez farklı kayma gerilmelerine neden olur ve diyagramda histeresis çevrimi olarak gösterilir. Histeresis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları tam olarak çakışmıyorsa yani kayma deformasyon hızı sıfır olduğunda malzeme toparlanamıyorsa malzeme reopektiktir (Bartos, 1992). Çimento hamuru ve harcı reopektik davranış gösterir (Özkul ve Sağlam, 2002).

Viskoplastik Sıvılar: Viskoplastik sıvıların akış davranışı bir eşik kayma geriliminin görülmesi ile tanımlanmaktadır (Çelebi, 2009).

3.2. Reoloji ve Beton

Reo, eski yunanca da akma anlamına gelmektedir. İdeal olmayan cisimlerin (katı ile sıvı arasındaki) deformasyonunu ve kuvvet etkisiyle akmasını inceleyen bilim dalıdır. Reoloji, sıvı veya katı cisimlerin gerilme-deformasyon ilişkilerini zaman değişkenini de dikkate alarak, yani gerilme ve deformasyonun zamana göre türevlerini de hesaplayarak inceleyen bilim dalıdır (Banfill, 1991; Tattersall, 1991; Bartos, 1992).

Taze harcın ve betonun reolojik sabitleri; kayma eşiği (τ_0) ve plastik viskozite (η_{pl}) akış bilimi olarak tanımlayabileceğimiz reoloji bilimi ile açıklanır. Bu incelemeyi kolaylaştıran yapısal modeller mevcuttur. Plastik viskozite (η_{pl}), akıcılığın tersidir, yani plastik viskozite (η_{pl}) değeri küçük olan bir beton akıcı olacak ve daha kolay yerleştirilebilecektir (Banfill, 1991; Tattersall, 1991; Bartos, 1992).

Çimento pastasında, agregalar arasındaki uzaklığa benzetilen reometrenin levhaları arasındaki boşluğa bağlı reolojik farklılıkların olduğunu göstermiştir. Agregaların arasındaki mesafe çimento pastasının hacim içeriğine bağlıdır. Aynı zamanda malzemelerin reolojik davranışları, kayma oranı, sıcaklık, karıştırma enerjisi gibi deneylerin durumuna bağlıdır. Bu yüzden betonda yapılacak deneylerde aynı durumlarda çimento pastasının ölçülebilmesi önemlidir (Ferraris, 1999).

Reolojinin kompleks (karmaşık) ilişkiler nedeniyle çoğu kez matematiksel ifadesini vermek zordur. Akış, sıvıdaki yakın elemanların rölatif yer değiştirmesi; kayan akışkan sıvı elemanlarının birbirlerinden uzaklaşmasına veya akışta birbirleri üzerinden geçmesi ile ilgilidir. Kayma akışı, sıvı hareketindeki (kayma oranı olarak adlandırılan), hız gradyanında (değişiminde) oluşan kayma

gerilmesine karşılık olarak, kayma gerilmelerindeki artış oranına, paralel olarak çizilen çizgilere eşittir (Banfill, 2003).

Beton parçacıklar şeklindedir ve gömülü parçacık kuvvetleri doğrudan hesaba katılamaz, bu bilinmeyen verilen metodolojiler veya modeller de akılda tutulmalıdır. Birbirini etkileyen parçalar olarak, sadece çimentonun hidratasyonu ve flokülasyonun devamlı meydana gelmesi gibi olayları içeren, zamana bağımlı özellikler kabul edilmiştir (Ferraris, 1996; 1999).

Taze beton akışkan bir malzemedir. Beton, gerçekte viskoz sıvısı (çimento pastası) içinde katı parçacıkların (agregaların) süspansiyonunun yoğunlaştırılmışıdır. Bileşenleri reolojik davranışı ve dolayısıyla betonun sertleştikten sonraki dayanımını etkiler. Çimento pastasında, sıvı (su) içindeki çimento tanelerinden oluşan akışkan homojen değildir. Taze beton, viskoz bir sıvı varsayılarak incelenir. Bu simülasyon çok kuru betonlar için doğal olarak anlam taşımaz. Bu nedenle reolojik parametrelerin kontrolü ve ölçülmesi kaliteli betonun üretilmesinde çok önemlidir (Leslie ve Xihuang, 2000; Ferraris, 1999; Yücel, 1997).

Betonun reolojik davranışı Newton sıvısından farklıdır, çimento pastasının plastisitesi ve viskoelastisitesi gibi reolojik davranışları ile ilişkilidir. Taze betonu, çimento pastası ile temsil edilen likit ortamdaki agrega dispersiyonu olarak varsaymak uygulamada yaygındır. Çimento pastasının kendisi, sıvı ortamdaki (su), katı taneciklerin (çimento) süspansiyonu olduğundan, taze betonu çok fazlı bir malzeme olarak varsaymak daha uygundur (Özkul ve Sağlam, 2002).

Ortamda ilk dönme hareketinin başlaması için uygulanan kayma gerilmesinin belirli bir değere varması gerekir, bu sınır değere “kayma eşiği” veya “akma gerilmesi” (τ_0) adı verilmektedir (Özkul ve Sağlam, 2002).

Ayrıca dY/dt ve (τ) arasındaki bağıntı başlangıçta doğrusal değildir, artan şekil değiştirme hızı ile azalan bir kayma direnci gösteren (tikotropik) bir eğri formundadır. Akma değerinin üzerinde Bingham eğrisi lineerdir. Eğri basitleştirilerek doğrusal bölümü uzatılırsa bağıntı, tümüyle doğrusal hale getirilebilir. Bu durumda viskozitede tek bir değere indirgenmekte ve plastik viskozite adını almaktadır. Bu davranışa uyan cisimlere reoloji biliminin kurucusu olan Bingham'ın adı verilmiştir (Yücel, 1997).

Beton gibi süspansiyon yoğunlaşması için birçok denklem kullanılır, kayma oranı için kayma gerilmesi veya viskozite için süspansiyon yoğunluğu bağıntısı anlatılmaya çalışılır, böylece bütün sistemin viskozitesi için tek bir değer olduğu varsayılır (Ferraris, 1999).

Bingham modeli plastik davranışı tanımlarken power kanunu ve cross modellerinin her ikisi de pseudoplastik davranışı tanımlar. Pseudoplastik davranış için genel model power kanunu denklemi'dir. Pseudoplastik malzeme için daha genel modeli Cross denklemi sağlar. Herschel-Bulkley modeli, Bingham modeli ile power kanunu denkleminin bileşimidir (Leslie ve Xihuang, 2000).

Reolojik parametreler için malzemeye göre değişen bir çok sayısal değerler verilmiştir. Bunun nedeni farklı deneysel teknik ve cihazlardan kaynaklanmaktadır. Deney anındaki kayma farklılıkları, viskozimetrelerin düzgün yüzeylerindeki fark edilemeyen tıkaç akış ve kayış mesafeleri, elde edilen verilerdeki farklılıklara neden olabilir. Çimento pastasını etkileyen deneysel parametrelerin çok olması reolojik verilerin elde edilmesini zorlaştırır (Banfill, 2003).

Reolojik parametreler, bir gerilme verildiği veya uygulandığı zaman oluşacak olan akış veya deformasyonun miktarını veya tersine olarak belirli bir

deformasyon miktarına neden olan gerilmeyi tahmin etmemizi olanaklı kılar (Özkul ve Sağlam, 2002).

Maksimum parça boyutu arttıkça akma gerilmesi ve plastik viskozite artar. Betondaki agrega miktarı artışı ile akma gerilmesi yüksektir. Benzer akma gerilmesindeki yuvarlak ve köşeli iri agrega içeren iki farklı betondaki plastik viskozitedeki artış, birbirine kenetlenen yüzeyler ve parçacıklar arası temas artışından dolayı kısmidir. Köşeli iri agregadan oluşan betonun plastik viskozitesi daha yüksektir. Plastik viskozitedeki artış için hesaplanan pastadaki akış direnci ve yüksek gerilme sonucunda kayma oranı da artar. Parçaların etkisi ise, kaba taneli betonlarda basit hacim etkisi ve ince taneli pastada yüzey alanı etkisidir (Banfill, 2003).

3.3. Zeolit

Zeolit tüfü ve kireç karışımları antik zamanlardan beridir inşaat alanında geniş anlamda kullanılmaktadır. Günümüzde 50 adetten fazla doğal zeolit ve 150 adetten fazla sentetik zeolit bilinmekte ve endüstride değişik alanlarda kullanılmaktadır. Dünyanın bazı bölgelerinde, çimento endüstrisinde, doğal zeolit popüler bir doğal puzolandır (Poon *et al.*, 1999).

Zeolitin önemli kullanım alanları arasında su sertliğinin azaltılması, gaz ve petrol işleme merkezleri, atık su temizlemesi ve kağıt endüstrisidir. Zeolitin volkanik kökenli olması ve amorf yapılı yüksek silis içeriği puzolanik aktivitesini ortaya çıkarmaktadır (Gervais ve Ouki, 2002).

Doğal zeolitin yüksek bir iyon değişim kapasitesi ve ağır metal katyonları belirli bir şekilde çekme özelliği vardır. Solüsyondan stronyum 90, sezyum 137 ve diğer radyoaktif izotopları emebilir ve 3 boyutlu kristal yapısında tutabilir.

Zeolitler kolayca çimento ve cam sistemleriyle reaksiyona girerek, radyoaktif atığın tutulmasına ve güvenli bir şekilde saklanmasına yardımcı olur. Zeolitler fiziksel olarak serttir ve nükleer ayrışmaya dayanıklıdır ayrıca organik iyon değişim reçinelerinden daha ucuzdur (Englert and Rubio, 2005).

Zeolitin beton üretiminde kullanıldığı en çarpıcı örnek 1912 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde 386 km uzunluğundaki su kanalı inşaatıdır. Yapım için gerekli olan çimento miktarının yaklaşık %25'inin zeolit katkılı çimento ile sağlanması toplam maliyetlerde yaklaşık 1.000.000 \$'lık bir getiri sağlamıştır. Yugoslavya, Bulgaristan, Rodos ve Çin ana bileşeni klinoptilolit ve analsimden oluşan zeolitin, çimento katkı maddesi olarak geniş kullanım alanı bulunduğu diğer bölgelerdir (Kurama, 1994).

Türkiye, her ne kadar özellikle Batı Anadolu Bölgesi'nde zengin zeolit yataklarına sahip ise de, zeolitin endüstriyel kullanımı henüz tam olarak gerçekleşmemiştir. Son yıllarda Türkiye'de zeolit kullanımı daha çok atık suların sertliğinin azaltılması ve zirai uygulamalar üzerine yoğunlaşmıştır (Erdem vd., 1999).

Çimento maliyeti ve tüketimini azaltmak için bağlayıcı özelliğe sahip inorganik malzemeler katkılı çimento üretmek için kullanılabilir. Bu malzemeler volkanik tüf, pomza, perlit ve diyatomit gibi doğal puzolanlar (tras) ve cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi tesis atıklarından oluşan yapay puzolanlardır. Katkılı çimento, portland çimentosuna göre çok daha az enerji tüketimi sağlaması ve bazı özelliklerinin getirdiği ilave katkılardan dolayı yapı sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Beton uygulamalarında tras katkılı çimentoların kullanılması betonun işlenebilirliğini arttırmak, geçirgenliği azaltmak, sülfat etkisine karşı dayanımı arttırmak, çatlamalara karşı dayanımı iyileştirmek, uzun dönemde dayanıklılığı arttırmak gibi çeşitli teknolojik avantajlar da sağlamaktadır (Camacho *et al.*, 2002).

Naiqian *et al.*, (1998) doğal zeolit tozunun ASR genleşmelerine etkisini incelemek için yaptıkları çalışmada ASTM C-227 Harç Çubuğu metodunu uygulayarak %30 oranında doğal zeolit tozunu çimento ile yer değiştirmesi durumunda reaktif agrega kullanılsa bile betonda ASR'nin oluşmayacağı ve zeolit tozunun inceliği artıkça bu etkinin artacağı belirtilmiştir. Bu sonuç zeolit tozunun boşluk çözültisi alkalitesini iyon değişimi, absorpsiyon puzolanik reaksiyon sonucu düşürmesi ile ortaya çıkmaktadır.

Zeolitın doğal mineral olarak kullanılmasının sebepleri; yüksek iyon değişim kapasitesi, moleküler elek olma özelliği, yüksek silis bileşimine sahip olması, düşük yoğunluğu ve kristal yapısı bozulmadan dehidrasyona uygunluğudur. Bu özellikler zeoliti diğer mineral katkılardan üstün kılmaktadır. Zeolitın moleküler elek olması zeolitın öğütülmesini kolaylaştırmaktadır. Özgül yüzeyin normal çimento değerinden yüksek olması ise boşlukların azalmasını sağlamaktadır (Taban ve Şimşek, 2009).

Doğal puzolan olan zeolitler, beton içinde uçucu kül ve silis dumanı gibi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanırlar. Daha önce yapılan çalışmalar, zeolit ile hazırlanan çimento hamuru örneklerinde, gözenekliliğin zaman içinde azaldığını ve zeolitın olumlu fiziksel ve mekanik özelliklerine ilave olarak, beton dayanıklılığını etkileyen bir faktör olduğunu göstermiştir (Karakurt ve Topçu 2012; Valipour *et al*, 2013).

3.4. Geopolimer

Geopolimerler, ortam sıcaklığında üretilen ve sertleştirilen seramik benzeri özelliklere sahip amorf üç boyutlu alüminosilikat malzemelerdir. Yüksek alkali koşullar altında, alkali hidroksit ve silikat çözültisi varlığında, polimerizasyon, reaktif alüminosilikatlar hızla çözüldüğünde ve çözültide serbest $[\text{SiO}_4]$ ve $[\text{AlO}_4]$ tetrahedral birimler serbest bırakıldığında gerçekleşir Tetrahedral birimler

alternatif olarak amorf jeopolimerleri oluşturan oksijen atomları paylaşarak polimerik öncüllere bağlanır. Çerçeve boşluklarında bulunan K^+ veya Na^+ gibi pozitif iyonlar, negatif yükü dengeler (Davidovits, 1994; Duxson *et al.*, 2007).

Bir alkali çözeltide çözülebilen herhangi bir silis ve alümin kaynağı, jeopolimer öncüsü ve jeopolimerizasyon yapabilir. $750^{\circ}C$ 'de kaolin kalsinasyonu ile üretilen metakaolin, sıklıkla jeopolimerlerin üretimi için kullanılır (Kamseu *et al.*, 2010).

Bulduğumuz yıllarda her ülkede çok miktarda ortaya çıkan madencilik, metalurjik, belediye, inşaat ve yıkım da dahil olmak üzere çeşitli atıklar, beton yapı elemanları, yangına dayanıklı kaplamalar ve izolatörler vs. jeopolimer malzemelerin üretimi için dahi kullanılabilir (Vaou ve Panias, 2010).

Çevreci bina ürünleri günümüz piyasasında hızla gelişmektedir. Bu tür malzemeler çevre dostu, dayanıklı, biyolojik esaslı ve geri dönüştürülmüş olmalıdır ve düşük toksiklik ve emisyonlarla karakterize edilmelidir. Çevreci malzemeler genellikle bina içi kapalı ozonun azaltılmasında dikkate değer bir potansiyel taşır ve bu etkiyi ortadan kaldırmak için kullanılabilir (Hoang *et al.*, 2009).

Geopolimerler özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerin birbirleri arasında polikondenzasyon sonucu oluşan kovalent zincir bağlar kurması ile oluşmaktadır. Geopolimerin en iyi özellikler gösterdiği ürünler ise $750^{\circ}C$ 'de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda ($40-100^{\circ}C$) fırınlanmasıyla elde edilebilmektedirler (Davidovits, 2008).

Geopolimerin son yapısı çoğunlukla Si:Al oranına bağlıdır ve genellikle bulunduran taşıma altyapısında kullanılması düşünülen malzemeler bu oran 2 ila 3.5 arasındadır (Hardjito *et al.*, 2004; Davidovits 2008).

Bu tür geopolimerler, aşağıda belirtilmiş üç ana tipten birini alacaktır (Davidovits 2008). Bunlar;

- Poli (sialat) Si:Al=1, tekrar eden birim olarak [-Si-O-Al-O-]'yi içerir.
- Yinelenen birim olarak [-Si-O-Al-O-Si-O-] olan Poli (sialat-silokso) Si:Al =2.
- Tekrar eden birim olarak [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]'yi haiz Poli (sialat-disilokso) Si:Al =3.

Davidovits'in tanımlarına göre geopolimer tepkimesine giren ve oluşan molekül grupları (Davidovits, 2008);

- Si-O-Si-O-siloxo, poly(siloxo)(camsuyu alkalı-silikatlar) bağlayıcılık kazandırıcı hammadde
- Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo)
- P-O-P-O- phosphate, poly(phosphate)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly(phospho-sialate)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone

Geopolimer kaynağı olarak kullanılan Al ve Si içerikli malzemelerin alkali çözeltilerle tepkimesinden en iyi sonuçlar metakaolin esaslı geopolimerlerde görülmekle beraber, metakaolin > zeolit > cüruf > uçucu kül > puzolan > kaolin sıralamasına göre azalmaktadır (Panagiotopoulou *et al.*, 2007).

Silis dumanı ve korindon geopolimer tepkimesine yatkın bileşiklerdir. Geopolimer işlemi bu alumino-silikat oksitlerin alkali hidroksit tuzlarda çözünmesi ile başlamaktadır. Kullanılan jeolojik malzemenin incelik modülünün

yüksek olması ile alüminyum ve silisyumlu moleküllerin çözünürlük düzeyi tepkimeyi etkilemektedir (Van Jaarsveld *et al.*, 1997). Alümino-silikat jel çözeltinin oluşum süreci ham maddelere uygulanan kür sıcaklığına ve süresine bağlıdır (Zeybek, 2009).

Alkali aktive edilmiş bileşikler konusunda portland çimentosuna alternatif olarak son 20 yıldır yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Yüksek mukavemetli farklı kombinasyonu ve gelişmiş yangın ve kimyasal direnci, malzeme bilimi, kimya mühendisliği ve inşaat mühendisliği alanındaki birçok araştırmacıyı cezbetmiştir. Alkali aktive edilmiş alüminosilikatların mekanik özellikleri portland çimentosunda olduğu gibi sıklıkla araştırılmıştır. Pek çok çalışmada alkali silikatların oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altındaki davranışları incelenmiştir. Hidrojenli özellikleri, klorür difüzyonu ve ısıl özellikleri gibi diğer parametreleri birçok çalışmada araştırılmıştır (Zuda *et al.*, 2009).

Analitik kimya, geopolimer üretiminde önemli bir bileşen olan çözünür silikatları 19. yüzyılda ortaya çıkarmıştır. İlk olarak Glauber tarafından (oleum silisium) silis yağı olarak isimlendirilen çözünür silikat bitki külleri içindeki potasyum karbonat ile kuartz kumunun birlikte ergitilmesi ile üretilmiştir (Zeybek, 2009).

Suda çözünürlük geopolimer üretimi için önemlidir. Geopolimerin Na^+ veya K^+ bazlı olması alkali silikatların suda çözünürlüğünü farklı etkilemektedir (Davidovits, 2008).

Cheng ve Chiu (2003) çalışmalarında potasyum hidroksit ve sodyum silikat ile granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolinit kullanarak geopolimer beton üretimi yapmışlardır. Yazarlar geopolimerin geopolimerizasyon davranışının, fiziksel, mekanik ve yangına dayanıklılık özelliklerinin, reaksiyon sistemindeki kimyasal bileşime kuvvetle bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Geopolimerin yapımında,

sistemdeki K_2O içeriğinin önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. K_2O içeriğinin artması ile priz süresinin iyileştirilebileceğini, basınç dayanımı yükseltilebileceğini ve yangın direncinin de iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Ghanbari *et al.*, (2017) çalışmalarında kaoliniti $750^\circ C$ 'de 24 saat kalsine etmişlerdir. Çalışmalarında metakaolin esaslı geopolimer betonların basınç dayanımını ve yığın yoğunluğunu belirlemek için dört parametre (sertleştirme sıcaklığı, SiO_2/Al_2O_3 , Na_2O/SiO_2 ve H_2O/Na_2O oranı) kullanmışlardır. Bu şekilde belirledikleri dört değişkenin optimum değerlerini sırası ile $67^\circ C$ 'lik bir kurlenme sıcaklığı, $SiO_2/Al_2O_3=2.90$, $Na_2O/SiO_2=0.20$, $H_2O/Na_2O=13.75$ olarak belirtmişlerdir. Geopolimer numunede basınç dayanımının 62.4 MPa ve yığın yoğunluğu 1.59 g/cm³'lük değerlere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Wan *et al.*, (2017) çalışmalarında metakaolin esaslı geopolimerlerin mikro yapılarını ve değişen Si/Al oranlarının geopolimerizasyon reaksiyonları üzerine etkisini incelemişlerdir. Si oranları değiştirmek için silika düzeltici olarak silis dumanı kullanmışlardır. 1:1, 1.5:1, 2:1, 3:1, 4:1 ve 5:1 Si/Al oranları ile metakaolin-esaslı geopolimerler üretmişlerdir. Modelleme ve simülasyon tekniği kullanarak bir Si atomunun bağlanma enerjisini ve çeşitli Si/Al oranlarında oluşan geopolimerlerin toplam enerjisini hesaplamışlardır. Si/Al oranı 2:1 olduğunda, geopolimerin yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang *et al.*, (2017) çalışmalarında alkali kationların geopolimerizasyon reaksiyonundaki rolünü ve metakaolin bazlı geopolimerlerin basınç dayanımını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Reolojik çalışmaları, başlangıç aşamasından itibaren geopolimerizasyon için gerçek zamanlı bilgi sağlamak için kullanılmışlardır. Na^+ ve K^+ arasındaki çözünme eğilimindeki farkın, basınç mukavemetini etkileyen farklı morfolojilere neden olduğu bulmuşlardır. Na^+ kullanan sistemlerde basınç dayanımını, K^+ kullananlara göre daha yüksek olarak tespit etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımı (~ 40.1 MPa), 1.9:1 Si/Al oranına

sahip 12M Na⁺ kullanılan bir sistemden elde etmişler ve burada sürekli monolitik bir mikro yapı gözlemlemişlerdir.

Geopolimer betonu, portland çimentolu betona göre 2–3 kat daha fazla çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca potasyum polisialat esaslı geopolimerlerin donma-çözülme dayanımları da daha iyidir. Doğaya zarar veren arsenik, sülfirik asit, radyoaktif atıkların tutulmasında geopolimer kayaç yapısı gelecek vaatmektedir. Geopolimit 50 ticari ismindeki K-poli-sialat formülü ile pH düzeyinin 1.5–3 arasında olduğu Kanada'daki uranyum ve arsenik atıkların kapsülasyonu araştırılmış ve geopolimer matris yapısının bozulmadan radyoaktif mineralleri hapsedebileceği gözlenmiştir (Zeybek, 2009).

Geleneksel Portland çimentosundan farklı olarak geopolimerik çimentolar kirece dayalı değildir ve asidik solüsyonlar tarafından çözülmüş değildirler. Portland esaslı çimentolar, (sade ve cüruf karıştırılmış) asitli ortamlarda tahrip olmuşlardır. Kalsiyum alüminat, üretim için pahalıdır ve %30-60 oranında ağırlık kaybettiği için (tahrip olduğu için) tatmin edici değildir. Geopolimerik çimentolar, Potasyum-Poli (sialat-siloxo) türü, geopolimit %5-8 arasında kayıptan sonra kararlı kalırlar. Bu asit dirençli çimentolar oda sıcaklığında hızlıca sertleşirler ve 20°C'de 4 saat sonra hidrolik bağlayıcı harçlara uygulanan standartlara göre test edildiğinde 20 MPa'a kadar basınç dayanımı gösterirler. 28 günlük nihai basınç dayanımlarının 70-100 MPa aralığında olduğu tespit edilmiştir (Davidovits, 1994).

Adak *et al.*, (2017) çalışmalarında uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda nano-silika kullanmışlardır. %6 oranında nano-silika kullanarak uçucu kül esaslı geopolimer betonun geliştirilebileceklerini söylemişlerdir. Bu tür nano-silika modifiyeli uçucu kül esaslı geopolimer betonların herhangi bir ısı aktivasyonu olmaksızın farklı yaşlarda yapısal davranışlarında ilerleme olduğunu belirtmişlerdir. Nano-silika ile modifiye olarak hazırlanan uçucu kül esaslı geopolimer betonların, sıcaklıkla kürlenmiş geopolimer betonlara ve sıradan

portland çimentosu ile hazırlanmış betonlara kıyasla mükemmel mekanik dayanım gösterdiklerini belirtmişlerdir. 28 günlük basınç dayanımını 46.83 MPa olarak bulmuşlardır.

Assi *et al.*, (2016) çalışmalarında uçucu kül esaslı geopolimer betonda sodyum hidroksit oranı, dış ısı miktarı ve kısmen portland çimentosu yerine kullanılmasını etkisi araştırmışlardır. Aktive edici solüsyon olarak sodyum hidroksit ve su kombinasyonunu kullanmışlardır. Çalışmalarında dışsal ısının basınç dayanımında ana etken olduğunu vurgulamışlardır. Dış ısı bulunmadığı takdirde, erken ve son basınç dayanım dayanımlarının, uçucu külün kısmen Portland çimentosu ile değiştirilerek geliştirilebileceğini belirtmişlerdir. Dışsal ısı etkisinin sadece nihai basınç dayanım değeri üzerinde değil, aynı zamanda erken yaşta basınç dayanım değerinin kazanılmasında da etkili olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında 68.5 MPa dayanımını elde etmişlerdir.

Liua *et al.*, (2016) çalışmalarında uçucu kül esaslı suda yüzen ve geçirimli bir geopolimer bloğu imal etmişlerdir. Geopolimer üretim süreci boyunca oleik asit ve H₂O₂ çözeltisi ilave edilerek oldukça birbirine bağlı, gözenekli köpüklü geopolimer bloğu üretmişlerdir. Köpüklü geopolimer bloğun basınç dayanımının 0.55±0.08 MPa, kuru yoğunluğun 0.37 g/cm³, su katsayısına geçirgenliğinin 0.35 cm/s ve yüzey alanı 67.62 m²/g olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak, gözenekli geopolimer bloğun metilen mavisi için yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine (50.7±0.7 mg/g) sahip olduğunu belirtmişlerdir. Atık su arıtımı gibi uygulamalarda zeolitlerin düşük maliyetlerinden dolayı, kullanılma potansiyeli olduğunu belirtmişlerdir.

Lirer *et al.*, (2017) çalışmalarını Napoli limanından tortulardan ve İtalya'nın güneyindeki bir enerji santrali tarafından üretilen endüstriyel uçucu küllerden oluşan farklı geopolimer numuneler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Silis kumunu, eylemsiz bir referans malzeme olarak karşılaştırma amacıyla kullanılmışlardır. XRD, SEM ve FTIR deneysel çalışmalarını yapmışlardır. Taranan topraklardan

yapılan kompozit malzemelerin, kumla yapılan kompozit malzemelerden daha kompakt mikroyapı gösterdiklerini, böylece daha iyi mekanik özelliklere sahip olduklarını vurgulamışlardır. Gözlemlenen ana farklılık olarak, geokompozit malzemenin young modülünün daha yüksek çıkması olarak belirtmişlerdir.

Shehab *et al.*, (2016) çalışmalarında normal portland çimentosu yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında uçucu kül kullanarak geopolimer betonlar üretmişlerdir. Uçucu külün betonların mekanik özelliklerini geliştirdiğini göstermişlerdir. En yüksek dayanımı 350 doz betonda, %50 uçucu kül ilave ettikleri betonda 28 günde 379 kg/cm² olarak bulmuşlardır.

Aliabdo *et al.*, (2016) çalışmalarında uçucu kül temelli geopolimer betonlarda çimento ilavesinin, çözelti dinlenme süresinin ve kürlenme özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. 350, 400, 450 doz uçucu küle ağırlıkça %0, %5, %10, %15 çimento eklemiştir. Numuneleri 28⁰C, 50⁰C, 70⁰C ve 90⁰C sıcaklıklarda 24, 48 ve 72 saat küre tabi tutmuştur. Uçucu kül oranının artması ile birlikte basınç dayanımlarının arttığını belirtmiştir. Uçucu kül oranının artması ile birlikte basınç dayanımı, gerilme mukavemeti ve elastisite modülünü değerlerinin arttırdığını belirtmişlerdir ve aynı zamanda su emme ve gözenekliliğinde azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca çimento eklenmesi durumunda betonun basınç dayanımının, çekme dayanımının ve elastisite modülünün arttığını ancak su emme ve porozitenin azaldığını belirtmişlerdir.

Uçucu kül termik santral bacalarından elde edilmiş, içi boş, küresel tanecik yapılı bir atık malzemedir. Uçucu kül tanecikleri amorf camsı yapıda mullit, hematit, magnetit, kuvarz gibi kristaller içermektedir. Oluşacak kristal tipleri kömürün çıktığı bölgeye ve baca ısısına bağlıdır. Öğütülmüş kömür teknolojisiyle ısıtılan fırınlarda 1200–1500⁰C baca ısısı oluşurken, gaz haline getirilmiş kömür prosesi ile 1800⁰C ısı oluşmaktadır. Bu teknoloji ile uçucu külün tamamı ince parçacıklı kristallere dönüşmekte ve çok daha yüksek düzeyde silika, alumina ve demir oksit içermektedir. Uçucu külü yüksek fırın cürufu ile benzer

kompozisyona ulaştırmakta ve daha verimli geopolimer reaksiyonu veren bir hammadde elde edilmektedir (Zeybek, 2009).

Fosfat esaslı geopolimer diş protez harcı üretiminde yapı malzemesi üretiminde kullanıldığı gibi en önemli kullanım alanlarından biri de radyoaktif atık depolama işleminde kullanılmasıdır. Fosfat esaslı geopolimer ile ilgili çalışmalar oldukça kısıtlı olmakla beraber gelecek vadeden bir araştırma konusu olduğu düşünölmektedir (Davidovits, 2008).

Hidrokarbon bağ yapılı organik polimerler ile polisialat geopolimer yapısı kullanılarak üç tip malzeme sentezi yapılabilmektedir. Humik asitin jeolojik mineraller üzerinde yoğuşması ile poli-organo-siloksan yapısı ve kerojen elde edilebildiği gibi, organik polimerleri mineral geopolimere, karışırma ve emdirme işlemleri ile de organo-geopolimer bileşikler elde edilir. Poli-organo-siloksan yapısı içerisindeki silikon atomu bir, iki ya da üç organik grup ile kimyasal bağ kurabilmektedir. Organo-geopolimerlerde asitik ve bazik ortam polimerizasyon işlemini katalize edebilmektedir. Asit katilizasyonu ile dehidrasyon sağlanmakta, silanol birimleri (Si-OH) 1 mol su çıkararak siloksan bağ (SiO₂) oluşumunu hızlandırmaktadır (Davidovits, 2008; Zeybek, 2009).

Kerojenin asit içinde sentezlenen inorganik ve organik polimerleri kapsayan ağ yapısı asit ve iklim şartlarından daha az etkilenen malzemelerin üretimini sağlayabilecektir (Zeybek, 2009).

Betonda bağlayıcılık sağlayan bileşen çimentodur. Diğer bağlayıcı ve rezenelerden farklı olarak çimentonun ısı kür uygulanmaksızın oda sıcaklığında sertleşmesi ve priz alması ve içindeki toprak kompozit malzemeyle uyum göstermesi önemlidir. Portland çimentosunun muadili geopolimer çimentosundan da bu özelliği göstermesi beklenmektedir. Kalsiyum esaslı, kayaç esaslı ve uçucu kül esaslı geopolimer sentezleri ile geopolimer çimento bağlayıcılar

üretilebilmekte ve oda sıcaklığında priz alması sağlanmaktadır (Davidovits, 2008; Arıöz vd., 2009).

Portland çimentosunun yaygın kullanılmasının sebebi kuru olarak paketlenilebilir ve sevk edilebilir olmasıdır. Geopolimer çimentosu girdileri daha önce de belirtildiği gibi katı hammadde olarak fırınlanmış toprak katı, sıvı alkali tuz ile sıvı alkali silikatlardır. Su ile aktive edilebilecek kuru geopolimer çimentosu ilk kez 1987 yılında denenmiştir (Zeybek, 2009).

Villa *et al.*, (2010) yapmış oldukları çalışmada doğal zeolitlerden sentezlenen geopolimerlerin mekanik dayanımı üzerindeki aktivatör oranı, zaman ve kür sıcaklığının etkisini silikat solüsyonu ve sodyum hidroksit kullanarak incelemiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranını 0.4, 1.5, 5, 10 ve 15 olarak ve sodyum hidroksit solüsyonunu 7 molar olarak tayin etmiştir. 17, 14, 28 ve 90 günlük kür uygulamışlardır. 40°C kür sıcaklığında sentezlenen malzemenin en yüksek dayanıma sahip olduklarını belirtmişlerdir. Kısa kür ve yüksek sıcaklıklarda da (60°C, 80°C) yüksek dayanıma sahip olduğunu belirtmişlerdir. Düşük sıcaklıklarda (25°C, 40°C) önemli dayanım artışları meydana getirmek amacı ile uzun kür süresinin gerekliliklerini belirtmişlerdir.

Geopolimer tuğla üretimi ilk kez 1982 yılında LTGS (düşük ısıli geopolimer prizi) yöntemi ile lateritik diye de adlandırılan kırmızı kil topraktan üretilmiş ve Fransa'da patent alınmıştır. Aynı araştırmacıların kaolinitik killerden üretilen siyah yüzeyli tuğlaları da aynı senteze dayanmaktadır. Ağırlıkça %5 alkali soda (NaOH, KOH) ve kırmızı toprağın 70°C civarında bir sıcaklıkta sentezlenmesiyle üretilen geopolimer tuğlanın basınç dayanımı 900°C ısıli işlemle üretilen seramik kil tuğlaların basınç dayanımından daha yüksek bulunmuştur. Ucuz enerji ile üretilebilir olması ve tek katlı binalarda kullanılacak tuğlaların standardını karşılayabilmesi nedeni ile geopolimer tuğlaların Afrika ülkelerindeki barınma sorununun çözümünde uygun bir yöntem olduğu ileri sürülmektedir (Arıöz vd., 2009).

Geopolimer tuğla üretiminde kostik soda (NaOH veya KOH) ile aktifleştirilmiş kil esaslı hammadde uygun kompaksiyon enerjisi ile preslenmektedir. Alkali soda seramik sentezinde ısıtma rötrenin önüne geçmekte böylece üretilecek malzemede çatlak ve boşluklu yapı oluşmamaktadır. Bu üretim tekniği daha sağlam daha ekonomik tuğlaların üretimini sağladığı gibi yapı elemanlarında elastiklik ve bina içerisinde doğal iklimlendirme de sağlar. Geopolimer tuğla üretim örneklerinden biri de yangın dayanımı yüksek dekoratif modern seramik geopolimer tuğlalardır. Geopoly-therm ticari ismi ile Cordi geopolimer tarafından patentlendirilmiş kaplama seramikleri refrakter olarak kullanıldığı gibi yüksek ısı ve ışığa maruz kalan dekoratif yüzeylerde de kullanılmıştır. 1400°C sıcaklığa dayanan bu malzeme 80–90°C sentezlendikten sonra yüzeyinde sırlama işlemi için 1120°C sıcaklık uygulanmaktadır (Arıöz *vd.*, 2009).

Düşük ısıtma geopolimer oluşumunda alkali tuz oranı %1–5 aralığında değişirken 85 °C ısıtma işlem sıcaklığında 6–18 MPa arası dayanımlar elde edilirken ısıtma işlem sıcaklığı 450 °C olduğunda, basınç dayanımı 60 MPa'a çıkmıştır (Arıöz *vd.*, 2009).

Messina *et al.*, (2017) çalışmalarında prefabrik geopolimer kaldırım tuğlası (kilit taşı) üretimi yapmışlardır. Kalsine işlemi yapıldıktan sonra üç farklı (%70/30, %50/50, %30/70) oranda kil ve sediment oranına sahip numuneler üretmişlerdir. Sodyum silikat solüsyonu ve 14M sodyum hidroksit çözeltileri kullanmışlardır. Ve SS/SH oranı 2.32 de sabit tutulmuştur. 22.9 MPa dayanımında geopolimer kilit taşı üretmişlerdir.

Li ve Xu (2009) yapmış oldukları çalışmada endüstriyel atıklar, cüruf, uçucu kül kullanılarak geopolimer betonlar üretmişlerdir. Geopolimer betonları bazalt lifle güçlendirmişlerdir. 3 farklı su/bağlayıcı oranı (0.26, 0.31, 0.38) kullanmışlardır. 1000 mm çapındaki Split Hopkinson basınç çubuğu yardımı ile bazalt lifli güçlendirilmiş geopolimer betonların mekanik davranışlarını incelemişlerdir. En yüksek basınç dayanıma 54.4 MPa ile 0.26 su/bağlayıcı

oranında ulaştıklarını belirtmişlerdir. Bazalt lifin eklenmesinin önemli bir biçimde geopolimer betonun deformasyon ve enerji emilimi gibi özelliklerini geliştireceğini belirtmişlerdir.

Bernal *et al.*, (2010) yapmış oldukları çalışmalarda çelik lifler güçlendirilmiş alkali-aktif edilmiş betonun erken yaşlardaki mekanik ve geçirgenlik özelliklerini incelemişlerdir. Alkali-aktif edilmiş lif birleştirmeleri ile basınç dayanımında azalmalar tespit etmişlerdir. Fakat 28 günlük kür uygulanmış numunelerde yarmada çekme dayanımında (3.75 MPa – 4.65 MPa) ve eğilme dayanımlarında (6.40 MPa – 8.86 MPa) lif hacminin artması ile birlikte gelişme gösterdiğini belirtmişlerdir. Betonun durabilite özelliklerinin çelik liflerin eklenmesi ile birlikte artış gösterdiğini belirtmişlerdir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Zeolit

Bu çalışma kapsamında kullanılan Zeolit Gördes bölgesinden temin edilmiştir. Kullanılan zeolitin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de, parçacık boyut analizi Çizelge 4.2’de, Helyum piknometresi ile bulunan hacim ve gerçek yoğunluk değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Zeolit kimyasal bileşimi

Bileşim (%)	Zeolit
SiO ₂	65 - 72
Al ₂ O ₃	10 - 12
CaO	2,4 - 3,7
K ₂ O	2,5 - 3,8
Fe ₂ O ₃	0,7 - 1,9
MgO	0,9 - 1,2
Na ₂ O	0,1 - 0,5
MnO	0 - 0,08
Cr ₂ O ₃	0 - 0,01
P ₂ O ₅	0,02 - 0,03
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5,4 - 7,2
LOI	9 - 14

Çizelge 4.2. Parçacık boyutu analizi sonuçları

d(0.1) µm	d(0.5) µm	d(0.9) µm	Yüzey ağırlıklı ortalama d[3,2] µm	Hacim ağırlıklı ortalama d[4,3] µm	Özgül yüzey alanı m ² /g
2.442	22.893	75.806	6.818	31.900	8800

Çizelge 4.3. Helyum piknometresi ile bulunan hacim ve gerçek yoğunluk değerleri

Örnek	Ağırlık(g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)
Zeolit	2.77	1.20	2.31

4.1.2. Çimento

Bu tez çalışmasında CEM I 42.5 N Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Portland Çimentosu (CEM I 42.5 N)'nun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Bileşim (%)	CEM I 42.5 N Portland çimentosu
SiO ₂	19,70
Al ₂ O ₃	4,97
Fe ₂ O ₃	3,58
CaO	64,25
MgO	0,91
Na ₂ O	0,17
K ₂ O	0,77
SO ₃	2,65
Cl	0,011
Kızdırma Kaybı	1,78
Çözünmeyen Kalıntı	0,38
Serbest CaO	1,07
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3600
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,15

4.1.3. Aktivatör

Alkali aktivatör olarak, sodyum hidroksit kullanılmıştır. Kullanılan aktivatörün bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40.00
Renk	Beyaz
pH	13-14
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2.13
Na ₂ O içeriği (%)	-
SiO ₂ içeriği (%)	-
H ₂ O içeriği (%)	-

4.1.4. Agregalar

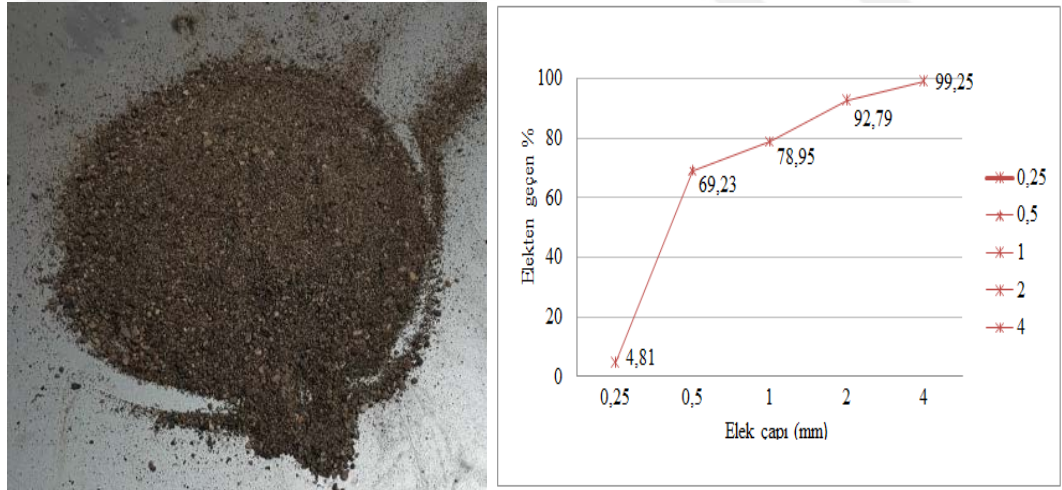
Deneyleerde kullanılan agregalar Malatya Battalgazi ilçesi Bulgurlu mevkiinde bulunan dere yatağından temin edilmiştir. Agregalar kullanılmadan önce laboratuvarıda yıkanmıştır. Bu agregalardan TS EN 13055 (2016)'e uygun olarak küçültme (çeyrekleme) metodu kullanılarak numune alınmıştır. Her deney 3'er defa gerçekleştirilmiştir. Her deney için elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir. Deneyleerde TS ISO 3310-2 (2015)'ye uygun elek analizi gerçekleştirilmiştir. 3 farklı agrega/bağlayıcı oranı seçilmiştir.

Deneyleerde kullanılan 0-4 mm tane çaplı agreganın özgül ağırlık değerleri TS EN 1097-6 (2013)'ya göre elde edilmiş olup, bulunan sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Karışımların üretilmesinde kullanılan agregaya ait özellikler

Özellik	Agrega
	0-4 mm
Kuru özgül ağırlık (g/cm ³)	2,38
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (g/cm ³)	2,47
Görünen özgül ağırlık (g/cm ³)	2,61
Su emme (%)	3,61

Çalışma kapsamında kullanılan 0-4 mm tane çaplı ince agrega ve agregaya ait elek analizi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 0-4 mm tane çaplı ince agrega ve elek analizi

4.1.5. Karma suyu

Çalışmada üniversite şebeke suyu kullanılmıştır.

4.2. Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında harç numunelerinin birim hacim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. XRD ve SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Taze haldeki harç numunelerinin Brookfield viskozimetre aleti ile viskozite değerleri tespit edilmiştir.

4.2.1. Harç Numunelerin Hazırlanması ve Bakımı

Bütün karışımlarda bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak zeolit ve portland çimentosu seçilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve literatür araştırması neticesinde NaOH molaritesi 25M olarak belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan aktivatörlerin miktarı hesaplanırken harçların dozajı 400 kg/m^3 olarak ele alınmıştır. 3 farklı agrega/bağlayıcı oranı (1.5, 1.75 ve 2) seçilmiş ve her bir agrega/bağlayıcı oranına göre hesaplar yapılmıştır. Karışım oranları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. NaOH solüsyonu ile hazırlanan geopolimer harç numunelerde çimento yerine %0, %10, %25, %40, %55, %70, %85 ve %100 oranlarında doğal zeolit kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Harç (1 m^3) karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

Karışım		Z100	Z85	Z70	Z55	Z40	Z25	Z10	Z0	
Zeolit Oranı (%)		100	85	70	55	40	25	10	0	
Zeolit (kg)		400	340	280	220	160	100	40	0	
Çimento (kg)		0	60	120	180	240	300	360	400	
Su (kg)		228	228	228	228	228	228	228	228	
NaOH (kg)		228	228	228	228	228	228	228	228	
Agrega (kg)	0-4 mm	Agrega/b bağlayıcı	1.5	600	600	600	600	600	600	600
			1.75	700	700	700	700	700	700	700
			2	800	800	800	800	800	800	800
Teorik Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)		1456	1456	1456	1456	1456	1456	1456	1456	
		1556	1556	1556	1556	1556	1556	1556	1556	
		1656	1656	1656	1656	1656	1656	1656	1656	

Karışım oranları belirlendikten sonra numunelerin tartılmasında 1g hassasiyete sahip elektronik terazi kullanılmıştır. Geopolimer harç numuneleri üretmek için ilk olarak sodyum hidroksit ile su karıştırılmıştır. Daha sonra sırasıyla zeolit, çimento ve 0-4 mm tane boyutlu agrega eklenerek tüm karışım 3 dakika sabit devirde mikserde karıştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanım değerlerinin tespiti için $40 \times 40 \times 40 \text{mm}^3$, birim hacim ağırlık ve UPV değerlerinin tespiti için ise $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$ ebatlarındaki numuneler kullanılmıştır. Kullanılan çelik kalıpların tüm yüzeyleri yağlanmıştır. Üretilen karışımlar kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler üretildikten 6 saat sonra 90C^0 sıcaklıktaki etüve yerleştirilip 3 gün (72 saat) bekletilerek kür uygulanmıştır. 3 gün sıcaklık küründen sonra bütün numuneler deney gününe(28 gün) kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Kullanılan mikser, fırın ve üretilen bazı numuneler Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Mikser, fırın ve üretilen bazı numuneler

4.2.2. Viskozimetre ile Reolojik Davranışın Tespiti

Hazırlanan harç numunelerinin viskozimetre değerleri Brookfield viskozimetre aleti ile ölçülmüştür. Viskozimetre başlık dönüş hız değerleri (0.5, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100) gidiş ve (100, 50, 20, 10, 5, 2.5 ve 0.5) dönüş olacak şekilde seçilmiştir. Viskozite okumalarında ortalama 5 saniye beklenmiş ve bu süre sonundaki ilk değer okunmuştur. Gidiş ve dönüş değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. R tipi başlıklardan tüm gidiş ve dönüşleri okuyacak olan uygun başlık seçimi yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan Brookfield viskozimetre aleti Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Brookfield viskozimetre aleti

4.2.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri

Üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri, birim hacim ağırlık değerleri ve ultrases geçiş hızı değerleri tespit edilmiştir.

4.2.3.1 Birim Hacim Ağırlık

40x40x160mm³ ebatlarındaki numunelerin 1g hassasiyete sahip elektronik terazi yardımıyla ağırlıkları ölçülmüş ve elde edilen ağırlık değerleri numune hacmine bölünerek birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Her bir karışım için elde edilen 3 adet numunenin birim hacim ağırlığının aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık değerleri TS EN 12390-7 (2010)'ye göre yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan terazi ve bazı numune örnekleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. 1g hassasiyetli terazi ve kullanılan bazı numune örnekleri

4.2.3.2. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)

Ultrases Geçiş Hızı değerleri TS EN 12504:4 (2012)'e göre elde edilmiştir. Uygulanacak işlemden önce başlıklara jel uygulanmıştır. UPV değerleri üretilen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ebatlarındaki numuneler üzerinden lmlmüştr. Her bir numune için ortalama 10 farklı ölüm yapılmış ve aritmetik ortalama alınmıştır. Kullanılan UPV cihazı ve uygulama yapılan bazı numuneler Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Ultrases geçiş hızı cihazı ve kullanılan bazı numuneler

4.2.3.3. Basınç Dayanımı

Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımlarının belirlenmesinde 40x40x40 mm³ ebatlarındaki numuneler kullanılmıştır. Basınç dayanımının tespitinde ASTM C39 standartına uyulmuştur. Bu çalışmada üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri 3 adet numunenin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı test cihazı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Basınç dayanım test cihazı

4.2.3.4. SEM-EDX

SEM ve EDX analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Merkezinde yapılmıştır. SEM-EDX analizleri için 28 günlük Z10 grubu agrega/bağlayıcı oranı 1.5 ve 1.75 olan harç numuneler üzerinden alınan örnekler incelenmiştir. Ayrıca Z100 grubuna ait agrega/bağlayıcı oranları sırası ile 1.5, 1.75 ve 2 olan harç numunelerinin SEM görüntüleri incelenmiştir.

4.2.3.5. XRD

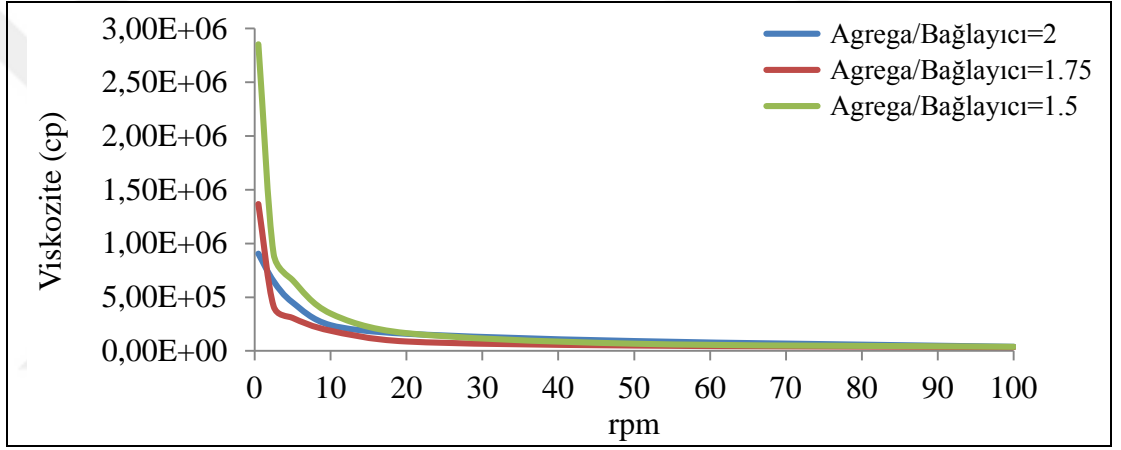
XRD analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Merkezinde yapılmıştır. XRD analizleri için 28 günlük Z10 grubuna ait agrega/bağlayıcı oranı 1.5 ve 1.75 olan harç numuneler üzerinden alınan örnekler incelenmiştir.



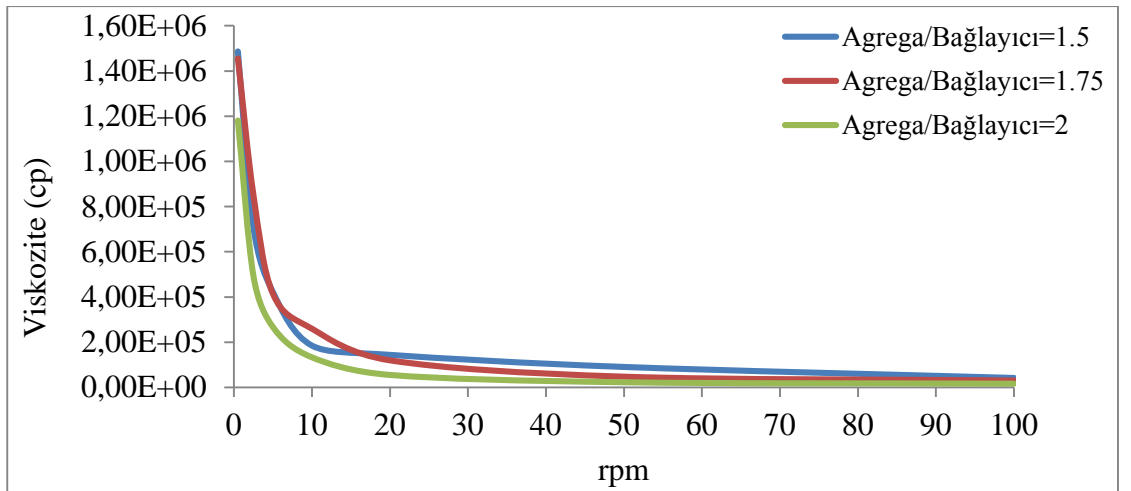
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Geopolimer Harç Numunelerin Reolojik Davranışları

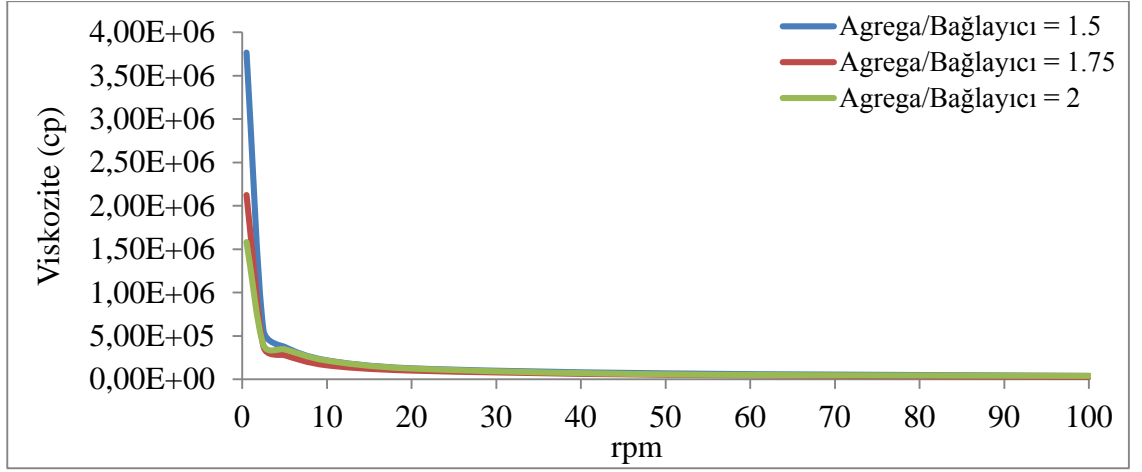
Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular Brookfield viskozimetre aleti kullanılarak elde edilmiştir. 8 grup harç numunesi incelenmiştir. Üretilen numunelerde zeolitin viskozite üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen değerler birbiri ile karşılaştırılmıştır.



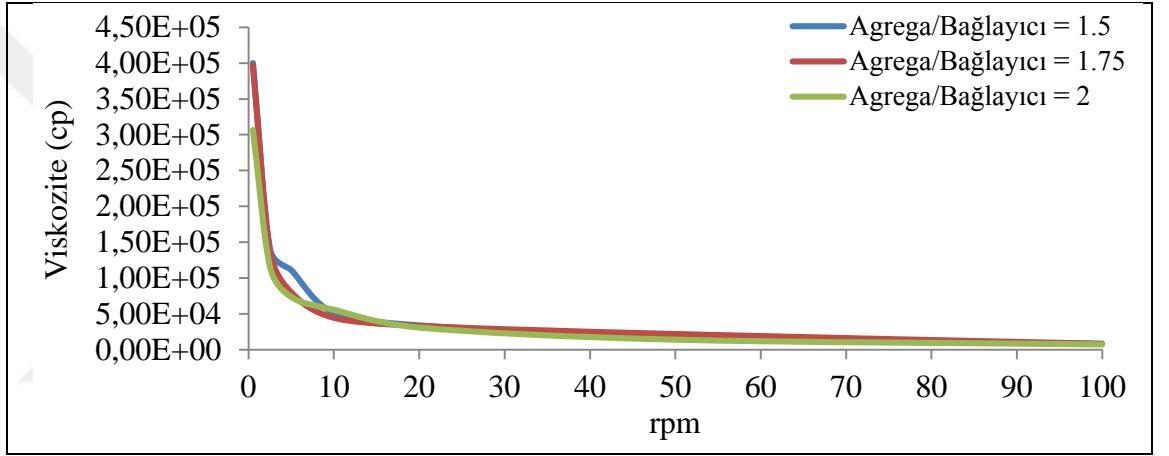
Şekil 5.1. Z100 grubuna ait viskozimetre değerleri



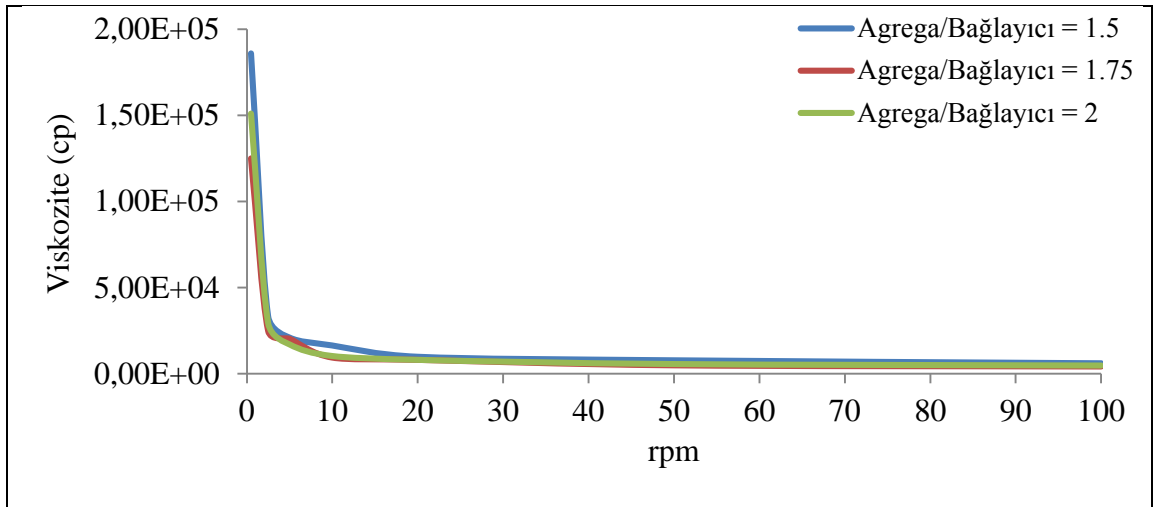
Şekil 5.2. Z85 grubuna ait viskozimetre değerleri



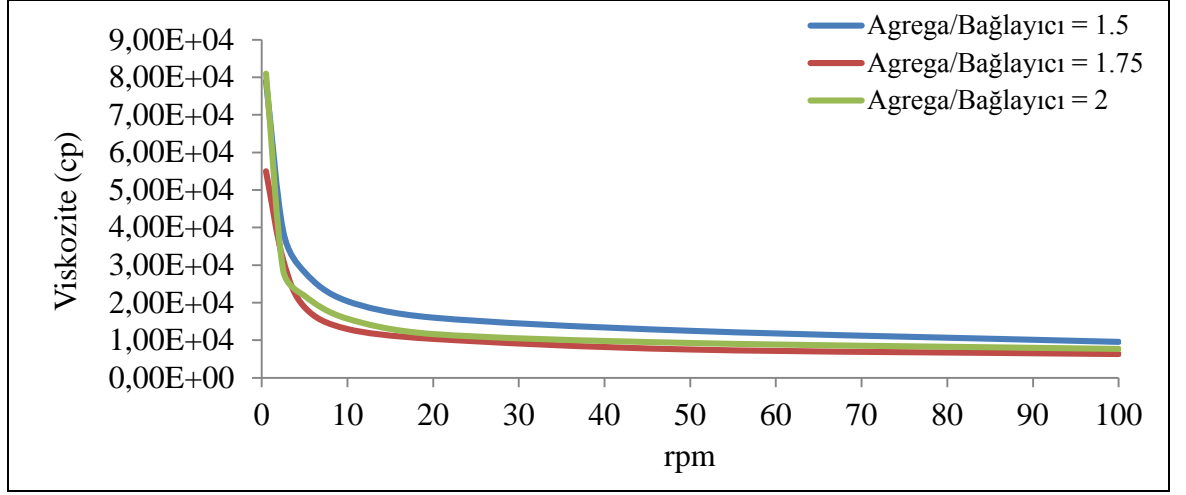
Şekil 5.3. Z70 grubuna ait viskozimetre değerleri



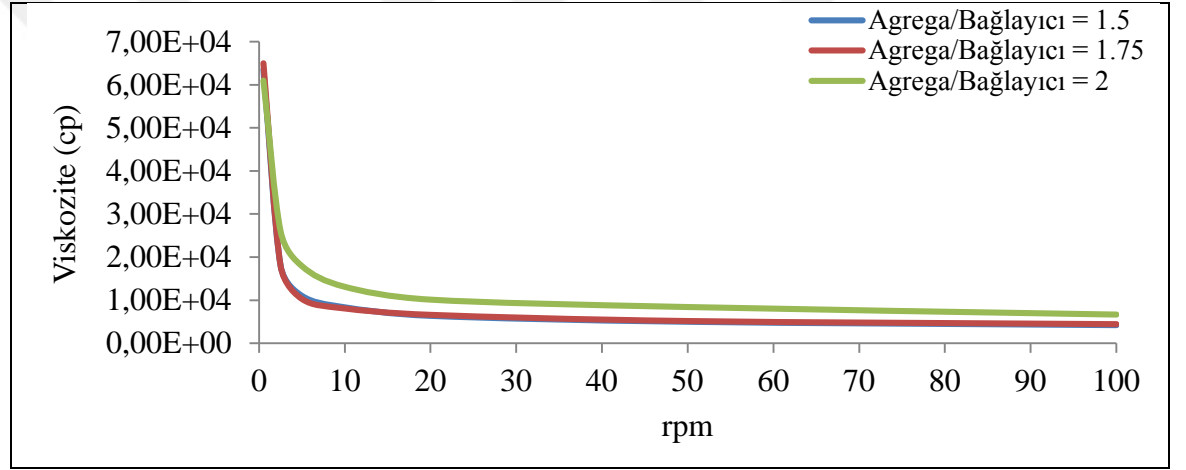
Şekil 5.4. Z55 grubuna ait viskozimetre değerleri



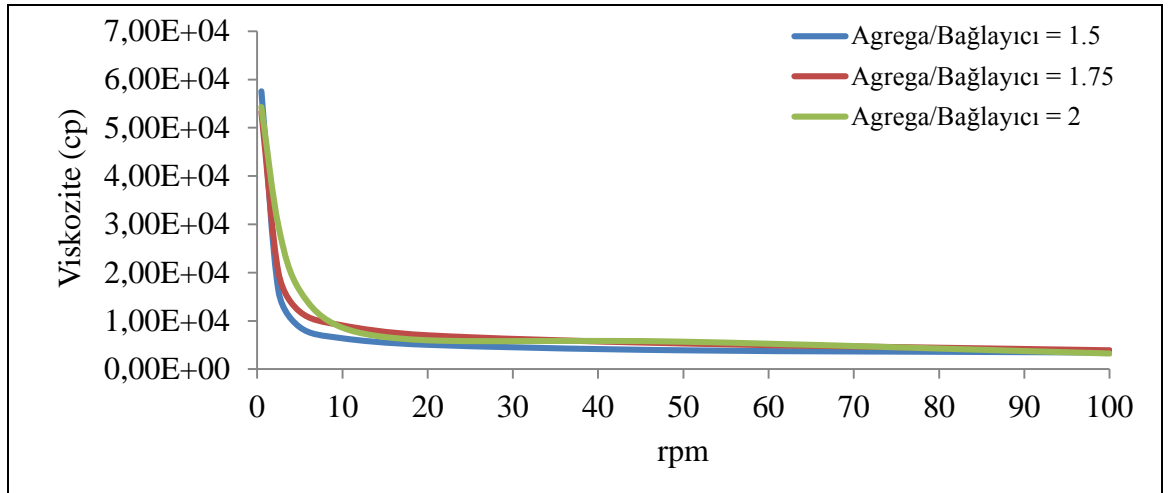
Şekil 5.5. Z40 grubuna ait viskozimetre değerleri



Şekil 5.6. Z25 grubuna ait viskozimetre değerleri



Şekil 5.7. Z10 grubuna ait viskozimetre değerleri



Şekil 5.8. Z0 grubuna ait viskozimetre değerleri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda karışıma eklenen zeolit miktarının artması ile viskozitenin artış gösterdiği tespit edilmiştir. En yüksek viskozite değerlerine %70 zeolit+%30 PÇ karışıma ait Z70 grubunda ulaşılmıştır. En düşük viskozite değerlerine Z0 grubunda ulaşılmıştır. Z25, Z10 ve Z0 gruplarında çimento miktarının artması ile birlikte okumalardan elde edilen verilerin değeri birbirine yaklaşmaktadır. Başlık dönüş hızının artması ile tüm çalışmalarda viskozitenin zamanla azaldığı, buna ek olarak tork (%) değerlerinde artışlar tespit edilmiştir. Zeolit miktarı arttıkça su ihtiyacının artması sebebi ile karışımlar çok yapışkan bir jel halini almıştır ve işlenebilirlik azalmıştır. Ayrıca agrega/bağlayıcı oranı azaldıkça karışıma katılan zeolit miktarının artması ile birlikte okunan viskozite değerlerinde artışlar görülmüştür. Katı madde içeriğinin artması ile birlikte viskozite değerlerinde artışlar tespit edilmiştir.

Şekil 5.1, 5.3 ve 5.8 incelendiğinde agrega/bağlayıcı oranının 1.5'te 0.5 dönüş hızında Z70 grubuna ait viskozite değerinin, Z100 grubuna göre yaklaşık 1.3 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine aynı şekilde agrega/bağlayıcı oranı 1.5'te Z70 grubu viskozite değerleri ise Z0 grubuna göre yaklaşık 65 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu da çimentonun zeolite göre daha az viskoz olduğu işaret etmektedir. Benzer şekilde Şahmaran *vd.*, (2008) çalışmalarında artan doğal zeolit ile düşük süperakışkanlaştırıcı oranlarında işlenebilirliğin önemli derecede azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca Seraj *et al.*, (2016) doğal zeolitin mezo ve makro gözeneklerindeki boşlukların yüksek su ihtiyacının nedeni olduğunu belirtmişlerdir. Markiv *et al.*, (2016) çalışmalarında doğal zeolit içerikli numunelerin su ihtiyacının daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Romagnoli *et al.*, (2012) NaOH ile aktive edilmiş metekaolin esaslı geopolimer karışımların reolojik parametrelerini inceledikleri çalışmalarında katı içeriğinin artması ile birlikte viskozitenin arttığını belirtmişlerdir. Romagnoli *et al.*, (2014) çalışmalarında ise uçucu kül esaslı karışımların reolojik davranışlarını inceledikleri çalışmalarında, katı madde ilavesinin viskozite üzerinde en etkili değişken olduğunu belirtmişlerdir. Katı madde miktarının artması ile birlikte görünür viskozitede artışlar olduğunu belirtmişlerdir. Katı madde içeriğinin artmasının tüm örneklerde viskozite artışına neden olduğunu belirtmişlerdir. Santos *et al.*, (2017) %3.3 oranının üzerindeki

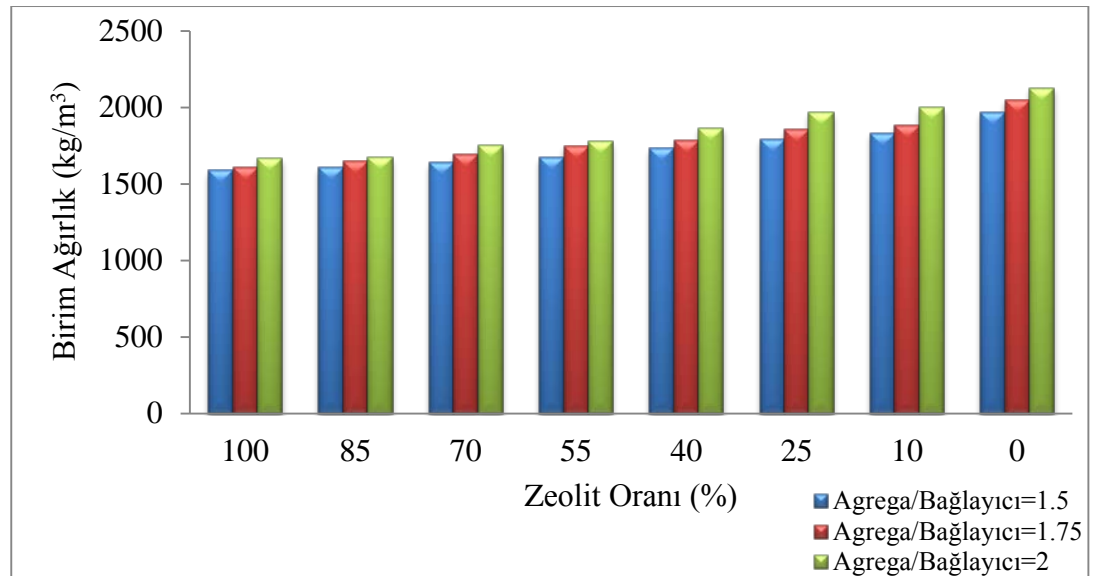
metakaolin içeriğinin kompleks viskozite değerlerinde artışa neden olduğunu belirtmişlerdir ve hazırlanan örneklerin görünüşte plastik özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kireç taşı tozu dolgu malzemesinin viskozitede herhangi bir değişikliğe neden olmadığını belirtmişlerdir. Fraoug *et al.*, (1999) plastik viskozitenin ise %10 oranına kadar azaldığını, %10 oranının aşılması ile birlikte plastik viskozitede artışların meydana geldiğini belirtmişlerdir.

5.2. Sertleşmiş Harç Numunelerinin Özellikleri

Bu çalışma kapsamında birim hacim ağırlık, UPV ve basınç dayanım değerleri gibi sertleşmiş harç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kendi arasında karşılaştırılmıştır. Bütün sonuçlar agrega/bağlayıcı oranlarına göre ayrı ayrı gösterilmiştir.

5.2.1. Birim Hacim Ağırlıkları

28 günlük numunelerin ölçülen birim hacim ağırlık değerleri Şekil 5.9'da verilmiştir.



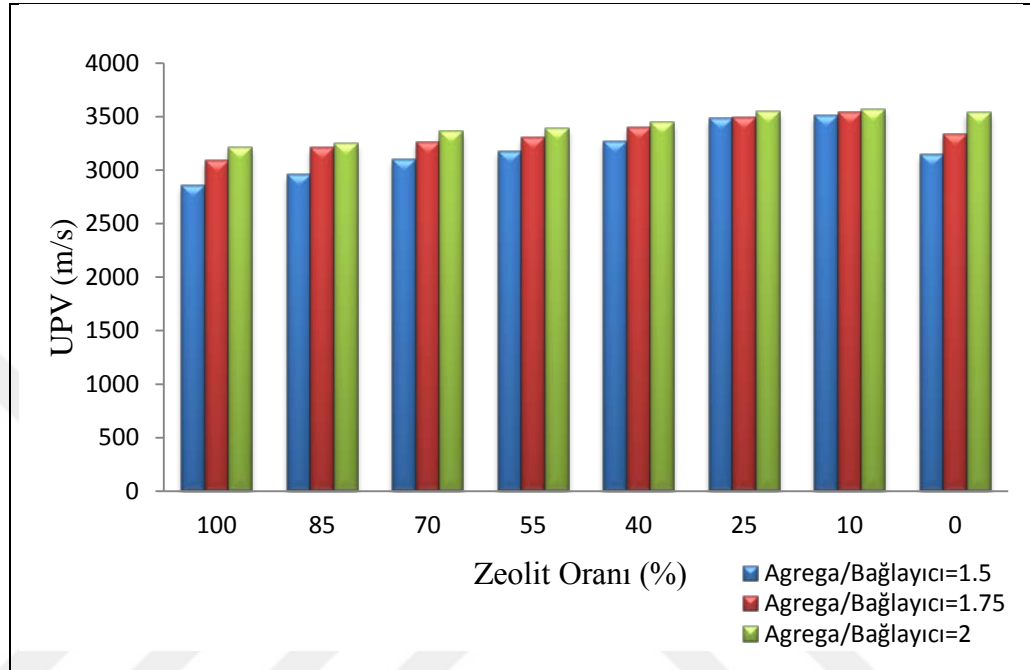
Şekil 5.9. Farklı zeolit oranlarına göre birim hacim ağırlık değerleri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda zeolit miktarının artması ile birlikte numunelerin birim hacim ağırlıklarının azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 5.9'da görüldüğü üzere en düşük birim hacim ağırlıklar %100 zeolit ile hazırlanan agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda Z100 grubu geopolimer numunelerden elde edilmiştir. Z100 grubu agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda en düşük birim hacim ağırlık 1588 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Ayrıca agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan Z100 grubu harçlarda 1606 kg/m³ ile en düşük birim hacim ağırlık elde edilmiştir. Agregabağlayıcı oranı 2 olan Z100 grubu harçlarda 1664 kg/m³ ile en düşük birim hacim ağırlık elde edilmiştir. Agregabağlayıcı oranı 2 olan harçlarda Z0 grubu numunelerde 2127 kg/m³ ile en yüksek birim hacim ağırlık elde edilmiştir. Ayrıca Z0 grubunda agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda birim hacim ağırlık en yüksek 2049 kg/m³ olarak elde edilirken, agrega/bağlayıcı oranı 1.5'te bu değer 1970 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. Ayrıca agrega/bağlayıcı oranının artması ile birlikte birim hacim ağırlıklarında artışlar meydana gelmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda Z0 grubuna ait numunelerin, Z100 grubuna ait numunelere göre birim hacim ağırlıklarının %33 daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Agregabağlayıcı oranı 1,75 olan harçlarda Z0 grubuna ait numunelerin, Z100 grubuna ait numunelere göre birim hacim ağırlıklarının %27 daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Agregabağlayıcı oranı 2 olan harçlarda Z0 grubuna ait numunelerin, Z100 grubuna ait numunelere göre birim hacim ağırlıklarının %28 daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Zeolit miktarının artması ile birlikte işlenebilirliğin azaldığı ve bununda numune yapısında boşluklara neden olduğu düşünülmektedir. Oluşan bu boşlukların birim hacim ağırlıklarda azalmalar meydana getirdiği düşünülmektedir.

Karakurt *vd.*, (2010) çalışmalarında zeoliti quartz yerine agrega olarak kullanarak gaz beton üretmişlerdir. Quartz kumu yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında doğal zeolit (klinoptilolit) kullanmışlardır. İnce agrega olarak 100 µm, kaba agrega olarak 0.5-1 mm boyutlarında zeolit kullanmışlardır. Zeolit ikame oranının artması ile birlikte birim ağırlıklarda azalma olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ince agregalı zeolit içerikli numunelerin birim ağırlıklarının kaba agregalı zeolit içerikli numunelere göre daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

5.2.2. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)

Şekil 5.10'da 28 günlük harç numunelere ait farklı agrega/bağlayıcı oranına ve zeolit miktarına göre UPV değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Farklı agrega/bağlayıcı oranına sahip numunelerin zeolit oranlarına göre UPV değerleri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda en yüksek UPV değeri Z10 grubunda 3512 m/s ile elde edilmiştir. Agregat/bağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda ise yine Z10 grubunda 3542 m/s değeri ile en yüksek değer elde edilmiştir. Agregat/bağlayıcı oranı 2 olan harçlarda ise en yüksek değere yine Z10 grubunda 3574 m/s ile ulaşılmıştır. En düşük UPV değerlerine ise Z100 grubu harç numunelerinde ulaşılmıştır. Agregat/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda Z100 grubunda 2885 m/sn ile en düşük UPV değeri elde edilmiştir. Ayrıca agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda Z100 grubunda 3090 m/sn ile en düşük UPV değeri elde edilirken, agrega/bağlayıcı oranı 2 olan harçlarda Z100 grubunda 3213 m/sn ile en düşük değer elde edilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde agrega/bağlayıcı oranı arttıkça UPV değerlerinde artışlar olduğu görülmektedir. %10 zeolit ikame oranını en ideal oran olarak tespit edilmiştir.

Karışımlarda kullanılan çimento miktarı arttıkça UPV değerlerinde artışlar tespit edilmiştir. Bunun nedeninin karışıma katılan ince agrega ve bağlayıcı malzemelerin daha yüksek etkisi olduğu düşünülmektedir. Zeolit miktarının artması ile birlikte işlenebilirlik azalmıştır. Bu sebepten dolayı numune yapısında boşluklar oluşmuştur. Oluşan bu boşlukların UPV okumalarında azalmalara neden olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.10 incelendiğinde agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda, Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri, Z10 grubuna ait numunelerin UPV değerlerine göre %23 daha düşük çıkmıştır. Z0 grubuna ait numunelerin UPV değerleri ise Z10 grubuna ait numunelerin UPV değerlerine göre %11 daha düşük çıkmıştır. Agregabağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda, Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri, Z10 grubuna ait numunelerin UPV değerlerine göre %14 daha düşük çıkmıştır. Z0 grubuna ait numunelerin UPV değerleri ise Z10 grubuna ait numunelerin UPV değerlerine göre %6 daha düşük çıkmıştır. Agregabağlayıcı oranı 2 olan harçlarda ise, Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri, Z10 grubuna ait numunelerin UPV değerlerine göre %11 daha düşük çıkmıştır. Z0 grubuna ait numunelerin UPV değerleri ise Z10 grubuna ait numunelerin UPV değerlerine göre %0.87 daha düşük çıkmıştır.

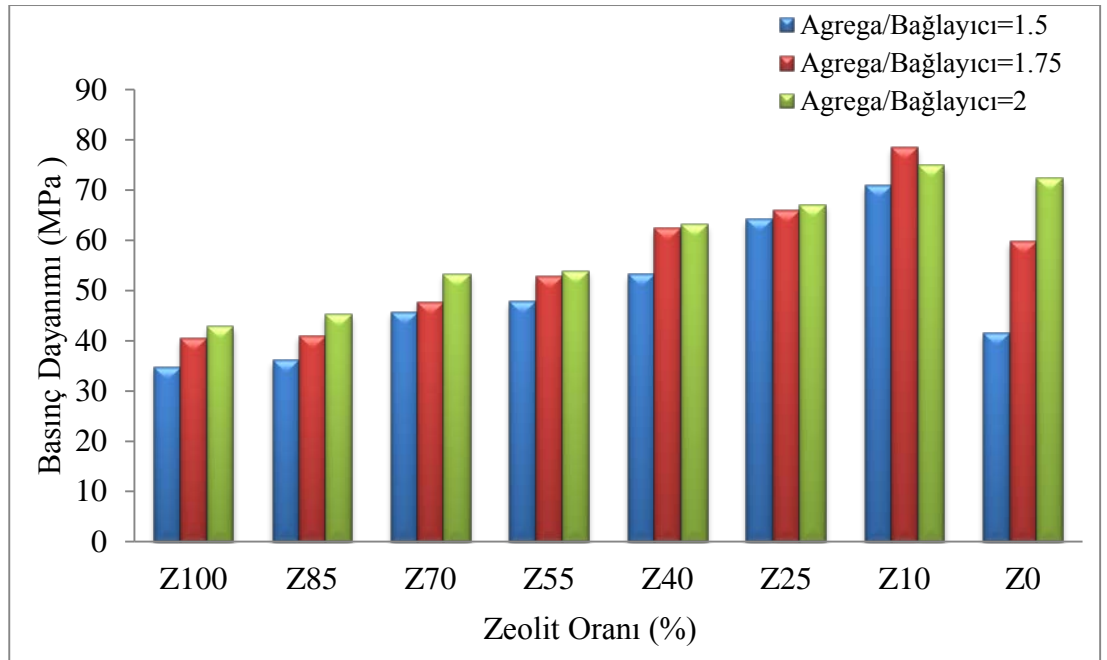
Agregabağlayıcı oranı 2 olan harçlarda Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri, Z0 grubu numunelere göre % 10 daha düşük çıkmıştır. Benzer şekilde agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri, Z0 grubu numunelere göre %8 daha düşük çıkmıştır. Agregabağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda ise Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri, Z0 grubu numunelere göre %9 daha düşük çıkmıştır. Agregabağlayıcı oranı arttıkça UPV değerlerinde artışlar tespit edilmiştir. Fakat artış yüzdeleri farklılıklar göstermiştir. Agregabağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri, agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlardaki numunelerin UPV değerlerine göre %8 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca agrega/baylayıcı oranı 2 olan harçlarda Z100 grubuna ait numunelerin UPV değerleri ise agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harçlardaki numunelerin UPV

değerlerine göre %4 daha yüksek çıkmıştır. Zeolit miktarı arttıkça UPV değerlerinde azalmalar tespit edilmiştir.

Benzer sonuçları Ranjbar *et al.*, (2013) yaptığı iki farklı su/bağlayıcı oranında ve çimento yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında zeolit kullanarak elde etmiştir. Çalışma sonucunda artan zeolit miktarı ile UPV değerlerinde azalmalar olduğunu tespit etmiştir. Bu sonucun zeolitin puzolanik yapısına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Zeolit içerikli betonda UPV değerini 3500 m/sn olduğunu belirtmişlerdir.

5.2.3. Basınç Dayanımı

Geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır. 3 farklı agrega/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Değerler agrega/bağlayıcı oranına göre sınıflandırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde üretilen numunelere ait basınç dayanımı değerleri şekil 5.11’de verilmiştir.



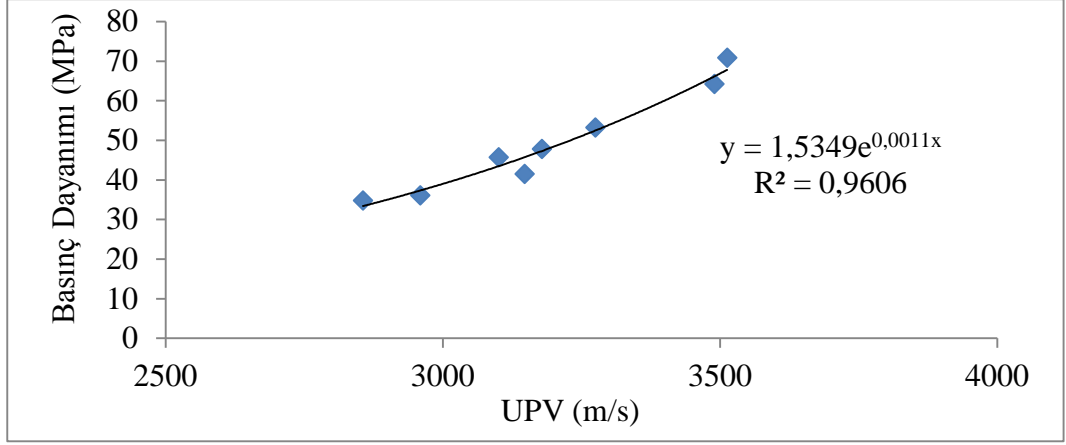
Şekil 5.11. Agregra oranının basınç dayanımı üzerine etkisi

Yapılan çalışmalar sonucunda agrega/bağlayıcı oranı 1.5, 1.75 ve 2 olan harçlarda en yüksek basınç dayanım değerlerine %10 zeolit içerikli Z10 grubu harçlarda ulaşılmıştır. Ayrıca %10 zeolit oranının aşılması ile birlikte basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. %100 zeolit ile hazırlanan harçlarda en yüksek basınç dayanım değerine agrega/bağlayıcı oranı 2 olan numunelerde 42.8 MPa ile ulaşılmıştır. %10 zeolit içerikli harç numunelerinde ise en yüksek basınç dayanımına agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan numunelerde 78.5 MPa ile ulaşılmıştır.

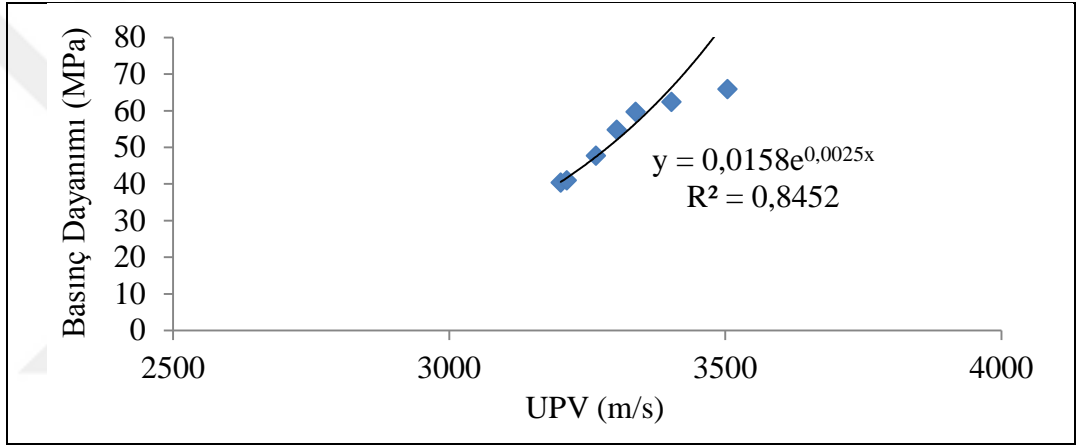
Agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda Z10 grubu numunelerinin basınç dayanım değerleri, Z100 grubu numunelerinin basınç dayanım değerlerine göre %104 daha yüksek çıkmıştır. Agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harçlarda Z10 grubu numunelerinin basınç dayanımları, Z0 grubu numunelerinin basınç dayanımlarına göre %70 daha yüksek çıkmıştır. Agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda Z10 grubu numunelerinin basınç dayanım değerleri, Z100 grubu numunelerinin basınç dayanım değerlerine göre %94 daha yüksek çıkmıştır. Agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harçlarda Z10 grubu numunelerinin basınç dayanım değerleri, Z0 grubu numunelerinin basınç dayanım değerlerine göre %31 daha yüksek çıkmıştır. Agrega/bağlayıcı oranı 2 olan harçlarda Z10 grubu numunelerinin basınç dayanım değerleri, Z100 grubu harç numunelerinin basınç dayanım değerlerine göre %75 daha yüksek çıkmıştır. Agrega/bağlayıcı oranı 2 olan harçlarda Z10 grubu numunelerinin basınç dayanım değerleri, Z0 grubu harç numunelerinin basınç dayanım değerlerine göre %4 daha yüksek çıkmıştır.

Agrega/bağlayıcı oranının artması ile birlikte %100 zeolit ile hazırlanmış harçların basınç dayanımlarında artışlar tespit edilmiştir. Agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harç numunelerinin basınç dayanımları, agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harç numunelerinin basınç dayanımına göre %16 artış gösterirken, agrega/bağlayıcı oranı 2 olan harç numunelerin basınç dayanımları ise agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harç numunelerinin basınç dayanımına göre %22 artış göstermiştir. Zeolit miktarının artması ile birlikte basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir.

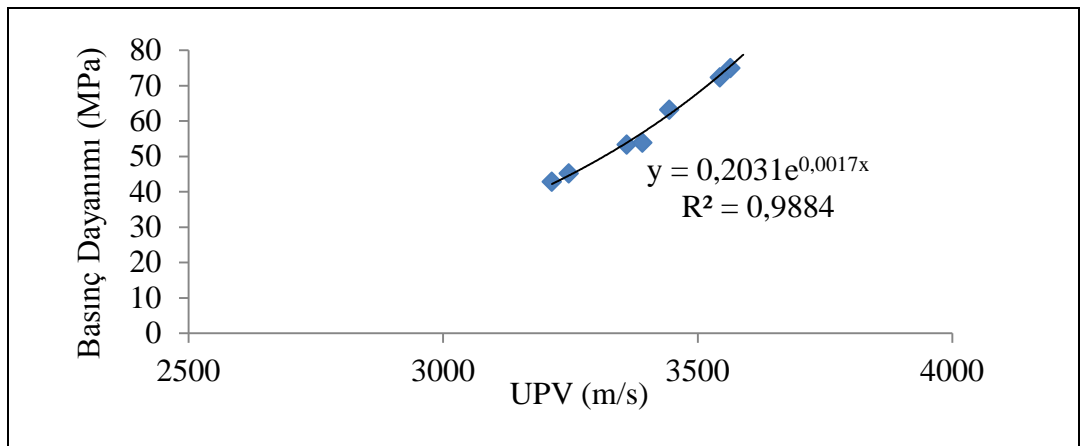
Agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan harç numunelerinde, Z100 ve Z85 gruplarının basınç dayanım değerleri Z0 grubu basınç dayanım değerlerine göre daha düşük olmasına rağmen, Z70, Z55, Z40, Z25 ve Z10 gruplarının basınç dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır. En yüksek basınç dayanım değeri Z10 grubu harç numunelerinde gözlemlenmiştir. Benzer olarak Nagrockiene ve Girkas (2016) %10 zeolit eklemenin 28 günlük basınç dayanımlarında %13 ve %15'e kadar artışlar olduğunu tespit etmişlerdir. Ramezianpour *et al.*, (2015) çalışmalarında zeolit eklemenin ilk 7 günlük basınç dayanımı gelişimini ertelediğini ve %10 zeolit içeren betonların basınç dayanımlarının şahit numune ile benzer değerlerde olduğunu ancak %15 zeolit içerikli betonların daha düşük basınç dayanımlarına sahip olduklarını belirtmişlerdir. Valipour *et al.*, (2014) çalışmalarında zeolit miktarının artması ile beraber basınç dayanımlarında azalmalar meydana geldiğini tespit etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımına 28 günde 47 MPa ile %10 zeolit içeren betonda ulaşmışlardır. Sabet *et al.*, (2013) %10 doğal zeolit içerikli betonlarda 28 günde basınç dayanımını 62 MPa bulmuşlardır. %20 zeolit içeren betonlarda ise 28 günlük basınç dayanım değerini 57 MPa olarak bulmuşlardır. %20 zeolit içerikli betonlarda basınç dayanım değerlerinde %8'lik bir azalma tespit etmişlerdir. Ranjbar *et al.*, (2013) 0.38 su/bağlayıcı oranında, %10 zeolit içeren betonda kontrol numunesine göre %9'luk bir artış belirtmişlerdir. Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14'te UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14 incelendiğinde basınç dayanımı ile UPV arasında üstel bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Ayrıca R^2 değerlerinin %90'lar civarında olması basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişkinin birbirlerine oldukça yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.12. Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki – agrega/bağlayıcı=1.5



Şekil 5.13. Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki – agrega/bağlayıcı=1.75



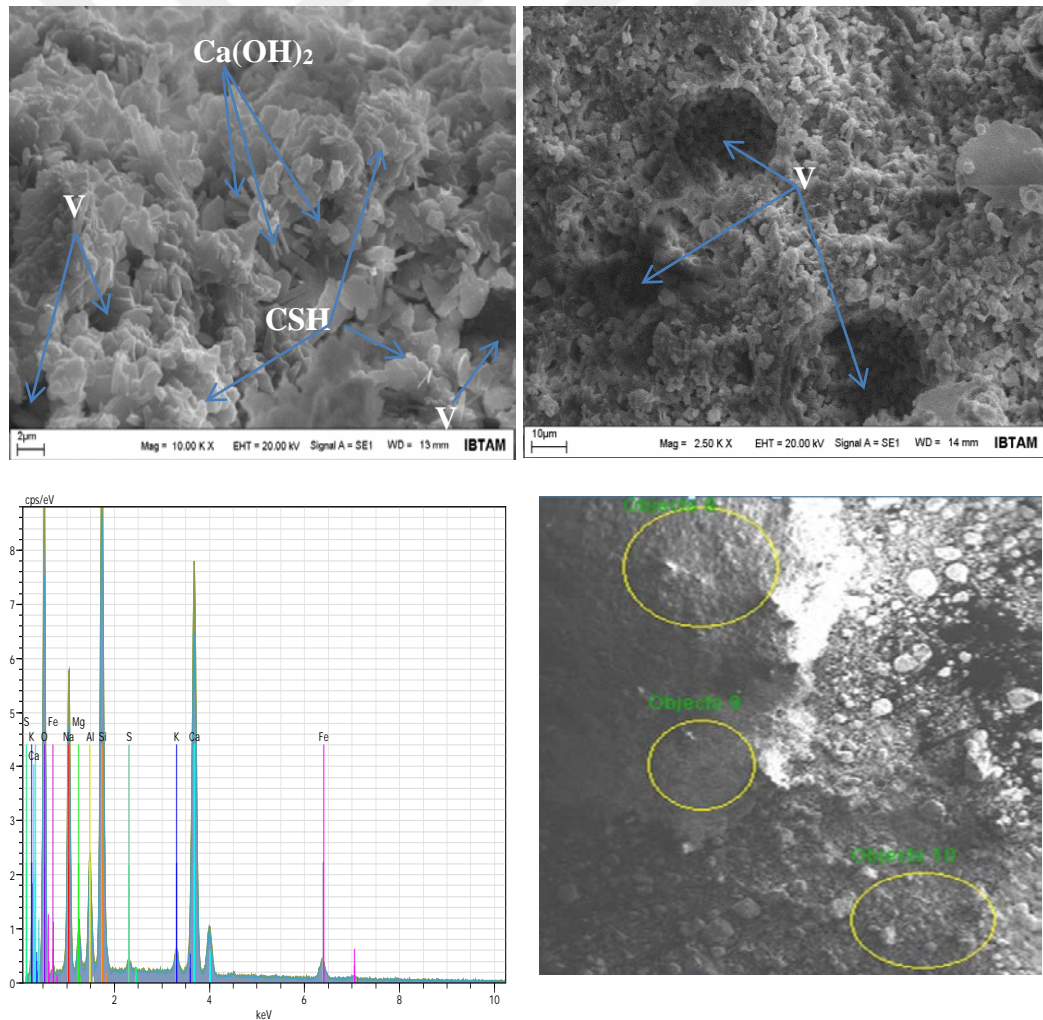
Şekil 5.14. Basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki – agrega/bağlayıcı=2

5.2.4. Mikroyapı Analizi

5.2.4.1. SEM – EDX

Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerin SEM ve EDX analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi Fizik Laboratuvarında yapılmıştır.

Z10 grubu agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan numuneye ait SEM görüntüleri ve EDX analiz verileri Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan Z10 grubuna ait SEM ve EDX analiz verileri

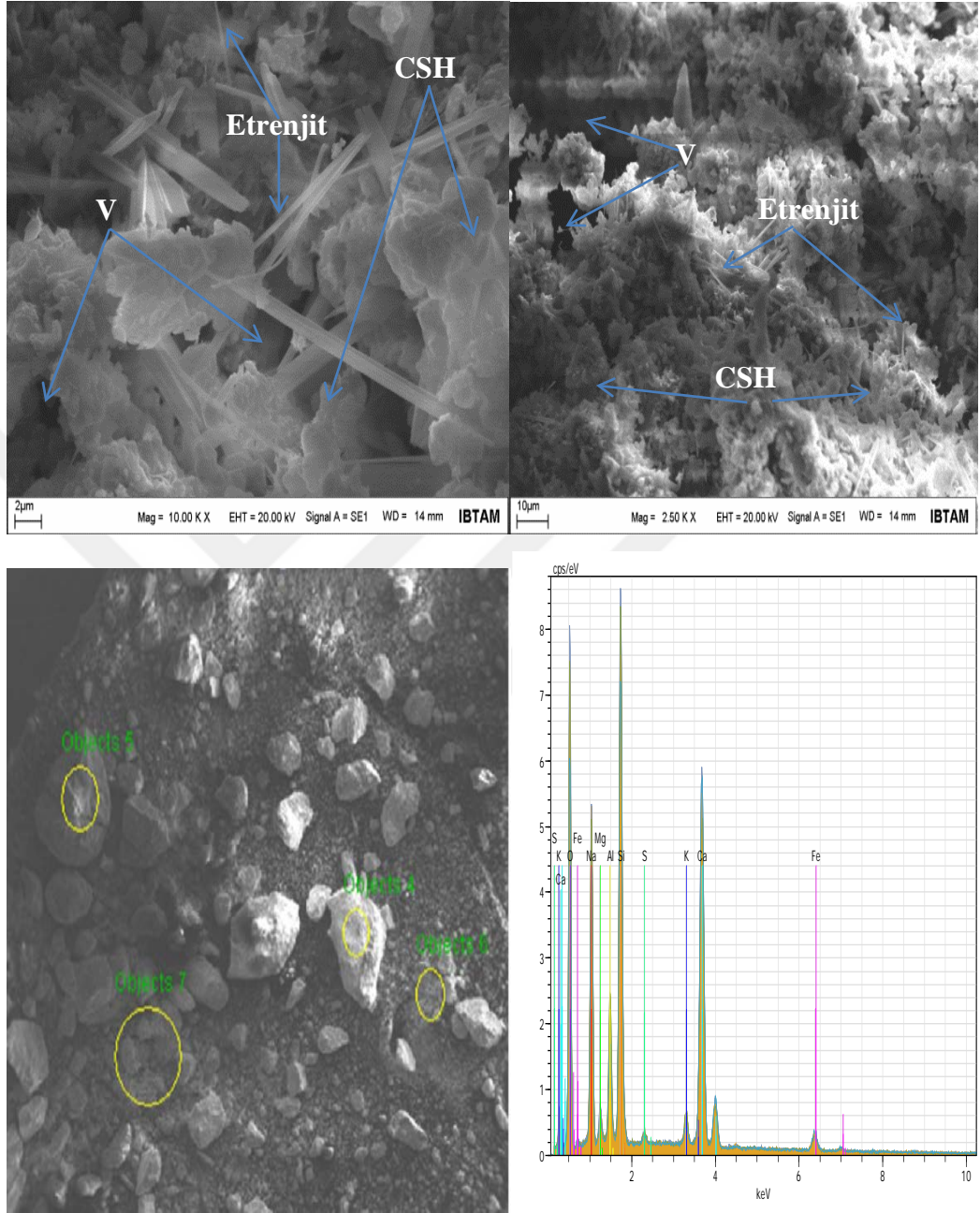
Z10 grubu agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan numuneye ait EDX analiz verileri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan Z10 grubuna ait EDX analiz verileri

Kütle Yüzdesi (%)								
Spektrum	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
8. Bölge	20,31	2,57	6,66	24,64	0,46	2,07	38,44	4,85
9. Bölge	21,10	2,81	6,42	24,45	0,53	2,08	38,12	4,48
10. Bölge	21,16	2,76	7,24	26,16	0,69	2,07	34,96	4,97
Atomik Yüzde (%)								
Spektrum	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
8. Bölge	27,38	3,27	7,65	27,19	0,45	1,64	29,73	2,69
9. Bölge	28,29	3,57	7,33	26,85	0,51	1,64	29,33	2,47
10. Bölge	28,15	3,47	8,21	28,49	0,66	1,62	26,68	2,72

Şekil 5.15 incelendiğinde numunenin yapısında hava boşluklarının ve yoğun bir CSH jel yapısının olduğu görülmektedir. Belirlenen bölgeler incelendiğinde Ca oranının yüksek olduğu görülmekte olup Çizelge 5.1’de belirtilen bileşenler gözlemlenmiştir. Yılmaz *vd.*, (2007) çalışmalarında %40’a kadar klinoptilite ile harmanlanmış harçları inceledikleri çalışmalarında, %20 klinoptilolit içeren çimento macununun mikroyapısında, kısmen hidratlaşmış üst yüzeyler ve dikdörtgen plaka şeklindeki susuz kalsiyum oksit olan çeşitli boyutlarda klinoptilolit parçacıkların bulunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca klinoptilolit yüzeyinde ve boşluklarda gelişen hidratlı CSH kaplamaları ve etrenjit kristallerinin varlığından söz etmişlerdir. Yüksek Si içerikli zeolitin burada Ca ile tepkimeye girdiği görülmektedir. Silisli bir maddenin çimentonun hidratasyonu sırasında serbest kalan kireç ve kireç tabanlı kalker bir yapı ile reaksiyona girdiği düşünülmektedir. Karakurt *vd.*, (2010) çalışmalarında zeolitin Ca(OH)₂ ile tepkimeye girerek C-S-H jelini oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Z10 grubu agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan numuneye ait SEM görüntüleri ve EDX analiz verileri Şekil 5.16’de gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan Z10 grubuna ait SEM ve EDX analiz verileri

Z10 grubu agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan numuneye ait EDX analiz verileri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Agregabağlayıcı oranı 1.75 olan Z10 grubuna ait EDX analiz verileri

Kütle Yüzdesi (%)								
Spektrum	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
4. Bölge	21,70	1,75	5,89	23,46	0,24	2,08	39,74	5,13
5. Bölge	22,53	1,60	8,56	26,22	0,66	3,01	33,62	3,81
6. Bölge	23,07	2,46	5,90	26,02	0,42	1,99	36,66	3,48
7. Bölge	24,75	2,25	6,18	23,89	0,39	1,94	36,33	4,28

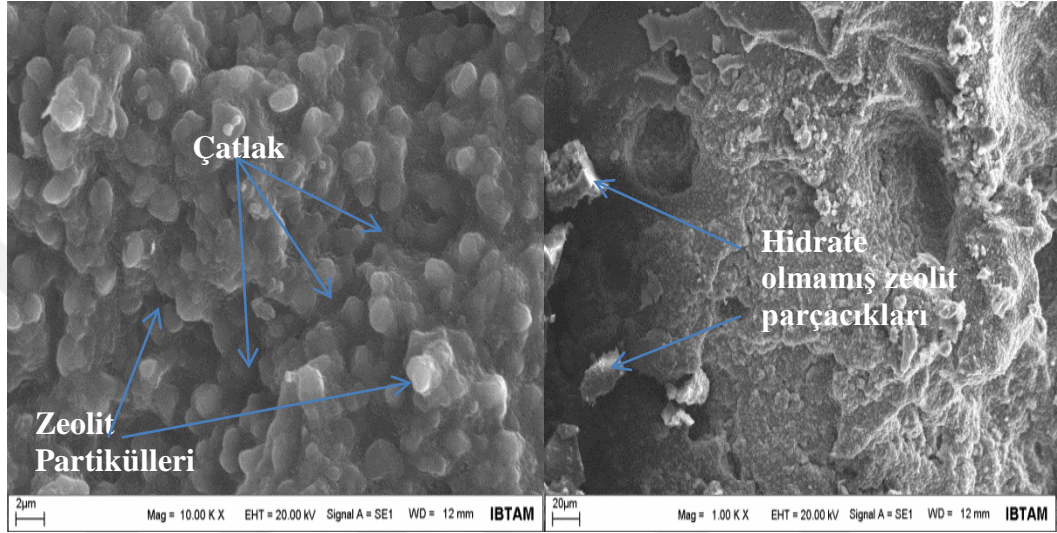
Atomik Yüzde (%)								
Spektrum	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
4. Bölge	29,37	2,25	9,79	25,99	0,23	1,66	30,85	2,86
5. Bölge	29,69	1,99	9,61	28,28	0,62	2,33	25,41	2,07
6. Bölge	30,49	3,08	6,64	28,15	0,4	1,55	27,79	1,89
7. Bölge	32,69	2,81	6,95	25,83	0,37	1,51	27,52	2,33

Çizelge 5.2 incelendiğinde Z10 grubu agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan numuneye ait EDX analiz verilerine göre numunenin yapısında Na, Si ve Ca elementlerinin kendini daha fazla gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 5.16’da verilen görüntüler incelendiğinde yapıda CSH yapısının ve kristal yapıların oluştuğu tespit edilmiştir. İçerikte bulunan Na elementinin alkali solüsyon olarak kullanılan sodyum hidroksit ile karşılandığı görülmektedir. SEM görüntüleri geopolimerizasyon sırasında zeolit parçacıklarının reaksiyona girdiğini göstermektedir. Geopolimer için karakteristik olan jel partiküllerinin alkali solüsyonu ile birlikte bir ağ yapısını oluşturduğu görülmektedir. Etrejrit kristallerinin içerikte bulunduğu gözlemlenmiştir. Etrejrit ise hegzagonal kesitli ve çubuk şekilli kristaller olup oldukça kararludur (Erdoğan, 2003).

EDX verileri incelendiğinde 2 farklı basınç dayanımında olan numunelerde de Na, Si ve Ca elementlerinin hem kütleli yüzde hem de atomik yüzdelerde homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca incelenen numunelerde Mg, Al, S, K ve Fe elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Görüntüler incelendiğinde yapının CSH jelleri ile sarıldığı görülmektedir. Yılmaz vd., (2007)

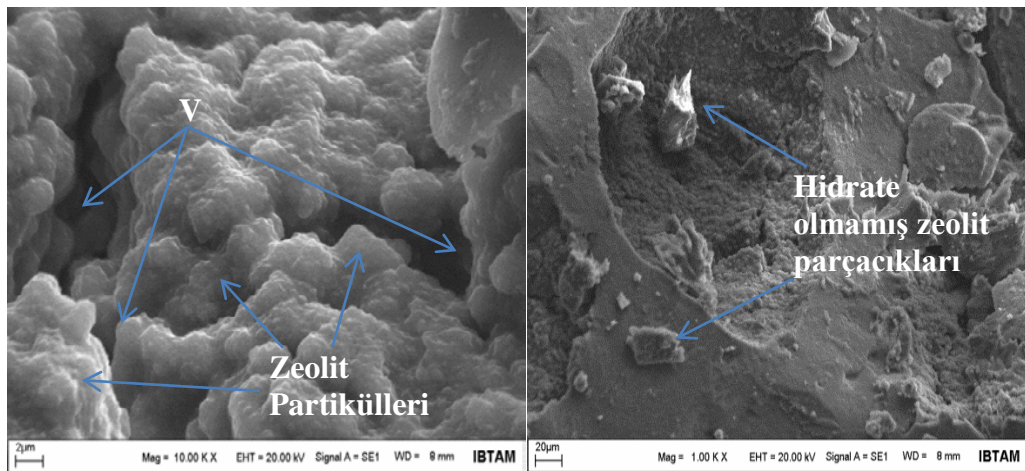
çalışmalarında %20 zeolit tufü içeren karışımın 7 günlük hidrasyonunu incelemişler ve yapıda EDX verilerine göre Ca varlığının yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ve birçok CSH jel tarafından kaplanmış gözenekler olduğunu belirtmişlerdir.

Agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan %100 zeolit içerikli numunedan alınan SEM görüntüsü Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



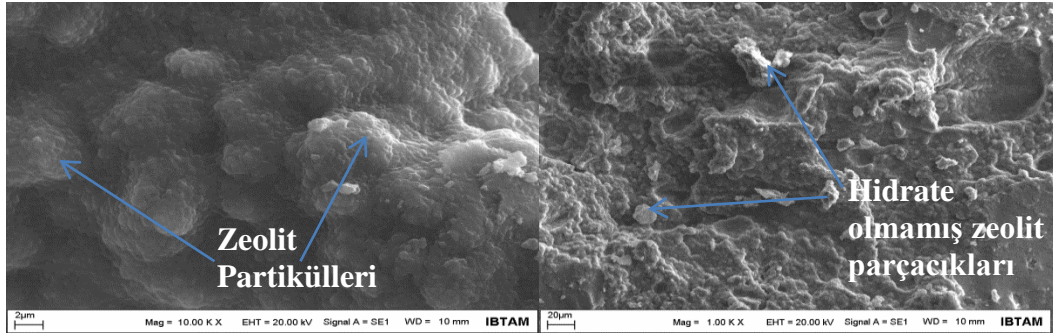
Şekil 5.17. Agregasyon/bağlayıcı oranı 1.5 olan %100 zeolit içerikli numuneye ait SEM görüntüleri

Agregasyon/bağlayıcı oranı 1.75 olan %100 zeolit içerikli numunedan alınan SEM görüntüsü Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Agregasyon/bağlayıcı oranı 1.75 olan %100 zeolit içerikli numuneye ait SEM görüntüleri

Agrega/bağlayıcı oranı 2 olan %100 zeolit içerikli numuneden alınan SEM görüntüsü Şekil 5.19’de gösterilmiştir.



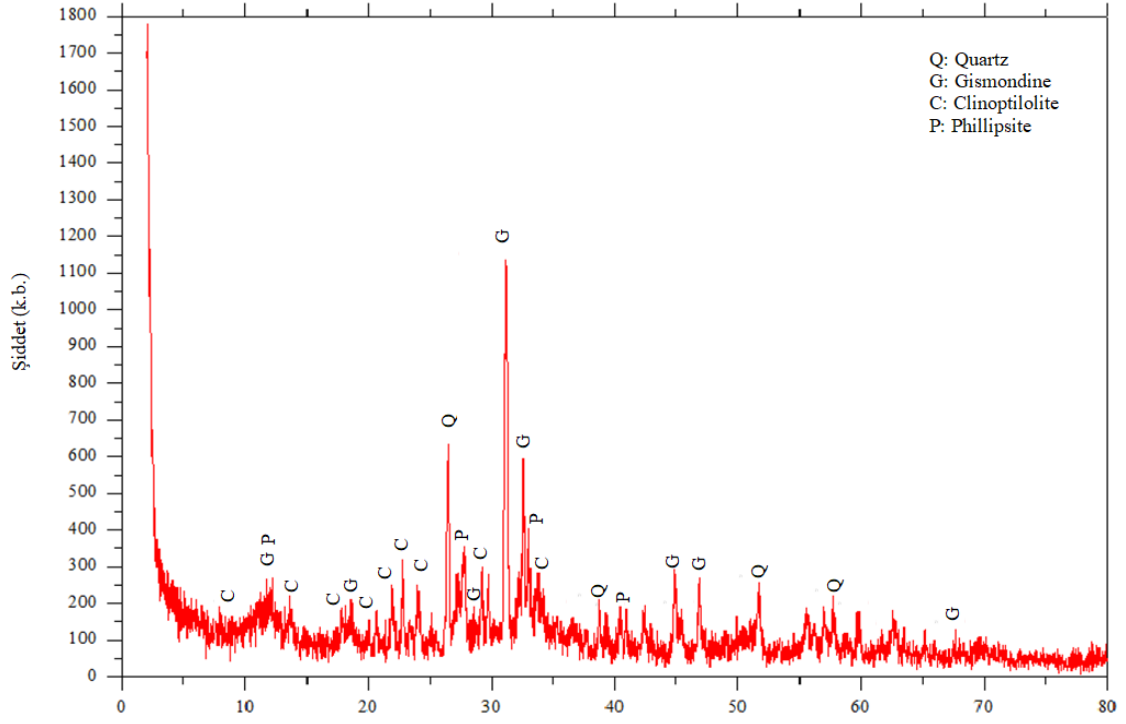
Şekil 5.19. Agregasyon/bağlayıcı oranı 2 olan %100 zeolit içerikli numuneye ait SEM görüntüleri

Z100 grubu %100 zeolit içerikli numunelerden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde yapıda hidrate olmamış zeolit kristallerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Mikro yapıdaki boşlukların dayanımda azalmalara neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yapıda boşlukları olduğu tespit edilmiştir.

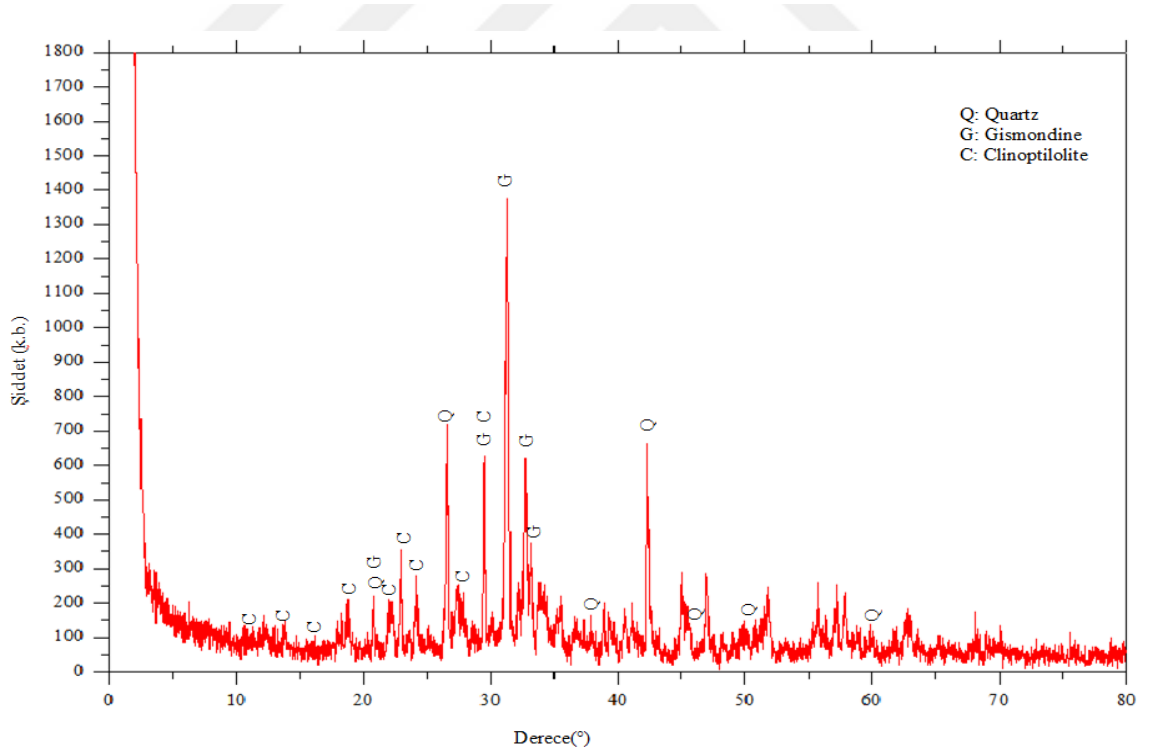
5.2.4.2. XRD

Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerin XRD analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi Fizik Laboratuvarında yapılmıştır. Sonuçlarda pik noktalarına karşılık gelen kimyasal bileşimler Şekil 5.20 ve 5.21’de verilmiştir.

Z10 grubu karışımında agregasyon/bağlayıcı oranı 1.5 olan numuneye ait XRD analiz verileri Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Z10 grubu karışımında agregasyon/bağlayıcı oranı 1.75 olan numuneye ait XRD analiz verileri Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Z10 grubu karışımında agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan numuneye ait XRD analiz verileri



Şekil 5.21. Z10 grubu karışımında agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan numuneye ait XRD analiz verileri

Deneysel çalışmalar kapsamında yapılan XRD sonuçlarına göre mikro yapı analizinde quartz, gismondine, rankinite ve klinoptilolit faz diyagramları tespit edilmiştir. Şekil 5.20 ve 5.21 incelendiğinde en yüksek pik değerlerine Z10 grubu karışımında agrega/bağlayıcı oranı 1.75 olan harç numunelerde rastlanmıştır. Benzer sonuçların elde edildiği çalışmalarında Nagrockiene ve Girskas (2016) %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 kadar oranında zeolit kullandıkları çalışmada XRD sonuçlarına göre quartz, klinoptilolit fazlarını elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Karakurt ve Topçu (2011) doğal zeolit, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullandıkları çalışmalarında zeolit XRD verilerine göre zeolitin quartz, klinoptilolit ve feldispat fazlarından oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca zeolitteki camsı fazın zeolitin puzolanik özelliğini temsil ettiğini belirtmişlerdir. Seraj *et al.*, (2016) çalışmalarında ham haldeki ve kalsine edilmiş örneklerinde zeolit örneklerinde klinoptilolit, kristobalit, anorthit, montmorillonit fazlarını gözlemlemişlerdir. Kalsine işleminin pik noktalarının yoğunluğunun azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. XRD sonuçlarına göre kalsinasyon için kullanılan sıcaklıklarda kuvarz, kristobalit ve anortit gibi inert safsızlıkların kararlı olduğunu belirtmişlerdir. Kocak *vd.*, (2013) zeolitin kimyasal ve XRD analiz sonuçlarına göre, ana mineral bileşeni klinoptilolit olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, çimento ve klinoptilolit yapılarının düzenli (kristal) olduğunu ifade etmişlerdir. Zeolitin, Portland çimentosunun hidrasyonu sırasında ve çimento sulu ürünler gibi oluşumda oluşan Ca(OH)_2 tüketimine katkıda bulunan puzolanik bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle agrega numunelerinin kuru özgül ağırlık, doygun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme değerleri tespit edilmiştir. Taze harç numunelerinde Brookfield viskozimetre aleti ile viskozite değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca sertleşmiş harç numuneler üzerinde 28 günlük birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Ayrıca harç numunelerinin mikroyapı (SEM-EDX, XRD) özellikleri de incelenmiştir. Üretilen numunelere ait bulgulardan üzerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Doğal zeolitin viskoziteyi genelde artırdığı tespit edilmiştir. Bu artışın artan zeolit miktarı ile arttığı belirlenmiştir. Karışımlarda zeolit miktarı arttıkça hamurun yapışkan jel halini aldığı tespit edilmiştir. Agregabağlayıcı oranı düştükçe viskozite değerlerinde artışların olduğu görülmüştür. En yüksek viskozite değerlerine %70 zeolit+ %30 PÇ karışımında ulaşılmıştır.
2. Zeolit miktarının artması ile birlikte harç numunelerinin birim hacim ağırlıklarında azalmalar görülmüştür. En düşük birim hacim ağırlık değerlerine %100 zeolit ile hazırlanmış geopolimer harçlarda ulaşılmıştır. Artan çimento miktarı ile birlikte birim hacim ağırlıklarında artışların meydana geldiği tespit edilmiştir. 28 günlük numunelerde 3 farklı agrega/bağlayıcı oranında, %100 zeolit ile hazırlanmış numunelerin birim hacim ağırlıklarının %100 çimento ile hazırlanmış numunelerin birim hacim ağırlıklarına göre ortalama %25 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
3. Zeolit miktarı arttıkça UPV değerlerinde azalmalar tespit edilmiştir. UPV değerlerinin artması ile basınç dayanım değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Agregabağlayıcı oranı arttıkça UPV değerlerinde artışlar tespit edilmiştir.

4. Basınç dayanımında zeolitin olumlu etkisi tespit edilmiştir. Agregabağlayıcı oranı 2 olan Z100 grubuna ait geopolimer harçlarda 28 günlük basınç dayanım değeri 42.8 MPa olarak belirlenmiştir.
5. Artan zeolit miktarı ile birlikte betonun su ihtiyacının arttığı belirlenmiştir. Zeolit miktarının artması ile birlikte işlenebilirlik azalmıştır.
6. En yüksek basınç dayanım değeri agregabağlayıcı oranı 1.75 olan %10 zeolit içerikli geopolimer harç numunelerinde, 28 günde 78.5 MPa olarak elde edilmiştir.

Geopolimer betonların inşaat alanında kullanılması inşaat mühendisliği tarihine bakıldığında yeni bir malzeme teknolojisidir. Ancak kullanıldığı alanlar incelendiğinde gelecek adına yenilikçi fikirler sunmaktadır. Yapılan bu çalışma neticesinde geopolimer harçların hem fiziksel hem de mekanik özellikleri anlamında harca olumlu katkı yaptığı gözlemlenmiştir. Doğada bol miktarda bulunan zeolit mineralinin inşaat alanında kullanıma kazandırılması amacı ile ek deneysel çalışmaların yapılması önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Adak, D., Sarkar M., Mandal, S. (2017). Structural Performance of Nano-Silica Modified Fly-Ash Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*. **135**, 430-439.
- Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2010). Use of Natural Zeolite as a Supplementary Cementitious Material. *Cement & Concrete Composite*. **32**, 134–141.
- Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty M, Abd Elmoaty., Salem, H.A. (2016). Effect of Cement Addition, Solution Resting Time and Curing Characteristics on Fly Ash Based Geopolymer Concrete Performance. *Construction and Building Materials*. **123**, 581-593.
- Ariöz, Ö., Tuncan, M., Tuncan, A., Kavas, T. (2009). *Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi (Tübitak Projesi)*. Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Eskişehir.
- Assi, L., Ghahari, S., Deaver E., Leaphart D., Ziehl, P. (2016). Improvement of the Early and Final Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete at Ambient Conditions. *Construction and Building Materials*, **123**, 806-813.
- ASTM C39/C39M. (1999). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials Information Handling Services. ASTM International, West Conshohocken, PA,
- Banfill, P.F.G. (1991). *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. E.&F.N. Spon Publisher, London,373.
- Banfill, P.F.G. (2003). The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review (pp:13). *Proc. 11th International Cement Chemistry Congress*, Durban, South Africa.
- Bartos, P. (1992). *Fresh Concrete Properties and Tests*. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, The Netherlands, 291p.
- Bernal, S., Gutierrez, R.D., Delvasto, S., Rodriguez, E. (2010). Performance of an Alkali-Activated Slag Concrete Reinforced With Steel Fibers. *Construction and Building Materials*. **24**, Issue 2, 208-214.
- Camacho, R.E.R., Afif, R.U. (2002). Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability. *Cement and Concrete Research*. **32**, 1851-1858.
- Chan, S.Y.N., Ji, X. (1999). Comparative Study of the Initial Surface Absorption and Chloride Diffusion of High Performance Zeolite Silica Fume and PFA Concretes. *Cement & Concrete Composites*, **21**, 293-300.

- Cheng, T.W., Chiu J.P. (2003). Fire-resistant Geopolymer Produce by Granulated Blast Furnace Slag. *Minerals Engineerin.* **16, 3**, 205–210.
- Çelebi, N. (2009). *TEB Eczacılık Akademisi, Modern Farmasötik Teknoloji-Reoloji (pp: s:392-405)*, Ankara.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements (pp:131-149). *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes Scientific Research Institute on Binders and Materials*, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine.
- Davidovits, J. (2002). Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. *Geopolymer 2002 Conference*, October 28-29, Melbourne, Australia.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*, Saint Quentin, France.
- Dousti A., Rashednia R., Ahmadi B., Shekarchi M., (2013), Influence of Exposure Temperature on Chloride Diffusion in Concretes Incorporating Silica Fume or Natural Zeolite, *Construction and Building Materials*, **49**, 393–399.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G., Palomo, A, van Deventer, J.S.J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of Materials Science.* **42**, 2917-2933.
- Englert, A.H., Rubio, J. (2005). Characterization and Environmental Application of a Chilean Natural Zeolite. *International Journal of Mineral Processing.* **75**, 21-29.
- Erdem, E., Donat, R., Çetişli, H. (1999). Hydration and Mechanical Properties of Cement Containing Zeolite. *Cement and Concrete World.* **17**, 22-28.
- Ferraris, C.F. (1996). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete. *Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, USA, NISTIR 5869,p.40.
- Ferraris, C.F. (1999). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete,. *Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology.* **104 (5)**, 461-478, Gaithersburg, USA.
- Gervais, C., Ouki, S.K. (2002). Performance Study of Cementitious Systems containing Zeolite and Silica Fume: Effects of Four Metal Nitrates on The Setting Time, Strength And Leaching Characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, **B93**, 187-200.
- Ghanbari, M., Hadian, A.M., Nourbakhsh, A.A., MacKenzie, K.J.D. (2017). Modeling and Optimization of Compressive Strength and Bulk Density of Metakaolin-Based Geopolymer Using Central Composite Design: A

numerical and experimental study. *Ceramics International*, **43**, Issue 1, Part A, 324-335.

Ghrici, M., Kenai, S., Meziane E. (2006). Mechanical and Durability Properties of Cement Mortar With Alger_ and Natural Pozzolana. *Journal of Materials Science*. **41**, 6965–6972.

Girskas, G., Skripkiunas, G., Šahmenko, G., Korjakins, A. (2016). Durability of Concrete Containing Synthetic Zeolite From Aluminum Fluoride Production Waste as a Supplementary Cementitious Material. *Construction and Building Materials*. **117**, 99–106.

Hardjito, D., Wallah, S.E., Dody, M., Sumajouw, J., Rangan, B.V. (2004). On the Development of Fly Ash–Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, **101**, **6**, 467–472.

Hoang, C.P., Kinney, K.A., Corsi, R.L., (2009). Ozone Removal by Green Building Materials. *Building and Environment*. **44**, 1627-1633.

Kamseu, E., Rizzuti, A., Leonelli, C., Perera, D. (2010). Enhanced Thermal Stability in K₂O-Metakaolin-Based Geopolymer Concretes by Al₂O₃ And SiO₂ Fillers Addition. *Journal of Materials Science*. **45**, 1715-1724.

Karakurt, C., Kurama, H., Topcu, İ.B. (2010). Utilization of Natural Zeolite in Aerated Concrete Production. *Cement & Concrete Composites*. **32**, 1–8.

Karakurt, C., Topcu, İ.B. (2012). Effect of Blended Cements with Natural Zeolite and Industrial By-Products on Rebar Corrosion and High Temperature Resistance of Concrete. *Construction and Building Materials*. **35**, 906–911.

Karakurt, C., Topçu, İ.B. (2011). Effect of Blended Cements Produced with Natural Zeolite and Industrial By-Products on Alkali-Silica Reaction and Sulfate Resistance of Concrete. *Construction and Building Materials*. **25**, 1789–1795.

Karaüç E. (2008). *Uçucu Kül Ve Zeolitin Kendiliğinden Yerleşen Betonlara Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Kim, D., Lai, H-T., Chilingar, G.V., Yen, T.F. (2006). Geopolymer Formation and its Unique Properties. *Environmental Geology*. **51**, 103-11.

Kocak, Y., Tascı, E., Kaya, U. (2013). The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*. **47**, 720-727.

Kucukyıldırım, E., Uzal, B. (2014). Characteristics of Calcined Natural Zeolites for use in High-Performance Pozzolan Blended Cements. *Construction and Building Materials*. **73**, 229–234.

- Kurama H. (1994). *Doğal Zeolit (Klinoptilolit) ile Atık Sulardan Ağır Metal İyonlarının Uzaklaştırılması*. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Leslie, J. S., Xihuang, J. (2000). *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology (Principles, Techniques, and Applications)*, Noyes Publications, (Edited by V. S. Ramachandran and James J. Beaudoin), *Institute for Research in Construction National Research Council Canada*, 333-367 p.
- Li, W., Xu J. (2009). Impact Characterization of Basalt Fiber Reinforced Geopolymeric Concrete Using a 100-Mm-Diameter Split Hopkinson Pressure Bar. *Materials Science and Engineering:A*. **513–514**, 145-153.
- Lirer, S., Liguori, B., Capasso, I., Flora, A., Caputo, D. (2017). Mechanical and Chemical Properties of Composite Materials Made of Dredged Sediments in a Fly-Ash Based Geopolymer. *Journal of Environmental Management*. **191**, 1-7.
- Liua, Y., Yana, C., Zhangc, Z., Gongga, Y., Wangga, H., Qiud, X. (2016). A Facile Method for Preparation of Floatable and Permeable Fly Ash-Based Geopolymer Block. **185**, 370-373.
- Marceau, M., Nisbet, A., VanGeem, M. (2007). *Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete*. PCA R&D Serial No.3007, Portland Cement Association, Skokie, IL.
- Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., Franus, W. (2016). Mechanical and Durability Properties of Concretes Incorporating Natural Zeolite. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. **16**, 554–562.
- Messina, F., Ferone, C., Molino, A., Roviello, G., Colangelo, F., Molino, B., Cioffi, R. (2017). Synergistic Recycling of Calcined Clayey Sediments and Water Potabilization Sludge As Geopolymer Precursors: Upscaling From Binders To Precast Paving Cement-Free Bricks. *Construction and Building Materials*. **133**, Pages 14-26.
- Nagrockiene, D., Girskas, G. (2016). Research into the Properties of Concrete Modified with Natural Zeolite Addition. *Construction and Building Materials*. **113**, 964–969.
- Naiqian, F., Hongwei, J., Enyi, C. (1998). Study on the Suppression Effect of Natural Zeolite on Expansion of Concrete Due to Alkali-Aggregate Reaction. *Magazine of Concrete Research*. **50(1)**,17.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2013). An Experimental Study on Durability Properties of Concrete Containing Zeolite as a Highly Reactive Natural Pozzolan. *Construction and Building Materials*. **35**, 1023–1033.

- Okumuş N. (2012). *Zeolit ve Silika Dumanı Katkılı Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinde Mekanik ve Geçirimsizlik Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, HATAY.
- Omer, S.A., Demirboğa, R., Khushefati, W.H., (2015). Relationship Between Compressive Strength and UPV of GGBFS Based Geopolymer Mortars Exposed to Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*. **94**, 189–195
- Öcal R. (2014), *Yüksek Sıcaklığın Doğal Zeolit Katkılı Betonlar Üzerindeki Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde.
- Öz A. (2006). *Yüksek Fırın Cürufu ve Doğal Zeolit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Termo-Mekanik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Özkul, H., Sağlam, A.R., (2002). *Süper akışkanlaştırıcı ve Mineral Katkıların Betonun Reolojik Özelliklerine Etkisi*, Proje No: İNTAG-655, TÜBİTAK Ankara, 169 s.
- Panagiotopoulou, C.H., Kontori, E., Perraki, T.H., Kakali, G. (2007). Dissolution of Alumino Silicate Minerals and by Products in Alkaline Media. *Journal of Materials Science*, **42**, 2967-2973.
- Perraki, T., Kontori, E., Tsivilis, S., Kakali, G. (2010). The Effect of Zeolite on the Properties and Hydration of Blended Cements. *Cement & Concrete Composite*. **32**, 128–133.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S. (1999). A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes. *Construction and Building Materials*. **13**, 427 – 432.
- Ramezaniyanpour, A.A., Mousavi, R., Kalhori, M., Sobhani, J., Najimi, M. (2015). Micro and Macro Level Properties of Natural Zeolite Contained Concretes. *Construction and Building Materials*. **101**, Part 1, 347–358.
- Ranjbar, M.M., Madandoust, R., Mousavi, S.Y., Yosefi, S. (2013). Effects of Natural Zeolite on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacted Concrete. *Construction and Building Materials*. **47**, 806–813.
- Romagnoli, M., Leonelli, C., Kamse, E., Gualtieri, M.L. (2012). Rheology of Geopolymer by DOE Approach. *Construction and Building Materials*. **36**, 251–258.
- Romagnoli, M., Sassatelli, P., Gualtieri, M.L., Tari, G. (2014). Rheological Characterization of Fly Ash-Based Suspensions. *Construction and Building Materials*. **65**, 526–534.
- Sabet, F.A., Libre, N.A., Shekarchi, M. (2013). Mechanical and Durability Properties of Self Consolidating High Performance Concrete Incorporating

Natural Zeolite, Silica Fume and Fly Ash. *Construction and Building Materials*. **44**, 175–184.

Santos, F.N., Sara Raquel Gomes de Sousa., Antonio José Faria Bombard., Sheila Lopes Vieira. (2017). Rheological Study of Cement Paste with Metakaolin and/or Limestone Filler using Mixture Design of Experiments. *Construction and Building Materials*. **143**, 92–103.

Sarıkaya H. (2006). *Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Seraj, S., Ferron, R.D., Juenger, M.C.G. (2016) Calcining Natural Zeolites to Improve their Effect on Cementitious Mixture Workability. *Cement and Concrete Research*. **85**, 102–110.

Shehab, H.K., Eisa, A.S., Wahba, A.M. (2016). Mechanical Properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete with Full and Partial Cement Replacement. *Construction and Building Materials*. **126**, 560-565.

Srinivasan, K., Sivakumar, A. (2013), Geopolymer Binders: A Need for Future Concrete Construction. *Hindawi Publishing Corporation ISRN Polymer Science*. **2013**, Article ID 509185, 8 p.

Şahmaran, M., Özkan, N., Keskin, S.B., Uzal, B., Yaman, İ.Ö., Erdem, T.K. (2008). Evaluation of Natural Zeolite as a Viscosity-Modifying Agent for Cement-Based Grouts. *Cement and Concrete Research*. **38**, 930–937.

Taban, S., Şimşek, O., (2009). Zeolitik Tuf Katkı Oranı ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **24(1)**, 145-153, Ankara

Tattersall, G. H. (1991). *Workability and Quality Control of Concrete*, E.&F.N. Spon Publ, London, 262 p.

TS EN 1097-6. (2013) *Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini*, TSE, Ankara.

TS EN 12390-7. (2010). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini*, TSE, ANKARA

TS EN 12504:4. (2012) *Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*, TSE, Ankara.

TS EN 13055. (2016). *Hafif agregalar*. TSE, Ankara.

TS ISO 3310-2. (2015). *Deney elekleri - teknik özellikler ve deneyler - Kısım 2: Delikli metal levhalı deney elekleri*, TSE, Ankara.

- Tydlitát, V., Zákoutský, J., Černý, R. (2014). Early-Stage Hydration Heat Development in Blended Cements containing Natural Zeolite Studied by Isothermal Calorimetry. *Thermochimica Acta*. **582**, 53–58.
- Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., Moradian, M. (2013). In Situ Study of Chloride Ingress in Concretes Containing Natural Zeolite, Metakaolin and Silica Fume Exposed to Various Exposure Conditions in a Harsh Marine Environment. *Construction and Building Materials*. **46**, 63–70.
- Valipour, M., Yekkalar, M., Shekarchi, M., Panahi, S. (2014). Environmental Assessment of Green Concrete Containing Natural Zeolite on The Global Warming Index In Marine Environments. *Journal of Cleaner Production*. **65**, 418-423.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S., Lorenzon, L. (1997). *Factors Affecting the Immobilization of Metals in Geopolymerized Fly Ash*, Part 1 Theory and Applications, *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669.
- Vaou, V., Pantias, D. (2010). Thermal Insulating Foamy Geopolymers from Perlite. *Mineral Engineering*. **23**, 1146-1151.
- Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., Gómez, L. (2010). Geopolymer Synthesis using Alkaline Activation of Natural Zeolite. *Construction and Building Materials Construction and Building Materials*. **24**, 2084–2090.
- Vyšvail, M., Bayer, P. (2016). *Immobilization of Heavy Metals in Natural Zeolite-Blended Cement Pastes*. *International Conference on Ecology and New Building Materials and Products (pp: 162-169)*. ICEBMP 2016, *Procedia Engineering*, **151**, 162 – 169.
- Wan, Q., Rao, F., Song, S., García, R.E., Estrella, R.M., Patiño, C.L., Zhang, Y., (2017). Geopolymerization Reaction, Microstructure and Simulation of Metakaolin-Based Geopolymers at Extended Si/Al Ratios *Cement And Concrete Composites*. **79**, 45-52.
- Yılmaz, B., Uçar, A., Öteyaka., B, Uz, V. (2007), Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment*. **42**, 3808–3815.
- Yücel, K.T. (1993), *Taze Betonun İşlenebilirliğinin Teorik ve Deneysel İfadeleri*. Doktora semineri, İTÜ, İstanbul.
- Yücel, K.T. (1997), *Pompa Betonlarında İşlenebilirliğin Harç Fazının Reolojisine Dayanarak Belirlenmesi*, İTÜ Fen, Doktora Tezi, İstanbul.
- Zeybek O. (2009). *Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Zhang, F., Zhang, L., Liu, M., Mu, C., Liang, Y.N., Hu, X. (2017). Role of Alkali Cation in Compressive Strength of Metakaolin Based Geopolymers. *Ceramics International*. **43**,3811–3817.

Zuda, L., Cerny, R., (2009). Measurement of Linear Thermal Expansion Coefficient of Alkali-Activated Aluminosilicate Composites up to 1000°C. *Cement & Concrete Composites*. **31**, 263–267.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Caner ÖZER

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya, 06.04.1987

Adres: İnönü Üniversitesi, Merkez Kampüs, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı
Rektörlük B Blok Kat:3 Elazığ Yolu 12.Km Battalgazi/MALATYA

E-Posta: caner.oz@inonu.edu.tr

Lisans: Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü

Mesleki Deneyim: Bozok Üniversitesi (2007-2011) Hizmetli, Bozok Üniversitesi
(2011-2013) Bilgisayar İşletmeni, İnönü Üniversitesi (2013-Devam ediyor) Memur

