

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

**ÇİMENTO VE BETON ENDÜSTRİSİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR
ÜRETİMLERİNDE DOĞAL ZEOLİT(ANALSİM)'İN
PUZOLANİK KATKI MALZEMESİ OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

ÖMER FATİH YAZICIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORDU 2016

TEZ ONAY

Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Ömer Fatih YAZICIOĞLU tarafından hazırlanan ve Yrd. Doç. Dr. Yasemin AKGÜN danışmanlığında yürütülen “ Çimento ve Beton Endüstrisinin Sürdürülebilir Üretimlerinde Doğal Zeolit (Analsim)’in Puzolanik Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi ” adlı bu tez, jürimiz tarafından 03 / 08 / 2016 tarihinde oy birliği / oy çokluğu ile Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Yasemin AKGÜN

Başkan : Prof. Dr. Tahsin TONKAZ
Biyosistem Mühendisliği, Ordu
Üniversitesi

İmza :

Üye : Doç. Dr. Zeki KARACA
İnşaat Mühendisliği, Ondokuz Mayıs
Üniversitesi

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yasemin AKGÜN
İnşaat Bölümü, Ordu Üniversitesi

İmza :

ONAY:

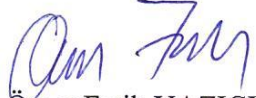
Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun. 11.08.2016..tarih ve 2016/187 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

23./08./2016.

Enstitü Müdürü
Doç. Dr. Kürşat KORKMAZ

TEZ BİLDİRİMİ

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


Ömer Fatih YAZICIOĞLU

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

ÇİMENTO VE BETON ENDÜSTRİSİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİMLERİNDE DOĞAL ZEOLİT(ANALSİM)'İN PUZOLANİK KATKI MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Ömer Fatih YAZICIOĞLU

Ordu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, 2016
Yüksek Lisans Tezi, 85s.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yasemin AKGÜN

Bilindiği gibi, geleneksel çimento endüstrisi yoğun enerji tüketiminden ve aynı zamanda dünya CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumludur. Geleneksel çimentoya kısmi yer değiştirmeli olarak ilave edilen katkıları, CO₂ emisyonlarının azalması, çimento üretimlerinde enerji tasarrufu, performansları iyileştirilmiş çimento ve beton eldesi sağlamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda çimento ve beton endüstrisi doğal zeolitleri üretimlerinde katkı malzemesi olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Türkiye oldukça zengin doğal zeolit rezervlerine sahip olmasına rağmen bunların endüstriyel kullanımları oldukça düşüktür. Oysa doğal zeolitlerin çimento ve beton endüstrisinin sürdürülebilirliğini destekleyerek ekonomiye kazandırılmaları önemli bir husustur. Bu kazanım ancak konuyla ilgili olarak endüstriye ışık tutacak teknik veriler yardımıyla mümkün olabilecektir.

Dolayısıyla, bu tez çalışmasında iki farklı rezervden temin edilen doğal zeolit minerallerinden klinoptilolit (Manisa/Gördes) ve analsim (Ordu/Perşembe) katkı malzemesi kullanımı amaçlı olarak ele alınmıştır. %0, %10, %30 ve %50 oranlarında doğal zeolit yer değiştirmesi içeren, 14 adet deney serisinden oluşan, çimento harç ve beton numuneler üzerinde basınç dayanım gelişimi ile dayanıklılığa yönelik bir takım standart deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deney serileri içinde öncelikle kendi aralarında daha sonra birbirleriyle olmak üzere karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda, katkılı çimento ve beton üretimlerinde doğal zeolitlerin ikinci değerli minerali olan analsim'in inşaat endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılan klinoptilolit'e alternatif olabileceği ve her iki doğal zeolitinin de (analsim ve klinoptilolit) katkılı çimento ve beton üretimlerinde yaklaşık %30 yer değiştirme oranına kadar puzolanik katkı malzemesi olarak kullanımının mümkün olabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Zeolit, Klinoptilolit, Analsim, Sürdürülebilirlik

ABSTRACT

INVESTIGATION OF USABILITY AS POZZOLANIC ADDITIVE MATERIAL OF NATURAL ZEOLITE (ANALCIME) IN SUSTAINABLE PRODUCTIONS OF CEMENT AND CONCRETE INDUSTRY

Ömer Fatih YAZICIOĞLU

University of Ordu
Institute for Graduate Studies in Science and Technology
Department of Renewable Energy, 2016
MSc. Thesis, 85p.

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yasemin AKGÜN

It is known that conventional cement industry is responsible for approximately 7% of global CO₂ emissions and also high energy consumption. Partial replacement of conventional cements by additives to obtain blended cements not only provides reduction in CO₂ emission and energy saving in cement production but also provides improved performance cement and concrete. Therefore using of natural zeolites as additive material in cement and concrete industry has become popular in recent years.

Although Turkey has rich reserves of natural zeolite their industrial using is quite low. Whereas gain to the economy of natural zeolites by supporting of the sustainability of the cement and concrete industry is an important issue. The gainings will be possible with the help of technical data on the subject.

Therefore the natural zeolite minerals obtained from two different reserves that is clinoptilolite (Manisa/Gördes) and analcime (Ordu/Perşembe) were investigated as additive materials in this study. The compressive strength development and durability tests were performed on blended cement mortar and concrete samples that is containing natural zeolite replacement with %0, %10, %30 ve %50 ratios and occurred from 14 test series. The obtained test results were compared firstly among themselves and then with each other.

As result of this study is determined that, second precious mineral analcime of natural zeolites could be alternative to more commonly used clinoptilolite in the construction industry for the purpose of blended cement ve concrete productions and both natural zeolite (analcime and clinoptilolite) could be possible of using as pozzolanic additive material by up to about 30% replacement in the blended cement and concrete productions.

Key Words: Natural Zeolite, Clinoptilolite, Analcime, Sustainability

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle beni destekleyen ve yanımda olan, değerli bilgi ve birikimleri ile beni yönlendirerek tez çalışmamın ortaya çıkmasını sağlayan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Yasemin AKGÜN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin teminindeki yardımlarından dolayı Ordu Altaş İnşaat A.Ş. ve Gördes Zeolit Madencilik Sanayii ve Ticaret A.Ş.'ye; doğal zeolitlerin öğütülmesi ile fiziksel ve kimyasal analizlerinde Ünye Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ve Votorantim Çimento Sanayii ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına TF-1521 proje numarası ile destek sağlayan Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimine teşekkür ederim.

Beni bu zorlu süreçte yalnız bırakmayan değerli dostum Hakan GEZGİN'e minnet ve şükran duygularımı belirtmek isterim.

Son olarak, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, eğitimim boyunca gösterdikleri sabır ve anlayış için aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	I
ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
ÇİZELGELER LİSTESİ	IX
SİMGELER VE KISALTMALAR	X
EK LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Doğal Zeolitler Hakkında Genel Bilgiler.....	2
1.2. Doğal Zeolitlerin Kullanım Alanları.....	6
1.3. Mineral Katkıların Etkileri.....	9
1.4. Analsim ve Klinoptilolit Hakkında Genel Bilgiler	11
1.4.1. Analsim.....	11
1.4.2. Klinoptilolit.....	12
1.5. Çalışmanın Amacı ve Önemi	13
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM	26
3.1. Materyal	26
3.1.1. Portland Çimentosu.....	26
3.1.2. Doğal Zeolitler	26
3.1.3. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Malzemesi.....	27
3.1.4. Agregalar.....	28
3.1.5. CEN Standart Kumu	30
3.2. Yöntem.....	31
3.2.1. Kimyasal ve Mineralojik Karakterizasyon.....	31
3.2.2. Puzolanik Aktivite Deneyleri.....	32
3.2.3. Agregada Deneyleri	32
3.2.4. Çimento Harç Numuneleri Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Yöntemleri	35
3.2.5. Beton Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Yöntemleri	42

4. BULGULAR ve TARTIŞMA	49
4.1. Doğal Zeolitlerin Karakterizasyonu.....	49
4.1.1. X-Işınları Difraktometresi Özellikleri.....	49
4.1.2. Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri	53
4.2. Zeolitlerin Puzolanik Aktivitesi	54
4.3. Agregada Deneyleri	54
4.3.1. Agreganın Mineralojik ve Petrografik Analizi	54
4.3.2. Agregada Birim Hacim Ağırlıkları ve Su Emme Oranı.....	55
4.3.3. Metilen Mavisini Deneyi.....	55
4.4. Çimento Harç Numunelerine Ait Bulgular ve Tartışma	55
4.4.1. Normal Kıvam, Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi	55
4.4.2. Böhme Aşınma Deneyi	60
4.4.3. Çimento Harç Numunelerinin Birim Hacim Ağırlıkları ve Basınç Dayanımları.....	61
4.4.4. Hidratasyon Isısı	63
4.5. Beton Numunelere Ait Bulgular ve Tartışma	67
4.5.1. Slump (Çökme) Deneyi	67
4.5.2. Betonların Birim Hacim Ağırlıkları ve Basınç Dayanımları	67
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	71
6. KAYNAKLAR	75
EKLER	81
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1.	Bazı doğal zeolit mineralleri	4
Şekil 1.2.	Zeolit kristal yapısını oluşturan dört yüzeyle	5
Şekil 1.3.	SiO ₄ veya AlO ₄ dörtyüzlüsünün görünümü	5
Şekil 1.4.	Analsim kristalleri	11
Şekil 1.5.	Klinoptilolit minerali	12
Şekil 1.6.	Klinoptilolit zeolitinin kimyasal yapısı	13
Şekil 3.1.	Çalışmada kullanılan klinoptilolit örneği	26
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan analsim örneği.....	27
Şekil 3.3.	Harçların üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı katkı malzemesi.....	28
Şekil 3.4.	Agrega numunelerinin etüvde kurutulması	29
Şekil 3.5.	Eleme işleminde kullanılan elekler.....	29
Şekil 3.6.	Agregaların sınıflandırılması.....	30
Şekil 3.7.	Harçların üretiminde kullanılan CEN standart kumu	31
Şekil 3.8.	Çimento harç numunelerinin datalogger ile sıcaklık ölçümleri.....	36
Şekil 3.9.	Vikat cihazı.....	37
Şekil 3.10.	Le Chatelier deney seti	37
Şekil 3.11.	İzotermal kalorimetre cihazı.....	39
Şekil 3.12.	Böhme aşınma deneyi seti	40
Şekil 3.13.	Hassas terazi	41
Şekil 3.14.	Harçların üretiminde kullanılan çimento mikseri	41
Şekil 3.15.	Çimento mikserinde harcın üretimi	42
Şekil 3.16.	Harçların kalıplara yerleştirilmesi	42
Şekil 3.17.	Düşey eksenli (Pan tipi) betoniyer.....	45
Şekil 3.18.	Kalıplara yerleştirilmiş numuneler	46
Şekil 3.19.	Numunelerin yerleştirilmesinde kullanılan sarsma tablası	46
Şekil 3.20.	Numunelerin kür havuzundaki saklanma koşulları	47
Şekil 3.21.	Taze betonun işlenebilirliğinin tespitinde kullanılan Slump deney seti	48
Şekil 4.1.	Çalışmada kullanılan klinoptilolit örneğinin XRD kırınım desenleri.....	50
Şekil 4.2.	Çalışmada kullanılan klinoptilolit örneğinin SEM görüntüsü	51
Şekil 4.3.	Analsim örneğinin polarizan mikroskop görüntüsü	52
Şekil 4.4.	Çalışmada kullanılan analsim örneğinin XRD kırınım desenleri	53
Şekil 4.5.	Çalışmada kullanılan analsim örneğinin SEM görüntüsü	53

Şekil 4.6.	Çimentoların ilk ve son priz süreleri	56
Şekil 4.7.	Çimentoların hacim genişmesi ve su / bağlayıcı oranı ilişkisi.....	57
Şekil 4.8.	Çimento kıvam deney anından bir görünüm	57
Şekil 4.9.	Çimento priz süresi deney anından bir görünüm.....	58
Şekil 4.10.	Hacim genişmesi deneyi numunelerinin hazırlanması.....	58
Şekil 4.11.	Hacim genişleme deneyi anından bir görünüm	59
Şekil 4.12.	Çimento hacim genişmesi numuneleri.....	59
Şekil 4.13.	Çimento etiket isimlerine göre hacimsel aşınma kaybı değişimleri	61
Şekil 4.14.	Çimento harç numunelerinin günlere göre basınç dayanımı	62
Şekil 4.15.	%10 Yer değiştirmeli çimentoların hidrasyon hızlarının karşılaştırmalı değişim grafiği.....	63
Şekil 4.16.	%10 Yer değiştirmeli çimentoların hidrasyon ısılarının değişim grafiği..	64
Şekil 4.17.	%30 Yer değiştirmeli çimentoların hidrasyon hızlarının karşılaştırmalı değişim grafiği.....	64
Şekil 4.18.	%30 Yer değiştirmeli çimentoların hidrasyon ısılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.....	65
Şekil 4.19.	%50 Yer değiştirmeli çimentoların hidrasyon hızlarının karşılaştırmalı değişim grafiği.....	66
Şekil 4.20.	%50 Yer değiştirmeli çimentoların hidrasyon ısılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.....	66
Şekil 4.21.	Taze betonun Slump deneyi	67
Şekil 4.22.	Beton numunelerinin günlere göre basınç dayanımı	69
Şekil 4.23.	Sertleşmiş beton numunesinin basınç dayanımı deney anından görünüm...	69
Şekil E.1.	Metilen mavisi deney seti	83
Şekil E.2.	Süzgeç kâğıdı üzerinde leke deneyi uygulanması	83

ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1.	PC'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	26
Çizelge 3.2.	Doğal zeolitlerin kimyasal kompozisyonu	27
Çizelge 3.3.	Agrega gruplarının tane boyut dağılımı verileri	30
Çizelge 3.4.	CEN standart kumunun tane büyüklüğü dağılımı	31
Çizelge 3.5.	Çimento harçlarının etiket isimleri ve açıklamaları.....	36
Çizelge 3.6.	Beton karışım oranları	44
Çizelge 4.1.	Doğal zeolitlerin sınıflandırılması	50
Çizelge 4.2.	Zeolit örneklerinin özgül ağırlık ve Blaine incelik değerleri.....	54
Çizelge 4.3.	Agregaların birim hacim ağırlıkları ve su emme oranı.....	55
Çizelge 4.4.	Çimentoların su/bağlayıcı oranı, priz süresi ve hacim genişmesi değerleri	56
Çizelge 4.5.	Çimento harçlarının Böhme aşınma deneyi değerleri	60
Çizelge 4.6.	Çimento harçlarının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları	62
Çizelge 4.7.	Taze betonun Slump deneyi sonuçları	67
Çizelge 4.8.	Betonların birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

°A	: Angstrom
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM	: American Society of Testing Materials
BET	: Brunauer-Emmett-Teller Metoduyla Yüzey Alanı Tespiti
CEN	: The European Committee for Standardization
C ₃ S	: Trikalsiyum Silikat
DN	: Doğal Nem Oranı
DS	: Doyma Suyu Miktarı
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
KI	: Kloritleşme
Kp	: Klinopiroksen
MB	: 0-2 mm Agreganın Metilen Mavisi Değeri
MBF	: 0-0.125 mm Agreganın Metilen Mavisi Değeri
MPa	: Megapascal
Op	: Opak Mineral
PÇ	: Portland Çimentosu
Pm	: Pomza Parçası
SiO ₂	: Silisyum dioksit
SE	: Kütlece Su Emme Oranı
SEM	: Scanning Electron Mikroskopi (Taramalı elektron mikroskobu)
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TS EN	: Türk Standartları Avrupa Normları
V _h	: 1 m ³ Betondaki Hava Hacmi
V _w	: 1 m ³ Betondaki Su Hacmi
W _a	: 1 m ³ Betondaki Agreganın Kütlesi
W _c	: 1 m ³ Betondaki Çimento Kütlesi
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
Zeol	: Zeolitleşme
β _i	: Agreganın Sınıfının Kütlece Oranı

γ_a	: Agreganın Doygun Yüzey Kuru Birim Kütlesi
γ_{ai}	: Agreganın Doygun Kuru Yüzeyli Özgül Kütleleri
γ_c	: Çimentonun Doygun Yüzey Kuru Birim Kütlesi
Δm	: 16 Periyot Sonundaki Ağırlık Kaybı Farkı
ΔV	: Hacimsel Aşınma Kaybı
ρ	: Birim Hacim Ağırlık

EK LİSTESİ

<u>EK No</u>		<u>Sayfa</u>
EK 1.	METİLEN MAVİSİ DENEYİ	81

1. GİRİŞ

Son yıllarda önemli derecede hız kazanan nüfus artışı ve teknolojik faaliyetler enerjiye olan ihtiyacı ve çevre kirliliğini artırmaktadır. Bu durum ise doğada sınırlı miktarda bulunan enerji kaynaklarının hızla tüketilmesine yol açmış ve en önemli küresel sorunlarımızdan biri haline gelmiştir.

XXI. yüzyıl dünyasında enerji arz güvenliği konusunda duyulan endişelere öncelikli uygulanabilecek en uygun senaryo, dünya enerji tüketimindeki kısıtlama mekanizmalarına ağırlık verilmesidir. Özellikle kalkınmakta olan ülkeler dünya enerji tüketim kısıtlama politikalarını desteklemek zorundadır. Böyle ülkeler enerji dış alımlarını mümkün olduğunca azaltabilmek için yoğun enerji kullanan iş kollarına yönelmelidir. Söz konusu sektörler malzeme seçimlerinde yerel ve doğal kaynak kullanımına yer vermelidir.

Yoğun enerji tüketen iş kollarından biri olan inşaat sektörü yerel ve doğal kaynak kullanımını puzolan olarak adlandırılan malzemelerle desteklemektedir. Puzolanlar literatürde, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık değeri olan, fakat ince öğütülmüş durumdayken, sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özelliği kazanan amorf yapılı, silikalı ve alüminalı malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Hem çevresel zararlı etkilerin azaltılabilmesi hem de çimento üretiminin daha düşük maliyetli olması için hidrolik çimentolara puzolan katılmaktadır. Çimento ile belli oranlarda yer değiştirilerek kullanılan doğal ya da yapay puzolanlar, maliyeti düşürmede ve CO₂ emisyonunu azaltmada yararlı olmaktadır. Hidratasyon sonucu ortaya çıkan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşenler meydana getiren puzolanlar, geçirimsizliğin artırılmasında ve betonun kimyasal ortamdaki direncinin iyileştirilmesinde oldukça yarar sağlamaktadır.

İnşaat sektöründe betonun dolayısıyla çimentonun hâkimiyeti bilinmektedir. Betonun hâkimiyeti ham maddesinin yaygınlığı, adaptasyon kabiliyeti, yük altındaki mekanik davranışları ve hizmet ömrü süresince bakım giderlerinin düşüklüğü, gibi daha birçok nedene bağlıdır. Çimento ise betonun önemli bileşenlerinden birisi olması nedeniyle vazgeçilmezliği yakalamıştır. Ancak çimento, söz konusu hâkimiyetine karşılık, üretim teknikleri gereği, pahalı ve çevreci olmayan bir yapı malzemesidir.

Dünya CO₂ emisyon kaynaklarının %7'si geleneksel portland çimentosu üretimlerinden kaynaklanmaktadır. Portland çimentosu klinkerinin 1 kg'ı atmosfere 0.87 kg CO₂ salmaktadır (Yücel ve Çulfaz, 1985; Turanlı ve ark., 2007). Ayrıca, çimento hammaddelerinin öğütülmesi ve klinkerinin pişirilmesi gibi aşamalarda da ciddi miktarlarda yenilenemeyen enerji kaynakları tüketilmektedir. Bu nedenle çimento, çevreyle barıştırılmak, sürdürülebilirliğini geliştirmek ve ekonomik hale dönüştürmek gibi ihtiyaçları olan bir malzemedir.

Böyle bir ihtiyacın giderilebilmesi için beton ve çimento üretimlerinde doğal puzolan kullanımları gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bunun nedeni, bir taraftan beton üretimlerinde çimento miktarını azaltmak için ikame malzemesi olarak doğal puzolanlar kullanmaktır. Diğer taraftan, geleneksel çimento kullanım miktarı global boyutta azalacağından, CO₂ emisyon miktarı da önemli ölçüde azalmış olacaktır. Böylelikle çimento çevreyle kısmi olarak barışmış ve Kyoto protokolü ile uyumlu bu tür çözümlerle çimento ve beton üretimlerinin çevrecilik ve sürdürülebilirlikleri hususu birbirlerine paralel olarak iyileştirilmiş olacaktır. Bunun yanı sıra, çimento ve betonun nihai dayanım ve dayanıklılıklarında da kazanımlar sağlanacaktır. Aynı zamanda da çimento ve beton üretimleri daha ucuza mal edilmiş olacaktır.

Bu bölümde doğal zeolitler hakkında genel bilgiler ve kullanım alanları ile ilgili bazı hatırlatmalar verildikten sonra mineral katkıların etkileri ile çalışmada kullanılan analsim ve klinoptilolit hakkında bilgiler sunulmaktadır. Daha sonra da çalışmanın amacı ve önemi verilmektedir.

1.1. Doğal Zeolitler Hakkında Genel Bilgiler

Zeolitlerle ilgili çalışmalar 1756 yılında İsveçli kimyacı ve mineralog Frederic Cronstedt tarafından bazı minerallerin ısıtılarak şiddetli su buharı çıkışıyla kaynadığı ve eridiğini gözlemlemesiyle başlamıştır. Cronstedt, bu malzemelere yapılarında bulunan suyu çıkarırken köpürmesinden dolayı Yunanca kaynayan “zein” ve taş anlamına gelen “lithos” kelimelerinden oluşan “zeolit” adını vermiştir (Huxtable ve Poole, 1976; Yörükoğulları, 1985).

Geniş anlamda alkali ve toprak alkali sulu alümina silikat olarak tanımlanan zeolitler, feldispatoid ve feldispatlar gibi tektosilikat gruba aittirler (Kumbasar, 1977; Yörükoğulları, 1985). Zeolitler bileşim ve bulunuşları bakımından birbirine benzer

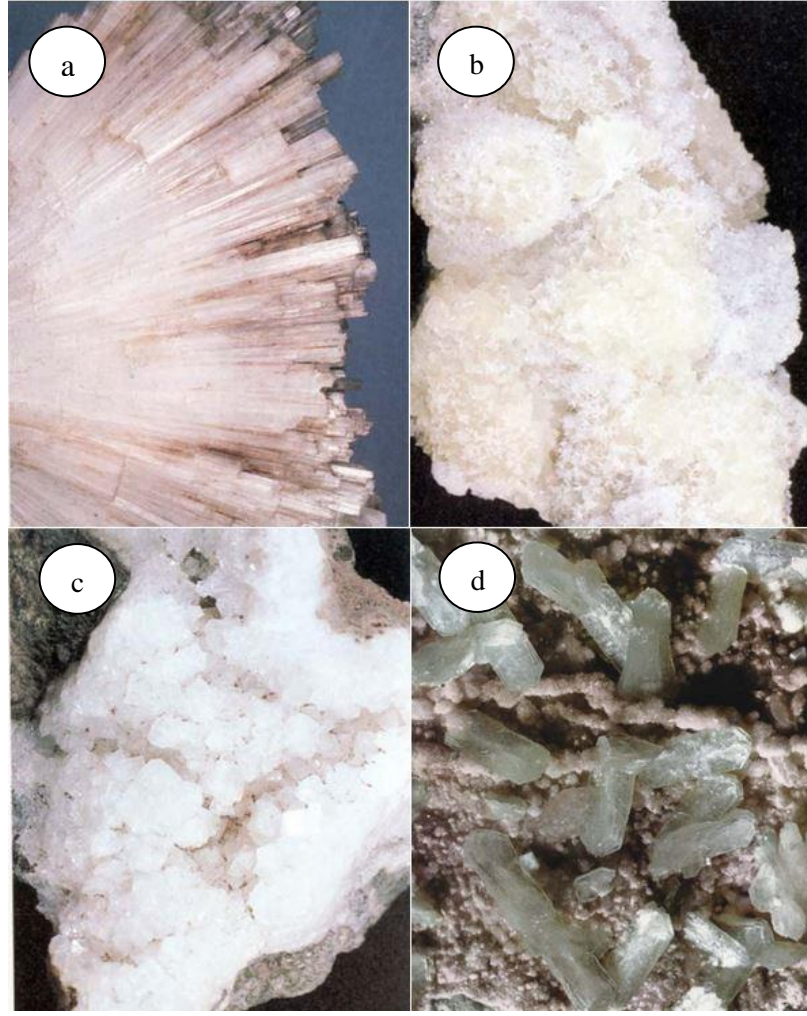
pek çok sulu silikat mineralini kapsarlar. Bu mineraller esas sodyum kalsiyum ve alüminyum sulu silikatlardır. Bazen potasyum ve baryum içerirler.

Zeolitler üzerinde ilk deneysel çalışmalar ise 1857 yılında A. Dumour tarafından yapılan zeolitlerin su tutma tersinirliğinin gözlenmesi ve 1858'de H. Eichorn tarafından zeolitlerin tuz çözeltileriyle iyon-değişme özelliklerini incelemesiyle başlamıştır (Yörükoğulları, 1985).

Zeolitlerin yapısal analizi x ışınları tekniği kullanılarak L. Pauling ve W.H. Taylor tarafından 1930 yılında, W.H. Taylor ve arkadaşları tarafından ise 1933'de yapılmıştır. Bu analizlerin sonucunda, yapının 3-10 Å arasında değişen kanalları ve boşlukları olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yük dengesini sağlayan katyonlar ve su molekülleri ile yapıdaki bu boşluklar dolmaktadır (Yörükoğulları, 1985).

Zeolitlerin temel kristal yapısı dört yüzeylilerin değişik bağlanma şekillerinden meydana gelmiştir. Bu bağlanma şekilleri zeolitlerin kanal özelliklerini belirler. Kanallar bir, iki veya üç yönde birbirleriyle ilişkili olarak oluşabilirler. Bu boşluk ve kanallar diğer yabancı iyon ve su gibi molekülleri rahatlıkla barındırabilirler. Zeolitleri ilginç yapan yapılarındaki bu kanala benzer boşluklardır. Isıtılınca bünyelerindeki suları yavaş yavaş verirler fakat yapıları olduğu gibi kalır. Zeolit tam olarak kurutulduktan sonra boşluklarını tekrar su, amonyak, civa buharı, iyot buharı veya başka malzemelerle doldurabilir. Doldurulacak malzemenin molekül boyutları ile zeolit yapısının uygun olması gerekir. Zeolitler bu özellikleri dolayısıyla molekül elekleri olarak kullanılırlar. Örneğin zeolitten süzülen sular hiçbir engelle karşılaşmadan içlerindeki iyonlar zeolit yapısındaki iyonlarla yer değiştirebilirler. Bu olaya baz değişimi veya iyon değişimi olayı denir.

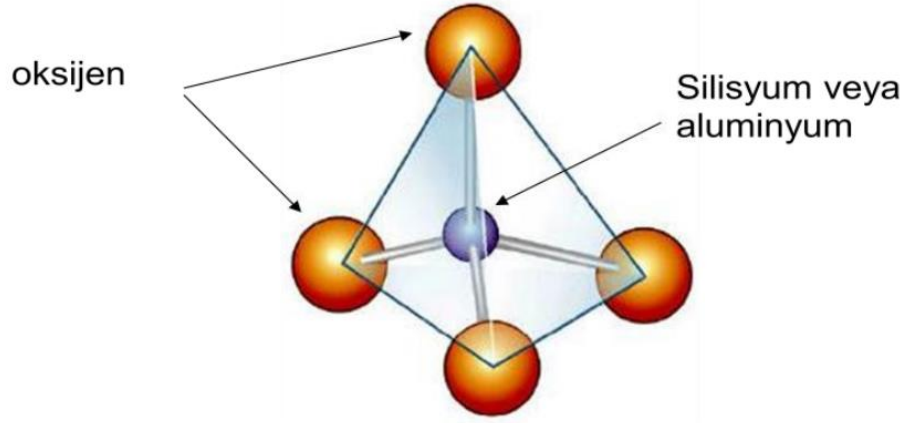
Zeolitler değişik ortamlarda değişik kayaçları oluşturmaktadır. Sedimenter zeolit kayaçlarını oluşturan zeolit minerallerinden bazıları analsim, şabazit, klinoptilolit, eriyonit, höylandit, mordenit ve filipsittir. Bu minerallerden sedimenter kayaçlar içinde en çok bulunanlar ise analsim ve klinoptilolittir (Sheppard, 1975; Yörükoğulları, 1985) (Şekil 1.1).



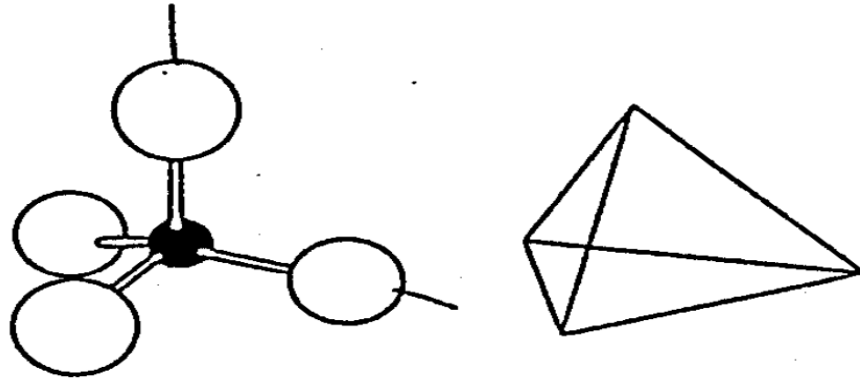
Şekil 1.1. Bazı doğal zeolit mineralleri (a: Harmotom, b: Natrolit, c: Şabazit, d: Stilbit)

Zeolitler temelde SiO_4 ve AlO_4 dört yüzeylilerin üç boyutta sonsuz bağlanmaları ile oluşan temel silikat yapısına sahiptir ve yapısındaki her oksijen iki dörtyüzlü tarafından paylaşılır (Şekil 1.2). Böylece $\text{O}/(\text{Al-Si})=2$ atomik oranı gerçekleşir. Üç değerli alüminyumun dört yüzeylilerde (Şekil 1.3) yer almasından dolayı açığa çıkan eksi yükün Ca, Na, K gibi artı yüklü alkali metal ve toprak alkali iyonları tarafından dengelenmeleri gerekir. Tam dengeli bir yapıda alüminyum silisyumun yerini en fazla 1/1 oranında alabilir. Bu durum, aynı temel silikat yapısına sahip feldispat grubu minerallerde eksi yükün Ca, Na, K gibi katyonlar tarafından dengelenmesi şeklinde ifade edilebilir. Ancak feldispatlarda artı yüklü katyonlar yapı içindeki küçük boşluklarda yer alırlar ve oksijen atomları ile çepeçevre sarılmaları nedeniyle yapı bozulmadan yer değiştiremezler. Aynı durum zeolitlerde ise farklı durum göstermektedir (Küçükyıldırım, 2013).

Alümina silikat temel yapısında Na, Ca, K kationlarının yer aldığı boşluklar daha büyük olup tüm boşlukları dolduramadıkları için kolaylıkla yer değiştirebilirler (Yörükoğulları, 1985).



Şekil 1.2. Zeolit kristal yapısını oluşturan dört yüzeyle (Küçükyıldırım, 2013)



Şekil 1.3. SiO_4 veya AlO_4 dörtyüzlüsünün görünümü (Küçükyıldırım, 2013)

Genel olarak zeolitler; $\text{M}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ampirik formülü ile tanımlanır. Bu oksit formülünde $x=2$ olup, n ise M kationunun değerliliğini göstermektedir. Kristalografik birim hücre için yapı formülü ise $\text{M}_{x/n}[(\text{AlO}_2)_x (\text{SiO}_2)_4]w \cdot \text{H}_2\text{O}$ şeklindedir.

Burada M_x ; değerliliği, n kationu; w su moleküllerinin sayısını; $(x+y)$ ise dört yüzeylilerin toplamını göstermektedir. y/x oranının değeri ise zeolit tipine göre değişim gösterir.

Zeolitlerin yapılarının içindeki kanallarda su moleküllerinin bulunması önemli özelliklerinden birisidir. Yapıda su moleküllerinin yer alabileceği boşluklar vardır. Bu boşluklarda Na, Ca ve K kationları su molekülleri ile çevrilirler ve su molekülleri

zayıf bağlarla hem artı yüklü katyonlara hem de silikat yapısına bağlıdır (Yıldırım, 2007; Hatipoğlu, 2014). Yapısında kalsiyum iyonu bulunan zeolitler diğer zeolitlere göre daha fazla su bulundururlar. Şabazit, höylandit ve stilbit mineralleri yapısı içerisinde yer alan su molekülleri potasyumdan daha çok kalsiyum katyonu ile bağlantılıdır (Breck, 1975; Yörükoğulları, 1985).

1.2. Doğal Zeolitlerin Kullanım Alanları

Zeolitlerin iyon değişikliği yapabilme, adsorbsiyon ve buna bağlı moleküler elek yapısı, silis içeriği, tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenek yapısı gibi başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri zeolitlerin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmalarına neden olmuştur. Doğal zeolitlerin son yıllarda önemli bir endüstriyel hammadde durumuna gelen bu özellikleri sayesinde kirlilik kontrolü, enerji, tarım-hayvancılık ve maden-metalürji gibi alanlarda kullanımı sağlanmıştır (Hatipoğlu, 2014).

Kirlilik Kontrolü: Zeolit minerallerinin sahip olduğu iyon değiştirme ve adsorbsiyon özellikleri zeolitlerin kirlilik kontrolünde kullanımını gittikçe arttırmaktadır. Bu kullanımlara sudaki radyoaktif atıkların tutulması, atık sulardaki metal iyonlarının ve azot bileşiklerinin tutulması, baca gazlarının adsorblanması, petrol sızıntılarının temizlenmesi, çöp depolama ve oksijen üretimi örnek olarak gösterilebilir (DPT, 2001; Hatipoğlu, 2014).

Enerji: Dünyada gittikçe artan enerji ihtiyacı kömür petrol gibi kaynakların yanında kullanılan güneş enerjisi ve nükleer enerji gibi kaynaklarla giderilmeye çalışılmaktadır. Bu kaynakların enerjiye dönüşümünde sentetik yapay zeolitlerden ve doğal zeolitlerden faydalanılmaktadır. Kömür gazlaştırma azot oksit ve hidrokarbonların temizlenmesinde, doğal gazın saflaştırılmasında, karbondioksitin uzaklaştırılmasında, güneş enerjisi üretiminde ısı değiştirici olarak ve petrol ürünleri üretiminde katalizör olarak zeolitler görev yapmaktadır (DPT, 2001; Hatipoğlu, 2014).

Tarım ve Hayvancılık: Gübrelerin kötü kokusunu gidermek, içeriğini kontrol etmek ve asit volkanik toprakların pH'ının yükseltilmesi amacıyla zeolitli tüfler uzun zamandır kullanılmaktadır. Doğal zeolitler ise gübre taşıyıcısı olarak gübreleme ve toprak hazırlanmasında, ilaç taşıyıcısı olarak tarımsal mücadelede yaygın şekilde

kullanılmaktadır. Ayrıca besicilikte hayvan yemi katkı maddesi olarak da kullanımı mevcuttur (DPT, 2001; Hatipoğlu, 2014).

Madencilik ve Metalürji: Zeolitlerin madencilik sektöründe kullanımı maden yataklarının aranmasında ve metalürjide ise bazı ağır metallerin tutulmasında karşımıza çıkmaktadır (DPT, 2001; Hatipoğlu, 2014).

Belirtilen alanların dışında son yıllarda zeolitlerin inşaat sektöründe kullanımı da mevcuttur.

İnşaat: Zeolitler inşaat sektöründe puzolan çimentosu, hafif agrega ve boyutlandırılmış taş uygulamalarında kullanılmaktadır.

Doğal zeolitlerin puzolan çimento üretiminde kullanılmasıyla içerdikleri yüksek silis oranı sayesinde betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir (Sarıkaya, 2006).

Bilinen ilk puzolan çimentosu yol, su geçidi ve kamu binalarının yapılması için Napoli yakınlarındaki zeolitik tüfler kullanılarak İtalya'da üretilmiştir. Sürekli su ile temas içinde olan yapılarda zeolitik puzolan çimentoları etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Dünyanın birçok yerinde silis bileşimlerinden yararlanılmak amacıyla içlerinde zeolit olduğu bilinmeden zeolitik tüfler kullanılmaktadır. Yugoslavya, Bulgaristan ve Almanya'da büyük miktarlarda zeolitik tuf, puzolan çimentosu üretiminde kullanılmaktadır (Sarıkaya, 2006).

Zeolitler 200 yıldan beri yapı taşı olarak görev yapmaktadır. Zeolitli tüflerin hafif olduğu kadar dayanıklı oluşları ve kolaylıkla kesilip işlenebilmeleri de yapı taşı olarak kullanılmalarında en önemli pay sahibidir. Güney Meksika'da birçok binanın yapımında kullanılan taşlar %90 mordenit ve klinoptilolit içeren zeolitik tüflerden kesilmiş taşlardan oluşmaktadır. Benzer şekilde Japonya'nın Otsunomiyo kenti yakınlarında yüzlerce yıldır zeolit işletilmektedir. Yapı taşı olarak işletilen bu zeolitler, 100 metreden fazla kalınlığa sahip olup % 80-85 oranında klinoptilolit ve az miktarlarda montmorillonit, kaledonit ve volkanik cam içerirler. Orta İtalya'da yer alan Napoli kentindeki hemen hemen bütün binalar büyük miktarlarda şabazit ve filipsit içeren sarı zeolit tüflerinden yapılmışlardır. Orta Avrupa'daki büyük binaların birçoğu, Almanya'daki Leacher bölgesindeki zeolitik tüflerden kesilmiş yapı taşları kullanılarak inşa edilmiştir. Avrupa'daki birçok ülkede, zeolitlerin yapı endüstrisinde

değişik biçimlerde kullanılma olanakları üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Klinoptilolit, perlit gibi, 1200-1400 °C'ye kadar ısıtıldığında, içerisindeki mevcut olan suyun ani olarak buhar fazına geçmesi ile genişmekte ve bu anda soğutulursa hafif ve gözenekli bir silikat malzemesi oluşmaktadır. Böylelikle genişleştirilmiş zeolitlerde yoğunluk 0.8 g/cm³'e kadar düşmekle birlikte, gözeneklilik de %65 oranlarına kadar çıkabilmektedir (Sarıkaya, 2006).

Genleştirilmiş doğal zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımı daha yüksek olduğundan bu zeolitlerden genişleştirilmiş hafif agrega üretilmektedir. Doğal zeolitik tüflerin düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapılı özelliklerinden dolayı hafif yapı taşı olarak yapı endüstrisinde kullanımları mümkündür (Sarıkaya, 2006).

Rusya, Kanada, A.B.D., Japonya ve Belçika gibi gelişmiş ülkelerde doğal zeolitlerin yapı endüstrisinde kullanımının uygulamaları görülmektedir. Özellikle Rus bilim adamları doğal zeolitlerin yapı endüstrisinde dekoratif süslemelerde kullanılması üzerinde çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaların sonuçlarını patent alarak hayata geçirmişlerdir (Sarıkaya, 2006).

Zeolitik tüf yatakları puzolanik hammadde olarak birçok ülkede kullanılmaktadır. Zeolitler, beton ürününün daima yeraltı su korozyonuna maruz kalacağı hidrolik çimentolarda önemli bir yere sahiptir. Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak puzolanlı çimento üretiminde kullanılması, yüksek silisli içerikleri nedeniyle, betonun katılma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesine katkı sağlayabilmektedir. Zeolitik tüflerin kolayca kesilip işlenebilmeleri ve hafiflikleri iyi bir yapı taşı olarak kullanılabilmesini sağlamıştır. Doğal zeolitlerden elde edilen hafif yapı malzemelerinin kullanılması yapı ağırlıklarının azaltılarak yapının deprem güvenliğinin artmasında önemli rol oynamaktadır. Bu malzemelerin hafif olması yapıların taşıyıcı sistemlerinde ekonomiye katkıda bulunduğu gibi, deprem yüklerine karşı güvenliği de arttırmaktadır (Sarıkaya, 2006).

Dünya doğal zeolit rezervlerini kesin rakamlarla belirtmek pek mümkün olmasa da 1756 yılından beri zeolitlerin varlığı bilinmektedir. Zeolit rezervleri 1950'li yıllardan itibaren belirlenmeye başlanmıştır. Avrupa kıtasında; Almanya, İngiltere, İtalya, İspanya, Belçika, Bulgaristan, Danimarka, Fransa ve İsviçre'de, Afrika kıtasında;

Mısır, Kenya, Angola, Kongo, K. Afrika'da, Asya ve Avustralya kıtasında; İran, İsrail, Pakistan, Çin, Kore, Yeni Zelanda, Güney Amerika kıtasında; Arjantin ve Şili, Kuzey Amerika kıtasında; A.B.D., Kanada, Küba, Meksika, Panama ve Antarktika kıtasında zeolit oluşumları görülmektedir. Bu ülkelerin çoğunda üretim yapılmaktadır ve bu üretimin yaklaşık %60 payını Küba karşılamaktadır (İnan, 2002; Şener, 2013).

Ülkemiz doğal zeolit açısından ideal jeolojik koşullara sahiptir ve ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında analsim oluşumları saptanmıştır. Daha sonra Ankara'nın batısında analsim ve klinoptilolit yatakları bulunmuştur. Volkanik oluşumların gözlenebildiği ülkemizde daha çok klinoptilolit ve analsim türleri yoğunluktadır. Diğer zeolit türlerine çok az rastlanmıştır. Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç'te Türkiye'nin en önemli zeolit yatakları tespit edilmiş olup, buradaki zeolitler kolaylıkla işletilebilir türdendir. Ülkemiz genelinde toplam zeolit rezervinin 50 milyar ton civarında bulunduğu tahmin edilmektedir.

1.3. Mineral Katkıların Etkileri

TS EN 197-1'de değişik mineral katkıları ve bunların çeşitli kombinasyonlarını içeren çok sayıda çimento türüne yer verilmiştir. Uygun özelliklerdeki mineral katkıların çimento üretiminde kullanılmasıyla önemli derecede ekonomik, çevresel ve teknik avantajlar sağlanmaktadır.

Bilindiği gibi, çimento bileşiminin yaklaşık %90 kadarı dört karma oksitten oluşmaktadır. Bu oksitler C_3S ve C_2S olarak belirtilen kalsiyum silikatlar ile C_3A ve C_4AF olarak belirtilen kalsiyum alüminatlarıdır.

Mineral katkıları genellikle klinker elde edildikten sonra klinkerle birlikte öğütülerek kullanılır. Bu sayede çimento elde etmek için daha az hammadde (doğal kaynak) ve daha az enerji kullanılmakta, ortaya daha az sera gazı çıkmaktadır. Katkı maddesinin endüstriyel atık olması durumunda çevresel yarar daha da fazladır.

Çimento su ile karıştırıldığında kalsiyum silikatlar bağlayıcı özellikteki kalsiyum silikat hidrat, C-S-H, jelini oluşturur. Bu esnada bir miktar kireç hidrat, CH açığa çıkar. Bileşimde yer alan oksitlerden C_3S erken dayanıma ve hidrasyon ısısına daha

fazla katkıda bulunmaktadır ve daha fazla kireç açığa çıkarmaktadır. C_3A ise hidratasyon ısını arttırarak, sülfatlara karşı direnci azaltmaktadır.

Hamurun yarısından fazlasını oluşturan bağlayıcı özellikteki C-S-H jelleri ile kalsiyum alüminat jelleri, kireç hidrat CH açığa çıkarır ve gözenekler oluşur. CH ve gözenekler dayanım ve dayanıklılığı olumsuz etkiler. Katkılı çimentoda hidratasyon ve özellikleri ise farklıdır. Katkılı çimentoda karma oksitlerden C_3A azaldığından sülfat direnci artacak, C_3S ve C_3A azaldığı için hidratasyon ısı ve erken dayanım azalacaktır. C_2S ve C_3S azaldığı için açığa çıkan CH miktarı da azalacaktır. Bu durum tekrar sülfat direncinin ve dayanıklılığın artmasını sağlayacaktır. Katkının puzolanik özelliklere sahip olduğu kabul edilirse, kalan CH'yi zamanla bağlayarak yeni (puzolanik) C-S-H jeline dönüştürecek ve gözenekleri tıkayacaktır. Böylelikle zamana bağlı olarak dayanım ve dayanıklılıkta artış söz konusudur. Özet olarak, katkılı çimento hamurunda bağlayıcı jeller artmakta, CH ve gözenekler azalmaktadır (Yeğınobalı ve Ertün, 2009).

Kuşkusuz bu genel etkiler klinker ve katkı özelliklerine bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Puzolanik olmayan bazı katkıların bile ince öğütüldüklerinde harç ve betonda su ihtiyacını azalttıkları, hidratasyonu hızlandırdıkları ve gözenekleri tıkayarak dayanıklılığı arttırdıkları bilinmektedir.

Sonuç olarak, çimentoya katılan mineral katkıları:

- Ekonomi ve enerji tasarrufu sağlanması,
- Doğal kaynakların ve çevrenin korunması, sera gazlarının azaltılması,
- Hidratasyon ısının azaltılması,
- Çimento ürünlerinde işlenebilmenin kolaylaştırılması, dayanıklılığın ve zamanla dayanımın iyileştirilmesi

gibi konularda yararlı olabilmektedir. Erken dayanımlarda görülebilecek azalma çimentonun daha ince öğütülmesi veya klinker özelliklerini değiştirilmesiyle çözümlenebilmektedir (Yeğınobalı ve Ertün, 2009).

1.4. Analsim ve Klinoptilolit Hakkında Genel Bilgiler

1.4.1. Analsim

Analsim, yapısında çok miktarda hidratlı sodyum aluminosilikat ($\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O}$) bulunan feldispatoit mineralidir. Analsit olarak da bilinmektedir. Bazalt, diyabaz, granit, gnays gibi kayaların çatlak ve oyuklarında, ayrıca tuzlu göllerdeki çökeltmeler sonucu oluştuğu sanılan geniş yataklar halinde bulunur.

İtalya'daki Trentino'da, ABD'nin Wyoming ve Utah eyaletleri ile Yeni Zelanda'da yaygın olan analsim, bir feldispatoit olmasına karşın zeolit mineralleriyle yakın ilişkisi nedeniyle bazen bu sınıftan sayılır. Adını "zayıf" anlamına gelen Yunanca analkis sözcüğünden, ısıtma ya da sürtmeyle zayıf bir elektrik yükü ürettiği için almıştır.

Analsim kübik sistem kristallografisinde ve kristalleri genellikle ikositetrahedral şekilli veya masif olarak bulunmaktadır. Sertliği 5.5 ve yoğunluğu ise 2.2'dir. Camsı parıltılı olup renksiz veya beyazdır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Analsim kristalleri

Analsim camsı parıltısı ve serbest büyüyen kristalleri ile tanınır. Kristalleri lösitle çok benzer fakat analsim üfleçte kolayca erir ve saydam cam verir, lösit ise erimez.

Diğer zeolit mineralleri gibi genellikle ikincil mineral olarak diğer zeolitlerle birlikte bazik volkanik kayaların boşluklarında ve yine ikincil mineral olarak sedimanter kayalar içinde oluşur.

1.4.2. Klinoptilolit

Klinoptilolit dünyada en çok ve en yaygın olarak bulunan doğal zeolit mineralidir (Şekil 1.5). Alkali ve toprak alkali katyonları içeren ve kimyasal formülü $(Na_3K_3)(Al_6Si_{30}O_{72}) \cdot 24 H_2O$ olan klinoptilolit zeoliti monoklinik bir kristallenme göstermektedir. Silika bakımından zengin bir doğal zeolit türüdür. Isıya dayanıklı olup 700 °C'ye kadar kristal yapısını korur. Kristal boşluğu %39'dur (Yıldırım, 2007). (Al+Si)/O oranınının 0.5 olması istenen bir durumdur (Uğurlu ve Pınar, 2004).

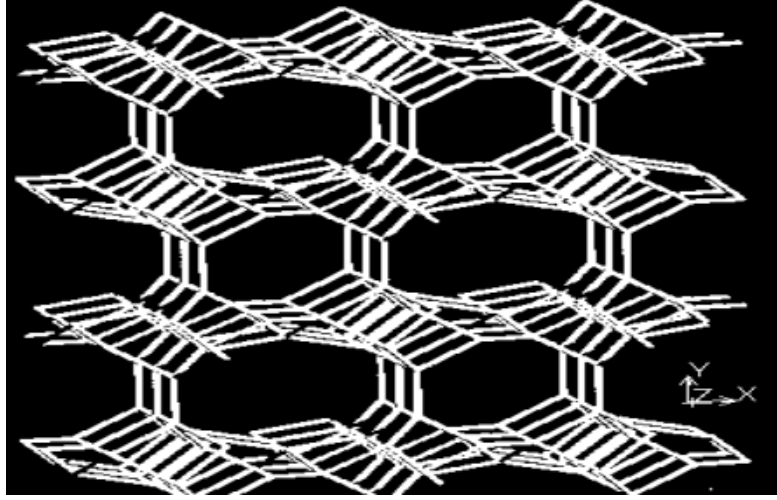


Şekil 1.5. Klinoptilolit minerali

Klinoptilolitin katyon oranı değiştirilebilmektedir. Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} yapısındaki değiştirilebilen katyonlardır. Klinoptilolitin katyon seçiciliğinin, $Cs > Rb > K > NH_4 > Ba > Sr > Na > Ca > Fe > Al > Mg > Li$ şeklinde olduğu bilinmektedir. (Özkırım ve Yörükoğulları, 2005; Duman, 2011).

Asit ve bazlara karşı duyarlı olan bir mineraldir (pH: 1.5-11). Lifsi bir mineral yapısı yoktur, zararlı elementler içermemektedir (Demirel ve ark., 2010).

Klinoptilolit zeoliti, birbiri ile kesişen 10 ve 8 üyeli oksijen halkasına ve gözenek açıklıkları $4.4 \times 7.2 \text{ \AA}$ ve $4.1 \times 4.7 \text{ \AA}$ olan tek boyutlu bir sisteme sahiptir (Şekil 1.6) (Alp, 2005).



Şekil 1.6. Klinoptilolit zeolitinin kimyasal yapısı (Alp, 2005)

Klinoptilolit yoğun adsorblama gücü ile sudan ve havadan amonyak ve diğer toksik gazları kolaylıkla adsorblayabilmektedir (Özkırım ve Yörükoğulları, 2005). Yüksek kation değişimi, ağır metal giderimi, su tutma kapasitesi ve yüzey alanının büyüklüğü gibi önemli özellikleri moleküler bir elek özelliği göstermesini sağlamıştır (Danabaş, 2009).

Günümüzde klinoptilolitin büyük miktarı yapı malzemesi, hayvan yemi katkısı veya gübre katkısı olarak kullanılmaktadır. Klinoptilolit ayrıca SO_2 , H_2S ve CO_2 gibi gazların tutulmasında, iyon değişiminde, atık suların arıtılmasında, kurutma ve saflaştırma teknolojisinde de kullanılabilir (Güvenir, 2005; Yıldırım,2007).

1.5. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmanın temel amacı; çimento ve beton endüstrisinin sürdürülebilir üretimlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan doğal zeolitlerden biri olan klinoptilolit'e alternatif olabilecek, zeolit tanımlamalarında ikinci değerli zeolit minerali olarak anılan, doğal zeolit analsim'in puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesidir.

Bu amaca yönelik olarak çimento harç ve beton numunelerinden oluşan 14 adet deney serisi üzerinde ilgili standartlarına uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, öncelikle deney serileri kendi aralarında daha sonra birbirleriyle olmak üzere karşılaştırılmışlardır.

Bu çalışmanın amacı, yerel ve doğal puzolan kaynaklarının aktif hale geçirilip, özellikleri tanımlanmış, doğal puzolan çeşitliliği yelpazesinin genişletilmesiyle

Çimento dolayısıyla beton üretimlerinde doğal puzolan kullanımını gündemde tutarak yenilenemeyen enerji kaynaklarının tüketiminde tasarruflar sağlanmasıdır. Böylelikle dünya enerji arz güvenliği hususundaki endişelere yenilenebilir enerji kaynakları arayışlarının bir öncesinde yer alan enerjinin tasarruflu kullanımına önemli ölçüde katkı sağlanmış olacaktır. Bunun yanı sıra, imento ve betonun nihai dayanım ve dayanıklılıklarında diğere bir deyişle performanslarında da ciddi kazanımlar elde edilmiş olacaktır.

Ülkemiz, literatür tanımlamaları ile uyumlu, kullanılabilir, yerel ve doğal puzolan malzeme rezervleri ile onların çeşitliliği açısından oldukça zengindir. Dolayısıyla çevreci, enerji dostu, sürdürülebilir aynı zamanda da ekonomik imento ve beton üretimlerine imkân sağlayabilecek oldukça yüksek potansiyele sahiptir.

Orta Karadeniz Bölgesinde bulunan Ordu ili, jeolojik konumu ile zengin ve genellikle volkanik kayaların egemen olduğu bir kuşak içerisinde yer alır. Bu çalışmada Ordu (Perşembe) bölgesinde yüzeylemiş olan doğal zeolit (analsim)'in fiziksel, kimyasal, mekanik, mineralojik ve petrografik özellikleri incelenerek bunların sürdürülebilir beton üretimlerinde puzolanik mineral katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Söz konusu bölgede yer alan doğal zeolit (analsim)'in puzolanik mineral katkı olarak kullanımını hakkında yapılmış bir çalışma literatürde henüz bulunmamaktadır.

Bu çalışma kapsamında ulaşılan sonuçların, Türkiye'de yüksek rezervlere sahip doğal zeolitler hakkında yapılacak daha ileri araştırmalar için temel teşkil edeceği düşünülmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Feng ve ark., (1990), zeolitik mineral katkılı yüksek dayanımlı beton üretimleri için çimento yerine %10 oranında zeolit ve karışımın %31-35'i arasında akışkanlaştırıcı katıldığında elde edilen beton dayanımının 80 MPa ve çökmesinin 18 cm olduğunu belirlemişlerdir. Bu dayanım, normal portland çimentosu kullanılması durumunda elde edilen betonların basınç dayanımlarından %10-%15 civarında daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda, geleneksel betonlara göre terleme ve ayrışmanın olmadığını gözlemlemişlerdir. Zeolit katkının kullanımıyla çimento hamurun fazında iyileşmeler olduğu görülmüş ve bu durumun betonun geçirgenlik özelliğini olumlu yönde etkileyeceğini vurgulamışlardır.

Birçok kaynakta belirtildiği gibi Neville (1997), puzolan malzemelerin hidrasyon hızı ve ısısının portland çimentosundan daha düşük olduğunu belirtmektedir.

Canpolat ve Yılmaz, (2002), puzolanik özelliği deneysel olarak belirlenen doğal zeolit ve uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığını araştırmışlardır. Çalışmada %5 ve %10'luk sodyum sülfat çözeltileri hazırlanmıştır. Deneyler geleneksel, çimento ağırlığının %20 ve %30 oranlarında doğal zeolit ikameli, %15 zeolit-%5 uçucu kül, %25 zeolit-%5 uçucu kül şeklinde düzenlenmiş harç numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler eskitme süreci başlangıcı olarak kabul edilen 28 gün boyunca kirece doygun suda saklanmıştır. Numunelerde 2, 7, 28 ve 90. günlerde eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve birim ağırlıklar belirlenmiştir. Deneyler sonucunda çimentoya zeolit katılmasının 90. güne kadar yüksek konsantrasyonda bile harcın sülfata karşı dayanıklılığına olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Canpolat ve ark., (2005), doğal zeolit ve silis dumanının birlikte çimento üretiminde mineral katkı maddeleri olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada katkılar farklı oranlarda portland çimentosu ile yer değiştirmeli olarak kullanılmıştır. Katkılı numunelerin fiziksel özellikleri, priz süresi, hacim genleşmesi, öğütme süresi, eğilmede çekme ve basınç dayanımı katkı içermeyen geleneksel numuneler ile karşılaştırılmıştır. Deney serileri, önce doğal zeolit portland klinkerine %5, %10 ve %20 ile değişen oranlarda ikili kompozisyon olarak katılması, daha sonra %10 silis dumanı sabit kalmak kaydıyla zeolit katkının yine %5, %10, %20 olmak üzere üçlü kompozisyon şeklinde çimentoya katılmasıyla

oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda zeolit mineral katkılı çimentoların mekanik özelliklerinin kontrol çimentosuna göre önemli ölçüde iyileşmiş olduğunu tespit etmişlerdir.

Gürkan (2006), çalışmasında alkali silika reaksiyonunun (ASR) zararlı etkilerini azaltmak amacıyla mineral katkı olarak çimento yerine pomza, perlit ve zeolit katkıları farklı oranlarda kullanmıştır. Harç örnekleri üzerinde yapılan ilk deneyler sonucunda, perlitin genleşmeleri azaltmada pomza ve zeolit kadar etkili olmadığını tespit etmiştir. Bu nedenle çalışmanın sonraki aşamasında, reaksiyonun zararlı etkilerini azaltmak amacıyla genleşme değerlerini, standarttaki genleşme sınır değerinin altına düşürebilen pomza ve zeolit kullanmıştır. Çalışmada ayrıca harç örnekleri üzerinde yapılan deneylerle mineral katkı olarak kullanılan pomza ve zeolitin betonun durabilitesine etkisi de incelenmiştir. Çalışma sonucunda zeolitin, çimento yerine ağırlıkça %5 oranında kullanımının çimentonun genleşmelerinde azalmaya değil, tam tersine, az miktarda artmaya sebep olduğunu gözlemlemiştir. Yüksek su emme kapasitesine sahip ve porozitesi yüksek olan zeolitin alkali yoğunluğuna sebep olması genleşmelerin artışına sebep olmuş olabileceğini belirtmiştir. %10, %15 ve 20 oranlarında zeolitin kullanılmasıyla ASR genleşmelerinin kontrol karışımına kıyasla azaldığı, ancak sınır genleşme değerinin aşıldığı, %25 oranında kullanımıyla ise genleşmelerin sınır değerinin altında kaldığını tespit etmiştir.

Albayrak ve ark., (2007), zeolit katkılı gaz betonlar üzerinde incelemeler yapmışlardır. Çalışmada üretilen gaz betonların birim hacim ağırlıkları, basınç dayanımları ve ısı iletkenlikleri incelenmiştir. Zeolit katkılı betonların birim hacim ağırlıkları $270-500 \text{ kg/m}^3$, termal iletkenliği $0.08-0.12 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$ ve basınç dayanımları da $1.22-3.34 \text{ N/mm}^2$ aralığında değerler göstermiştir. Zeolit katkılı betonların birim hacim ağırlığındaki artışla birlikte katkı oranlarına bağlı olarak basınç dayanımları da artmıştır. Aynı birim hacim ağırlıklardaki geleneksel gaz betonların termal iletkenlikleri ile zeolit katkılı gaz betonların termal iletkenlikleri benzer değerler vermiştir.

Turanlı ve ark., (2007), doğal zeolitlerin çimento-beton endüstrisinde puzolanik katkı maddesi olarak ve hafif yapı malzemeleri üretiminde hafif agrega olarak

kullanılabilirliği üzerine çalışmışlardır. Bu amaçla; öncelikle Manisa/Gördes ve Balıkesir/Bigadiç'te yer alan doğal zeolit rezervinden temin edilen doğal zeolitlerin karakterizasyonu yapılmış ardından düşük, orta ve yüksek miktarlarda doğal zeolit katkısı içeren çimentoların ve beton karışımlarının özellikleri belirlenerek malzemelerin hafif agrega olarak kullanımlarına yönelik özellikleri de değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda Gördes ve Bigadiç zeolitlerinin reaktif SiO₂ içerikleriyle ve yüksek BET yüzey alanlarıyla ilişkili olarak önemli düzeyde puzolanik aktivite gösterdikleri; doğal zeolit katkılı portland çimentolarının kontrol çimentosuna oranla daha hızlı ilk ve son priz süreleri gösterdiklerini belirlemişlerdir. Bu durumun yüksek BET yüzey alanlarından kaynaklandığını belirlemişlerdir. Ayrıca Gördes zeolitinin temel fiziksel özellikleri açısından hafif agrega olarak kullanılabilmesi tespit edilmiş ancak alkali-silika reaktivitesi açısından tedbirli olunması gerektiğini önermişlerdir.

Uzal (2007), iki farklı rezervden temin edilen doğal zeolitlerin (klinoptilolit) puzolanik aktivitelerini araştırmış ve bu zeolitlerden düşük (%15 ikame), orta (%35 ikame) ve yüksek (%55 ikame) düzeyde zeolit içeren çimento hamuru, harç ve beton karışımlarının özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda doğal zeolitlerin Ca(OH)₂ ile olan reaktivitelerinin, uçucu külün ve zeolitik olmayan puzolanın reaktivitelerinden daha yüksek olduğu, silis dumanının reaktivitesinden ise bir miktar düşük olduğu görülmüştür. Doğal zeolit içeren katkılı çimentoların portland çimentosundan daha hızlı priz süresi gösterdiği anlaşılmıştır.

Yıldırım (2007), Manisa-Gördes yöresinden elde edilen klinoptilolit türü doğal zeolitinin çimentoda katkı olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada Manisa-Gördes doğal zeoliti ile %0, %15 ve %30 oranında doğal zeolit katkılı çimentolar oluşturularak fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda %15 oranında doğal zeolit katkılı numune özelliklerinin çimentoda daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Yılmaz ve ark., (2007), klinoptilolit katkılı olarak üretilen harçların fiziksel kimyasal mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine gerçekleştirilen çalışmada ortamın CH seviyesine bağlı olarak klinoptilolitinin iyon değiştirme kapasitesi ve reaktif silis oranına bağlı olarak da nihai dayanım değerleri belirlenmiştir. Klinoptilolitinin puzolan

olarak kullanılabilir olduğunu, katkılı çimentonun özgül ağırlığının geleneksel betonlara göre düşük olduğunu, katkılı çimentonun su ihtiyacını artırdığını ve klinoptilolit karışım oranlarına bağlı olarak da çimento harçlarının priz sürelerini artırdığını tespit etmişlerdir.

Caputo ve ark., (2008), iki farklı yapay zeolit (sentetik sodyum zeolitleri) katkılı çimento hamuru numuneleri üzerinde Fratini testi yardımıyla puzolanik aktivite belirlenmesi yapmışlardır. Numunelerin 3-28 günlük basınç dayanımları incelemelerinin ardından her iki zeolit de etkin puzolanik malzeme olduğunu vurgulamışlardır.

Karakurt (2008), çimento üretiminde doğal zeolit ve volkanik tüflerin endüstriyel atıklarla birlikte kullanılmasının beton performansına etkileri üzerinde incelemeler yapmıştır. Yapılan çalışmada katkılı çimento üretiminde endüstriyel atık olarak Kütahya Tunçbilek Termik Santrali atığı uçucu kül, Ereğli Demir Çelik Fabrikası atığı yüksek fırın cürufu ve Manisa Enli Madencilik kırma atığı doğal zeolit (klinoptilolit) kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve doğal zeolit ile birlikte, iki farklı yöreden sağlanan doğal puzolan (Nevşehir tüfü ve Eskişehir trası) da kullanılarak katkılı çimentolar üretilmiştir. Çimentolar, %10, %20, %30, %40 ve %45 oranlarında beş farklı katkının klinker yerine bilyalı öğütücüde alçıtaşıyla birlikte öğütülmesiyle elde edilmiştir. Standart harç numunelerine 2, 7, 28 ve 180. günlerde yapılan deneyler ile katkılı çimentoların mekanik performansı test edilmiştir. Daha sonra hazırlanan harç ve beton numuneleri üzerinde sülfat dayanıklılığı, alkali-silis reaktivitesi, donma-çözülme dayanıklılığı, yüksek sıcaklık ve hızlandırılmış donatı korozyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda edinilen bulgulara göre zeolit katkılı çimento kullanımının betonun ileri yaş dayanımlarını artırdığı, dayanıklılık özelliklerini ise geliştirdiği belirlenmiştir.

Mertens ve ark., (2009), bu çalışmada oldukça saf doğal zeolit türleri (analsim, filipsit, şabazit, eriyonit, modernit ve klinoptilolit) kullanılmıştır. TGA analizleri yardımıyla 3-180 gün boyunca puzolanik reaksiyon davranışları takip edilmiştir. Kullanılan puzolanların numune boyut analizleri ve özgül yüzey alanları belirlenmiştir. Puzolanların boyutları küçüldükçe özgül yüzey alanları artacağından kısa sürede daha yüksek puzolanik aktivite sonuçları gözlemlenmiştir. Ayrıca

zeolitler için dış yüzey alanlarının önemli olduğunu ancak bu sonucun erken yaşlarda etkisinin olmadığını da vurgulamışlardır.

Taban ve Şimşek, (2009), zeolitik tuf örneğinin tras olarak kullanılabilirliğini araştırmışlar ve fiziksel, kimyasal, mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışmada %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında zeolitik tuf CEM I 42.5 R çimentosu yerine ikame edilerek numuneler oluşturulmuştur. Çimento harcı üretiminde, karışım suyu ve olgunlaştırma suyu içme ve deniz suyu olmak üzere iki farklı şekilde kullanılarak çimento harcının priz süresi, hacim genleşmesi, eğilme ve basınç dayanımlarına etkileri test edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde gruplarda kontrol örneklerinden sonra en yüksek eğilme ve basınç dayanım değerini %10 katkı oranındaki çimento harçları vermiş olduğunu ve bunun yanı sıra, çimento içerisindeki zeolitik tuf ikame oranı arttıkça, normal kıvam için gereken su miktarının da artmış olduğunu belirlemişlerdir.

Gökçe ve ark., (2010), andezit, kireçtaşı ve perlit kayalarından üretilen kırmataş agregaların, harç karışımlarında çimento yerine farklı oranlarda zeolitik tuf kullanılmasının ASR'ye ilişkin özelliklerini incelemişlerdir. CEM I 42.5 R tipi çimentoya, %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ikame edilmiş ve agrega türleri üzerinde ASR etkinliğini belirlemek için 45 adet harç çubuğu numunesi üretmişlerdir. Numunelerin boy değişim değerleri 3, 7, 14, 28, 42 ve 56. günlerde ölçülmüştür. Yapılan çalışmanın deney sonuçlarından tüm numunelerin boy değişim miktarının zeolitik tuf ikamesi arttıkça azaldığı görülmüş ve zeolitik tuf katkısının reaktif agregaların ASR'sini önlemede önemli olduğu anlaşılmıştır.

Oymael (2010), %0, %15 ve %30 oranında zeolit katılan çimento harcı numuneleri üzerinde yaptığı çalışmada numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını belirlemiştir. Çalışmada katkılı numuneleri kontrol numunesi ile karşılaştırdığında, 7 günlük basınç dayanım değerlerinin düşük ve 28 günlük basınç dayanım değerlerinin ise standart değerler içinde olduğunu tespit etmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek basınç dayanım değerinin %15 zeolit katkılı numunelerden 62.5 MPa olarak elde edildiği görülmüştür.

Perraki ve ark., (2010), çimentoya ağırlığının %10 ve %20'si kadar zeolit ikame ederek katkılı çimentoda zeolitin etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda numuneler

oluşturarak 1, 2, 7, 28 ve 90. günde basınç dayanımı deneyi uygulamışlardır. Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre %10 zeolit ikame edilen numunelerin portland çimentosunun 1, 2 ve 7 günlük basınç dayanım değerlerini geçemediği, sadece 28 ve 90 günlük dayanım değerlerini geçtiği belirlenmiştir. Ancak, %10 ve %20 zeolit ikame edilen numunelerin basınç dayanımları kendi aralarında karşılaştırıldığında, %10 zeolit ikame edilen numunelerin basınç dayanımlarının tüm yaşlarda %20 ikame edilen numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Uzal ve ark., (2010), çalışmalarında en yaygın doğal zeolit minerali olan klinoptilolitin puzolanik aktivitesi diğer puzolan türleriyle (zeolitik doğal puzolan olmayan, uçucu kül ve silis dumanı) karşılaştırılmıştır. Puzolanik aktivitelerin belirlenmesinde literatürde var olan standart aktivite belirleme deneylerini kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda klinoptilolitin özgül yüzey alanı ve reaktif SiO₂ içeriği sayesinde puzolanik aktivitesinin diğer puzolan türlerine göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Yıldız ve ark., (2010), yüksek silis içeren pomza ve zeolit gibi minerallerin yüksek dayanımlı beton (YDB) içerisinde puzolan olarak kullanımı üzerinde çalışmışlardır. Deney programı kapsamında beton tasarımı gerçekleştirilirken çimento ile yer değiştirilerek “ %0 pomza-%15 zeolit, %5 pomza-%10 zeolit, %10 pomza-%5 zeolit, ve %15 pomza-%0 zeolit olmak üzere dört tip yüksek dayanımlı beton üretmişlerdir. Beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde zeolit yer değiştirme oranı arttıkça, taze betonda çökme değerinin arttığı bununda işlenebilirliği artırdığı görülmüştür. Zeolitin yapısında bulunan zeolitik suyun bu duruma etken olabileceği kanısına varılmıştır.

Bilim (2011), çimento yerine ikame malzemesi olarak zeolit ve silis dumanı içeren çimento harçlarının, fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Deneylerde silis dumanı %10 oranında sabit kalmak üzere ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında değişen zeolit yer değişimleriyle oluşturulan harç karışımları kullanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sabit silis dumanıyla, karışım içerisindeki zeolit oranının yükselmesi karışımların su ihtiyacını artırmış, priz sürelerinin uzamasına neden olduğu belirlenmiştir.

Dorum ve Yıldız, (2011), YDB’de mineral katkı olarak pomza ve zeolit doğal puzolanlarının kullanılabilirliği üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla YDB beton numuneleri oluşturulurken çimentoya ikame edilmek suretiyle, %0 pomza-%15 zeolit, %5 pomza-%10 zeolit, %10 pomza-%5 zeolit ve %15 pomza-%0 zeolit oranlarında dört farklı beton üretilmiştir. Üretilen beton numuneleri üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonucunda %0 pomza-%15 zeolit ve %5 pomza-%10 zeolit ikameli betonların, YDB üretiminde kullanılabileceği görülmüştür.

Sevim ve Okumuş, (2011), doğal zeolit ve silika dumanının betonun geçirimsizlik ve dayanım özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada doğal zeolit olarak Manisa-Gördes yöresinden temin edilen doğal zeolit kullanmışlardır. Bu çalışmada karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.4 olarak belirlenmiştir. Doğal zeolit çimentonun yerine ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirilerek, silika dumanı ise ağırlıkça %8 sabit yer değiştirme oranında kullanılarak 7 karışım hazırlanmıştır. Üretilen karışımların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, basınçlı su geçirgenlikleri, kapilarite katsayıları ve su emme oranları 28. günde tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, doğal zeolitin çimentoya ağırlıkça %20 oranında yer değiştirilmesiyle mineral katkı olarak kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca, %10 ve %20 zeolitli beton karışımları kontrol betonuna göre düşük su geçirgenliği ve yüksek dayanım sağlamıştır.

Najimi ve ark., (2012), yüksek reaktif doğal bir puzolan olan zeolit içeren betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İkame malzemesi olarak %15-%30 oranında doğal zeolit kullanmışlardır. Çalışmada geleneksel betonlarla karşılaştırma yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar yardımıyla %15 doğal zeolit içeren betonların dayanım ve durabilite özelliklerinin (su geçirimsizliği, klorit iyonu geçirimsizliği, korozyon oranı ve kuruma rötresi) iyileştiğini tespit etmişlerdir. Çalışmada kullanılan zeolitin puzolanik aktivitesinin amorf yapılı doğal puzolanlardan daha yüksek performans gösterdiğini de belirlemişlerdir.

Yıldız (2012), beton yol kaplamalarında kullanılan pomza ve zeolitli YDB’nin NaCl etkisi altında aşınmaya karşı direnci üzerinde çalışmıştır. Çimento, pomza ve zeolit

üzerinde fiziksel, kimyasal ve mekanik analizler yapılmış, daha sonra çimentoya ikame edilerek “%0 pomza-%15 zeolit”, “%5 pomza-%10 zeolit”, “%10 pomza-%5 zeolit” ve “%15 pomza-%0 zeolit” olmak üzere dört tip YDB üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde taze beton deneyleri, NaCl etkisi altında basınç dayanımı deneyi ve aşınma direnci deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde 28. gün dayanımlarında %15 pomza-%0 zeolit betonunun en düşük, %0 pomza-%15 zeolit betonunun en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. 28 günlük bütün beton türlerinde rijit yol üst kaplamalarında sağlanması gereken sınır basınç dayanımı değerleri sağlanmıştır. Numunelerin aşınma dayanımı değerlerinin ise tüm beton türlerinde ASTM C 944-99’de belirtilen değerlerin altında kaldığı belirlenmiştir.

Sallı Bideci ve ark., (2013), zeolit katkısının çimento harç özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, portland çimentosuna %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında zeolit katılarak oluşturulan çimento harç numunelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda katkılı çimento özellikleri bakımından en uygun değerlerin %10 zeolit katkılı çimento harçlarından elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Shon ve Kim (2013), çalışmalarında ASTM standartlarında verilen F sınıfı uçucu küle alternatif olarak Batı Texas doğal zeolitini incelemişlerdir. Çalışmanın sonunda zeolitli karışımların hidratasyon ısı ve kuruma rötresinde azalmalar, alkali reaksiyon ve sülfat atağı direncinde iyileşmeler gözlenmiştir. Ayrıca dikkate alınan uçucu küle göre zeolitli karışımların su ihtiyacının daha fazla olduğunu ve düşük işlenebilirlik gösterdiklerini belirlemişlerdir.

Küçükyıldırım (2013), Türkiye’deki başlıca iki doğal zeolit rezervinden (Manisa/Gördes, Balıkesir/Bigadiç) alınan klinoptilolit zeolitlerinin ısı ve kimyasal ön işleminin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, puzolanik aktiviteleri ve dayanımları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Zeolitler 200 °C, 400 °C ve 600 °C’lerde ısı işlem uygulanarak asit (HCl) ve baz (NaOH) çözeltileri ile kimyasal işleme tabi tutulmuşlardır. Asit çözeltisi ile yapılan ön işlemler ile zeolitlerin kireç bağlama özelliğinin önemli ölçüde arttığı ve ısı işlemlerin kireç aktivitesi üzerinde fazla etkili olmadığı tespit edilmiştir. 600 °C’de gerçekleştirilen ısı işlemiyle

özellikle Bigadiç zeolitinin 28 günlük dayanım aktivite indeksinin önemli ölçüde artmış olduğu gözlenmiştir.

Akçaözoğlu ve ark., (2014), klinoptilolit içeren betonlar üzerinde yüksek sıcaklık etkisinin mikroyapısal düzeyde incelemelerini yapmışlardır. Bu çalışmada çimento ağırlığının %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında klinoptilolit katkısı kullanılan beton numuneler üretilmiştir. Deneysel çalışma parametreleri olarak kuru birim hacim ağırlıkları, su emme oranları, porozite oranları, basınç dayanımları ve ısı iletkenlik katsayıları gibi özelliklerinin yüksek sıcaklıklardaki etkilerini dikkate almışlardır. Numuneler iki farklı soğutmaya (yavaş soğutma, hızlı soğutma) maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda hızlı soğutmaya maruz bırakılan beton numunelerin basınç kayıplarının yavaş soğutulanlara göre daha fazla olduğunu vurgulamışlardır.

Aruntaş ve Beycioğlu, (2014), farklı oranlarda zeolit ikamesinin çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda, zeolit (klinoptilolit) katkıyı ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında portland çimentosu ile ikame ederek kullanmışlardır. Harç karışımları standart kum ve su miktarı sabit tutularak oluşturulmuştur. Araştırma sonucunda, priz başlangıcı süresi değerlerinin tüm serilerde TS EN 197-1'deki alt sınır değerini sağladığı görülmüştür. Çimentoların eğilme dayanımı sadece %5 ikame oranında artarken, %5'in üzerindeki bütün ikame oranlarında eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı değerleri ise TS EN 197-1'de öngörülen minimum dayanım değerini %10 ikame oranına kadar sağlamıştır.

Tydlitat ve ark., (2014), izotermal kalorimetre yöntemiyle çalıştıkları bu araştırmada, doğal zeolit içeren katkılı çimentolarda erken yaş hidrasyon ısısı gelişimini incelemişlerdir. Farklı yer değiştirme oranları altında hidrasyon ürünlerini detaylı olarak değerlendirmişlerdir. Zeolit katkısının yer değiştirme miktarının %10 civarında kullanılmasının hidrasyon işleminde iyileştirici etkilerinin gözlemlendiğini ancak yer değiştirme miktarının artmasıyla hidrasyon işlemine önemli bir katkı sağlamadığını, yalnızca ince filler malzemesi şeklinde bir katkı sağladığını vurgulamışlardır.

Yıldız ve Demirel, (2014), pomza ve zeolit içeren YDB'nin MgSO₄ etkisi altında rijit yol kaplaması olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla, üretilen

beton numuneleri üzerinde taze beton deneyleri, basınç dayanımı deneyi ve aşınma direnci deneyleri yapılmıştır. Ayrıca üretilen betonda bağlayıcı olarak kullanılan çimento, pomza ve zeolite ait fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, MgSO₄ etkisiyle YDB'lerin yüzeylerinde candlot tozu ve kalsiyum sülfoalimünat gibi betona zarar veren birtakım reaksiyon ürünleri oluşmuş ancak bu ürünlerin betonun merkezine doğru nüfuz edemediği görülmüştür. Numune üzerinde gözle görülebilen çatlak oluşmadığı, özellikle ilerleyen yaşlarda numunenin kenarlarında çok hafif kopmalar olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma dayanımı değerlerinin ise tüm beton türlerinde ASTM C944-99 standardında öngörülen değerleri sağladığını tespit etmişlerdir.

Öcal (2014), yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkılı betonun bazı özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu kapsamda doğal zeolit kullanılarak %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 ikame miktarlarında 7 farklı beton karışımı hazırlamıştır. Karışımlarda betonların su / bağlayıcı oranı sabit tutularak akışkanlaştırıcı kullanımı ile çökme değerleri 13±2 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan numunelerin kuru birim ağırlık, su emme oranı, boşluk oranı, basınç dayanımı değerleri ve ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık karşısındaki davranışlarını tespit etmek için, numuneler elektrikli fırında 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılarak bu sıcaklıklarda iki saat süreyle bekletilmişlerdir. Uygulanan deneyler ile yüksek sıcaklık etkisi altında doğal zeolit katkısının beton dayanımına olumlu etkileri görülmüştür. Doğal zeolit katkısının numunelerin erken yaşlardaki basınç dayanımlarını azalttığını, ilerleyen günlerde ise artırdığını belirlemiştir. Ayrıca karışımlarda doğal zeolit miktarının artışı beton agregaların yüksek sıcaklıktan daha az etkilenmesini sağlamış ve doğal zeolit ilavesinin betonun ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü sonucuna ulaşmıştır.

Hatipoğlu (2014), kireç ve çimento harçlarının taze ve sertleşmiş özelliklerinin zeolit ve toz haline getirilmiş Bayburt taşlarıyla iyileştirilebilirliğini araştırmıştır. Çalışma deney kapsamında katkı oranı %2.5, %5, %10, %20, %30, %40 ve %50 olarak belirlenmiş, her seri için 6 küp ve üç kiriş numune dökülmüştür. Çimento harçları için basınç ve eğilme dayanımı deneyi 14. gün, 21. gün ve 28. günlerde; kireç harçları için 28. gün, 56. gün ve 91. günlerde uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre zeolit ve Bayburt taşı katkısıyla kireç harcının basınç dayanımının %60 oranlarına

kadar arttığı, su iletme kapasitesinin 4 kat arttığı, su iletme süresinin 4 kat azaldığı ve priz süresinin ise %40'lara varan oranlarda iyileştirilebildiği gözlenmiştir. Ayrıca zeolit ve Bayburt taşı katkısı ile çimento harcının kontrol numunesine göre basınç dayanımının %65 oranında azaldığı, priz süresi ve kıvam değerlerinin ise kontrol altında tutulabildiği görülmüştür.

Liguori ve ark., (2015), çevre dostu çimento ürünlerinden olan zeolitlerin (eriyonit, şabazit, klinoptilolit ve filipsit) kimyasal ve mekanik özellikleri üzerine incelemeler yapmışlardır. Kullanılan zeolitın puzolanik aktivesini iki farklı yöntem (Fratini testi, kireç tüketimi deneyi) ile belirlemişlerdir. Üretilen harç numunelerine 28 günlük kür süreleri sonunda basınç dayanımı deneyi uygulamışlardır. Zeolit katkılı çimento üretimleri sayesinde çimento endüstrisine çevre dostu olarak sürdürülebilirlik ve ekonomik çözümler sağlandığını vurgulamışlardır.

Özen ve ark., (2016), üç farklı rezervden temin edilen (Manisa/Gördes, İzmir/Aliağa ve Balıkesir/Bigadiç) klinoptilolit, mordenit (İzmir/Foça) ve analsim'den (Çanakkale/Ayvacık) oluşan beş farklı doğal zeolit kullanarak üretilen çimento harç numuneleri üzerinde çeşitli kimyasal-fiziksel parametreleri incelemişlerdir. Doğal zeolitlerin puzolanik aktiviteleri XRD ve FTIR analizleri yardımıyla monitörize edilmiştir. Bu iki analiz yönteminden XRD yönteminin daha hassas sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Portland Çimentosu

Deneysel çalışmalarda kullanılan CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (PÇ), TS EN 197-1'e uygun olarak üretildiği üreticisi Ünye Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından beyan edilmiş, kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. PÇ'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	Çimento (%) ağırlıkça	Çimentonun Fiziksel Özellikleri	
SiO ₂	19.53	Özgül ağırlık, (g/cm ³)	3.12
Al ₂ O ₃	5.33	Priz başlangıcı, dk.	176
Fe ₂ O ₃	3.56	Priz sonu, dk.	238
CaO	62.26	Hacim genişmesi, mm	2
MgO	0.99	Blaine özgül yüzey (cm ² /g)	3210
SO ₃	3.02	2 gün. basınç dayanımı, MPa	32.3
Kızdırma kaybı	3.06	7 gün. basınç dayanımı, MPa	44.6
Toplam SiO ₂	20.22	28 gün. basınç dayanımı, MPa	53

3.1.2. Doğal Zeolitler

Çalışmada Manisa/Gördes bölgesinden temin edilen klinoptilolit türü doğal zeolit ile Ordu/Perşembe bölgesinden temin edilen analsim türü doğal zeolit kullanılmıştır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Çalışmada kullanılan doğal zeolitlerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan klinoptilolit örneği



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan analsim örneği

Çizelge 3.2. Doğal zeolitlerin kimyasal kompozisyonu

Kimyasal kompozisyon	Klinoptilolit (%)	Analsim (%)
SiO ₂	64.70	46.71
Al ₂ O ₃	11.21	17.24
Fe ₂ O ₃	1.38	9.21
CaO	2.08	3.03
MgO	0.79	5.29
Na ₂ O	0.38	4.84
K ₂ O	3.78	4.08
Kızdırma kaybı	11.80	7.00

3.1.3. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Malzemesi

Süper akışkanlaştırıcı beton katkısı, betonun su içeriğini artırmadan ve ayrıştırma riski olmaksızın akışkanlığı önemli oranda artırır. Kullanılan çimento cinsine bağlı olarak kıvam koruma sağlarken, son dayanımlarda da olumsuz etki yapmamaktadır. Akışkanlaştırıcılık özelliği ile işlenebilirliği artırırken betonun daha kolay yerleşmesine imkân sağlar. Su azaltıcı etkisiyle son dayanımlarda önemli artış sağlar. Betonun su geçirimsizliğini artırır. Büzülme ve sünmeyi azaltır.

Deneysel çalışmalarda öğütülmüş doğal zeolit yer değişimi ile hazırlanan harç ve beton karışımlarında etkinliğini test etmek amacıyla TS EN 934-2 standardına uygun melamin esaslı modifiye polimer Sikament F-06 olarak anılan süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi karışım suyuna ilave edilerek kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Harçların üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı katkı malzemesi

3.1.4. Agregalar

Betonda kullanılacak agreganın uygun olup olmadığının tespit edilmesi, elek analizi yapılarak hesapla bulunan granulometri eğrisinin standartta gösterilen sınır değer eğrileri ile ideal eğrinin bulunduğu bölgenin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Agregalar ideal eğrinin bulunduğu bölgede bulunursa karışımın agrega tane boyutu ideal iriliktir.

Elek analizi için alınan numuneler etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur (Şekil 3.4). Etüvden alınan numune soğutulduktan sonra, kare delikli elek setine, en büyük elek üstte (büyükten küçüğe doğru) olmak üzere sırayla dizilmiş bir şekilde konur. Eleme işleminden sonra, her elek üzerinde kalan malzeme tartılır, çizelgeye yazılır. Her elek için bulunan toplam, agrega ağırlığına bölünüp 100 ile çarpılarak, her elek üzerinde kalan malzeme yüzdesi bulunur. Her elekten geçen malzeme yüzdeleri grafiğe işlenerek öngörülen elek analizi sınır değerleriyle karşılaştırılır.



Şekil 3.4. Agrega numunelerinin etüvde kurutulması

Beton karışımlarında en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan doğal şekillenmiş agrega kullanılmıştır. Agregalar 0-5.6 mm, 4-16 mm ve 8-32 mm boyut gruplarında Ordu Altaş İnşaat A.Ş'den temin edilmiştir. Uygun tane boyut dağılımını elde edebilmek için TS EN 933-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen elek analiziyle 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm şeklinde sınıflandırılmıştır (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6). Agrega gruplarının tane boyut dağılımı verileri Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Eleme işleminde kullanılan elekler



Şekil 3.6. Agregaların sınıflandırılması

Çizelge 3.3. Agregra gruplarının tane boyut dağılımı verileri

Elek boyutu, mm	Kümülatif Geçen, %		
	0-6 mm	4-16 mm	8-32 mm
32	100.0	100	100
16	100.0	100	99.8
11.2	100.0	66.6	14.4
8	100.0	25.2	-
5.6	91.8	2	-
4	84.6	0.1	-
2	52.8	-	-
1	38.0	-	-
0.5	28.0	-	-
0.25	18.2	-	-
0.125	10.0	-	-
0.063	3.1	-	-

3.1.5. CEN Standart Kumu

Deneysel çalışmalarda kullanılan CEN referans kumu, tercihen yuvarlak tanecikli ve silisyum dioksit miktarı en az % 98 olan doğal silis kumu özelliğinde olmalıdır.

Çimento harç numunelerinin üretiminde kullanılmak üzere TS EN 196-1 standartlarına uygun CEN standart kumu kullanılmıştır (Şekil 3.7). Kullanılan standart kum Limak Batı Çimento San. ve Tic. A.Ş. ürünüdür. Kumun elek analizi Çizelge 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.7. Harçların üretiminde kullanılan CEN standart kumu

Çizelge 3.4. CEN standart kumunun tane büyüklüğü dağılımı (Binici ve ark., 2011)

Kare Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2.00	0
1.60	7±5
1.61	33±5
1.62	67±5
1.63	87±5
1.64	99±5

3.2. Yöntem

Bu çalışmada; iki farklı rezervden temin edilen analsim (Ordu/Perşembe) ve klinoptilolit (Manisa/Gördes) doğal zeolitleri kullanılarak farklı oranlarda (%0, %10, %30 ve %50) yer değiştirmeli çimento harç ve beton numunelerden oluşan 14 adet deney serisi oluşturulmuştur. Bu deney serilerinin numuneleri üzerinde dayanım gelişimi ve dayanıklılığa yönelik bir takım standart deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deney serileri içinde öncelikle kendi aralarında daha sonra birbirleriyle olmak üzere karşılaştırılmıştır. Deneyler Ordu Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Kimyasal ve Mineralojik Karakterizasyon

Klinoptilolit numunesinin kimyasal kompozisyonunun tespiti için yapılan X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi, İTÜ Maden Fakültesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçları malzemenin temin edildiği Gördes Zeolit Madencilik Sanayii

ve Ticaret A.Ş. tarafından belirlenmiştir. XRD analizi “Bruker D8 Advance” X-Işınları Difraktometresinde, CuK_{α} radyasyon ve Ni filtre kullanılarak ve sayım 40kV, 40mA şartlarında ve çekim hızı 2-45 °2θ arasında olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Klinoptilolit örneğinin taramalı elektron mikroskobu kullanılarak tespit edilen SEM görüntüleri de aynı firma tarafından yapılan analiz sonuç raporlarından elde edilmiştir.

Analsim numunesinin kimyasal kompozisyonunun tespiti için ise X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü, Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarlarından, Votorantim Çimento A.Ş. ve AcmeLabs (Canada) laboratuvarlarından elde edilen kimyasal analiz sonuçları karşılaştırma amaçlı olarak yaptırılmıştır. Numunenin XRD analizinde Cu X-ışın tüplü Panalytical X’Pert Powder XRD analiz cihazı kullanılarak 2°-70° arasında XRD difraktogram çekimleri yapılmıştır. Analsim örneğinin taramalı elektron mikroskobu kullanılarak tespit edilen SEM görüntüleri de MTA tarafından yapılan analiz sonuç raporlarından elde edilmiştir.

3.2.2. Puzolanik Aktivite Deneyleri

Puzolanik aktivite deneyi, TS 25’de doğal puzolanın belirli bir incelikte öğütülüp su ve kalsiyum hidroksitle karıştırılması ile elde edilen harcın basınç dayanımı cinsinden tespit edilen hidrolik özelliği olarak tanımlanmıştır. Çalışmada numuneler hazırlanmış ve hazırlanan numunelere ait kalıpların üstü buharlaşmayı önleyecek şekilde cam plaka ile kapatılmıştır. Numuneler 24 saat (23 ± 2) °C’lik oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıplar sökülmeden (55 ± 2) °C sıcaklıktaki bir etüv içinde 6 gün daha bekletilmiştir. Numuneler etüvden çıkartılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmış ve TS EN 196-1’e göre basınç dayanımı tayini deneyine tabi tutulmuştur.

3.2.3. Agregat Deneyleri

Agregatlar üzerinde deneylere başlamadan önce deneye tabi tutulacak agregalarda aranacak en önemli özellik alındığı kaynağı tam olarak temsil etmesidir. Malzeme kaynağının özelliğini temsil eden, yapılacak deney için yeterli miktara indirilmesi dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) ve bölgeçle numune hazırlama yöntemi ile yapılır.

Bu tez çalışmasında agregaların mineralojik ve petrografik analizi, agrega birim hacim ağırlığı ve su emme oranı tayini deneyi ile metilen mavisi deneyi gerçekleştirilmiştir.

3.2.3.1. Agreganın Mineralojik ve Petrografik Analizi

Yeterince sertleşmiş ve beklenen dayanımına ulaşmış olan betonun özelliklerinin bileşimindeki malzemelerin özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Ancak betonun dış kuvvetler altındaki kırılma mekanizmasının bilinmesinden önce bu durumun böyle olmadığı düşünülmekteydi. Homojen yapıya sahip cisimler için geliştirilen elastisite teorileri betonda gözlenen olayları açıklamakta yetersiz kalmış, bunun nedeni olarak da homojen, izotrop ve sürekli malzemeler için geçerli olan elastisite teorisinin sürekli bir ortam olmayan, heterojen ve anizotrop yapıya sahip olan betonlara uygulanması gösterilmiştir (Akgün, 1997).

Beton, agrega ve sertleşmiş çimento hamuru olmak üzere iki fazlı heterojen malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Çimento hamuru genel olarak jel özelliğine ve çok ince boyutlu çimento tanelerinin hidrasyonu ile oluşan amorf yapıya sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle kendi içerisinde heterojen olan çimento hamuru gibi agrega da kendi fazı içinde son derece heterojen bir yapıdadır.

Viskoz akım teorisinde, sertleşmiş çimento hamuru fazı yüksek viskoziteli bir sıvı olarak değerlendirilmektedir (Durmuş ve Pul, 1993; Onaran, 1993). Sertleşmiş çimento hamurunda, sabit gerilme altında doğal taşlardakinden ileri düzeyde şekil değiştirmelerin meydana gelmesi bu teoriyi desteklemektedir. Yani sertleşmiş çimento hamurunu viskoz bir cisim olarak dikkate almak mümkündür.

Daha önce de belirtildiği gibi heterojen yapıya sahip olan betonun sertleşmiş çimento hamuru fazında sünme, şişme ve rötne gibi şekil değiştirmeler meydana geldiğinden klasik teorilerle malzemenin dış kuvvetler altındaki davranışı belirlenmemektedir. Elastisite teorisine elde edilen sonuçlar ile beton üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar birbirinden farklı olmaktadır. Bu fark, birbirinden değişik yapıdaki iki cisimden meydana gelen, aderansları kendisini oluşturan cisimlerin özelliklerine bağlı kompozit malzemenin kendi heterojen yapısından ileri gelmektedir.

Feret (1892)'in baz alınan çalışmalarıyla agrega petrografik yapısının beton kırılma mekanizması üzerinde etkisinin olmadığı düşüncesi beton dayanımına etki eden faktörleri;

- Çimento türü ve miktarı,
- Su/çimento oranı,
- Agrega granülometrisi,
- Agrega birim kütlesi,
- Agrega yüzey temizliği,
- Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü,
- Betonda hapsedilen hava oranı,
- Yapım ve saklama koşulları,
- Sertleşme koşulları

olarak kabul etmektedir. Ancak agrega petrografik yapısını belirlemek, betona yerleşmiş bulunan agregaların çimento hamuruyla bağlantılarının özelliklerini belirlemek anlamına geldiğinden bu etkenler arasında olması gerekmektedir (Hüsem, 1995).

Agregaların TS 10088 EN 932-3'e göre petrografik analize tabi tutulması donma-çözülme olayından etkilenme durumu hakkında da bize bilgi verebilmektedir. Bu tür tanelerin varlığının gözlenmesi veya şüphelenilmesi halinde, su emme oranı ve magnezyum sülfat deneylerinden biri agreganın donma-çözülmeye karşı direncini belirlemede kullanılabilir (Şimşek, 2011).

Bu bilgiler ışığında çalışmada kullanılan agregaların mineralojik ve petrografik analizi bu tez çalışmasının içerisinde yer almıştır. Çalışmada kullanılan agreganın teminini Ordu Altaş İnşaat A.Ş. sağlamıştır. Dolayısıyla söz konusu agreganın mineralojik ve petrografik analiz sonuçları, santral tarafından yaptırılmış bilgilerden elde edilmiştir.

3.2.3.2. Agrega Birim Hacim Ağırlıkları ve Su Emme Oranı

Bilindiği gibi, agreganın yüzey neminden kaynaklanan su miktarı göz ardı edilirse beton karışımında su miktarının artmasına neden olabilmektedir. Su miktarının artması da su-çimento oranını değiştirir. Bu oran değişirse yüksek kaliteli beton elde

etmemiz mümkün olmayacaktır. Bundan dolayı agregalardaki yüzey nemi miktarı hesaplanarak beton karışımı için gerekli su miktarından çıkarılmalıdır. Aynı şekilde agreganın tanımlanması ve bileşen hesaplarında kullanılmak üzere agreganın birim hacim ağırlıklarının bilinmesi zorunludur.

Çalışmada kullanılan agregaların TS EN 1097-6 standardına uygun olarak birim hacim ağırlıkları ve su emme oranı belirlenmiştir.

3.2.3.3. Metilen Mavisi Deneyi

Agregaların, beton için uygun olup olmadığının belirlenmesi için granülometri, birim hacim ağırlığı, su emme ve ince tanelerin miktarının tayini gibi kontroller yapılmaktadır. Doğal agregaların ince tane grubu içinde kil mineralleri bulunabilmektedir. Bu malzemelerin aşırı miktarda olması beton ve harç üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle ince agregalarda 0.063 mm elek altı malzeme miktarının belirlenmesi amacıyla metilen mavisi deneyi yapılır (bkz. Ek 1).

Çalışmanın bu bölümünde 0-5.6 mm agregalar üzerinde TS EN 933-9 standartlarına uygun olarak metilen mavisi deneyi gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Çimento Harç Numuneleri Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Yöntemleri

Çalışmanın bu bölümünde ağırlıkça düşük (%10), orta (%30) ve yüksek (%50) miktarlarda doğal zeolit içeren ve çimento ile yer değiştirmeli olarak hazırlanmış çimento harç numuneleri ile yer değiştirmesiz (%0) geleneksel harç numuneler üzerinde basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, aşınma direnci ve hidrasyon ısısının incelenmesi amaçlanmıştır.

Doğal zeolit yer değiştirmeli çimento harçlarının elde edilmesinde ince öğütülmüş olan Gördes zeoliti (klinoptilolit) ve Perşembe zeoliti (analsim) kullanılmış olup, elde edilen çimento harçlarının etiket isimleri ve açıklamaları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Doğal zeolit yer değiştirmeli çimento harçlarının normal kıvam için gerekli olan su miktarları, priz süreleri, hacim genleşmesi değerleri, aşınma miktarları tespit edilmiş ve bu özellikler Portland çimentosu ile karşılaştırılmıştır. Çimento harçlarının üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların detayları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.5. Çimento harçlarının etiket isimleri ve açıklamaları

Çimento	Açıklama
G	CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (geleneksel)
K10	Ağırlıkça %10 oranında Klinoptilolit yer değiştirmeli çimento
K30	Ağırlıkça %30 oranında Klinoptilolit yer değiştirmeli çimento
K50	Ağırlıkça %50 oranında Klinoptilolit yer değiştirmeli çimento
A10	Ağırlıkça %10 oranında Analsim yer değiştirmeli çimento
A30	Ağırlıkça %30 oranında Analsim yer değiştirmeli çimento
A50	Ağırlıkça %50 oranında Analsim yer değiştirmeli çimento

Ayrıca, üretilen çimento harç numuneleri termokupl bağlantılı datalogger ile ilk 24 saatteki sıcaklık ölçümleri kontrol altında tutulmuşlardır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Çimento harç numunelerinin datalogger ile sıcaklık ölçümleri

3.2.4.1. Normal Kıvam, Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi

Farklı oranlarda doğal zeolit içeren çimentoların ve kontrol çimentosunun normal kıvam su ihtiyacı ve priz süreleri vikat cihazı (Şekil 3.9) ile, hacim genleşmesi deneyleri ise Le Chatelier deney seti (Şekil 3.10) ile TS EN 196-3 standart metotlarına göre tespit edilmiştir.



Şekil 3.9. Vikat cihazı



Şekil 3.10. Le Chatelier deney seti

3.2.4.2. Hidratasyon Isısı Tayini

Çimento ve suyun birleştiği andan itibaren bu iki malzeme arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara “hidratasyon” adı verilmektedir. Yerleştiğinde yumuşak plastik durumda olan çimento hamuru, zaman ilerledikçe daha az plastik durumuna gelmekte ve katılaşarak sertleşmektedir (Erdoğan, 2010).

Çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin su ile birleşerek başlattıkları hidrasyon reaksiyonları ekzotermik yani dışarıya ısı çıkaran türdendir. Kimyasal reaksiyonlar devam ederken ısının açığa çıkması da devam eder. Ancak, hidrasyon olayı ilk saatlerde oldukça hızlı gerçekleşmekte olup zaman ilerledikçe hızı yavaşlamaktadır. Çimentonun hidrasyon ısısı çimentonun belirli bir sıcaklık koşulunda hidrasyona başlayıp hidrasyon sonuna kadar açığa çıkardığı ısı miktarıdır. Hidrasyon ısısı kalori/gram (cal/g) veya joule / gram (j/g) birimleri ile ifade edilir. $1 \text{ cal/g} = 4.19 \text{ j/g}$ 'dır (Erdoğan, 1995).

Portland çimentosunun toplam hidrasyon ısısı portland çimentosu - doğal puzolan karışımından genellikle daha fazla olduğu bilinmektedir (Grymek, 1980). Bununla beraber, puzolanik tepkimeler sonucu ısı açığa çıkmaktadır. Çimentoya puzolan katılması hidrasyon ısısı hızı - zaman diyagramının daha dikleşmesine, pasif dönemin kısalmasına ve maksimum değere daha erken ulaşılmasına neden olur (Gündeşli, 2008). Doğal puzolanların alit (C₃S) hidrasyonunu hızlandırdığı düşünülmekte olsa da alit hidrasyonunun doğal puzolanlar tarafından hızlandırılmasının sebebi tam olarak açıklanamamıştır (Akyazı, 2011).

Bu çalışmada da %0, %10, %30 ve %50 oranlarında puzolan yer değiştirmeli çimentolar üzerinde hidrasyon ısısı (mikrokalorimetre) ölçümleri Ankara DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Beton-Malzeme Laboratuvarlarında hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir. Belirlenen karışım oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde hidrasyon ısısı tayini deneyi TAM AIR İzotermal Kalorimetre Cihazı (Şekil 3.11) ile 20 °C sabit sıcaklık ve 0.5 su / çimento oranında yapılmıştır. Hazırlanan örneklerden 5 gram numune alınarak su / çimento oranı 0.5 olacak şekilde 2.5 gram su cihazın tüpüne yerleştirilerek üzerine çimento dökülmüştür ve bir spatula yardımı ile karıştırılmıştır. Hazırlanan tüp içerisindeki karışım cihazın haznesine yerleştirilerek ölçümler TSE CEN/TR 16632 standardına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 3.11. İzotermal kalorimetre cihazı

3.2.4.3. Böhme Aşınma Deneyi

Aşınma, yavaş tempoda olan fiziksel ve mekanik bir olaydır. Birbirine temas eden ve birbirine göre izafi hareket yapan cisimlerin yüzeylerindeki aşındırıcı maddelerin sürtünmesiyle oluşan boyutça ve kütlece azalma aşınma kaybı olarak tanımlanır. Genel olarak aşınmanın miktarı; malzemenin türü, aşınma yüzeyinin durumu, sürtünme koşulları (devir sayısı, kuvvetin şiddeti vb.) ve çevrenin kimyasal etkilerine bağlıdır.

Beton bileşenlerinin tümü üzerinde gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda aşınma direncinin istenilen düzeye çıkartılabileceği bilinmektedir. Buradan, bir beton bileşeni olan çimentonun tek başına aşınma direnci özelliklerinin iyileştirilmesi son ürün olan betonun aşınma direncine katkı sağlayacağı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, aşınma direnci beklentisi olan yapılarda (araç ve yaya trafiği, iş makinaları, ağır cisimlerin sürüklenmesinden doğan kuru sürtünme etkisi görülen kaldırım, beton yollar, fabrika taban yüzeyleri ile içinde askı halinde yüzer maddelerin bulunduğu sıvıların beton yüzeyini çizerek aşındırıcı etkilerine maruz su yapıları, külün sürtünmesi ile oluşan aşınma etkisinin görüldüğü duman bacaları vb.) çimento harçlarının aşınma direncinin artırılması ile aşınmanın meydana getireceği hasarların minimize edilmesi hususuna dikkat edilmektedir.

Doğal zeolit içeren çimento harçlarının ve kontrol çimentosu harcının Böhme aşınma deneyleri TS 2824 EN 1338 standart metotlarına göre gerçekleştirilmiştir.

Küp numuneler Böhme aşındırma diskinin üzerine, standart aşındırıcı serpilmiş ize gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Disk, numuneye (294 ± 3) N'luk aşındırma kuvveti ile 16 çevrim uygulanarak ve her çevrimde 22 tur olmak üzere döndürülmüştür (Şekil 3.12). Numunenin aşınma kaybı, hacmindeki azalma olarak hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda, ΔV ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$); hacimsel aşınma kaybını, Δm (gr); 16 periyot sonundaki ağırlık kaybı farkını, ρ (g/cm^3); birim hacim ağırlığını göstermek üzere (3.1) numaralı bağıntı kullanılmıştır.

$$\Delta V = \Delta m / \rho \quad (3.1)$$



Şekil 3.12. Böhme aşınma deneyi seti

3.2.4.4. Çimento Harç Numunelerinin Akışkanlaştırıcı İhtiyaçları ve Basınç Dayanımları

Düşük (%10), orta (%30) ve yüksek (%50) miktarlarda doğal zeolit içeren yer değiştirmeli çimento harç numuneleri doğal zeolit kullanımından kaynaklanan su ihtiyacı artışını sabitlemek amacıyla öncelikle akışkanlaştırıcı katkı malzemesi ihtiyaçları belirlenmiştir. Ardından aynı numuneler üzerinde doğal zeolitlerin belli yaşlardaki etkisini görmek için hazırlanan çimento harç numunelerinin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına ilişkin deneyler de TS EN 196-1' a uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Söz konusu standart deneyler için, malzeme tartılarak çimento mikserinde (Şekil 3.13 ve Şekil 3.14) toplam 450 gr bağlayıcı malzeme (PÇ+öğütülmüş doğal zeolit), 1375 gr standart kum ve 225 ml su kullanılarak harç karışımları hazırlanmıştır (Şekil 3.15). Harçların benzer işlenebilirliğe sahip olması için karışım suyuna akışkanlaştırıcı katkı ilave edilerek kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Hassas terazi



Şekil 3.14. Harçların üretiminde kullanılan çimento mikseri



Şekil 3.15. Çimento mikserinde harcın üretimi

Öğütülmüş iki ayrı doğal zeolit örneği ve geleneksel çimento harçlarının her biri 70.7 mm'lik küp kalıplara yerleştirilmiş (Şekil 3.16) ve 1 gün süreyle ıslak bez altında nemli kür uygulanmıştır. Sonrasında numuneler kalıptan çıkarılarak, deney gününe kadar kür havuzunda bekletilmiştir.

Sertleşmiş çimento harçlarının basınç dayanımları 2, 7 ve 28 günlük yaşlar için tespit edilmiştir.



Şekil 3.16. Harçların kalıplara yerleştirilmesi

3.2.5. Beton Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Yöntemleri

Beton numunelerin üretiminde mineral katkı malzemesi olarak ince öğütülmüş Gördes ve Perşembe doğal zeolitleri kullanılmıştır. Söz konusu doğal zeolit içeren beton karışımlarının, portland çimentosunun, düşük (%10), orta (%30) ve yüksek

(%50) miktarda doğal zeolitle yer değiştirmesi durumundaki, fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu oranların seçiminde düşük zeolit oranı yer değişimiyle yüksek dayanımlı beton performansı, orta ve yüksek düzeyde zeolit yer değişimi durumlarında ise nispeten daha düşük dayanımlı ancak daha az portland çimentosu içeren beton karışımı özellikleri hedeflenmiştir. 1, 2, 7, 14 ve 28 günlük seri numuneler yardımıyla da basınç dayanımının gelişim takipleri yapılmıştır.

3.2.5.1. Betonların Bileşimi ve Karışım Oranları

Üretilen betonların bileşim hesabında TS 802'de verilen mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır. Buna göre W_c , W_a , V_w ve V_h sırasıyla yerine konmuş $1m^3$ betondaki çimento kütlelerini (kg/m^3), agrega kütlelerini (kg/m^3), su hacmini (dm^3) ve hapsedilmiş hava hacmini, γ_c ve γ_a ise sırasıyla çimento ve agreganın doymuş yüzey kuru birim kütlelerini (kg/m^3) göstermek üzere agrega mutlak hacmi;

$$V_a = \frac{W_a}{\gamma_a} = 1000 - \left(\frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (3.2)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Agreganın ayrı agrega sınıfından meydana geldiği dikkate alındığında her bir agrega sınıfının kütlesi farklı olacaktır. B_i ve γ_{ai} sırasıyla her bir agrega sınıfının kütlece oranını ve doymuş kuru yüzeyli özgül kütlelerini göstermek üzere toplam agrega kütlesi, (3.2) bağıntısı yerine,

$$\sum_{i=1}^n \left(\beta_i \frac{W_a}{\gamma_{ai}} \right) = 1000 - \left(\frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (3.3)$$

bağıntısıyla daha hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Bu son bağıntıdan görüldüğü gibi hesaplanan toplam agrega kütlesi her bir agrega sınıfının kütlece oranıyla çarpılarak ($W_{ai} = \beta_i \cdot W_a$) her bir agrega sınıfının kütleleri elde edilmektedir. Bu şekilde belirlenen agrega kütlesi doymuş kuru yüzeyli agrega kütlesidir. Bu değerden doğal nem durumundaki agrega kütlesi değerine geçmek için,

$$DS = (SE - DN) \gamma_a \quad (3.4)$$

bağıntısı kullanılabilir. Burada DS, SE ve DN agreganın sırasıyla doyma suyu miktarı, kütlece su emme oranı ve doğal nem oranını göstermektedir. Bu bağıntıyla hesaplanan doyma suyu miktarını (kg/m^3), (3.2) bağıntısıyla belirlenen W_a değerinden çıkartmak gerekmektedir. Agreg a kütlesi (3.3) bağıntısıyla hesaplandığında doyma suyu da buna bağılı olarak her bir agreg a tane sınıfı için belirlenmeli, dolayısıyla da toplam doyma suyu miktarı da;

$$DS = \sum [(SE)_i - (DN)_i] \cdot W_{ai} \quad (3.5)$$

bağıntısıyla hesaplanmalıdır (Akgün, 2003).

Bu ilkeler doğrultusunda doğal zeolitlerin, beton karışımlarında portland çimentosuna yer değiştirilerek kullanımını incelemek için bağlayıcı içerisinde düşük (%10), orta (%30) ve yüksek (%50) oranda doğal zeolit içeren beton karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlar oluşturulurken belirtilen oranlarda doğal zeolit, 350 kg/m^3 bağlayıcı ve 0.50 su/bağlayıcı oranı kullanılmıştır.

Taze beton karışımları, yapısal uygulamalar için ortalama çökme değerine sahip olmaları amacıyla yeterli miktarda melamin bazlı akışkanlaştırıcı katkı maddesi karışım suyuna ilave edilerek hazırlanmıştır.

Hazırlanan beton karışımlarına ilişkin karışım oranları Çizelge 3.6' da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Beton karışım oranları

Beton Karışımları	G	K10	K30	K50	A10	A30	A50
Portland Çimentosu, kg/m^3	350	315	245	175	350	245	175
Öğütülmüş Zeolit, kg/m^3	-	35	105	175	35	105	175
Su, kg/m^3	175	175	175	175	175	175	175
Su / Çimento Oranı	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0-4 mm Agreg a, kg/m^3	789.99	785.77	777.34	767.23	787.99	783.99	778.31
4-8 mm Agreg a, kg/m^3	351.11	349.23	345.48	340.99	350.22	348.44	345.91
8-16 mm Agreg a, kg/m^3	614.44	611.16	604.60	596.73	612.88	609.77	605.35
Akışkanlaştırıcı, kg/m^3	5.25	5.25	5.50	7.00	5.25	5.50	7.00

3.2.5.2. Betonların Üretimi

Betonların üretiminde 56 litre karıştırma kapasiteli düşey eksenli (Pan tipi) bir betoniyer kullanılmıştır (Şekil 3.17).

Her bir sınıf agrega tartılarak, önceden nemlendirilen betoniyere konulmuş ve doyma suyu da ilave edilerek 3 dakika, daha sonra çimento ilavesiyle 3 dakika, bunu takiben betoniyer hiç durdurulmadan karma suyu ilave edilerek bir üç dakika daha karıştırılmıştır. Katkılı hazırlanan 0.50 su/çimento oranına sahip betonlarda gereken miktarlarda “Sikament F06” ticari adıyla pazarlanan süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmış ve karma suyuna ilave edilerek bileşime katılmıştır. Doğal agregayla üretilen betonun işlenebilirlik özelliğinin sabitliğini sağlamak amacıyla değişik oranlarda katkı malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Düşey eksenli (Pan tipi) betoniyer

3.2.5.3. Numuneler ve Saklama Koşulları

Hazırlanan her bir beton karışımı serisinden basınç dayanımı deneylerinde kullanılmak üzere, yeterli sayıda 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir (Şekil 3.18). Döküm öncesinde her seriye ait Slump (çökme) deneyi

gerçekleştirilmiştir. Taze beton karışımları kalıplara yerleştirildikten sonra sarsma tablası yardımıyla sıkıştırılmıştır (Şekil 3.19).

Numuneler, dökümünden 24 saat sonrasında kalıplardan çıkarılarak, kür havuzuna yerleştirilmiş ve 22 ± 2 °C sıcaklığındaki suda deney gününe kadar saklanmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.18. Kalıplara yerleştirilmiş numuneler



Şekil 3.19. Numunelerin yerleştirilmesinde kullanılan sarsma tablası



Şekil 3.20. Numunelerin kür havuzundaki saklanma koşulları

3.2.5.4. Deneysel Yöntemler

Taze beton üzerinde gerçekleştirilen Slump (çökme) deneyi ile betonun işlenebilirliğinin saptanması amaçlanmıştır (Şekil 3.21). Hazırlanan taze beton karışımlarının Slump deneyi TS EN 12350-2 standartlarına uygun gerçekleştirilmiştir. Slump deneyinde üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan kesik koni kullanılmıştır. Koni içine eşit yükseklikte 3 tabaka halinde beton doldurulmuştur. Her tabaka doldurulduktan sonra 25 defa çelik çubuk ile şişlenmiştir. Bu işlemle malzemenin yerleşmesi sağlanmaktadır. Koni tamamen doldurulduktan sonra mala ile tesviyesi yapılır ve doldurulan harç sarsılmadan kesik koni düşey şekilde dik olarak yukarı çekilir. Böylelikle kesik koninin üst kenarı ile yayılan betonun üstünde oluşan en yüksek orta ve en düşük yükseklikler alınarak çökme miktarı bulunur.

Çökme miktarının fazla olması betonun kendi ağırlığı altındaki hareket etme özelliğinin büyük olduğunu göstermektedir. Bu bakımdan çökme miktarı ne kadar fazlaysa işlenebilme özelliği derecesi o kadar fazladır.



Şekil 3.21. Taze betonun işlenebilirliğinin tespitinde kullanılan Slump deney seti

Basınç dayanımı deneyi için her bir karışımdan 15x15x15 cm boyutlarında hazırlanmış küp numuneler su küründen deney anı zamanlamaları ile çıkarılarak, oda koşullarında kuruması beklenmiştir. Daha sonra, TS EN 12390-3'e göre 1, 2, 7, 14 ve 28 günlük yaşlarda deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları her yaş için numunelerin ortalama değerleri alınarak kaydedilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Doğal Zeolitlerin Karakterizasyonu

4.1.1. X-Işınları Difraktometresi Özellikleri

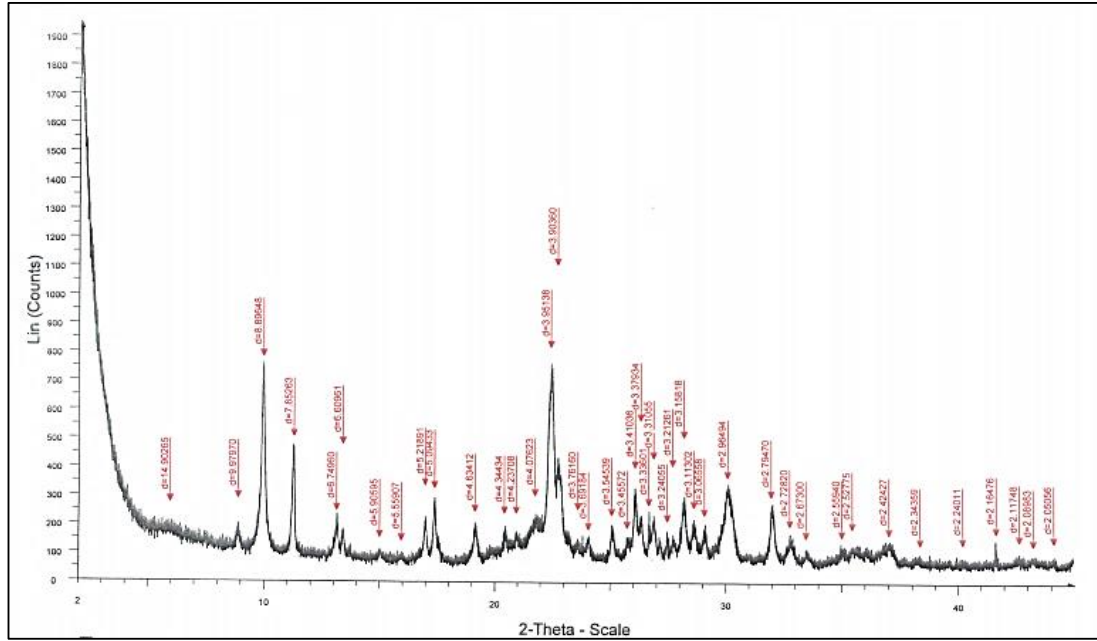
Klinoptilolit numunesi ile ilgili firma tarafından gönderilen raporun ışığında numunenin X- Işınları Difraksiyon Analizi (XRD) ile belirlenen mineralojik bileşim sonucuna göre belirlenen mineral modal oranlarına göre, numune zeolit endüstriyel hammaddesi karakterindedir. Numunenin XRD analizi sonucu belirlenen modal-mineralojik bileşimi aşağıda verilmiştir.

- Klinoptilolit (Silikat – Zeolit Grup Minerali) (%80-85)
- Opal-CT (Opal- Kritobalit/Tridimit) (Silikat – Silis Grup Minerali) (%10-15)
- Kuvars (Silikat – Silis Grup Minerali) (%< 2)
- Feldspat (Na ve K-Feldspat) (Silikat –Feldspat Grup Minerali) (%< 2)
- İllit-Mika (Silikat-Kil-Mika Grup Minerali) (% < 5)

Numunedeki ana bileşen (% > 50) bir zeolit grup minerali olan ve höylandit – klinoptilolit izomorf serisi üyesi olan “klinoptilolit”tir (Çizelge 4.1). Numunedeki klinoptilolit oranı % 80-85 oranındadır. Diğer mineraller olarak; opal-CT, belirli bir oranda, illit mika, kuvars ve feldspat ise düşük ve eser oranlardadır. Numune, zeolit (klinoptilolit) kullanım alanları için istenen ulusal ve uluslararası standartları karşılar niteliktedir. Numune örneğinin X ışınları difraktometresi analizi Şekil 4.1’de verilmektedir. Klinoptilolit örneğinin taramalı elektron mikroskobu kullanılarak tespit edilen SEM görüntüleri de aynı firma tarafından yapılan analiz sonuç raporlarından elde edilmiştir (Şekil 4.2).

Çizelge 4.1. Doğal zeolitlerin sınıflandırılması (Barrer, 1978)

1-Analsim Grubu	5-Höyländit Grubu
Analsim	Höyländit
Lomontit	Klinoptilolit
2-Natrolit Grubu	Stilbit
Natrolit	6-Mordenit Grubu
Tomsolit	Mordenit
Edingtonit	Ferriyetit
3-Şabazit Grubu	Deshiartit
Şabazit	7-Foyasit Grubu
Eriyonit	Foyasit
Gmelibit	Linde A
4-Filipsit Grubu	8-Melanofiyagit Grubu
Filipsit	Klarat
Gismondin	Melanofiyagit Grubu SM-39



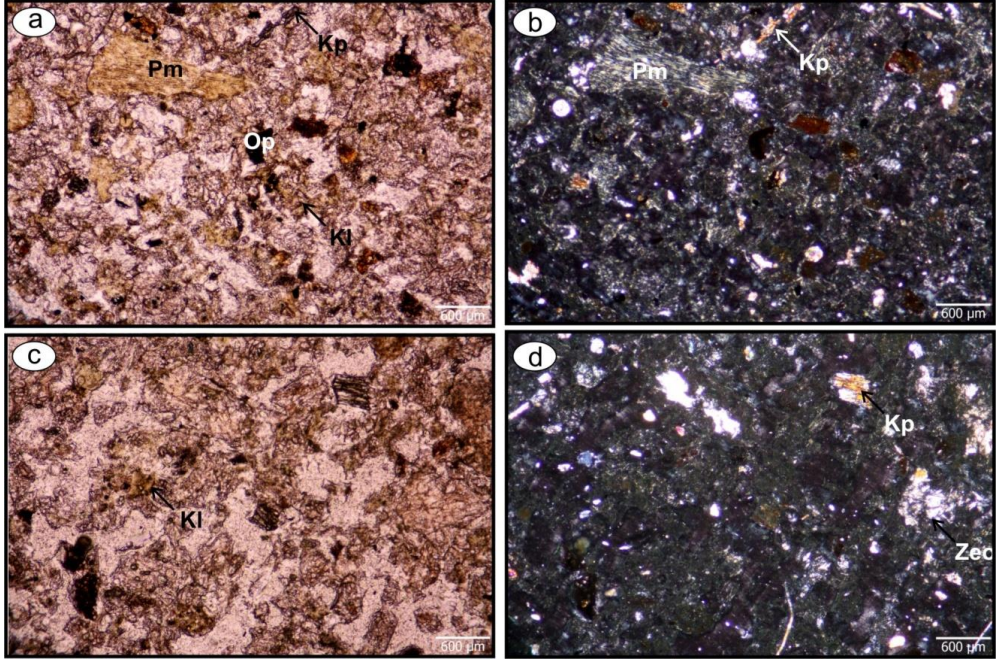
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan klinoptilolit örneğinin XRD kırınım desenleri



Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan klinoptilolit örneğinin SEM görüntüsü

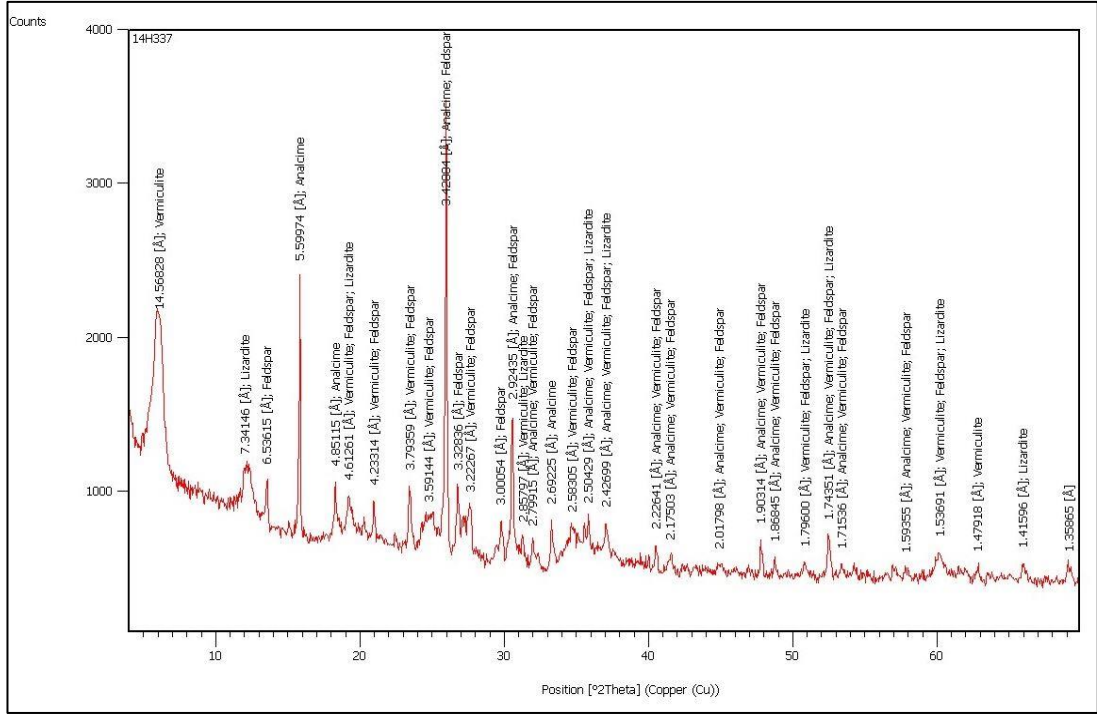
Analsim numunesinin mineralojik karakteristik özellikleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği laboratuvarlarında kayaç numuneler üzerinden tespit edilmiştir. Buna göre kayaç vitrik tüf niteliğinde olup cam kıymıkları ve kristal bileşenlerden oluşmaktadır. Cam kıymıkları yoğun olarak altere olmuş zeolit ve klorite dönüşmüştür. Bağlayıcı malzeme içerisinde yer yer kripto kristalen silis oluşumları mevcuttur. Kristal bileşenler yoğun olarak parçalanmış ojit (piroksen) ve çok az oranda biyotitten oluşmaktadır. Opak mineraller kayaç içerisinde %5'ten az oranda bulunmakta olup, öz şekilsiz kristaller görünümündedir.

Kayaç alterasyondan yoğun olarak etkilenmiş olup kloritleşme ve zeolitleşme yaygındır. Oldukça az oranda karbonatlaşma tespit edilmiş olup yaygınlık arz etmemektedir. Bağlayıcı malzeme içerisinde yer yer silisleşme tespit edilmiştir (Şekil 4.3). Analsim numunesi de klinoptilolit numunesi gibi istenen ulusal ve uluslararası standartları karşılamaktadır.

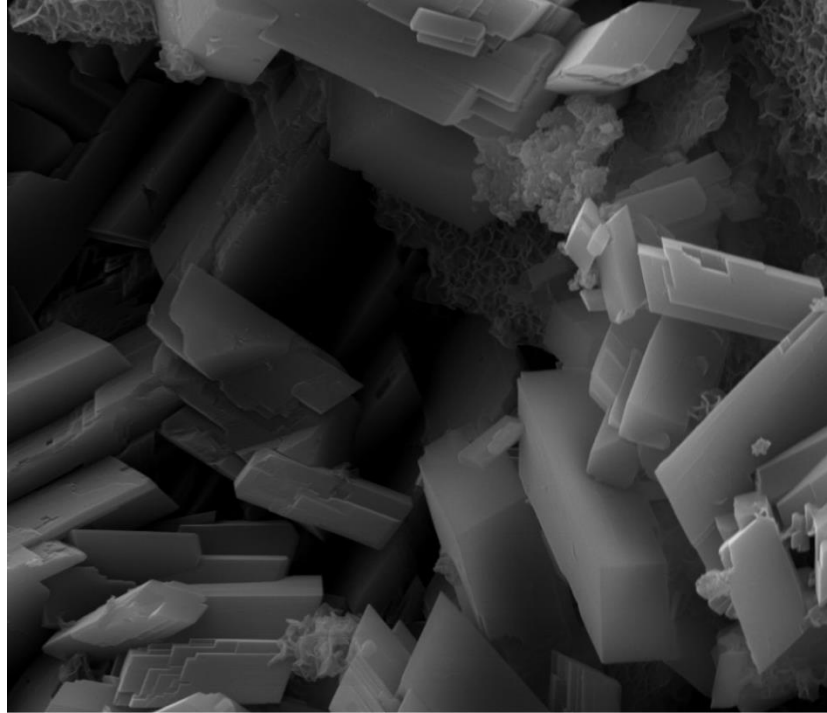


Şekil 4.3. Analsim örneğinin polarizan mikroskop görüntüsü (İnce taneli örnekte a)T.N., b) Ç.N.’de pomza parçaları, pomza parçaları ve bağlayıcıda gerçekleşen kloritleşme İri taneli örnekte c) T.N., d) Ç.N.’de kloritleşme ve zeolitlenme (T.N., Tek nikol, Ç.N., Çapraz nikol; Pm, pomza parçası; Op, opak mineral; Kp, klinopiroksen; Zeo, zeolitlenme; Kl, kloritleşme)

Analsim örneğinin X- Işınları Difraksiyon Analizi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak tespit edilen SEM görüntüleri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarlarından hizmet alımı yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te verilmektedir.



Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan analcim örneğinin XRD kırınım desenleri



Şekil 4.5. Çalışmada kullanılan analcim örneğinin SEM görüntüsü

4.1.2. Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri

Bu çalışmada kullanılmak üzere iki farklı doğal zeolit örneği bilyeli öğütücüde öğütülerek elde edilmiştir. Klinoptilolit zeolitinin öğütme işlemleri zeolitinin temin

edildiği firmada analsim zeolitinin öğütme işlemleri ise Samsun Votorantim Çimento A.Ş.'de yapılmıştır. İncelik parametresi olarak 45-µm elekten ASTM C 430 standardına kapsamında elekten geçen malzeme yüzdesi kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen yöntemle öğütülerek elde edilen numunelerin özgül ağırlıkları ile Blaine incelikleri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2. Zeolit örneklerinin özgül ağırlık ve Blaine incelik değerleri

Zeolit	Özgül Ağırlık (g/cm³)	Blaine İnceliği (cm²/g)
Klinoptilolit	2.11	4079
Analsim	2.28	4780

4.2. Zeolitlerin Puzolanik Aktivitesi

TS 25'te trasların (puzolanların) uygunluk kriterleri tanımlanırken doğal puzolanın puzolanik aktivite deneyi yapıldığında kireç-doğal puzolan karışımı ile hazırlanan numunelerin 7 günlük basınç dayanımı göz önüne alınmıştır. Bu değer için en az 4 MPa sınır değeri verilmiştir. Klinoptilolit için yapılan deneysel çalışmada kireç-zeolit karışımı numune için basınç dayanımı değeri 9.02 MPa olarak bulunmuştur. Analsim için ise kireç-zeolit karışımı numunenin basınç dayanımı 6.3 MPa olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca yine TS 25'te $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ toplamının kütlece en az %70 olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu toplamın değeri klinoptilolit için 77.3, analsim için ise 73.16 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler zeolitlerin yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğunu ve zeolitlerin puzolan olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

4.3. Agregada Deneyleri

4.3.1. Agreganın Mineralojik ve Petrografik Analizi

Daha öncede belirtildiği gibi Ordu Altaş İnşaat A.Ş.'den temin edilen agregaların mineralojik ve petrografik analiz sonuçları aşağıdaki gibidir.

Santral tarafından gönderilen raporun ışığında çalışmada kullanılan agregada makro tanımıyla yuvarlak, çakıl numunesi ve üzerindeki kayaç kırıntıları gözle görülebilecek durumdadır. Polarizan mikroskopta tanımlanan özelliği ile numune bol

gözenekli, birbirine yüksek ısıda lehimlenmiş kayaç kırıntısı ve kristal parçalarından oluşmaktadır.

Kayaçta plajiyoklas primer olarak bol miktarda olmakla birlikte yoğun olarak altere olmuş albitleşmiş, zeolitleşmiş, kalsitleşmiş ve nadiren killeşmiş olarak görülmüştür. Bileşimleri genellikle nötr-bazik olup ayrık kristal olarak %12 oranındadır. Numunede %20 oranında ve yoğun altere durumda bazik kayaç kırıntıları mevcuttur. Plajiyoklas, ferromagnezyen mineral ve ikincil ürünlerinden oluşmaktadır. Hâkim sekonder mineral olarak (%20) zeolit, bol miktarda ve sekonder olarak (%12) klorit, ikincil olarak (%3) kuvars, %6 oranında kalsit, hem saçınım halinde primer ve hem de ferromagnezyen kristallerin ayrışma ürünü olarak yaklaşık %2 oranında magnetit, sekonder olarak gelişmiş kristaller halinde (%6) hornblend, %8 oranında aktinolit-tremolit ve %4 kalsedon bulunmaktadır. Killeşme düzeyi orta seviyededir. Boşluk (gözenek) %7 olup gözeneklerin birbirleriyle irtibatı az durumdadır.

4.3.2. Agregaların Birim Hacim Ağırlıkları ve Su Emme Oranı

TS EN 1097-6 standardına uygun olarak birim hacim ağırlıkları ve su emme oranı belirlenen agregaların sonuçları Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Agregaların birim hacim ağırlıkları ve su emme oranı

Agrega	Kuru Birim Hacim Ağırlık (g / cm ³)	Doygun Kuru Yüzeysel Birim Hacim Ağırlık (g / cm ³)	Görünür Birim Hacim Ağırlık (g / cm ³)	Su Emme Oranı (%)
Kaba Agregası	2.50	2.55	2.65	2.20
İnce Agregası	2.55	2.60	2.69	1.96

4.3.3. Metilen Mavisi Deneyi

TS EN 933-9'a göre 0-2 mm tane büyüklüğü aralığının beher kilogramı başına tüketilen boyanın gram cinsinden ifadesi olan metilen mavisi değeri 0.3 olarak belirlenmiştir.

4.4. Çimento Harç Numunelerine Ait Bulgular ve Tartışma

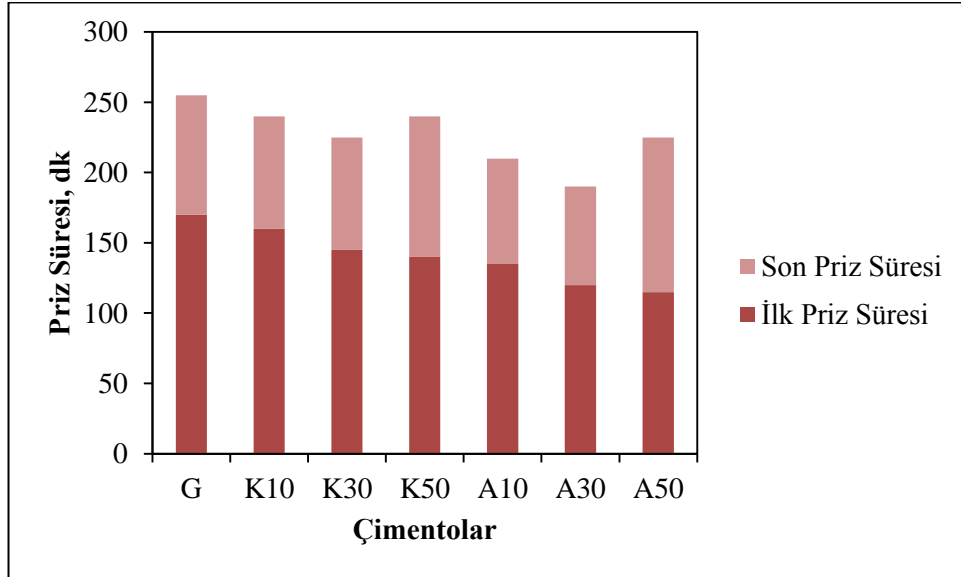
4.4.1. Normal Kıvam, Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi

Farklı yer değiştirme oranları kullanılarak, öğütülmüş Gördes ve Perşembe zeoliti içeren katkılı çimentoların normal kıvam için gerekli su miktarları, priz süreleri ve

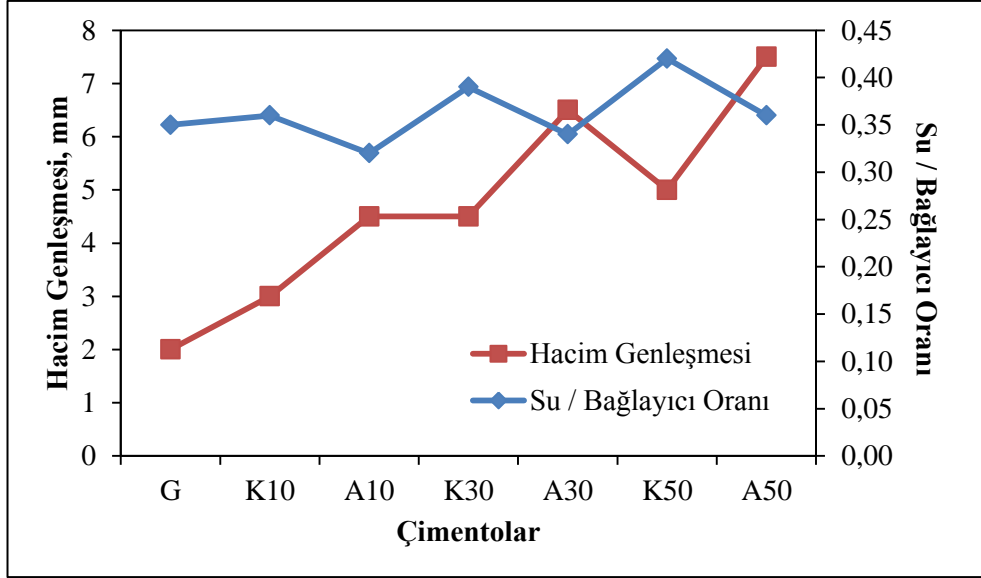
hacim genişmesi değerleri TS EN 196-3 standardına göre tespit edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.4'te, çimentoların priz sürelerine ait değişim grafiği Şekil 4.6'da ve hacim genişmesi-su/bağlayıcı ilişkisi Şekil 4.7'de verilmiştir. Çimento kıvam, priz süresi, hacim genişmesi deney anı, hacim genişmesi deneyi numunelerinin hazırlığı ve çimento hacim genişmesi numunelerine ilişkin görünüm Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmektedir.

Çizelge 4.4. Çimentoların su/bağlayıcı oranı, priz süresi ve hacim genişmesi değerleri

Çimento	Normal Kıvam için Gerekli su/bağlayıcı oranı	İlk Priz Süresi (Dakika)	Son Priz Süresi (Dakika)	Hacim Genleşmesi (mm)
G	0.35	170	255	2.00
K10	0.36	160	240	3.00
K30	0.39	145	225	4.50
K50	0.42	140	240	5.00
A10	0.32	135	210	4.50
A30	0.34	120	195	6.50
A50	0.36	115	225	7.50



Şekil 4.6. Çimentoların ilk ve son priz süreleri



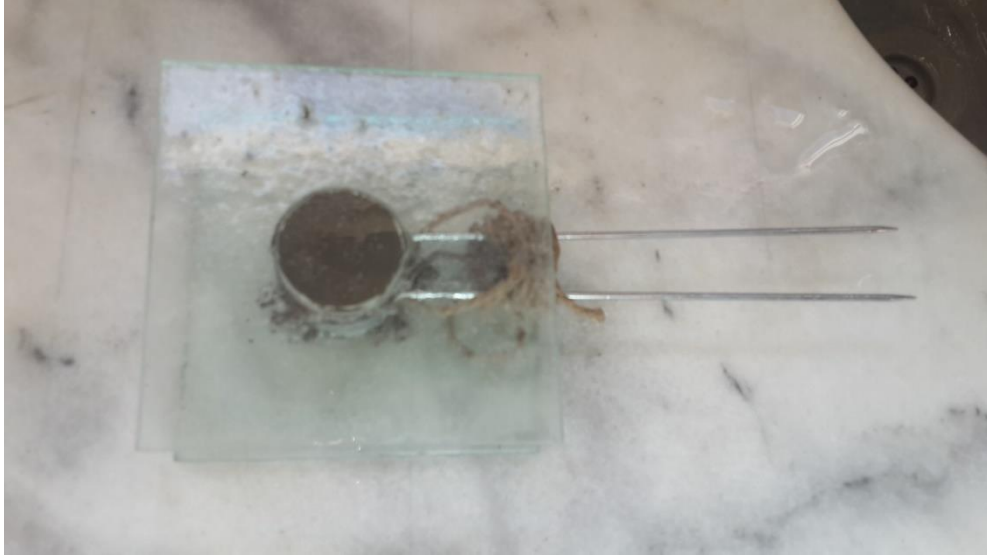
Şekil 4.7. Çimentoların hacim genleşmesi ve su / bağlayıcı oranı ilişkisi



Şekil 4.8. Çimento kıvam deney anından bir görünüm



Şekil 4.9. Çimento priz süresi deney anından bir görünüm



Şekil 4.10. Hacim genişmesi deneyi numunelerinin hazırlanması



Şekil 4.11. Hacim genleşme deneyi anından bir görünüm



Şekil 4.12. Çimento hacim genleşmesi numuneleri

Çizelge 4.4'teki verilere göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır;

- Doğal zeolit yer değiştirmeli çimentoların normal kıvam suyu ihtiyaçları, içeriklerindeki doğal zeolit miktarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır.
- Perşembe zeolit (analsim) katkılı çimentoların normal kıvam suyu ihtiyacının, eşit doğal zeolit içerikleri için, Gördes zeolit (klinoptilolit) katkılı çimentolara kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu duruma analsimin molekül

yapısındaki suyun ve Gördes zeolitinin daha yüksek olan özgül yüzey alanının neden olabileceği düşünülmektedir.

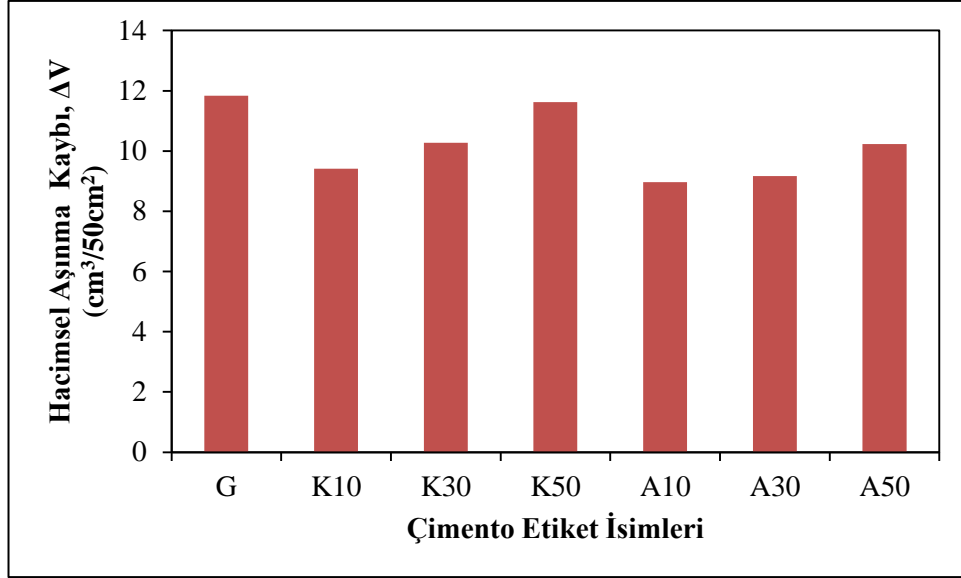
- Her iki doğal zeolit türü için, çimentolardaki doğal zeolit oranı arttıkça ilk priz süresi kısalmıştır.
- Doğal zeolit yer değiştirmeli çimentoların son priz süreleri ise zeolit türüne göre farklı sonuçlar vermiştir. Perşembe zeoliti içeren çimentolarda zeolit oranındaki artış son priz süresini uzatırken, Gördes zeoliti içeren çimentolarda önemli bir değişiklik olmamıştır.
- Doğal zeolit yer değiştirmeli tüm çimentoların priz başlangıcı ve bitiş süreleri geleneksel koşullarda üretilen portland çimentosundan daha kısa olduğu tespit edilmiştir.
- Çimentolarda doğal zeolitin miktarı hacim genişmesini doğrudan etkilemiştir. Doğal zeolit oranı arttıkça hacim genişmesi değerleri de artış göstermiştir. Bu değerler Perşembe zeoliti içeren çimentolarda Gördes zeoliti içerenlere göre daha fazladır.
- Çalışmada dikkate alınan tüm doğal zeolit yer değiştirmeli çimentoların TS EN 197-1’de verilen priz süresi ve hacim genişmesi limitleri dahilinde olduğu tespit edilmiştir.

4.4.2. Böhme Aşınma Deneyi

TS 2824 EN 1338 standart metodlarına göre gerçekleştirilen doğal zeolit içeren çimento harçlarının ve kontrol çimentosu harcının Böhme aşınma deneyi sonuçları Çizelge 4.5’te ve çimento etiket isimlerine göre hacimsel aşınma kaybı değişimleri Şekil 4.13’te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çimento harçlarının Böhme aşınma deneyi değerleri

Çimento Harç Numunelerinin Etiket İsimleri	Hacimsel Aşınma Kayıpları ΔV (cm³/50cm²)
G	11.84
K10	9.41
K30	10.27
K50	11.62
A10	8.97
A30	9.17
A50	10.23



Şekil 4.13. Çimento etiket isimlerine göre hacimsel aşınma kaybı değişimleri

Çizelge 4.5'te verilen deney sonuçları incelendiğinde, her iki zeolit türünün de Blaine değerleri geleneksel çimentoya göre daha yüksek olmasına rağmen katkı çimentoların Blaine değerleri, karışım oranlarının artmasıyla, düşmüştür. Bu düşüş klinoptilolitte daha büyük, analsimde ise daha küçük olmuştur. Dolayısıyla analsimli karışımların aşınma kaybı, klinoptilolitli karışımli olanlara göre yaklaşık %11, geleneksel harçlara göre de %25 civarında daha az olmuştur. Diğer bir deyişle, artan zeolit içeriği ile birlikte, karışımlarda aşınmaya karşı bir direncin meydana geldiği ve zeolit katkıli harç karışımlarına ait aşınma kayıplarının, bütün yer değişim oranları için, geleneksel harçlara kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir. Aşınma direncinin gelişmesinde doğal zeolit in sağladığı bu olumlu etkinin, puzolanik reaksiyonların hamur yapısı ve agrega-hamur ara yüzeyinde meydana getirdiği iyileşmenin muhtemel sonucu olduğu düşünülmektedir.

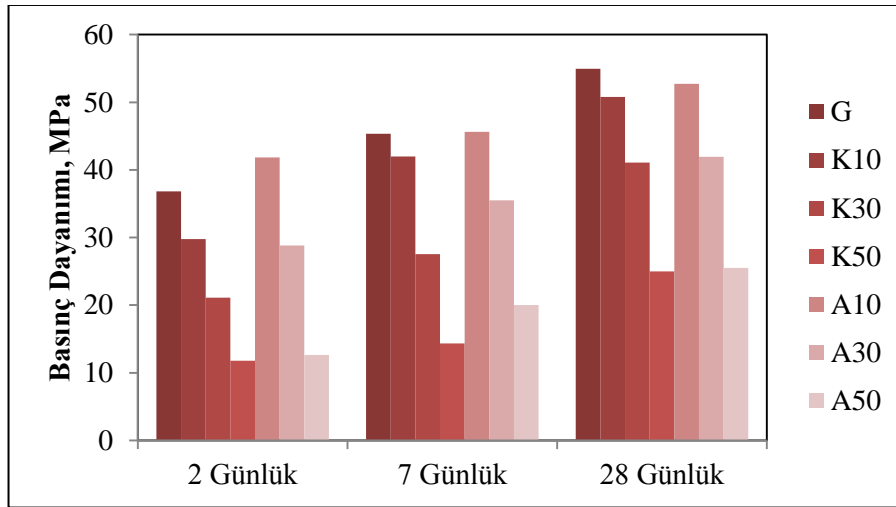
4.4.3. Çimento Harç Numunelerinin Birim Hacim Ağırlıkları ve Basınç Dayanımları

Düşük (%10), orta (%30) ve yüksek (%50) miktarlarda doğal zeolit yer değiştirmesi içeren çimento harçları ile geleneksel özellikteki katkısız çimento harcının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.6'da ve çimento harç numunelerinin günlere göre basınç dayanımı değişimleri Şekil 4.14'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Çimento harçlarının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları

Çimentolar	Birim Hacim Ağırlıklar (gr/cm ³)		
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
G	2.28	2.30	2.32
K10	2.08	2.14	2.16
K30	2.06	2.14	2.15
K50	1.96	1.98	2.01
A10	2.23	2.19	2.21
A30	2.20	2.16	2.19
A50	2.15	2.15	2.13

Çimentolar	Basınç Dayanımı (MPa)		
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
G	36.83	45.35	54.96
K10	29.79	42.00	50.79
K30	21.11	27.56	41.08
K50	11.80	14.35	24.97
A10	41.84	45.64	52.72
A30	28.84	35.49	41.96
A50	12.63	20.04	25.52



Şekil 4.14. Çimento harç numunelerinin günlere göre basınç dayanımı

Çizelge 4.6 incelendiğinde her iki doğal zeolit katkı türünün birim hacim ağırlıklarının düşüklüğü nedeniyle, katkılı çimento harçlarının birim hacim ağırlıkları da katkı miktarlarındaki artışla azalmaktadır.

Analsim katkılı harçların basınç dayanımları klinoptilolit katkılı olanlara göre özgül yüzey alanlarına bağlı olarak bir miktar artmasına rağmen geleneksel çimento

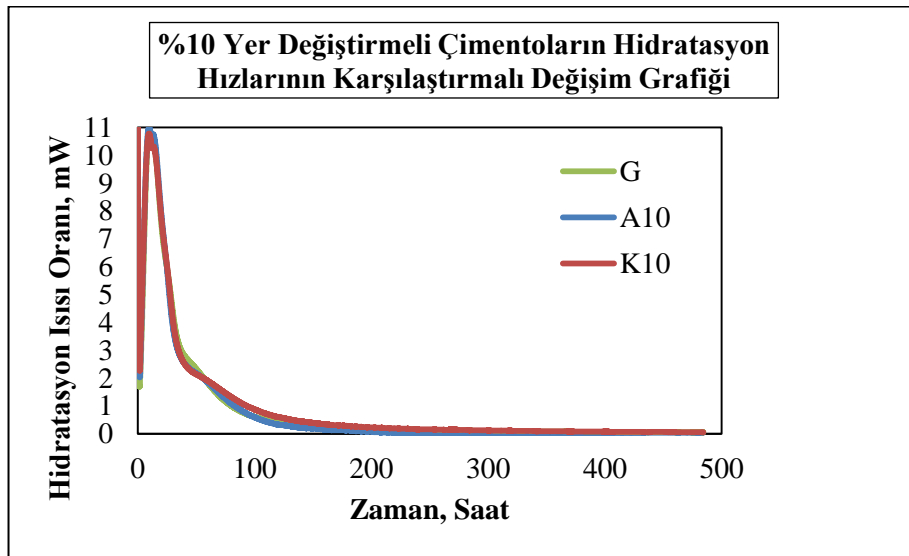
olanlara göre karışım oranları arttıkça geleneksel çimento miktarının azalmasına bağlı olarak düşmüştür.

Klinoptilolit ve analsim katkılı çimento harçların erken yaş dayanımlarında belirgin farklar gözükürken, 28 günlük dayanımlarda bu fark azalmıştır. Çizelge 4.6'da, analsim türü zeolitin dayanım kazanma hızının klinoptilolit türü zeolite oranla yüksek olduğu görülebilmektedir.

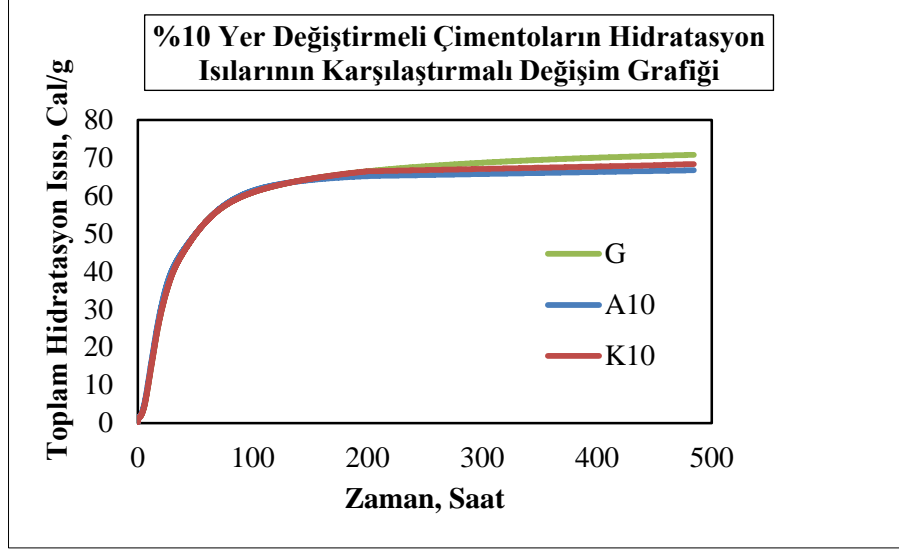
Numunelerin basınç dayanımı değerleri hem erken yaşlarda hem de 28 günlük yaşlarda %30 yer değiştirme oranına kadar TS EN 197-1'de öngörülen minimum dayanım değerini sağlamaktadır.

4.4.4. Hidratasyon Isısı

Daha öncede belirtildiği gibi, %0, %10, %30 ve %50 oranlarında ayrı ayrı klinoptilolit ve analsim çimento ile yer değiştirmeli numuneler üzerinde hidratasyon hızı ve ısı (mikrokaloremetre) ölçümleri TSE CEN/TR 16632 standardına uygun olarak yapılmıştır. Söz konusu numunelerin hidratasyon ısı tayini deneyi TAM AIR İzotermal Kalorimetre Cihazı ile belirlenmiştir. Deney sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20).



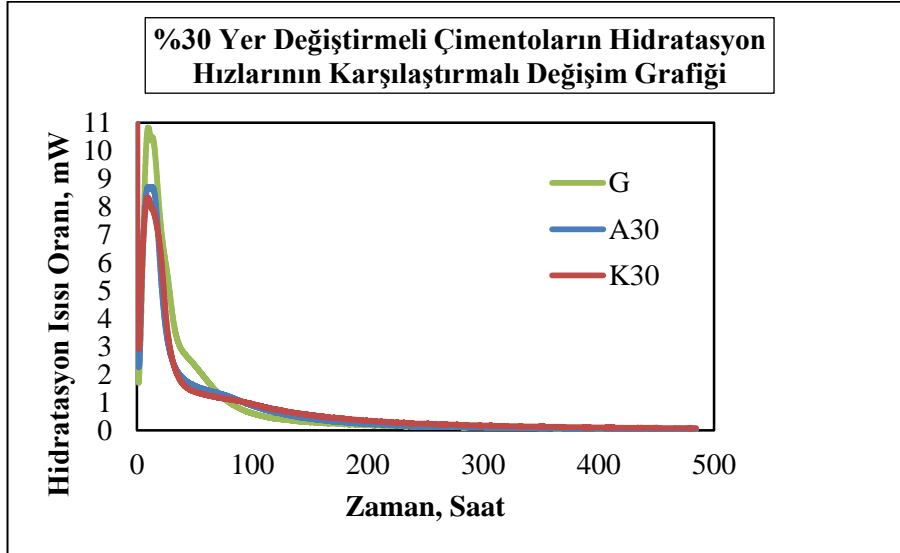
Şekil 4.15. %10 Yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon hızlarının karşılaştırmalı değişim grafiği



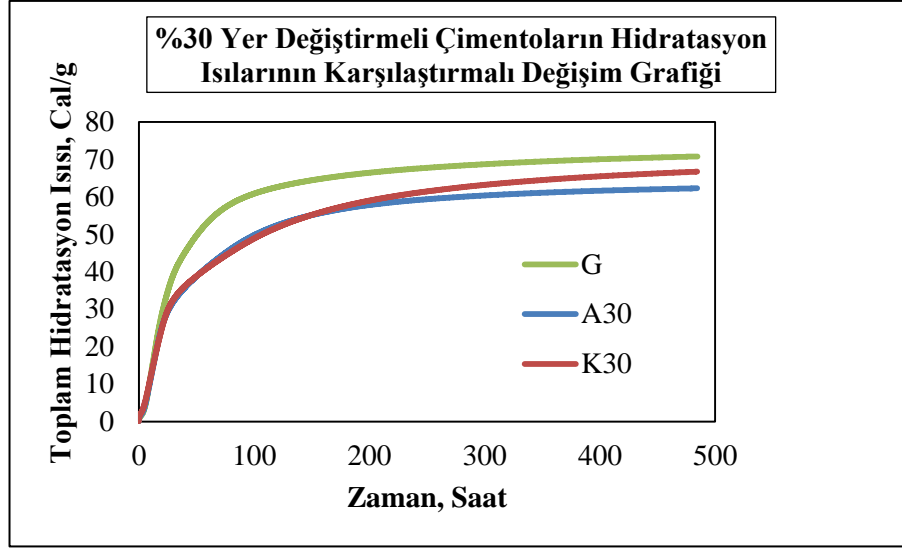
Şekil 4.16. %10 Yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon ısılarının karşılaştırmalı değişim grafiği

Şekil 4.15'ten görüldüğü gibi, %10 yer değiştirmeli çimento numunelerinin (A10 ve K10) hidratasyon hızları geleneksel (G) numuneye göre önemli bir değişim göstermemiştir.

Şekil 4.16 incelendiğinde ise %10 yer değiştirmeli çimento numunelerinin hidratasyon ısıları geleneksel numuneye göre yaklaşık %5 daha düşüktür.



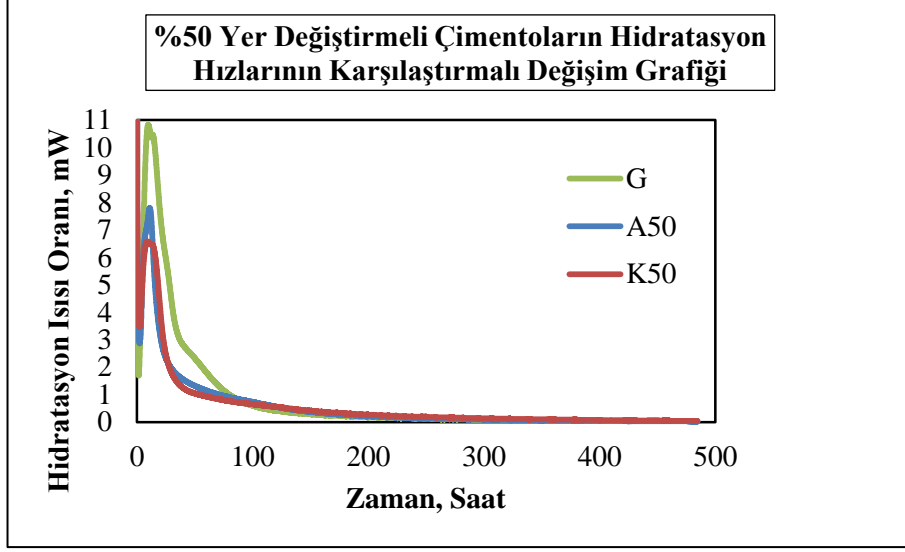
Şekil 4.17. %30 Yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon hızlarının karşılaştırmalı değişim grafiği



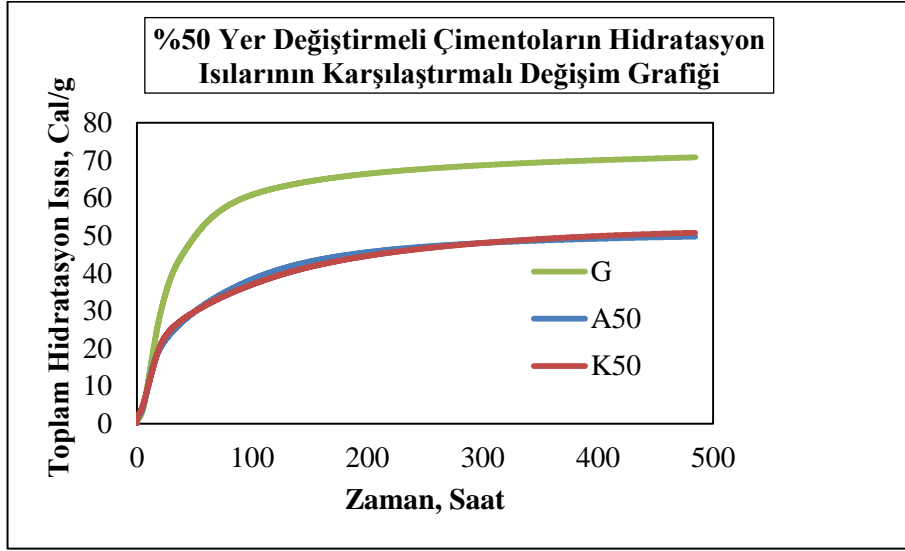
Şekil 4.18. %30 Yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon ısılarının karşılaştırmalı değişim grafiği

Şekil 4.17'den görüldüğü gibi A30 numunesinin hidratasyon hızı G numunesine göre yaklaşık %24 daha düşük, K30 numunesinin hidratasyon hızı ise G numunesine göre yaklaşık %22 daha düşük çıkmıştır. A30 numunesinin hidratasyon hızı K30 numunesine göre yaklaşık %7 daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.18'de görüldüğü gibi %30 yer değiştirmeli numunelerden A30 numunesinin hidratasyon ısısı ise G numunesine göre yaklaşık %12 daha düşük, %30 yer değiştirmeli numunelerden K30 numunesinin hidratasyon ısısı G numunesine göre yaklaşık %6 daha düşük olarak belirlenmiştir. A30 numunesinin hidratasyon ısısının K30 numunesine göre yaklaşık %7 daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.19. %50 Yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon hızlarının karşılaştırmalı değişim grafiği



Şekil 4.20. %50 Yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon ısılarının karşılaştırmalı değişim grafiği

Şekil 4.19'da verilen %50 yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon hızlarının karşılaştırmalı değişim grafiğinden görüldüğü gibi, A50 numunesinin hidratasyon hızı G numunesinden yaklaşık %30, K50 numunesinin hidratasyon hızı G numunesinden yaklaşık %40 daha düşüktür. A50 numunesinin hidratasyon hızı K50 numunesine göre yaklaşık %16 daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.20'de verilen %50 yer değiştirmeli çimentoların hidratasyon ısılarının karşılaştırmalı değişim grafiğinde ise A50 ve K50 çimentolarının hidratasyon ısılarının G numunesine oranla %30 civarında daha düşük olduğu görülmüştür.

4.5. Beton Numunelere Ait Bulgular ve Tartışma

4.5.1. Slump (Çökme) Deneyi

TS EN 12350-2 standartlarına uygun her bir beton karışımı serisinin kalıplara yerleştirilmesi öncesinde gerçekleştirilen Slump deneyi sonuçları Çizelge 4.7’de ve deney anından bir görünüm ise Şekil 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Taze betonun Slump deneyi sonuçları

	Seriler						
	G	K10	K30	K50	A10	A30	A50
Slump (cm)	8.00	8.00	7.00	8.00	8.00	7.00	8.00



Şekil 4.21. Taze betonun Slump deneyi

Çizelge 4.7’den görüldüğü gibi doğal zeolit yer değiştirmesiyle üretilen betonların kıvam değerleri 7.00-8.00 arasında değişmektedir.

4.5.2. Betonların Birim Hacim Ağırlıkları ve Basınç Dayanımları

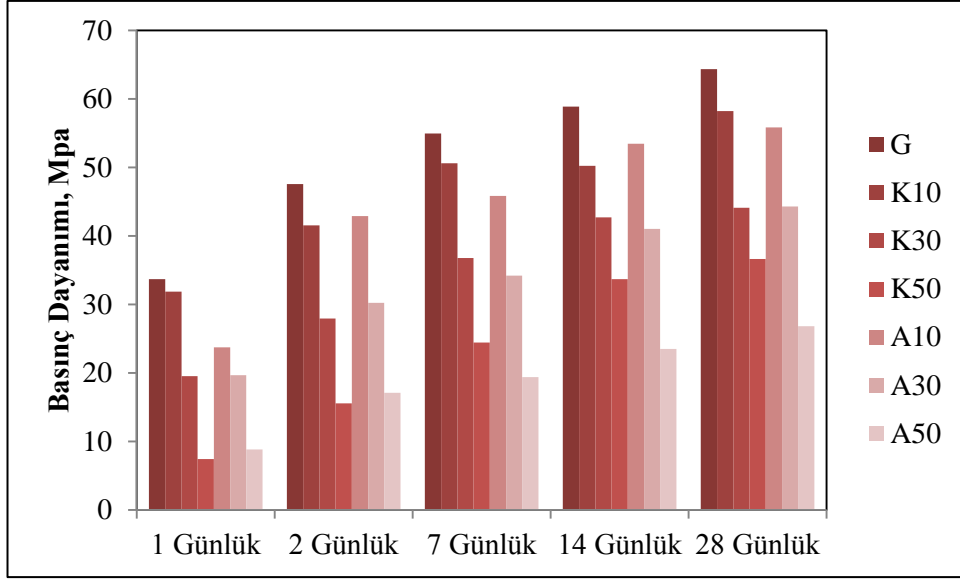
Üretilen beton numunelerine ait 1, 2, 7, 14 ve 28 günlük birim hacim ağırlıkları ve 15x15x15 cm küp basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.8’de ve beton numunelerinin

günlere göre basınç dayanımı değişimleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Sertleşmiş beton numunesinin tek eksenli basınç dayanımı deney anından görünüm Şekil 4.23’te verilmiştir. Çizelge 4.8’deki sonuçlar deney serilerine ait numunelerin deney anı yaşlarındaki birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımlarının ortalama değerini göstermektedir.

Çizelge 4.8. Betonların birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları

Betonlar	Birim Hacim Ağırlıklar (gr/cm ³)				
	1 Gün	2 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
G	2.41	2.41	2.43	2.41	2.42
K10	2.39	2.39	2.38	2.37	2.38
K30	2.35	2.36	2.32	2.34	2.34
K50	2.34	2.32	2.37	2.32	2.33
A10	2.40	2.39	2.38	2.36	2.40
A30	2.39	2.40	2.38	2.41	2.38
A50	2.31	2.39	2.34	2.32	2.32

Betonlar	Basınç Dayanımı (MPa)				
	1 Gün	2 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
G	33.71	47.57	54.98	58.90	64.38
K10	31.86	41.55	50.60	50.24	58.24
K30	19.52	27.96	36.80	42.73	44.11
K50	7.42	15.55	24.44	33.70	36.63
A10	23.72	42.91	45.86	53.48	55.84
A30	19.67	30.25	34.22	41.05	44.29
A50	8.81	17.12	19.40	23.50	26.83



Şekil 4.22. Beton numunelerinin günlere göre basınç dayanımı



Şekil 4.23. Sertleşmiş beton numunesinin basınç dayanımı deney anından görünüm

Çizelge 4.8'deki sonuçlara göre;

- Her iki doğal zeolit katkı türünün birim hacim ağırlıklarının düşüklüğü nedeniyle, beton birim hacim ağırlıkları da çimento içeriğindeki katkı miktarlarındaki artışla azalmaktadır.
- Betonda doğal zeolit yer değiştirme oranı arttıkça dayanımların azaldığı görülmüştür.
- %10 klinoptilolit ve analsim yer değiştirmeli beton numuneleri (K10 ve A10) 2. günde geleneksel beton numunesi (G) ile benzer sonuçlar verirken, 28. günde ise geleneksel betondan sırasıyla %10 ve %13 civarında daha düşük sonuçlar vermiştir.
- %30 klinoptilolit ve analsim yer değiştirmeli beton numuneleri (K30 ve A30) 2. günde geleneksel beton numunesinden (G) sırasıyla yaklaşık %40 ve %36 daha düşük sonuçlar verirken, 28. günde ise her iki seri için geleneksel betondan %30 daha düşük sonuçlar vermiştir.
- %50 klinoptilolit ve analsim yer değiştirmeli beton numuneleri (K50 ve A50) 2. günde geleneksel betondan (G) sırasıyla %67 ve %64 oranında düşüşler göstermiştir. 28. günde ise geleneksel betondan sırasıyla yaklaşık %43 ve %58 daha düşük sonuçlar vermiştir.
- Analsim katkılı beton numunelerin basınç dayanımları erken yaşlarda klinoptilolit katkılı numunelere göre daha yüksek değerler verirken, ilerleyen yaşlarda bu durum ortadan kalkmıştır. Bu durum analsimin dayanım kazanma hızının klinoptilolite oranla daha yüksek olduğunu göstermiştir.
- Beton basınç dayanımı değerleri hem erken yaşlarda hem de 28 günlük yaşlarda %30 yer değiştirme oranına kadar TS EN 197-1'de öngörülen minimum dayanım değerini sağlamaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Türkiye’deki iki farklı rezervden temin edilen doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde katkı malzemesi olarak kullanımlarına yönelik “Çimento ve Beton Endüstrisinin Sürdürülebilir Üretimlerinde Doğal Zeolit (Analsim)’in Puzolanik Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma konu ile ilgili bilimsel veri sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların verileri ışığında aşağıdaki bazı önemli sonuçlara varılmıştır;

1) Bu çalışmada kullanılan doğal zeolit yer değiştirmeli çimentoların normal kıvam suyu ihtiyaçları, içeriklerindeki doğal zeolit miktarıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Doğal zeolit yer değiştirmeli tüm çimentoların priz başlangıcı ve bitiş süreleri geleneksel koşullarda üretilen portland çimentosundan daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Bu durum doğal zeolitlerin yüksek özgül yüzey alanlarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Çimentolarda doğal zeolit miktarı hacim genişmesini doğrudan etkilemiştir. Doğal zeolit oranı arttıkça hacim genişmesi değerleri de artış göstermiştir. Bu değerler Perşembe zeoliti içeren çimentolarda Gördes zeoliti içerenlere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Buna göre, çalışmada dikkate alınan tüm doğal zeolit yer değiştirmeli çimentoların TS EN 197-1’de verilen priz süresi ve hacim genişmesi limitleri dahilinde olduğu tespit edilmiştir.

2) Her iki doğal zeolit katkı türünün birim hacim ağırlıklarının düşüklüğü nedeniyle, katkılı çimento harçlarının birim hacim ağırlıkları da katkı miktarlarındaki artışla azalmaktadır.

3) Analsim katkılı çimento harçlarının basınç dayanımları, klinoptilolit katkılı olanlara göre özgül yüzey alanlarına bağlı olarak bir miktar artmasına rağmen geleneksel çimento olanlara göre karışım oranları arttıkça geleneksel çimento miktarının azalmasına bağlı olarak düşmüştür. Klinoptilolit ve analsim katkılı çimento harçların erken yaş dayanımlarında birbirleriyle karşılaştırıldıklarında belirgin farklar gözükürken, 28 günlük dayanımlarında bu fark azalmıştır. Analsim türü zeolitinin dayanım kazanma hızının klinoptilolit türü zeolite oranla yüksek olduğu görülebilmektedir (bkz. Çizelge 4.6). Söz konusu harç basınç dayanımı değerleri hem

erken yaşlarda hem de 28 günlük yaşlarda %30 yer değiştirme oranına kadar TS EN 197-1'de öngörülen minimum dayanım değerini sağlamaktadır.

4) Çalışmaya konu olan doğal zeolitler, 28 günlük harç numunelerinin sürtünme yolu ile aşınma dirençlerini arttırmıştır. Blaine değerlerine bağlı olarak, klinoptilolitli karışımların aşınma kaybı geleneksel harçlarınkine göre %15, analsimli karışımların aşınma kaybı geleneksel harçlarınkine göre %25 azalmıştır. Benzer şekilde, analsimli karışımların aşınma kaybı klinoptilolitli karışımli olanlara göre de yaklaşık %11 daha az olmuştur. Bu olumlu etkinin, puzolanik reaksiyonların hamur yapısı ve agrega-hamur ara yüzeyinde meydana getirdiği iyileşmenin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Böylelikle, literatürde var olan aşınma direncinin artırılması amaçlı kullanılan mineral katkıları gibi optimum %30 yer değiştirme oranıyla klinoptilolit ve analsim türü doğal zeolitlerin aynı amaçla kullanılabilmesi de tespit edilmiştir.

5) Literatür, çimento mineral katkılarının genellikle çimentonun hidrasyon ısısını azaltmakta olduğunu vurgulamaktadır. A10, A30, A50, K10, K30 ve K50 etiket isimleriyle üretilen çimentolarla yapılan deneyler sonucunda, çimentoların hidrasyon ısıları geleneksel çimentoya göre sırasıyla yaklaşık %5, %12, %30, %5, %6 ve %30 değerlerinde azalmıştır. Bu sonuçlar, çalışmada kullanılan her iki doğal zeolit hidrasyon ısıları değerlerinin literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

6) Her iki doğal zeolit hidrasyon hızları ise, A10, A30, A50, K10, K30 ve K50 etiket isimleriyle üretilen çimentolarla yapılan deneyler sonucunda çimentoların hidrasyon hızları geleneksel çimentoya göre sırasıyla yaklaşık %0, %24, %30, %0, %22 ve %40 değerlerinde azalmıştır.

7) Her iki doğal zeolit katkı türünün birim hacim ağırlıklarının düşüklüğü nedeniyle, katkılı çimento harç numunelerinde olduğu gibi beton birim hacim ağırlıkları da çimento içeriğindeki katkı miktarlarındaki artışla azalmaktadır.

8) Bu çalışmada iki farklı doğal zeolit, farklı yer değiştirme oranları kullanılarak beton küp numuneler üretilmiştir. Bu küp numuneler üzerinde 1, 2, 7, 14 ve 28 günlük standart basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilerek basınç dayanımının gelişim takibi yapılmış ve değerleri tespit edilmiştir. Her iki doğal zeolit kullanılarak üretilen beton küp numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri A10, A30, A50, K10, K30 ve K50 geleneksel betonlara göre sırasıyla yaklaşık %13, %30, %58, %10,

%30 ve %43 deęerlerinde dūřmūřtur. Bu deęerlerden anlařılacaęı gibi, betonda doęal zeolit yer deęiřtirme oranı arttıkça dayanımların azaldıęı gōrūlmūřtur (bkz. Çizelge 4.8).

9) Analsim katkılı beton numunelerin basınç dayanımları erken yaşlarda klinoptilolit katkılı numunelere gōre daha yūksək değerler verirken, ilerleyen yaşlarda bu durum ortadan kalkmıştır. Bu sonuçlar analsimin dayanım kazanma hızının klinoptilolite oranla daha yūksək olduğunu gōstermiřtir (bkz. Çizelge 4.8).

10) Beton numunelerin basınç dayanımı deęerleri hem erken yařlarda hem de 28 gūnlük yařlarda %30 yer deęiřtirme oranına kadar TS EN 197-1'de ōngōrūlen minimum dayanım deęerini saęlamaktadır.

11) alıřmada kullanılan her iki doęal zeolit tūrūnūn (klinoptilolit ve analsim) silis-alūmin içerikleri, puzolanik aktivite deęerleri, dūřūk ōzgūl aęırlıkları, yūksək ōzgūl yūzeyleri, kolay ōęūtūlebilir oluřları ve imento harç numuneleri ile betonların yeterli basınç dayanımları sayesinde katkılı imento ūretiminde kullanılabilēēi belirlenmiřtir.

12) Gerçekleřtirilen bu çalıřmada kullanılacak imento miktarını azaltmak ve çimentonun performanslarının iyileřtirilmesini saęlamak amacıyla klinoptilolit tūrū doęal zeolitlere yer deęiřtirme malzemesi olarak alternatif olabileēēi belirlenmiřtir. Ancak burada yapılan bu deęerlendirmenin yalnızca bu çalıřmaya konu olan analsim tūrū için ve bu çalıřma kořullarındaki ūretimler için geçerli olduęunu belirtmekte fayda vardır. Bununla birlikte, farklı bōlgelerden elde edilecek analsim tūrū zeolitler ūzerinde yapılacak olan çalıřmaların daha yaygın hale getirilmesinin isabetli olacaęı da dūřūnūlmektedir.

Ōzetle, alıřma sonucunda katkılı imento ve beton ūretimlerinde doęal zeolitlerin ikinci deęerli minerali olan analsim'in inřaat endūstrisinde daha yaygın olarak kullanılan klinoptilolit'e alternatif olabileēēi ve her iki doęal zeolit'in de (analsim ve klinoptilolit) katkılı imento ve beton ūretimlerinde yaklařık %30 yer deęiřtirme oranına kadar puzolanik katkı malzemesi olarak kullanımının mūmkūn olabileēēi belirlenmiřtir.

Bununla beraber yerel ve doğal puzolan kaynaklarının aktif hale geçirilip, ōzellikleri tanımlanmış, doğal puzolan çeşitliliği yelpazesinin genişletilmesiyle imento

dolayısıyla beton üretimlerinde doğal puzolan kullanımını gündemde tutarak yenilenemeyen enerji kaynaklarının tüketiminde tasarruflar sağlanabileceği anlaşılmaktadır. Bu durum, dünya enerji arz güvenliğinin sağlanmasındaki enerji tasarrufu politikalarını desteklemektedir. Aynı zamanda, çimento ve betonun nihai dayanım ve dayanıklılıklarında diğer bir deyişle performanslarında da ciddi kazanımlar elde edilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akçaözoğlu, K., Fener, M., Akçaözoğlu, S., Öcal, R. 2014. Microstructural examination of the effect of elevated temperature on the concrete containing clinoptilolite. *Construction and Building Materials*, 72: 316-325.
- Akgün, Y. 1997. Doğu Karadeniz bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle üretilen ağır betonun geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Akgün, Y. 2003. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlerin davranışlarının incelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Akyazı, Ö. 2011. Katkısız ve katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının çimentonun diğer özellikleriyle karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Albayrak, M., Yörükoğlu, A., Karahan, S., Atlıhan, S., Aruntaş, H. Y., Girgin, İ. 2007. Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. *Building and Environment*, 42: 3161-3165.
- Alp, E. 2005. Aromatik bileşiklerin zeolit katalizörler üzerinde transalkilasyonu ve disproporsiyonu. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Aruntaş, H. Y., Beycioğlu A. 2014. Puzolanik zeolit (klinoptilolit) katkılı çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(2): 57-67.
- ASTM C 430. 2005. Test method for fineness of hydraulic cement by the 45-µm (No. 325) sieve, American Society for Testing and Materials, United States of America.
- ASTM C 944-99. 1999. Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method, American Society for Testing and Materials, United States of America, 1-10.
- Barrer, R. M. 1978. Zeolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves. Academic Press, London.
- Bilim, C. 2011. Çimento harçlarında ikame malzemesi olarak zeolit ve silis dumanı kullanımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(4): 339-345.
- Binici, H., Sevinç, A. H., Durgun, M. Y. 2011. Pomza, barit, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların dayanımı ve sülfat direnci. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1): 39-51.
- Breck, D.W. 1975. Synthetic zeolite: Properties and applications, industrial minerals and rocks, Ed.: Lefond, S. J., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, 1243-1257.

- Canpolat, F., Yılmaz, K. 2002. Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı. Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 16(2): 11-24.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Sümer, M., Uysal, M. 2005. Zeolit katkılı çimentoların özelliklerinin incelenmesi. 6. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Kasım 2005, İstanbul, Türkiye.
- Caputo, D., Liguori, B., Colella, C. 2008. Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure. Cement and Concrete Composites, 30: 455-462.
- Danabaş, D. 2009. Farklı oranlardaki zeolit (klinoptilolit)'in bazı su parametreleri ile gökkuşağı alabalığı (*oncorhynchus mykiss walbaum, 1792*)'nin gelişimi ve vücut kompozisyonuna etkileri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri Anabilim Dalı, Adana.
- Demirel, D. Ş., Demirel, R., Doran, İ. 2010. Doğal zeolitlerin hayvancılıkta kullanım olanakları. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 14 (2): 13-20.
- Dorum, A., Yıldız, K. 2011. Yüksek dayanımlı betonlarda pomza ve zeolitin kullanılabilirliği. İMO Teknik Dergi, Yazı 345, 5335-5340.
- DPT, 2001. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri II (Mika-Zeolit-Lületaşı) Çalışma Grubu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara Enstitüsü, Ankara.
- Duman, N. 2011. Frükto-oligosakkaritlerin zeolitler tarafından adsorpsiyonunun incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Isparta.
- Durmuş, A., Pul, S. 1993. Agregata petrografik yapısının betonun kırılma mekanizmaları üzerindeki etkisi. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongresi, Ekim 1993, Gazimağusa, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti.
- Erdoğan, T. 1995. Türkiye'de üretilen çimentolar, özellikleri ve kullanımları. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, İnşaat Mühendisleri Odası Çimento Sempozyumu, 16 - 27 Kasım 1995, Ankara.
- Erdoğan, T. Y. 2010. Beton. ODTÜ Yayıncılık, Üçüncü Baskı, Ankara, 757s.
- Feng, N. Q., Li, Z., G., Zang, X. W. 1990. High - strength and flowing concrete with a zeolite mineral admixture. Cement and Aggregates, American Society for Testing and Materials, 12: 61-69.
- Feret, R. 1892. Compacité des mortiers hydrauliques. Annales des ponts et Chaussées, Paris.
- Gökçe, H. S., Taban, S., Şimşek, O. 2010. Zeolitik tüf ikamesinin farklı agregalar üzerinde alkali-silika reaksiyonu etkilerinin belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(4): 803-809.
- Gündeşli, U. 2008. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımını üzerine bir kaynak taraması. Yüksek Lisans

- Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Gürkan, A. 2006. Pomza ve zeolitin alkali silika reaksiyonu üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı, İzmir.
- Güvenir, Ö. 2005. Synthesis and characterization of clinoptilolite. Master of Science Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Chemical Engineering Department, Ankara.
- Hatipoğlu, Y. S. 2014. Sönmüş kireç ve çimento harçlarının mekanik özelliklerinin toz haline getirilmiş Bayburt taşları ve zeolit ile iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bayburt.
- Huxtable, D. D., Poole, D. R. 1976. Thermal energy storage by the sulfuric acid-water system. Sharing the Sun Solar Technology in Seventies Joint Conference, ISES, 8: 178-191.
- Hüsem, M. 1995. Doğu Karadeniz bölgesi doğal hafif agregalarından biriyle yapılan hafif betonun geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- İnan, Z. 2002. Klinoptilolit bakımından zengin doğal batı Anadolu zeolitlerinin toryum, kadmiyum ve krom sorpsiyonunun incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, İzmir.
- Karakurt, C. 2008. Çimento üretiminde doğal zeolit ve volkanik tüflerin endüstriyel atıklarla birlikte kullanılmasının beton performansı üzerine etkileri. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Kumbasar, I. 1977. Silikat mineralleri. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul.
- Küçükyıldırım, E. 2013. Kimyasal veya ısı işlem görmüş klinoptilolit zeolitinin puzolanik aktivitesinin ve katkılı çimentolardaki performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde.
- Liguori, B., Iucolano, F., Gennaro, B., Marroccoli, M., Caputo, D. 2015. Zeolized tuff in environmental friendly production of cementitious material: Chemical and mechanical characterization. Construction and Building Materials, 99: 272-278.
- Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P., Elsen, J. 2009. Pozzolan reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. Cement and Concrete Research, 39(3): 233-240.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M. 2012. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. Construction and Building Materials, 35: 1023-1033.

- Neville, A. M. 1997. Properties of concrete. Final Edition, Pearson Education Limited, London.
- Onaran, K. 1993. Malzeme bilimi, Dördüncü baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Oymael, S. 2010. Examinations of the internal structure of zeolite - blended cements. *Trakya University Journal of Science*, 11(1): 29-39.
- Öcal, R. 2014. Yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkılı betonlar üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde.
- Özen, S., Öncüoğlu, M. C., Liguori, B., Gennaro, B., Cappelletti, P., Gatta, G. D., Iucolano, F., Colella, C. 2016. A comprehensive evaluation of sedimentary zeolites from Turkey as pozzolanic addition of cement-and lime-based binders. *Construction and Building Materials*, 105: 46-61.
- Özkırım, İ., Yörükoğulları, E., 2005. Manisa-Gördes doğal zeolitinin (klinoptilolit) bet izoterm karakteristikleri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9: 65-70.
- Perraki, T., Kontori, E., Tsvivilis, S., Kakali, G. 2010. The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 32: 128-133.
- Sallı Bideci, Ö., Bideci, A., Oymael, S. 2013. Zeolit katkılı çimentoların özelliklerinin incelenmesi. *Süleyman Demirel University International Technologic Science*, 5(3): 70-76.
- Sarıkaya, H. 2006. Zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Isparta.
- Sevim, U. K., Okumuş, N. 2011. Zeolit ve silika dumanı katkılı betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2): 57-63.
- Sheppard, R. A. 1975. Zeolites in sedimentary rocks: Industrial minerals and rocks, Ed.: Lefond, S. J., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, 1257-1262.
- Shon, C. S., Kim, Y. S. 2013. Evaluation of West Texas natural zeolite as an alternative of ASTM class F fly ash. *Construction and Building Materials*, 47: 389-396.
- Şimşek, O. 2011. Beton bileşenleri ve beton deneyleri. Seçkin Yayıncılık, Dördüncü baskı, Ankara, 383s.
- Şener, A. G. 2013. Zeolit süspansiyonunun farklı değerlikli katyonlara sahip inorganik tuzlar ile koagülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Taban, S., Şimşek, O. 2009. Zeolitik tüf katkı oranı ve deniz suyunun çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(1): 145-153.

- TSE CEN/TR 16632. 2014. Çimento hidratasyon ısısının izotermal konduksiyon kalorimetre (ICC) ile belirlenmesi: Son gelişmeleri ihtiva eden rapor ve öneriler. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1. 2009. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-3+A1. 2010. Çimento deney yöntemleri-Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1. 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1. 2012. Agregaların genel özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini - Eleme metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 932-2. 1999. Agregaların genel özellikleri için deneyler - Bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-9. 2011. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce tanelerin tayini - Metilen mavisi deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2. 2013. Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6. 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 10088 EN 932-3/A1. 2006. Agregaların genel özellikleri için deneyler - Kısım 3: Basitleştirilmiş petrografik tanımlama için işlem ve terminoloji. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2. 2010. Beton-Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3. 2010. Beton-sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 25. 2008. Doğal puzolan (tras) - Çimento ve betonda kullanılan - tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802. 2009. Beton karışım tasarımı hesap esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2824 EN 1338. 2005. Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, M. C., Çulfaz, A., Uzal, B. 2007. Doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımı. TÜBİTAK, 104M393 nolu Proje Kesin Raporu, Ankara.

- Tydlitat, V., Zakoutsky, J., Cerny, R. 2014. Early-stage hydration heat development in blended cements containing natural zeolite studied by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 582: 53-58.
- Uğurlu, A., Pınar, A. 2004. Doğal zeolitlerin atık su arıtımında kullanımı. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 28(2): 13-20.
- Uzal, B. 2007. Properties and hydration of cementitious systems containing low, moderate and high amounts of natural zeolites. Doctor of Philosophy Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Civil Engineering Department, Ankara.
- Uzal, B., Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, M. C., Çulfaz, A. 2010. Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 40(3): 398-404.
- Ünsal, A., Şen, H. 2008. Beton ve beton malzemeleri laboratuvar deneyleri. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Laboratuvar Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 236s.
- Yeğinobalı, A., Ertün, T. 2009. Çimentoda standartlar ve mineral katkıları. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, AR-GE Enstitüsü, Y 04.01, Ankara, 48s.
- Yıldırım, S. F. 2007. Puzolanik zeolitin çimentoda katkı uygunluğunun araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay.
- Yıldız, K. 2012. Pomza ve zeolit katkılı betonun yol kaplamalarında kullanılabilirliği ve NaCl etkisinin araştırılması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 1(1): 69-79.
- Yıldız, K., Dorum, A., Koçak, Y. 2010. Pomza zeolit ve Cem I çimentosunun minerolojik moleküler elektrokinetik ve termal uyumunun yüksek dayanımlı betona etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4): 867-879.
- Yıldız, K., Demirel, C. 2014. MgSO₄ etkisine maruz rijit yol kaplamalarında pomza ve zeolit katkılı betonun kullanılabilirliği. *Politeknik Dergisi*, 17(1): 23-29.
- Yılmaz, B., Uçar, A., Ötekaya, B., Uz, V. 2007. Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment*, 42(11): 3808-3815.
- Yitik, H. 2006. İnce tanelerdeki kil içeriğinin metilen mavisi deneyi ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Yörükoğulları, E. 1985. Güneş enerjisinin doğal zeolitte depolanması. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yücel, H., Çulfaz, A. 1985. Yerel ve doğal clinoptilolit zeolitinin fiziksel ve kimyasal özellikleri. *TÜBİTAK, Doğa Bilim Dergisi, Seri B*, 9(3): 288-296.

EKLER

EK 1. METİLEN MAVİSİ DENEYİ

Metilen mavisi deneyi, TS EN 933-9 standardına uygun olarak ince agregalarda 0-2 mm aralığının metilen mavisi değerinin (MB) ve çok ince tanelerin 0-0.125 mm aralığının metilen mavisi değerinin (MBF) belirlenmesi amacıyla yapılır.

Doğal agregaların içerisinde aşırı miktarda bulunan kil minerallerinin beton ve harç için olumsuz etkileri vardır. Metilen mavisi deneyi ile taneler içerisindeki kil içeriği miktarı belirlenir. Ancak bu deney kil minerallerinin zarar verme oranını belirleyemez.

1.1. Metilen Mavisi Çözeltisinin Hazırlanması

Metilen mavisi çözeltisi hazırlanırken kullanılan metilen mavisi tozunun kuru olmasına dikkat edilmelidir. Emin olunamaması durumunda tozun su muhtevası belirlenmelidir.

Kuru metilen mavisi tozundan 0.01 g hassasiyetinde 10 g tartılır. Çözeltide kullanılacak damıtık veya demineralize su beherde maksimum 40 °C olacak şekilde ısıtılır. Isıtılmış su ile dolu behere yavaşça karıştırılarak metilen mavisi tozu ilave edilir. Tamamen çözülmesi için 45 dakika karıştırılır. Ardından çözelti 20 °C'ye soğutulur. Çözelti, 1 lt'lik bir ölçülü balona boşaltılır ve damıtık suyla çalkalanır. Ölçülü balon, 1 lt seviyesine kadar damıtık veya demineralize su ile tamamlanarak çalkalanır. Hafif renkli bir cam şişeye boşaltılarak karanlık bir yerde saklanır. Metilen mavisi çözeltisinin kullanılma ömrü hazırlandıktan itibaren 28 gündür (Yitik, 2006; Şimşek, 2011).

1.2. Agrega Numunelerinin Hazırlanması

Deneyde kullanılacak agrega numuneleri 0-2 mm tane büyüklüğüne sahip en az 200 g agrega içeren kısmî numune elde etmek için TS EN 932-2'ye uygun olarak azaltılır. Kısmî numune, etüvde (110 ± 5) °C'de sabit kütleye kadar kurutulur ve soğumaya bırakılır. Kuru kısmî numune, tanelerin uygun aralıkta ayrılması amacıyla bir deney fırçası yardımıyla 2 mm açıklıklı elekten elenir. Elenen numunenin 0-2 mm

(Ek 1'in devamı)

arası kısmının kütlesi 200 g, 0-0.125 mm arası kısmının kütlesi 30 g'dan büyük olmalıdır. Deney numunesi tartılarak 1g hassasiyetinde M1 olarak kaydedilir (Ünsal ve Şen, 2008; Şimşek, 2011).

1.3. Deneyin Yapılışı

500 ± 5 ml hacmindeki damıtık su behere konur. Kurutulmuş 200 g deney numunesi spatül ile iyice karıştırılarak behere eklenir. Daha önceden hazırlanan metilen mavisi çözeltisi iyice karıştırılarak bürete doldurulur. Boş bir beher üzerine süzgeç kâğıdı yerleştirilir. Kâğıdın yüzeyinin herhangi bir katı ve sıvı ile temas etmeyecek şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmelidir. Karıştırıcı, 600 devir/dakika hızına ayarlanır ve pervane beher tabanından 10 mm yükseklikte sabitlenir. Karıştırıcı çalıştırılarak 600 ± 60 hızında 5 dakika karıştırılır. Daha önceden hazırlanmış 5 ml çözelti behere eklenerek beherdeki malzeme 400 ± 40 devir/dakika hızında en az 1 dakika karıştırmaya devam edilir. Cam çubukla süspansiyondan bir damla alınarak süzgeç kâğıdı üzerinde leke deneyi gerçekleştirilir. Eklenen boya çözeltisinden sonra hâle (mavi merkeze çevreleyen açık mavi renkli halka oluşumu) gözlenir. Hâlenin görülmemesi durumunda ikinci 5ml boya çözeltisi eklenir ve 1 dakika süreyle karıştırma işlemi sürdürülür. Devamında cam çubuk ile süzgeç kâğıdı üzerinde bir leke deneyi daha uygulanır. Hâle görülünceye kadar benzer şekilde işlemlere devam edilir (Yitik, 2006; Şimşek, 2011).

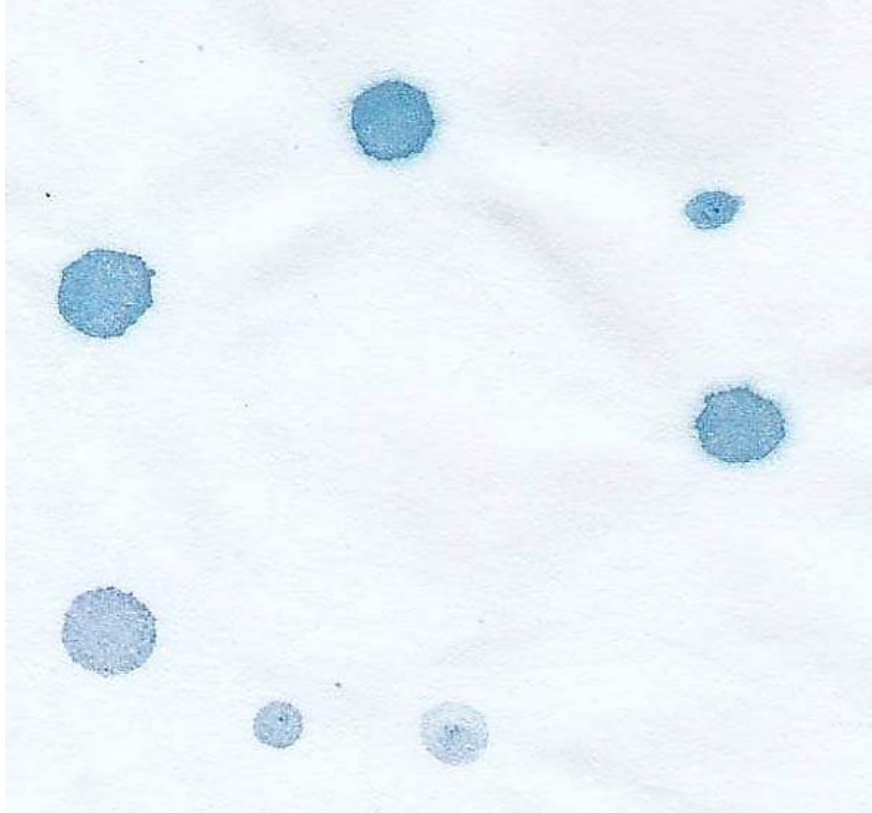
Hâle görüldükten sonra daha fazla boya çözeltisi ilavesi yapılmaksızın karıştırma işlemi sürdürülür ve 1 dakika aralıklarla leke deneylerine devam edilir. Hâle eğer ilk 4 dakikada kaybolursa 5 ml boya çözeltisi, beşinci dakikada kaybolursa 2 ml boya çözeltisi eklenir. Hâle oluşumu 5 dakika varlığını sürdürünceye kadar karıştırmaya ve leke deneylerine devam edilir. İlave edilen boya çözeltisinin toplam hacmi (V1), 1 ml hassasiyetinde kaydedilir (Şimşek, 2011).

Deney numunesi oluşturulurken hale oluşturmaya yetecek kadar ince tane (0.063 mm elekten geçen) agrega içermiyorsa, kaolinit kullanılmalıdır. 110 ± 5 °C'de sabit kütleye kadar kurutulan kaolinitten 30 ± 0.1 g behere eklenir. Daha sonra V' ml hacmindeki boya çözeltisi behere ilave edilir. Burada V' hacmi 30 g kaolinit tarafından adsorplanan boya çözeltisi hacmidir (Şimşek,2011).

(Ek 1'in devamı)



Şekil E.1. Metilen mavisi deney seti (Yitik, 2006)



Şekil E.2. Süzgeç kâğıdı üzerinde leke deneyi uygulanması (Yitik, 2006)

(Ek 1'in devamı)

1.4. Metilen Mavisi Değerinin Belirlenmesi

0-2 mm tane büyüklüğü aralığı ile 0-0.125 mm tane büyüklüğü aralığının beher kilogramı başına tüketilen boyanın gram cinsinden ifadesi olan metilen mavisi değeri (MB ve MBF) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$MB=MBF=(V1/M1).10 \quad (E.1)$$

Bu bağıntıda;

M1: Deney numunesi kısmının g cinsinden kütlesi,

V1: İlave edilen boya çözeltisinin ml cinsinden hacmidir.

MB değeri, 0-2 mm aralığının metilen mavisi değeri, 0.1 g hassasiyeti ile kaydedilir. MBF değeri, 0-0.125 mm aralığının metilen mavisi değeri, 0.1 g hassasiyeti ile kaydedilir. Deneyde eğer kaolinit kullanılmışsa metilen mavisi değeri (E.1) bağıntısı yerine aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$MB=(V1-V'/M1).10 \quad (E.2)$$

Burada;

V': Kaolinit tarafından adsorplanan boya çözeltisinin ml cinsinden hacmidir.

(E.1) ve (E.2) bağıntılarında yer alan 10 değeri, kullanılan boya çözeltisi hacmini, deneye tabi tutulan büyüklük aralığının beher kilogramı başına adsorplanan boya kütlesine dönüştürmek için kullanılır (Şimşek, 2011).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer Fatih YAZICIOĞLU
Doğum Yeri : Ünye
Doğum Tarihi : 27.11.1989
Yabancı Dili : İngilizce
E-mail : omerfatihyazicioglu@gmail.com
İletişim Bilgileri : Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/ Program	Üniversite	Yıl
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Niğde Üniversitesi	2013

İş Deneyimi:

Görev	Görev Yeri	Yıl

Yayınlar :

1. Akgün, Y., Yazıcıoğlu, Ö. F. 2016. İki Farklı Doğal Zeolit Katkısının Çimento Harç Aşınma Dayanımına Etkisi. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(1): 94-104.