

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmada, metakaolin ve riyolit kullanımının gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Tez konusunun belirlenmesinden son aşamasına gelinceye kadar bana yol gösteren, yoğun iş temposu arasında değerli vakitlerini ayırarak destek ve yardımlarını esirgemeyen, akademik kariyerime başladığım günden beri tecrübeleriyle bana ışık tutan, danışmanım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimle ilgili çalışmalarında ilgi ve yardımlarından dolayı, isimlerini burada zikredemediğim değerli hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmamın başından sonuna kadar desteklerini esirgemeyen, akademik kariyerime devam etmemde ve bugünlere gelmemde sağladığı desteklerle en zor anlarımda hep yanımda olan, haklarını asla ödeyemeyeceğim saygıdeğer ebeveynim, Çiğdem-Fethi KARAHÜSEYİN'e, abim Arş. Gör. Samet KARAHÜSEYİN ve eşi Merve Nur KARAHÜSEYİN'e ve kardeşim Tahacan KARAHÜSEYİN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Sümeyye KARAHÜSEYİN

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Metakaolin ve Riyolit Kullanımının Gecikmiş Etrenjit Oluşumu Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 12/06/2019

Sümeyye KARAHÜSEYİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam	2
1.3. Literatür Taraması.....	2
1.4. Betonda Durabilite	11
1.4.1. Betonun Bozulma Mekanizmaları	12
1.4.1.1. Fiziksel ve Mekanik Etkenler	13
1.4.1.2. Kimyasal ve Biyolojik Etkenler	13
1.5. Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (GEO-Delayed Ettringite Formation)	14
1.6. GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen Faktörler	19
1.6.1. Çimentonun Kimyasal Bileşimi	19
1.6.2. Çimentonun Özgül Yüzeyi	21
1.6.3. Agrega Özellikleri	22
1.6.4. S/Ç Oranı ve Geçirimsizlik.....	24
1.6.5. Mineral Katkı Kullanımı	25
1.6.6. Buhar Kürü Koşulları	29
1.7. GEO Potansiyelinin Tespitinde Kullanılan Hızlandırılmış Deney Yöntemleri....	31
1.7.1. Duggan Yöntemi	32
1.7.2. Attiogbe Yöntemi	34
1.7.3. Fu Yöntemi	35
1.7.4. Kelham Yöntemi	36
2. DENEYSEL ÇALIŞMA, BULGULAR VE İRDELEME.....	38

2.1.	Malzeme Özellikleri	38
2.1.1.	Çimento	38
2.1.2.	Agrega	39
2.1.3.	Su	40
2.1.4.	Mineral Katkılar	40
2.1.5.	Kimyasal Katkılar	40
2.2.	Karışımların Hazırlanması	41
2.3.	Kür Yöntemi ve Koşulları	45
2.4.	DeneySEL Sonuçlar	48
2.4.1.	Genleşme Ölçümleri	48
2.4.2.	Mikroyapı Analizleri	53
2.4.2.1.	Buhar Kürü Uygulanmayan Referans Örneklerinin Mikroyapı Analizleri	55
2.4.2.2.	Buhar Kürü Uygulanan Referans Örneklerinin Mikroyapı Analizleri	56
2.4.2.3.	Metakaolin Katkılı Örneklerin Mikroyapı Analizleri	57
2.4.2.4.	Riyolit Katkılı Örneklerin Mikroyapı Analizleri	62
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
4.	KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

METAKAOLİN VE RİYOLİT KULLANIMININ GECİKMİŞ ETRENJİT OLUŞUMU
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Sümeyye KARAHÜSEYİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2019, 76 Sayfa

Bu çalışmada metakaolin ve riyolit kullanımının gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, çimento ağırlığının %5, %10, %15 ve %20'si oranlarında metakaolin ve riyolit ikame edilen harç karışımları hazırlanmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla ayrıca mineral katkı içermeyen üretimler de yapılmıştır.

Hazırlanan harç numunelerine buhar kürü uygulamasının ardından gecikmiş etrenjit oluşumunu hızlandırmak amacıyla Duggan döngüsü uygulanmıştır. Oluşan ürünlerin mikroyapı ve bileşimlerini incelemek amacıyla SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizinde, hazırlanan örnekler üzerinde BSE (Geri Saçılımlı Elektron) modunda incelemeler yapılmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile metakaolin ve riyolitin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki önleyici etkisinin dikkate değer olduğu görülmüştür. Bu anlamda metakaoline kıyasla riyolitin daha belirgin önleyici etkiye sahip olduğunu söylemek mümkündür. Bu itibarla riyolitin de metakaolin gibi GEO kaynaklı genleşmeyi önlemek amacıyla sektörde kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gecikmiş Etrenjit Oluşumu, Sülfat Etkisi, Durabilite, Metakaolin, Riyolit, SEM-EDS

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF METAKAOLIN AND RHYOLITE ON
DELAYED ETTRINGITE FORMATION

Sümeyye KARAHÜSEYİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2019, 76 Pages

In this study the effects of using metakaolin and rhyolite on delayed ettringite formation (DEF) were investigated. In the experimental program, mortar mixtures were produced by replacing metakaolin and rhyolite at ratios of 5%, 10%, 15%, 20% by weight of cement. For comparison, mortar mixtures without mineral additives were also produced.

After steam curing, Duggan cycle was applied to the prepared mortar samples in order to monitor the accelerated effect of the test on DEF. To investigate the microstructure and compositions of the products, SEM (Scanning Electron Microscope) and EDS (Energy Dispersive Spectrometer) analysis were performed. In SEM analysis, the prepared samples were investigated via BSE (Backscattered Electron) mode.

Based on the experimental results obtained, it has been found that the preventive effect of metakaolin and rhyolite has a pronounced effect on DEF. Compared to metakaolin; rhyolite is more effective in this respect. In this sense, like metakaolin, it is possible to use rhyolite in the sector as an effective preventive mineral in mitigating DEF.

Keywords: Delayed Ettringite Formation, Sulfate Attack, Durability, Metakaolin, Rhyolite, SEM-EDS

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	GEO kaynaklı hasar görmüş travers (altta)	3
Şekil 2.	Yer altı otopark merdiveni prefabrik elamanda oluşan GEO kaynaklı hasar	5
Şekil 3.	Öngerilmeli köprü kirişlerinde meydana gelen GEO kaynaklı hasar.....	6
Şekil 4.	Agrega etrafında boşluktaki etrenjit varlığı	6
Şekil 5.	Köprü başlığında GEO kaynaklı meydana gelen hasar	7
Şekil 6.	Donma-çözülme etkisi esnasında meydana gelen etrenjitin boşluklara girmesi .	8
Şekil 7.	Bir otoyol viyadük ayağında GEO nedeniyle oluşan çatlaklar .	9
Şekil 8.	GEO ve ASR sonucu harita şeklinde çatlamanın olduğu betonarme köprü kanat duvarının görüntüsü .	9
Şekil 9.	GEO kaynaklı rıhtım duvarında oluşan çatlama .	10
Şekil 10.	Köprü taban betonunda GEO kaynaklı çatlaklar (Bourgogne Köprüsü)	10
Şekil 11.	Köprü kazık başlıklarda harita şeklinde çatlaklar	11
Şekil 12.	Betonun bozulma mekanizmaları	12
Şekil 13.	Etrenjit kristalinin kafes yapısı (Taylor Modeli)	15
Şekil 14.	İğnemsiz etrenjit oluşumu	16
Şekil 15.	Top etrenjit oluşumu	17
Şekil 16.	Masif etrenjit oluşumu .	17
Şekil 17.	Tomasit morfolojisi	18
Şekil 18.	Etrenjit ve tomasit minerallerinin oluşum mekanizması.....	18
Şekil 19.	Tomasit oluşumu nedeniyle öndöküm beton istinat duvarında meydana gelen hasar	19
Şekil 20.	Özgül yüzey alanı ve GEO kaynaklı genişleme miktarı arasındaki ilişki	22
Şekil 21.	Farklı agregalarla hazırlanan çimento harçlarının genişleme miktarları	23
Şekil 22.	Kuvars agregası kullanılan örnekteki masif etrenjit oluşumu.....	24
Şekil 23.	Farklı tür mineral katkıların GEO kaynaklı genişleme üzerindeki etkileri .	26
Şekil 24.	Mineral katkıların GEO kaynaklı genişleme üzerindeki etkileri	27
Şekil 25.	Farklı sıcaklık ve sürelerde buhar kürü uygulamasının erken ve nihai dayanıma etkisi	30
Şekil 26.	Farklı buhar kürü koşullarının geçirimsizliğe olan etkisi	30

Şekil 27.	Uygulanan buhar kürü çevrimi.....	33
Şekil 28.	Duggan yönteminin şematik olarak gösterimi	34
Şekil 29.	Attigbe yönteminin şematik olarak gösterimi	35
Şekil 30.	Fu yönteminin şematik olarak gösterimi	36
Şekil 31.	Kelham yönteminin şematik olarak gösterimi	37
Şekil 32.	Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi	39
Şekil 33.	Üretimlerde kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi	41
Şekil 34.	Harç karışımlarında kullanılan malzemeler	43
Şekil 35.	Malzemelerin karıştırılması.....	44
Şekil 36.	Harç karışımlarının yayılma çapının ölçülmesi	44
Şekil 37.	Hazırlanan harç çubuğu örnekleri	45
Şekil 38.	Uygulanan buhar kürünün şematik olarak gösterimi	46
Şekil 39.	Buhar kürü için kullanılan kür tankı.....	46
Şekil 40.	Buhar kürü uygulaması sonrası numuneler	47
Şekil 41.	Boy ölçümleri için kullanılan ölçüm cihazı	47
Şekil 42.	Numunelerin etüvde kurutulması	48
Şekil 43.	Numunelerin suya yerleştirilmesi.....	48
Şekil 44.	Numuneler üzerinde ölçülen zamana bağlı genleşme değerleri	49
Şekil 45.	Metakaolin katkılı harç çubuğu numuneleri ile referans numunesinin karşılaştırılması	50
Şekil 46.	Riyolit katkılı harç çubuğu numuneleri ile referans numunesinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 47.	Referans numunelerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 48.	Metakaolin ve riyolit katkılı harç çubuğu numunelerinin karşılaştırılması	52
Şekil 49.	Zımparalanmış ve parlatılmış örnekler.....	54
Şekil 50.	Örneklerin vakumlanması ve altın kaplanması	54
Şekil 51.	Analizlerde kullanılan SEM cihazı.....	55
Şekil 52.	Buhar kürü uygulanmayan referans örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	56
Şekil 53.	Buhar kürü uygulanan referans örneğinin 80 gün sonraki içyapı görüntüsü	56
Şekil 54.	MK-5 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	57
Şekil 55.	MK-5 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	58
Şekil 56.	MK-10 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	59

Şekil 57.	MK-10 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	60
Şekil 58.	MK-15 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	60
Şekil 59.	MK-15 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	61
Şekil 60.	MK-20 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	61
Şekil 61.	MK-20 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	62
Şekil 62.	R-5 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	62
Şekil 63.	R-5 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	63
Şekil 64.	R-10 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	63
Şekil 65.	R-10 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	64
Şekil 66.	R-15 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	64
Şekil 67.	R-15 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	65
Şekil 68.	R-20 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü	65
Şekil 69.	R-20 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü	66

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	38
Tablo 2. Agreganın elek analizi ve fiziksel özellikleri	39
Tablo 3. Metakaolin ve riyolite ilişkin kimyasal ve fiziksel özellikler	40
Tablo 4. MasterRheobuild 716 süperakışkanlaştırıcı katkı maddesine ait bazı teknik özellikler	41
Tablo 5. Metakaolin katkılı harç karışımlarına ilişkin malzeme miktarları (kg/m ³) ve harçlar için ölçülen yayılma çapları (cm)	42
Tablo 6. Riyolit katkılı harç karışımlarına ilişkin malzeme miktarları (kg/m ³) ve harçlar için ölçülen yayılma çapları (cm)	42
Tablo 7. Numunelerin genleşme değerleri	49

SEMBOLLER DİZİNİ

AAR	: Alkali-Agrega Reaksiyonu
AASHTO	: Amerikan Karayolları Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSE	: Geri Saçılımlı Elektron Modu
CaCO ₃	: Kalker (Kireç Taşı)
CH	: Kalsiyum Hidroksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit(Sönmüş Kireç)
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
C ₂ S	: Dikalsiyum Silikat
C ₃ A	: Trikalsiyum Silikat
C ₃ S	: Trikalsiyum Silikat
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
GEO	: Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
(Na ₂ O) _e	: Sodyum oksit eşdeđeri
PÇ	: Portland Çimento
pH	: Asitlik veya Bazlık Derecesini Tarif Eden Ölçü Birimi
S/Ç	: Su/Çimento
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Difraktometresi (Kırınımı)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Dünyada her yıl yaklaşık olarak 10 milyar ton beton kullanılmaktadır [1]. Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde kimyasal ve mineral katkıların uygun oranlarda ve homojen olarak karıştırılmasıyla oluşturulan, başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilen ve çimentonun hidrasyonu ile zamanla katılaşarak sertleşerek mukavemet kazanan kompozit bir yapı malzemesidir [2].

Beton üretiminde kullanılan agregalar çakıl ve kırmataş (mıcır) şeklinde iri agrega ve kırma kum ve dere kumu şeklinde ince agrega olarak temelde iki sınıfa ayrılabilir. İlgili standarda göre, elendiğinde 4.0 mm göz açıklıklı elekten geçen agrega “ince agrega” ve bu elek üzerinde kalan agrega ise “iri agrega” olarak adlandırılmaktadır.

Çimento, betonun bağlayıcı bileşenidir. Çimentonun bağlayıcılık özelliği, bu malzemenin su ile tepkimesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Çimentonun su ile tepkimesi olayına hidrasyon; tepkime sonucu meydana gelen ürünler hidrasyon ürünleri olarak bilinir. Betonda çimento hamurunun işlevi agrega tanelerinin yüzeylerini kaplamak suretiyle agrega tanelerinin arasındaki boşlukları doldurmak ve bu taneleri bir arada tutacak şekilde bağlayıcılık sağlamaktır [3].

İyi bir beton, maruz kaldığı dış yüklere ve çevre etkilerine karşı hizmet ömrü süresince fiziksel ve kimyasal bütünlüğünü koruyabilen, dayanımı yüksek ve geçirimsiz olan betondur. Beton kalitesi açısından basınç dayanımı tek belirleyici olan değil aynı zamanda betonun hizmet ömrü boyunca maruz kaldığı çevresel etkilere karşı dayanıklılığı da önemli bir ölçüttür [2].

Dayanıklılık (kalıcılık, durabilite) açısından su ve rutubet en önemli etkenlerdir. Su, zararlı maddeleri beton içine taşıdığı gibi, kimyasal reaksiyonların oluşmasına da doğrudan etkir. Dış ortamda mevcut sülfat, klorür, asidik bileşikler gibi zararlı maddeler beton bünyesine su vasıtasıyla girerek betonda mevcut hidrasyon ürünleriyle tepkimeleri sonucu sertleşmiş betonun zamanla genişleşip hasar görmesine neden olurlar [4].

1.2. Amaç ve Kapsam

Beton ve betonarme elemanların zamanla hasar görmesine sebep olan pek çok iç ve dış etken vardır. Bu etkenler mekanik, fiziksel, kimyasal ve/veya biyolojik kökenli olabilir. İç etkenler arasında gecikmiş etrenjit oluşumu, alkali-agrega reaksiyonu, tomasit oluşumu, beton bileşenleri arasındaki termal farklılıklara bağlı olarak meydana gelen hasarlar sayılabilir. Sülfat etkisi, karbonatlaşma, aşınma, donma-çözülme etkisi, bazı asit ve tuz etkileri dış etkenlere örnek olarak verilebilir [4].

Bu çalışmada betonun kimyasal nedenlerle bozulmasına neden olan gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO) varlığı deneysel olarak değerlendirilmiş önlenmesi hususunda metakaolin ve riyolit kullanımının etkisi araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen karışımlarda kullanılan metakaolin ve riyolit çimento ağırlığının %5, %10, %15 ve %20'si oranında karışıma ikame edilmiştir. Metakaolin ikame edilen karışımlar sırasıyla MK-5, MK-10, MK-15, MK-20 olarak, riyolit ikame edilen karışımlar ise R-5, R-10, R-15, R-20 olarak sembolize edilmiştir. Çalışmada karşılaştırma amaçlı metakaolin ve riyolit ikame edilmeyen karışımlar da üretilmiştir. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.50 olarak sabit tutulmuş ve hedef kıvamı sağlamak için gerektiği miktarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Gecikmiş etrenjit oluşumuna bağlı olarak meydana gelen boy değişimini ölçmek için her bir karışımdan 4'er tane 25x25x285 mm ebadında prizmatik harç çubuğu örnekleri hazırlanmıştır. Boy değişimini ölçmek için harç çubuğu örnekleri üzerinde haftalık ölçümler alınmıştır. Hidratasyon ürünlerinin mikro yapısını ve bileşimlerini incelemek amacıyla hazırlanan numuneler üzerinde SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler için harç çubuğu örneklerinden uygun boyutta örnekler hazırlanmış, yüzeyleri zımparalanmış ve parlatılmış ardından Geri Saçılımlı Elektron (BSE) ile gerekli incelemeler yapılmıştır.

1.3. Literatür Taraması

Gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO), dışarıdan herhangi bir sülfat girişi olmaksızın çeşitli nedenlerle (sıcaklık etkisi gibi) sertleşmiş betonda zamanla etrenjit oluşması şeklinde tanımlanabilir.

Etrenjit, çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan bir reaksiyon ürünüdür. Beton taze halde iken etrenjit oluşmasına müsait bir yapıya sahiptir. Bu nedenle oluşan etrenjit

betonun bünyesinde herhangi bir genişmeye neden olmaz. Ancak sertleşmiş betonda herhangi bir nedenle etrenjit oluşumu beton bünyesinde hasara neden olabilecek ölçüde genişmelere neden olabilir [5].

Aşağıda sertleşmiş betonda oluşan etrenjitin, hasara yol açtığı saha örneklerine ve sahada yapılan gözlemlere ilişkin literatürde yer alan çalışmalar özetlenmektedir.

Finlandiya’da demiryolu traverslerinde 1970’lerden itibaren GEO kaynaklı hasarlar gözlemlenmiştir. Buradaki hasarların buhar kürü uygulamasının neden olduğu ve yanı sıra alkali-silika itibariyle reaktif agrega kullanıldığı ifade edilmektedir. Soruna ilişkin gerekli önlemler alınarak sorun büyük ölçüde çözülmüştür [6, 7]. 1980’li yıllarda ise Almanya’da ısıtma işlem uygulaması gören demiryolu traverslerinde buhar kürü kaynaklı GEO çatlakları tespit edildiği ifade edilmektedir (Şekil 1).



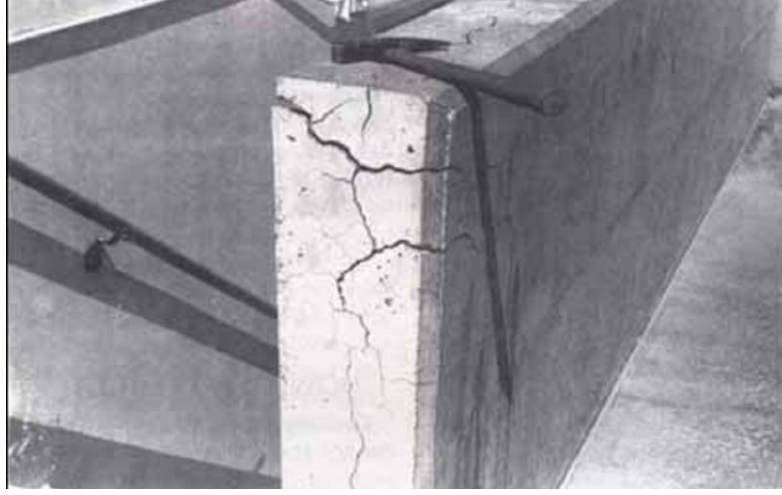
Şekil 1. GEO kaynaklı hasar görmüş travers (altta)

1992-1996 yılları arasında İsveç’te üretilen demiryolu traverslerinin yaklaşık 3 yıl sonra çatlama başladı raporu edilmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda, traverslerin üretiminde kullanılan çimentonun inceliği fazla ve kimyasal bileşimi bakımından yüksek oranda alkali ve sülfat içeren erken yüksek dayanımlı çimento olduğu tespit edilmiştir. 70°C buhar kürü uygulanan bu traversler, soğuk ve nemli ortam koşullarına maruz bırakılmıştır. Hasar gören traversler üzerinde yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda, oluşan çatlak ve boşlukların etrenjit kristalleri ile dolu olduğu gözlemlenmiştir [8]. Özetle,

70°C üstünde hızlı küre tabi tutulan traversler daha çok hasar görmüş olduğu rapor edilmektedir [9, 10]. Bir başka örnek, 90'lı yıllarda ABD'nin Kuzeydoğusunda demiryolu traverslerinde GEO kaynaklı olduğu ileri sürülen hasarlar tespit edilmiş ve incelemeye alınmıştır. İnceleme sonucunda, ön bekleme süresi kısa tutulan ve hızlı ısıtma yapılan traverslerde hizmet ömrü boyunca daha fazla hasar olduğu gözlemlendiği ifade edilmektedir [9, 11]. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere, kür koşulları gecikmiş etrenjit oluşumu üzerinde önemli ölçüde etkili olmaktadır.

GEO kaynaklı hasarlarla ilgili olarak, Ludwig ve diğerleri laboratuvar ortamında bir deney seti kurarak sahadaki bu durumu sistematik olarak incelemişlerdir. Deneyde, ortalama bir SO₃ oranına sahip çimento harçları hazırlanmış, harç örneklerinin bir kısmına buhar kürü uygulanmış ve örnekler suda bekletilmiştir. Kalan diğer örnekler ise standart kür uygulanmıştır. Buhar kürü gören örnekler, uzun vadede su içinde bekletildiklerinde genleştikleri görülmüştür. Standart kür uygulanan örneklerde ise uzun vadede genleşme gözlemlenmemiştir. Buhar kürü uygulanan örneklerdeki genleşmenin sebebi, buhar kürü esnasında etrenjit yerine monosülfat oluşması ve sonrasında sertleşmiş betonda monosülfatın yeniden etrenjite dönüşmesi olarak ifade edilmektedir [6, 12, 13]. Konuya ilişkin olarak daha sonraları farklı mekanizmalar ileri sürülmüştür. Bunlardan biri, buhar kürü esnasında etrenjitin çözündüğü ve sülfat açığa çıktığı ve bu sülfatın C-S-H jeli tarafından adsorbe edildiği belirtilmektedir. Ardından suda bekleme sırasında adsorbe edilen sülfat, C-S-H jelinden ayrılıp boşluk suyuna geçerek boşluk suyu sülfat konsantrasyonunun artmasına ve artan sülfat konsantrasyonu ise etrenjitin yeniden oluşmasına imkân sağlamaktadır.

Demiryolu traversleri dışında farklı prefabrik yapı elemanlarında da GEO kaynaklı hasarlar gözlemlenmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi bir yer altı otopark merdiveni prefabrik elemanda GEO kaynaklı hasar meydana gelmiş olduğu ifade edilmektedir [14]. Servis ömrü sonunda elemanda özellikle uç kısmında 2 cm'ye varan çatlaklar gözlemlenmiştir. Diğer kısımlar mesnetli olduğundan genleşme serbest uçta daha fazla hasar yaratmıştır. Açık havaya maruz kalan bu elemanlarda ıslanan kısımlarda zaman zaman hasarın boyutunun arttığı gözlemlendiği belirtilmektedir [15, 16].



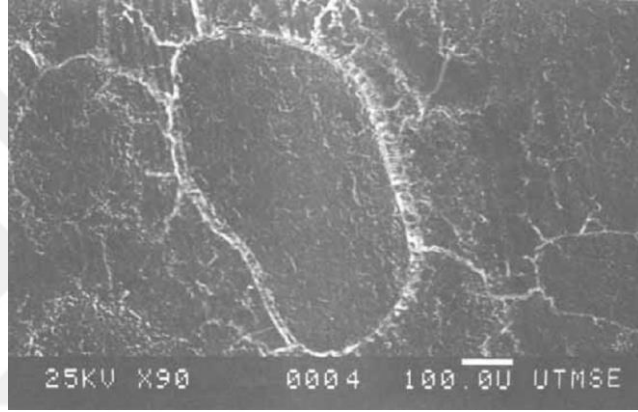
Şekil 2. Yer altı otopark merdiveni prefabrik elamanda oluşan GEO kaynaklı hasar [14].

Prefabrik öngerilmeli betonarme elemanlarda da benzer şekilde GEO kaynaklı hasarlar gözlemlenmiştir. Özellikle yapı elemanlarının uç kenarlarında başlayan çatlaklar öngerilme kaybına neden olmaktadır. Ayrıca suyun çatlaklardan sızarak beton içerisindeki donatının korozyonuna sebebiyet vermesi gibi ikincil hasarlar da dikkat çekicidir. Kiriş elemanların orta bölgelerinde ise öngerilme donatısına paralel çatlaklar şeklinde hasarlar meydana geldiği; hasarlı örnekler üzerinde yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda, genişlemenin sebebinin ileriki yaşlarda oluşan etrenjit oluşumuna bağlandığı rapor edilmektedir [17].

GEO kaynaklı bir başka hasar ise Amerika'nın Texas eyaletinde üretiminden yaklaşık 1 yıl sonra prefabrik öngerilmeli betonarme bir elemanda ve kütle betonunda gözlemlenmiştir. Ayrıca köprü kirişi olarak üretilen prefabrik elemanlardan bazılarının henüz hizmete girmeden stok sahasında bekletilirken çatlamaya başlamış olduğu rapor edilmektedir (Şekil 3). Birden fazla kuruluşun ortaklaşa yaptığı incelemeler sonucu hazırlanan raporda, hasarın ana nedeninin GEO olduğu belirtilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda, çatlak ve boşluklarda çok miktarda etrenjit oluştuğu, agregalar etrafında boşluklar oluştuğu ve oluşan bu boşlukların bazılarının etrenjit ile dolu olduğu rapor edilmektedir [11]. Ancak farklı kuruluşlarca yapılan ikinci bir incelemeyle üretimde kullanılan agreganın reaktif olması nedeniyle hasarın esas nedeninin agrega etrafındaki boşluklarda oluşan ASR jelinin olduğu belirtilmektedir [18].



Şekil 3. Öngerilmeli köprü kirişlerinde meydana gelen GEO kaynaklı hasar



Şekil 4. Agregada etrafında boşluktaki etrenjit varlığı

Bilindiği gibi ASR yüksek sıcaklıktaki kürde hızlanmakta ve alkalileri jelleştirerek boşluk suyu alkaliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Boşluk suyu alkaliliğinin azalması etrenjit stabilitesini artırmaktadır. Bu durum boşluk suyundaki sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak yeni etrenjit oluşumunu tetiklemektedir. Bahsedilen bu mekanizma, ASR ile birlikte GEO'nun da meydana gelmesinin ve buna bağlı olarak betona daha çok hasar vermesinin sebebi olarak gösterilmektedir. Çünkü boşluk suyu alkaliliği düşerse oluşacak etrenjit miktarı artmakta ve betonun boşluk yapısının uygunluğuna göre de oluşan etrenjit genleştirici etki yaratabileceği belirtilmektedir [17, 19].

GEO yalnızca buhar kürü uygulanmış yapı elemanları için risk teşkil etmemektedir. Buhar kürü uygulanmayan, iç ısı artan veya dıştan ısınan beton veya betonarme elemanlarda da GEO kaynaklı hasarlar görülebilir. Örneğin, Suudi Arabistan'da buhar kürü uygulanmayan beton bir uçak pistinde çatlakların meydana geldiği gözlemlenmiş ve bu çatlaklarda fazla miktarda etrenjit biriktiği tespit edilmiştir. Çatlakların asıl nedeninin ısı

gerilmeler olduğu ve etrenjitin oluşan çatlaklara sonradan dolmuş olabileceği ifade edilmektedir [5, 15]. İlk bakışta hasarın nedeni etrenjit oluşumu gibi görünse de oluşan etrenjit birikimi aslında çatlağın sebebi değil bir sonucudur.

Buhar kürü uygulanmayan ancak ıslanma-kuruma etkisine maruz kalan kütle beton örneklerinde meydana gelen hasarın şiddetinin oldukça fazla olduğu tespit edilmiştir. Islanma-kuruma gibi kılcal çatlak oluşturan etkilerin yanı sıra nem etkisi de GEO potansiyelini artırmaktadır [20, 21]. Bu duruma örnek olarak köprü elemanları gösterilebilir. Örneğin, Fransa’da 1955’te yapımı biten bir köprünün başlıklarından birinde yoğun şekilde çatlaklar olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5). Bahsedilen bu kütle beton 1954 Ağustos ayında üretilmiştir. Yapılan hesaplamalarla bu tür kütle betonlarda, betonun merkezi ile dış yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkının betonun ilk üretildiği zamanlarda 50-60°C’ye kadar çıkabileceği belirlenmiş olduğu vurgulanmaktadır. Oluşan bu sıcaklık farkı büyük ihtimal kılcal çatlak oluşturarak yapı elemanına nem girişini kolaylaştırdığı belirtilmektedir. Bu yüksek sıcaklık, ilk oluşan etrenjitin yapısını bozarak GEO için uygun ortam yaratmış olabilir. Yapılan incelemeler sonucu, buhar kürü uygulanmayan bu köprü elemanında oluşan çatlaklarda çok miktarda etrenjit olduğu tespit edilmiştir [22].

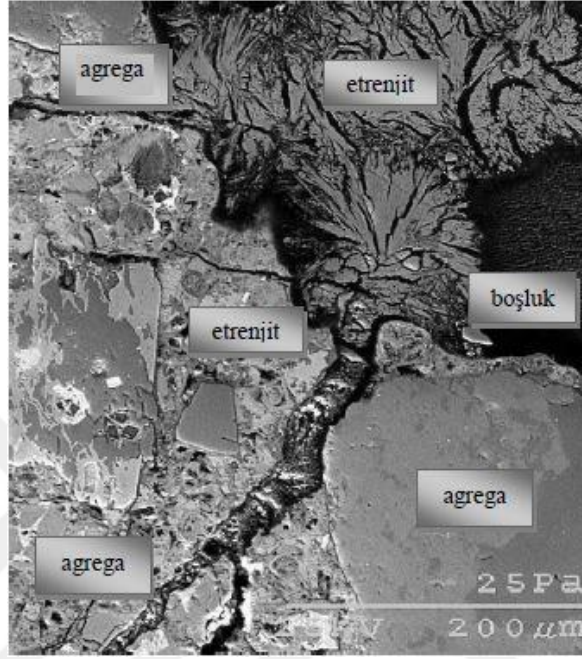


Şekil 5. Köprü başlığında GEO kaynaklı meydana gelen hasar [22].

Donma-çözülme etkisi de ASR gibi GEO ile birlikte görülebilmektedir. Donma-çözülme etkisi sonucu oluşan kılcal çatlaklar GEO için uygun ortam yaratmaktadır [17]. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda buhar kürü uygulanmış örneklerin, standart kürde bekletilen örneklerle kıyasla donma-çözülme etkisinden daha fazla etkilendikleri gözlemlenmiş olduğu rapor edilmektedir [23].

Soğuk ortam koşullarında kararlı yapıdan uzak olan monosülfat, donma-çözülme, ıslanma-kuruma gibi etkilerin varlığında ayrışmakta ve etrenjite dönüşmektedir. Şekil 6’da,

yeniden kristalize olan iğnemi yapıya sahip etrenjit kristallerinin boşlukları doldurduğu görülmektedir. Sürüklenmiş hava boşluklarının performansını azaltan bu durum, etrenjitin hasarın şiddetini dolaylı yoldan artırdığının da bir göstergesidir [5, 24, 25].



Şekil 6. Donma-çözülme etkisi esnasında meydana gelen etrenjitin boşluklara girmesi

GEO'dan etkilenmiş yapılarda görülen çatlak şekilleri, ASR sonucu oluşan çatlaklara benzemektedir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, betonarme yapılardaki çatlaklar yüzeye dik olarak yayılan ince çatlaklar biçiminde veya Şekil 8'deki gibi dış yüzeyde harita şeklinde çatlaklar biçiminde oluşmaktadır. Şekil 9'da gösterildiği üzere, donatısız betonlarda çatlak genişliği 25 mm'ye kadar çıkabilmektedir [26].



Şekil 7. Bir otoyol viyadük ayağında GEO nedeniyle oluşan çatlaklar [27].



Şekil 8. GEO ve ASR sonucu harita şeklinde çatlamanın olduğu betonarme köprü kanat duvarının görüntüsü [28].



Şekil 9. GEO kaynaklı rıhtım duvarında oluşan çatlama [26].

Harita şeklindeki çatlaklara bir başka örnek Bourgogne Köprüsü verilebilir. Fransa’da inşa edilen bu köprünün Şekil 10’da görüldüğü üzere köprü tabanında GEO kaynaklı çatlaklar meydana gelmiştir [29].



Şekil 10. Köprü taban betonunda GEO kaynaklı çatlaklar (Bourgogne Köprüsü)

Bir başka GEO kaynaklı hasar Sri Lanka’da bir karayolu projesinde meydana gelmiştir. Proje kapsamında inşa edilen köprünün bazı kazık başlıklarında ciddi şekilde çatlaklar oluşmuştur ve yapılan incelemeler sonucunda çatlamanın asıl nedeninin gecikmiş etrenjit oluşumu olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 11’den görüldüğü üzere, başlıklarda harita şeklinde GEO çatlakları meydana geldiği görülmektedir [30].



Şekil 11. Köprü kazık başlıklarda harita şeklinde çatlaklar

Literatürde şimdiye kadar ülkemizde GEO kaynaklı bir hasar tespit edildiğine dair herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu, GEO kaynaklı hasar olmayacağı anlamına gelmemektedir. Zira pek çok prefabrik yapı elemanında potansiyel olarak GEO kaynaklı hasar oluşma riskinin yüksek olduğunu söylemek mümkündür.

Literatürde mevcut saha örneklerinden görüldüğü üzere, GEO kaynaklı hasar tek başına nadir olarak görülmekte ve ilaveten kılcal çatlak oluşturuca hasar mekanizmalarının (ıslanma-kuruma, donma-çözülme gibi) da bulunması gerekmektedir [22, 31].

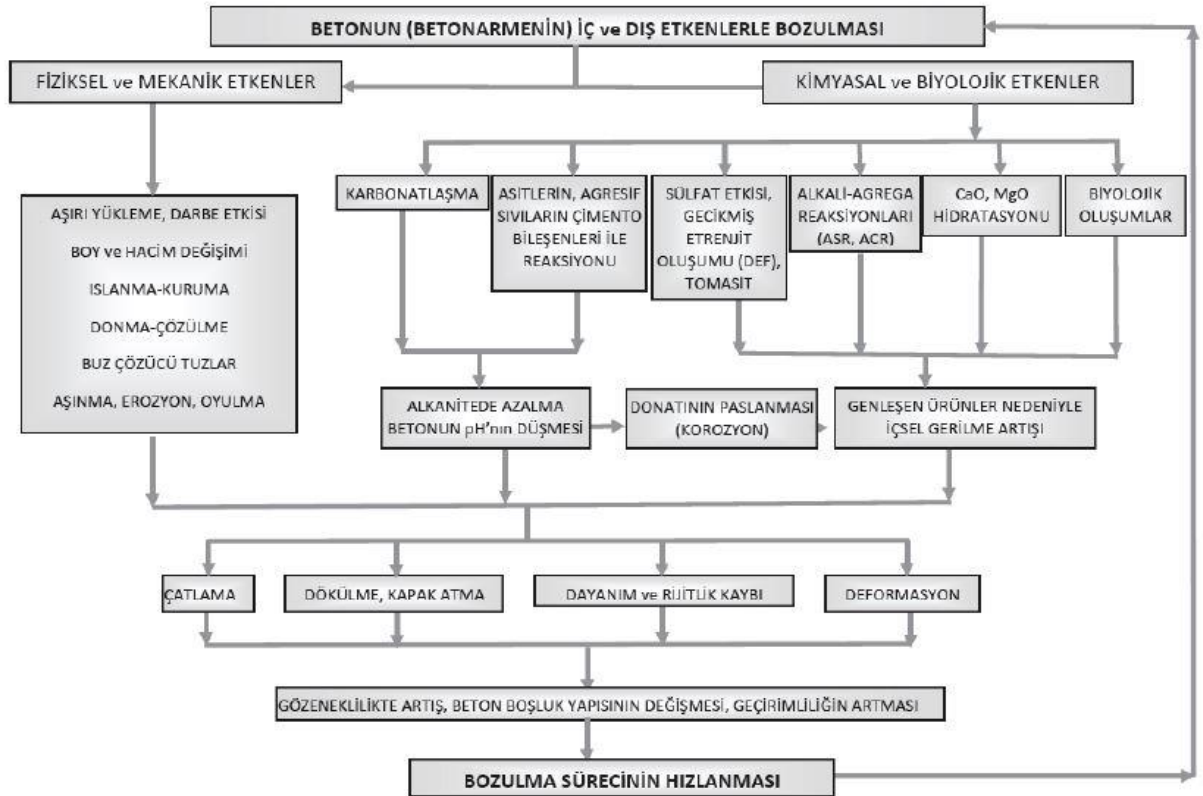
1.4. Betonda Durabilite

Yapıların ve yapı elemanlarının servis ömrü süresince işlevlerini yerine getirmesine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık denir. Yapıların durabilitesini etkileyen ana faktörler, yapı elemanı bünyesinde mevcut boşluk ve çatlaklarda su ile taşınan zararlı maddelerdir. Suyun, zararlı maddelerin beton bünyesine taşınımı ve bu zararlı maddelerin beton ile tepkimesinin hızı ve şiddeti betonun bozulma sürecinin ilerlemesi bakımından önem arz etmektedir. Taşınım boyutu, hızı ve etkisi büyük oranda betonun yapısındaki boşluk ve çatlakların miktarı, boyutu ve birbirleriyle bağlantılı olması yanı sıra beton yüzeyindeki “mikroiklime” de bağlıdır. Agreganın beton içinde çimento hamuru ile kaplanmış olması ve boşluk oranının az olması durumunda betonun geçirimsizliği büyük oranda çimento hamuru ve agrega-çimento hamuru arayüzeyinin yapısıyla doğrudan ilgilidir. Beton bünyesindeki ve çimento hamurundaki çatlak ve boşluklar genellikle yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür, kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terleme yoluyla atılması,

buharlaşma olayları ve hava sürükleyici katkı maddelerinin ilave edilmesi gibi nedenlerle açıklanabilir. Beton bünyesindeki ve çimento hamurundaki boşluklar mikro, kılcal (kapiler) ve makro olarak sınıflandırılabilir. Durabilite üzerinde büyük oranda kılcal ve makro boyutta olan boşluklar etkili olmaktadır [32].

1.4.1. Betonun Bozulma Mekanizmaları

Beton ve betonarme yapılarda bozulmaya neden olan fiziksel, kimyasal, mekanik ve biyolojik kökenli etkenler Şekil 12’de verilmektedir. Fiziksel etkenler arasında donma-çözülme, buz çözücü tuzların kullanımı, yüksek sıcaklık gibi etkiler verilebilir. Gecikmiş etrenjit oluşumunun da içinde yer aldığı kimyasal ve biyolojik etkenler grubunda karbonatlaşma, sülfat etkisi, alkali-agrega reaksiyonu, korozyon ve bazı asit ve tuz etkileri bulunmaktadır. Kimyasal bozulmaya neden olan etkenler beton bünyesine dışarıdan giren zararlı maddelerden kaynaklanabileceği gibi beton bileşiminde mevcut malzemelerden de kaynaklanabilmektedir. Mekanik etkenlere örnek olarak darbe, aşınma, erozyon ve kavitasyon (oyulma) gibi etkenler verilebilir [32].



Şekil 12. Betonun bozulma mekanizmaları [32].

1.4.1.1. Fiziksel ve Mekanik Etkenler

Betonda bozulmaya neden olan fiziksel ve mekanik etkenler iki ana gruba ayrılabilir. Bunlardan birincisi, yüzey aşınması sebebiyle kütle kaybına yol açanlar diğeri ise betonda çatlama gibi hasarlara neden olanlardır. Aşınma, erozyon ve kavitasyon yüzey aşınması sebebiyle kütle kaybına yol açanlar grubuna girerken, hacim değişimleri, ıslanma-kuruma, yüksek sıcaklıklar ve yangın, donma-çözülme, aşırı yükleme, yorulma gibi etkenler çatlama yol açanlar grubuna girer. Uygulamada beton fiziksel ve kimyasal birçok etkiye maruz kalabilmekte ve bu etkiler bir diğerin gelişim sürecini hızlandırabilmektedir. Betonun fiziksel etkenlerle çatlama sonucu geçirimsizliğinin artması ve buna bağlı olarak da betonun kimyasal nedenlerle bozulmasının kolaylaşması bu sürece örnek olarak verilebilir [33].

1.4.1.2. Kimyasal ve Biyolojik Etkenler

Kimyasal reaksiyonlar, betonun kimyasal olarak direncini kaybetmesine neden olan dış ortamdaki agresif maddeler ile hidrasyon ürünleri arasında meydana gelen tepkimelerdir.

Betonun bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyonlar üç ana gruba ayrılabilir (Şekil 12). I. grup reaksiyonlar, düşük sertlikteki suların çimentonun hidrasyon ürünlerini çözmesi ve yıkayarak beton bünyesinden uzaklaştırması şeklinde meydana gelir. Bu sürece Ca(OH)_2 'in çözünerek beton bünyesinden ayrılması örnek olarak verilebilir. II. grup reaksiyonlar, agresif sıvıların hidrasyon ürünlerini çözmesi şeklinde meydana gelir. Reaksiyon ürünleri ya yıkanarak beton bünyesinden uzaklaşır ya da suda çözünmeyen yeni bir yapı oluştururlar. Asitlerin ve Mg^{++} iyonu içeren suların yol açtığı hasar bu tür reaksiyonlara örnek verilebilir. III. grup reaksiyonlar ise genleşen ürünler oluşturarak betonda hasara sebep olurlar. Alkali-silika reaksiyonu (ASR), sülfat etkisi, gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO), tomasit oluşumu, magnezyum oksit (MgO) ve kalsiyum oksit (CaO) gibi çimento bileşenlerinin gecikmiş tepkimeleri, beton içine gömülü çelik donatının korozyonu gibi kimyasal bozulmalar III. grup reaksiyonlara verilebilecek en karakteristik örneklerdir [33].

Beton, üzerindeki veya yakınındaki biyolojik oluşumlardan da etkilenebilir. Bitki veya ağaç kökleri, çatlaklı ve boşluklu bölgelerden beton bünyesine girer ve orada gelişim gösterirler. Genleşme biçiminde oluşan bu gelişim beton elemanların çatlama ve hasar

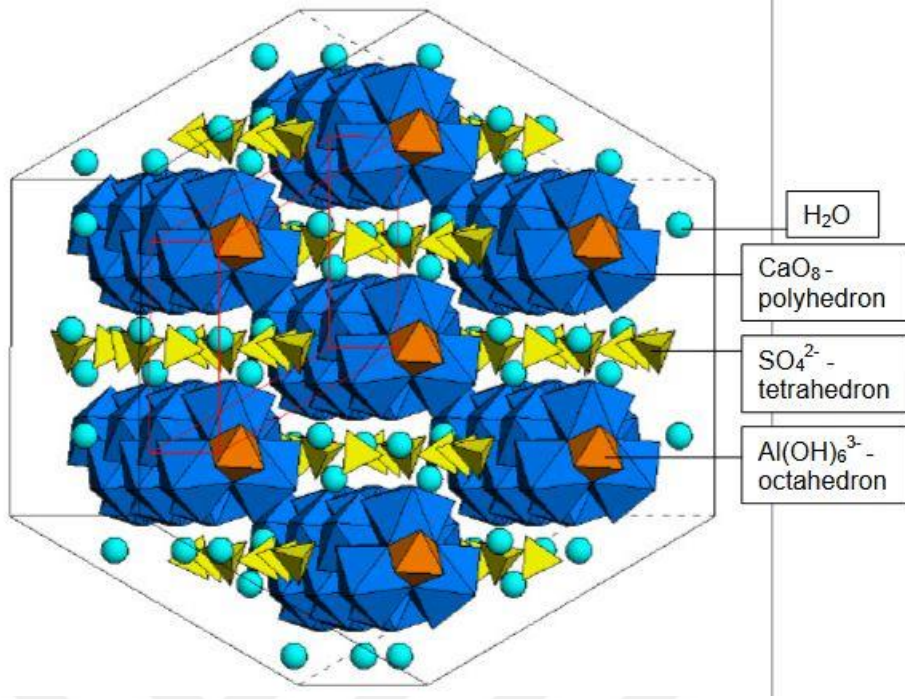
görmesine yol açar [34]. Bir başka etki ise kanalizasyon sistemlerinde görülmektedir. Asit etkisine neden olan bazı oluşumlar, biyolojik reaksiyonlar sonucu betonda hasara yol açabilmektedir [35].

1.5. Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (GEO-Delayed Ettringite Formation)

Gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO), dışarıdan herhangi bir sülfat girişi olmaksızın çeşitli nedenlerle (sıcaklık etkisi gibi) sertleşmiş betonda zamanla etrenjit oluşması şeklinde tanımlanabilir. Etrenjit, çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan bir reaksiyon ürünüdür. Beton taze halde iken etrenjit oluşmasına müsait bir yapıya sahiptir. Bu nedenle oluşan etrenjit betonun bünyesinde herhangi bir genişlemeye neden olmaz. Ancak sertleşmiş betonda herhangi bir nedenle etrenjit oluşumu beton bünyesinde hasara neden olabilecek ölçüde genişlemelere neden olabilir [5].

Hekzagonal prizmatik kristal kafes yapıya sahip etrenjit, çimento kimyasında 1890 yılında ilk kez Candlot tarafından keşfedilmiştir. Candlot, alçıtaşının kalsiyum alümina çimentosunun hidratasyonu üzerindeki etkisini araştırırken etrenjiti tespit etmiştir [13, 36]. Günümüzde etrenjit, AFt ($Al_2O_3-Fe_2O_3$ -tri) faz grubunun içinde tanımlanmaktadır. Genel formülü $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ olan etrenjitin yapısındaki Alüminyum, Silisyum ile yer değiştirdiği takdirde tomasit kristaline dönüşmektedir [37]. Kristal yapısı etrenjitten biraz daha farklı olan monosülfat, AFm ($Al_2O_3-Fe_2O_3$ -mono) faz grubuna girer. Genel formülü $3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.13H_2O$ olan monosülfat, hekzagonal levha şeklinde oda sıcaklığında yarı kararlı (metastabil) halde bir kristaldir. Yüksek sıcaklıklarda kararlı halde olan bu kristal yapı, oda sıcaklığında yeterli sülfat ve nem mevcudiyeti halinde etrenjite dönüşme potansiyeline sahiptir [13].

Bünyesinde 32 mol su bulunan etrenjit merkezinde alümina ve kalsiyum atomları içeren, dış katmanlarında sülfür atomu bulunan bir kristal yapıya sahiptir. Suya doygun bir ortamda etrenjit belli sıcaklığa kadar (70-80°C) stabilitesini koruyan bir mineraldir. Sıcaklığın artması halinde Şekil 13'te görülen kafes sistem bozulur ve etrenjit stabilitesini yitirir. Bunun yanı sıra etrenjit içinde bulunduğu ortamda nem miktarı azaldığında bünyesinde bulunan 32 mol suyu kaybetmeye başlar ve belli bir süreden sonra bünyesinde 10-13 mol kadar su içeren meta-etrenjite dönüşerek stabilitesini kaybedebilir [38].



Şekil 13. Etrenjit kristalinin kafes yapısı (Taylor Modeli) [5].

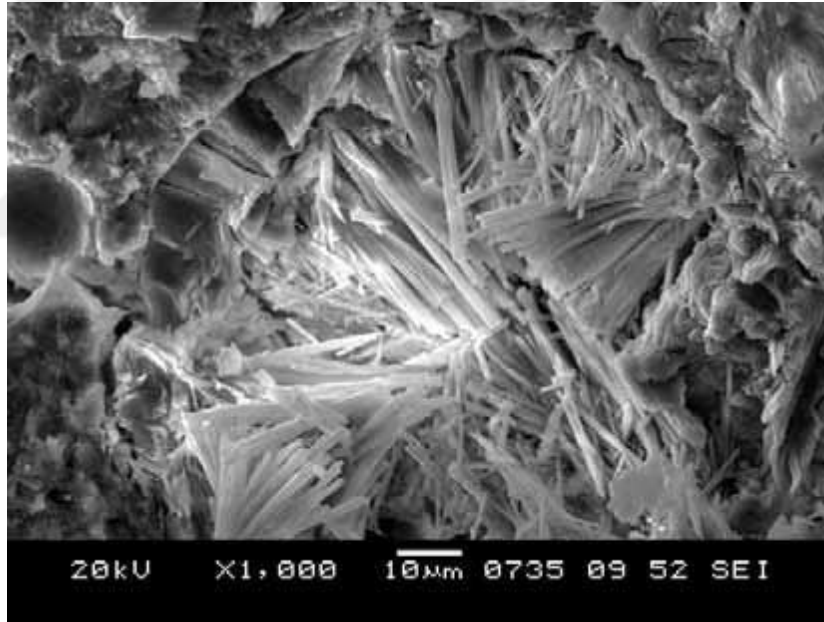
Genleşen ürünler oluşturan kimyasal reaksiyonlar grubunda yer alan sülfat etkisi, dış sülfat etkisi ve iç sülfat etkisi olarak iki gruba ayrılabilir. Dış sülfat etkisi, sertleşmiş betona dış kaynaklardan gelen sülfat iyonlarının (SO_4^{2-}) hidrasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyona girmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda betonda bazı yeni ürünler meydana gelir. Oluşan bu ürünler betonda hacim artışı, kohezyon kaybı, kütle kaybı gibi oluşumlara ilaveten çatlamaya da neden olabilmektedir [39].

İç sülfat etkisi ise betonda kullanılan çimento, agrega, su ve katkılardan gelen sülfat iyonlarının (SO_4^{2-}) betonun sertleşmesinden sonra uygun ortam şartlarında genleştirici yeni ürünler oluşturmasıdır [39].

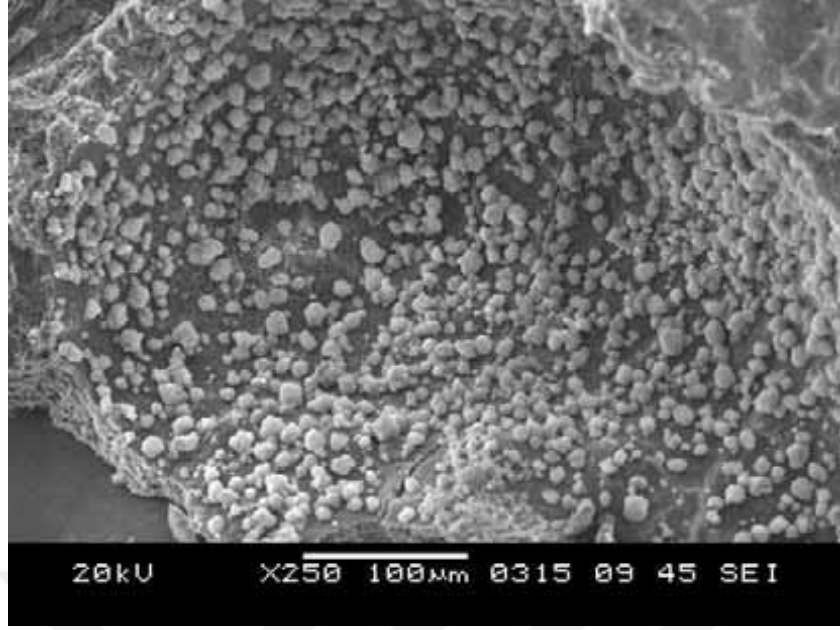
İçsel bir sülfat etkisi olan gecikmiş etrenjit oluşumunun nedeni, özellikle prefabrik sektörde yapı elemanlarının hızlı priz alması ve dayanım kazanması amacıyla uygulanan yüksek kür sıcaklığına bağlanmaktadır [4]. 70°C 'nin üzerindeki buhar kürü sıcaklıklarında etrenjit oluşumu engellenir veya çimento hamurunda oluşan etrenjitin bir kısmı veya tamamı ayrışır [9]. Bu durumda boşluk suyu alkaliliğinin yüksek olması da etrenjitin çözünürlüğünü artırır. Etrenjitin çözünmesiyle de boşluk suyuna salınan sülfat miktarı artar [31, 40, 41]. Bu ayrışma sonucunda oluşan SO_4^{2-} ve Al^{+3} iyonları C-S-H tarafından absorbe

edilir veya monosülfata dönüşür [9]. Soğuma safhasında ise yavaşça geri salınan sülfatın artması, etrenjit oluşumuna katkı sağlayacağı için GEO riskini de artırmaktadır [40].

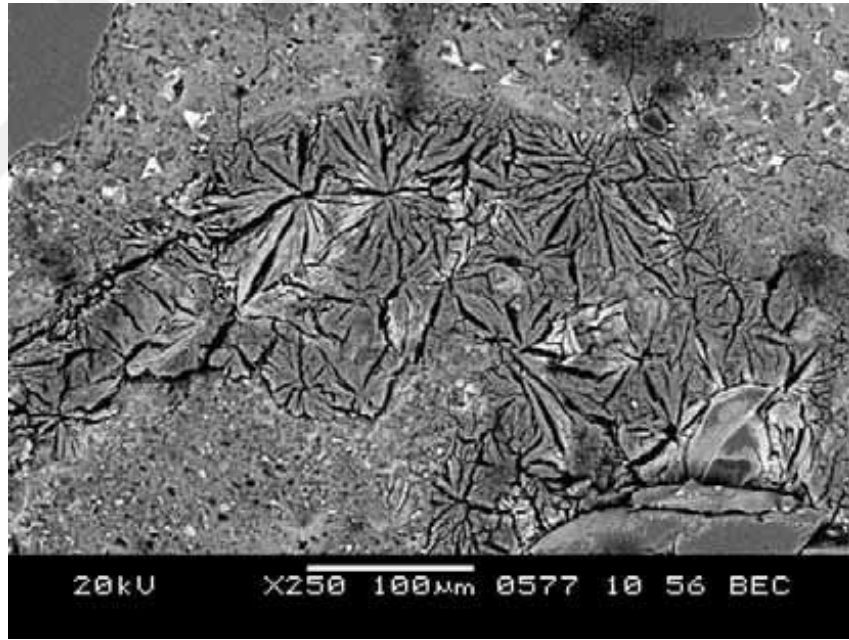
Gecikmiş etrenjit oluşumu nedeniyle genişleme gösteren örnekler üzerinde bazı mikroyapı incelemeleri yapılmış ve bu incelemeler sonucunda gecikmiş etrenjit morfolojisinin, oluşum yeri ve zamanına göre değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde genel olarak iğnemsî, top ve masif olmak üzere üç tip etrenjit tespit edilmiştir (Şekil 14, 15, 16). Bunlardan iğnemsî etrenjit kristalleri 20-30 nm çaplı ve 30-40 mikron uzunluğunda olup oldukça küçük boyutlu kristallerdir [42]. Top etrenjit, iri boşluklarda oluşan ve genişletirici etkisi bulunmayan tiptir [32]. Masif etrenjitler ise özellikle çimento hamuru içinde, kılcal çatlaklarda oluşarak genişlemeye neden olmaktadır [42].



Şekil 14. İğnemsî etrenjit oluşumu [42].

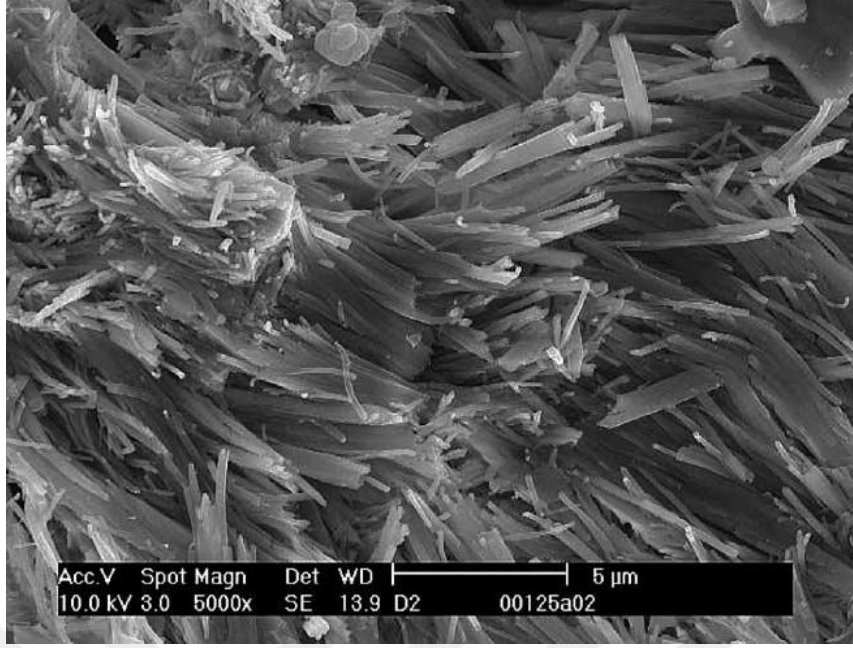


Şekil 15. Top etrenjit oluşumu [42].



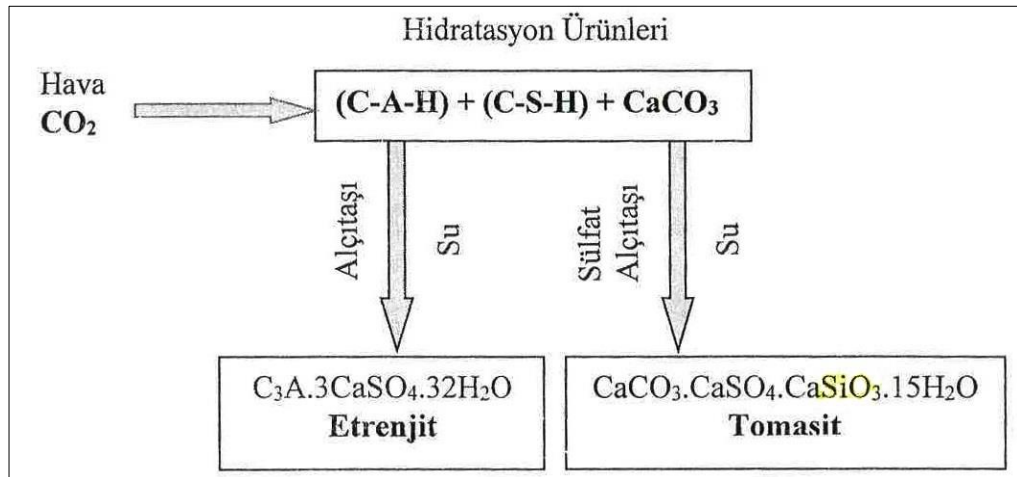
Şekil 16. Masif etrenjit oluşumu [42].

Sülfat etkisi sonucu meydana gelen reaksiyon ürünlerinden bir diğeri ise kristal yapısı etrenjite çok benzeyen tomasittir. Tomasitin genel formülü $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir (Şekil 17).



Şekil 17. Tomasit morfolojisi [43].

Tomasit oluşumu için Şekil 18’de görüldüğü gibi sülfat kaynağı, kalsiyum karbonat kaynağı ve silis kaynağı gereklidir. Betona dış ortamdan sülfat girişi söz konusu ise silis herhangi bir nedenden dolayı zayıflayan C-S-H jelinden gelebilir ve kalsiyum karbonat kaynağı ise karbonatlaşma sonucu oluşabilir [32].



Şekil 18. Etrenjit ve tomasit minerallerinin oluşum mekanizması

Ayrıca, beton üretiminde dolomitik kireçtaşı (CaMg(CO₃)₂) veya kireçtaşı (CaCO₃) içerikli agregalar kullanılması durumunda da tomasit oluşumu için gerekli karbonat iyonu

(CO₃⁻²) sağlanmış olur. Tomasit oluşumundaki silikatın (SiO₃) ana kaynağı C-S-H jelidir. Silikatlar, beton üretimi sırasında hidrate olmamış C₃S (Trikalsiyum silikat) veya C₂S (Dikalsiyum silikat)'den de gelebilir [44].

Şekil 19'da tomasit oluşumu nedeniyle öndöküm beton istinat duvarında meydana gelen hasar görülmektedir.



Şekil 19. Tomasit oluşumu nedeniyle öndöküm beton istinat duvarında meydana gelen hasar [45].

1.6. GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen Faktörler

GEO kaynaklı genleşme için hemen hemen tüm araştırmacıların kabul ettiği en yaygın parametre yüksek kür sıcaklığı veya kütle betonların hidrasyon ısısı nedeniyle ulaştığı yüksek sıcaklıklardır. Diğer bazı faktörler ise çimentonun kimyasal bileşimi, çimentonun özgül yüzeyi, agrega özellikleri, S/Ç oranı ve geçirimsizlik, mineral katkı kullanımı ve kür koşulları olarak verilmektedir.

1.6.1. Çimentonun Kimyasal Bileşimi

GEO kaynaklı genleşmeyi etkileyen en önemli faktör, çimentonun kimyasal bileşimidir. Günümüzde hem erken dayanımı artırmak hem de çimento dayanım sınıfını yükseltmek amacıyla çimento bileşimindeki C₃S ve C₃A oranları artırılmakta ve bununla

birlikte çimentonun SO_3 oranı, alkali içeriği ve Blaine (özgül yüzey alanı) değerleri de artmaktadır [41, 46].

Çimentonun kimyasal bileşiminde SO_3 'ün iki kaynağı vardır. Bunlardan ilki klinkerden gelen ve bazı durumlarda belit fazında veya katı eriyik fazında dağılmış olarak bulunan SO_3 diğeri ise klinkerle birlikte öğütülerek çimentoya sonradan ilave edilen alçıtaşıdır ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). GEO, genel olarak yüksek oranda (%4-5) SO_3 içeren (yüksek sülfat içerikli klinkerlerden üretilmiş çimentolar) çimentolarda görülmektedir [17].

Klinkerden gelen sülfat genel olarak alkali sülfat formunda olduğu için çözünürlüğü de yüksektir. Örnek olarak, alkali sülfatlardan arkanit (K_2SO_4), aphtalit ($K_3N\bar{S}_4$), ender olarak tenardit (Na_2SO_4) ve kalsiyum langbeinit ($KC_2\bar{S}_3$) su ile çok hızlı reaksiyona girebilen sülfat kaynaklarıdır [47]. Hidratasyonun ilk 24 saatinde, klinkerden gelen SO_3 'ün tükendiğini gösteren çalışmalar bu teoriyi desteklemektedir [5, 48]. Burada çimentonun çok ince öğütülmesinin klinkerden gelen belit içine hapsolmuş SO_3 'ün fiziksel açıdan serbest kalmasını sağladığı göz önünde bulundurulmalıdır. Kısaca, buhar kürü olmadan klinkerden gelen SO_3 'ün tek başına genleştirici etkisi olduğu söylenemez [49, 50, 51].

Sülfata dayanıklı çimentolar haricinde diğer birçok çimento tipinde C_3A miktarı SO_3 miktarından daha fazladır. Bundan dolayı, hasar şiddetinin belirlenmesinde SO_3 miktarı kilit rol oynamaktadır [5].

Yüksek SO_3 oranlarına sahip çimentolarla hazırlanmış harç örneklerine buhar kürü uygulanmış ancak kürden sonra herhangi bir genleşme gözlemlenmediği rapor edilmektedir [40]. Bu durum birkaç nedenden kaynaklanabilir. İlki, kullanılan çimentoların C_3A oranlarının düşük olmasından, ikincisi ise boşluk suyundaki sülfat miktarının fazla olması durumunda buhar kürü esnasında etrenjitin stabilitesini korumasından kaynaklanabileceği ifade edilmektedir [20].

Çimento bileşenlerinden C_3A en önemli etrenjit kaynağı olup GEO kaynaklı genleşme C_3A oranı düşük çimentolarda gözlemlenmemektedir [40]. C_3A miktarının yanı sıra tane boyut dağılımı (çimento inceliği) de C_3A 'nın reaktifliğini etkileyebilmektedir [13].

Çoğu araştırmacıya göre ise C_3A 'nın ve SO_3 'ün çimentodaki miktarı GEO açısından pek fazla önem arz etmemektedir. Bu araştırmacılara göre, SO_3/Al_2O_3 ve $(SO_3)^2/Al_2O_3$ molar oranları, çimentoların GEO kaynaklı genleşme potansiyelinin belirlenmesinde daha önemli parametreler olarak belirtilmektedir. Day'e [31] göre, SO_3/Al_2O_3 oranının 0,7'den fazla olması veya $(SO_3)^2 / Al_2O_3$ oranının 2,0'den fazla olması durumunda, çimentolar

GEO açısından riskli sınıfına girmektedir. Buradaki Al_2O_3 miktarı, C_3A 'dan gelen aktif alüminayı temsil etmektedir.

Çimentonun kimyasal bileşimindeki alkali varlığı boşluk suyu alkaliliğini değiştirerek etrenjit stabilitesini etkilemektedir [5]. Normal bir Portland çimentosundaki eşdeğer Na_2O miktarı yaklaşık olarak %0,8-1,2 arasındadır. Bu koşullar altında düşük S/Ç oranına sahip çimento hamurundaki boşluk suyu pH değeri 13,5-14 arasındadır. Son derece yüksek olan bu pH değerlerinde mevcut olan mikrokristalin etrenjit stabilitesini korurken, yeni etrenjit oluşumu için uygun ortam bulunmamaktadır. Etrenjit oluşumu için pH değerinin, etrenjitin stabil olduğu aralığa (pH= 9,0-13,4) düşmesi gerekmektedir [52].

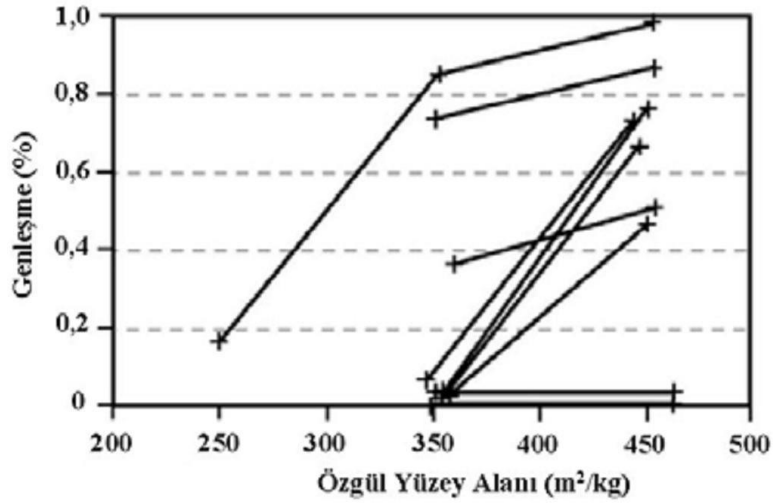
Buhar kürü esnasında sıcaklık artışıyla oluşan birincil etrenjit çözünmektedir. Bu aşamada boşluk suyu alkaliliğinin de yüksek olması etrenjitin çözünürlüğünü artırmaktadır. Bu da etrenjitin çözünmesiyle birlikte boşluk suyuna salınan sülfat miktarının arttığı anlamına gelmektedir [31, 40, 41]. Bilindiği gibi boşluk suyuna salınan sülfat, C-S-H yapısı tarafından tutulmakta veya monosülfat yapısını oluşturmaktadır [53]. Bu da alkaliliği yüksek çimentolardaki GEO riskinin daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. Diğer taraftan, örneklerin soğuma sonrası bekleme koşulları da boşluk suyu alkaliliğini değiştirebilmektedir. Bu aşamada boşluk suyu alkaliliğinin korunması, yeniden etrenjit oluşmasını engellemektedir. Yani, alkaliliği yüksek çözeltilerde bekletilen örneklerde GEO'ya rastlanmaz. ASR etkisi veya normal suda bekleyerek kireç kaybetme, sızma durumunda ise etrenjit oluşma riski artmaktadır [17].

Brown ve Bothe'ye [40] göre çimento bileşimindeki C_3S miktarı, oluşacak C-S-H jeli ile bağlantılı olduğundan GEO potansiyelini artırır. Çünkü C-S-H, buhar kürü esnasında etrenjitin stabilite kaybı ile boşluk suyuna saldığı sülfatı adeta bir sünger gibi absorbe etmektedir. Soğuma aşamasında ise yavaşça geri salınan sülfat miktarının artması da GEO riskini artırmaktadır. Ancak bu mekanizma içinde geçirimsizlik, C_3A ve SO_3 miktarı gibi daha farklı etkiler de bulunduğundan dolayı tek başına C_3S miktarının artışının gecikmiş etrenjit oluşumuna yol açacağını iddia etmek doğru değildir.

1.6.2. Çimentonun Özgül Yüzeyi

Çimento inceliği reaksiyona giren fazların reaktifliklerini etkilemektedir. Bugüne dek yapılan çalışmalardan çimento inceliğinin artırılmasının GEO potansiyelini artırdığı yönünde sonuçlar elde edilmiş olduğu ifade edilmektedir [40, 54].

Kelham deneysel çalışmasında, özgül yüzey alanı farklı çimentolar kullanmış, hazırladığı çimento harçlarına 90°C buhar kürü uygulamış ve sonrasında 1000 günlük genleşmeleri ölçmüştür. Kelham yaptığı bu deneysel çalışma sonucunda, genel olarak çimentoların özgül yüzey alanının artmasıyla GEO kaynaklı genleşmelerinin de arttığını gözlemlemiştir (Şekil 20) ve bu artış miktarı çimento tipine göre de farklılık gösterebilmektedir [40].



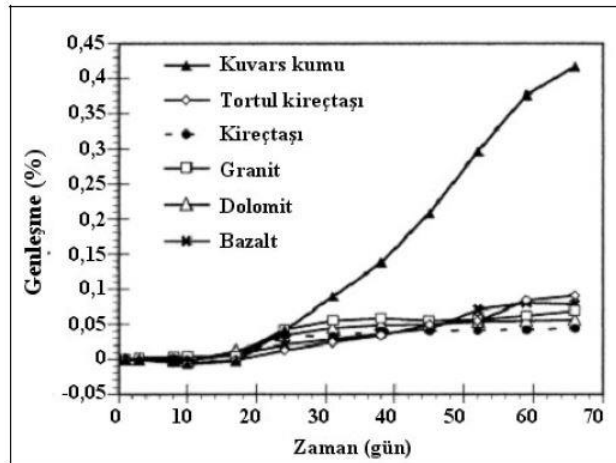
Şekil 20. Özgül yüzey alanı ve GEO kaynaklı genleşme miktarı arasındaki ilişki [40].

1.6.3. Agreganın Özellikleri

Betonda kullanılan agreganın miktarı, agreganın petrografik kökeni ve tane dağılımı GEO'yu etkileyen agreganın parametreleridir. GEO açısından etkisiz (inert) olan agreganın etkisi daha çok fizikseldir. Agreganın, ASR'de olduğu gibi reaksiyona doğrudan girmemektir. Çimento hamurundaki gerilmeler ve şekil değişimleri, arayüzey aracılığıyla agregaya aktarılmaktadır. Arayüzey özelliklerindeki farklılıklar, çeşitli etkiler sebebiyle içyapıda oluşan çatlakların yönünü ve miktarını değiştirmektedir. Böylelikle agreganın tipi, GEO kaynaklı genleşmeleri dolaylı yoldan etkilemektedir. Aynı şekilde, buhar kürü ve ısınma soğuma gibi ısı etkilerine maruz kalan betonlarda agregaların farklı ısı genleşme katsayılarına sahip olması, genleşme mekanizmasının farklı cereyan etmesine yol açmaktadır. Agreganın içermeyen çimento hamuru, agreganın kum içeren çimento harcı ve iri agreganın içeren betonun GEO kaynaklı genleşme potansiyelleri açısından karşılaştırıldığında beton, çimento harcı ve çimento hamuru şeklinde sıralanmaktadır.

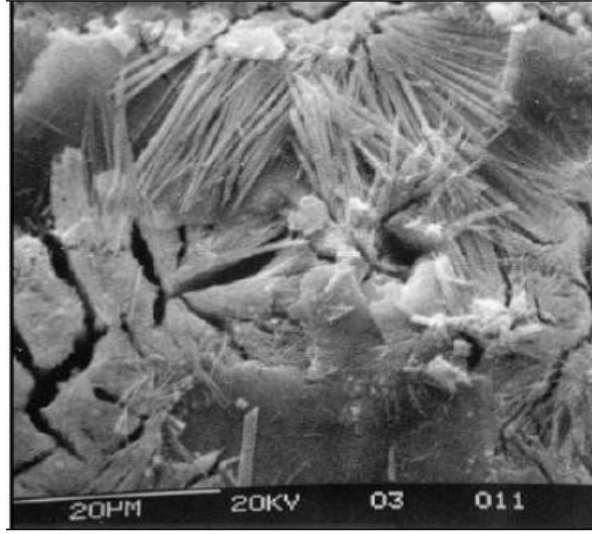
Fakat nihai genleşme miktarları karşılaştırıldığında ise bu sıralama tam tersine dönmektedir [55]. Elbette ki burada çimento ve agrega özellikleri, S/Ç oranı gibi parametreler değiştirilip farklı sıralamalar da elde edilebilmektedir. Burada anlatılmak istenen agrega miktarının GEO kaynaklı genleşme üzerindeki rolüdür. Agrega miktarı artırıldığında etrenjit oluşma potansiyeli azalacağından dolayı nihai genleşme miktarı da azalmaktadır. Agreganın petrografik kökeni, ısı genleşme katsayısını ve agrega yüzey özelliklerini etkilediğinden GEO kaynaklı genleşme mekanizmasını, genleşmenin oluşum hızını ve şiddetini de değiştirmektedir [20].

Grattan-Bellew vd. [56], deneysel bir çalışma gerçekleştirmiş ve kullanılan agrega tipinin harç örneklerindeki GEO kaynaklı genleşme hızı üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Deneyde tane boyut dağılımı aynı olan kireçtaşı, kuvars, dolomit, granit ve bazalt kumu ile GEO potansiyeli olan bir çimento kullanılmıştır. Harç örneklerine 12 saat 95°C buhar kürü uygulanmış ve soğutma sonrası örnekler bir çevrim ıslanma-kuruma etkisine maruz kalmıştır. Deneyi daha da hızlandırmak amacıyla örnekler üç çevrim daha ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Daha sonra, suda bekletilen örneklerin 70 gün sonundaki genleşme değerleri ölçülmüş ve deney sonuçları Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 21. Farklı agregalarla hazırlanan çimento harçlarının genleşme miktarları [56].

Örnekler üzerinde mikroyapı incelemeleri yapılmış ve Şekil 22’de görüldüğü gibi kuvars agrega kullanılan örneklerin yüzeylerinde masif etrenjit tabakaları oluştuğu tespit edilmiştir [56].



Şekil 22. Kuvars agrega kullanılan örnekteki masif etrenjit oluşumu

1.6.4. S/Ç Oranı ve Geçirimsizlik

S/Ç oranı oluşacak olan etrenjit yapısını belirlemektedir. Yüksek S/Ç oranına sahip betonlardaki boşluk suyu pH değeri daha düşük olduğundan dolayı etrenjit iri kristaller şeklinde çok sayıda bulunan kılcal boşluklarda oluşmakta ve genişleme oluşturmamaktadır. Diğer taraftan, düşük S/Ç oranına sahip betonlardaki boşluk suyu alkaliliği göreceli olarak daha yüksek olduğundan, oluşan etrenjit kristalleri daha küçük ve daha fazla miktardadır. Bu nedenle, kılcal boşlukların az sayıda olması durumunda oluşan mikrokristalin etrenjit genişleme etkisi yaratabilmektedir [13].

Gecikmiş etrenjit oluşumu için de benzer durum söz konusudur. Çok geçirimli (S/Ç=0,7) ve geçirimsiz betonlarda GEO kaynaklı hasar genel olarak gözlemlenmemektedir. Çünkü çok geçirimli betonlarda oluşan etrenjitin yeniden kristalleşmesi sonucu hasara sebep olmadan bağlantı kurabileceği çok sayıda kılcal boşluk bulunmaktadır. Dış sülfat etkisinde olduğu gibi iç sülfat kaynakları da sürekli olarak yenilenmediğinden bu boşlukların dolması ve genişleme etkisi yaratması pek mümkün görünmemektedir [57].

Dış ortamdaki etkilere açık olan prefabrik betonlar geçirimsizliği az ve yüksek dayanımlı olmasına rağmen GEO açısından en riskli grup olarak nitelendirilmektedir. Çünkü bu tarz prefabrik betonların imalatında hem inceliği yüksek hem de C_3A , SO_3 ve alkalice zengin olan çimentolar kullanılmaktadır. Hidratasyon ısısının ve betonun

sertleşmesinden sonra oluşan ısı etkilerinin yarattığı kılcal çatlak oluşumları GEO riskini artırmaktadır.

S/Ç oranı 0,4'ten küçük olan çimento harçlarında GEO'nun geciktiği, ancak genişleme ortaya çıktıktan sonra yapıya daha çok hasar verdiği Stark ve diğerleri tarafından da vurgulanmıştır. Çünkü ilk yaşlardaki çimento harcının düşük S/Ç oranına sahip olması geçirimsizliğin çok düşük olmasını sağlamıştır. Ancak zamanla çok uzun vadede de olsa su, çimento harcının iç kısımlarına ulaştığında veya içyapıda C-S-H tarafından yeterince sülfat boşluk suyuna geri salındığında GEO gözlemlenmektedir. S/Ç oranına bağlı olarak oluşan iri kılcal boşlukların sayısının azlığı, oluşan etrenjitin hasar yaratma ihtimalini de artırmaktadır [15, 55].

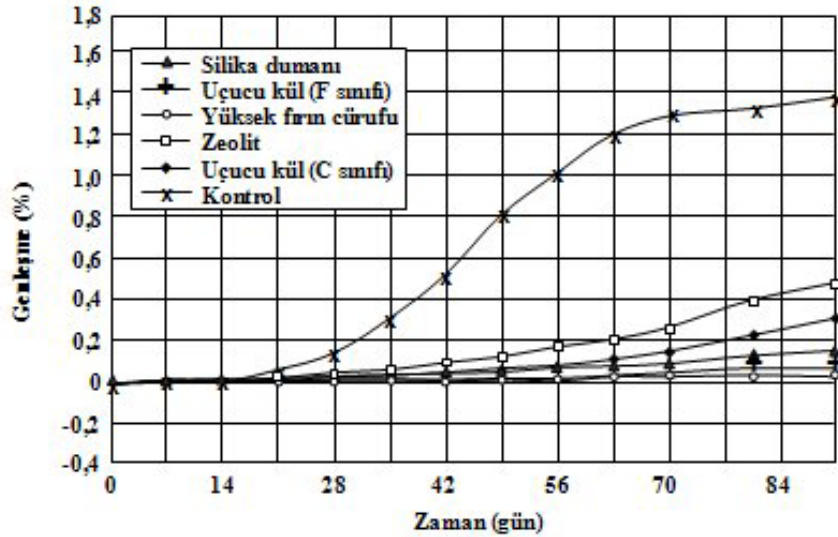
Geçirimsizliğin sonradan artması sulu ortamda bekleyen örneklerden alkali çıkışına sebep olmaktadır. Boşluk suyu alkaliliğinin azalması hem etrenjit stabilitesini artırmakta hem de C-S-H'nin sülfatı geri alma hızını artırmaktadır. Her iki etki de birbirini tetikleyerek GEO riskini artırmaktadır. Bu nedenle betonun geçirimsizliğinde zamanla meydana gelebilecek değişiklikler göz önünde bulundurulmalıdır [58].

1.6.5. Mineral Katkı Kullanımı

Mineral katkı kullanımı bilindiği gibi sülfat etkisine karşı alınabilecek oldukça etkili bir önlemdir. Çünkü mineral katkıları, beton karışımına belli oranlarda ikame edilerek etrenjitin oluşum kaynağı olan çimento miktarını azaltmakta ve bu durum dolaylı olarak hidrasyon ısısı nedeniyle oluşan ısı çatlakları azaltmaktadır [15]. Ayrıca mineral katkıları zayıf bir hidrasyon ürünü olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i bağlayarak ekstra dayanım ve geçirimsizlik sağlamaktadır. Doğal puzolanlar ve silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi yapay puzolanların beton dayanıklılığına sağladıkları katkı itibarıyla kullanımı her geçen gün önemi artmaktadır. Bunlar arasından silis dumanı, sülfat etkisine karşı en etkili mineral katkılardan bir tanesi olduğu kabul edilmektedir [59].

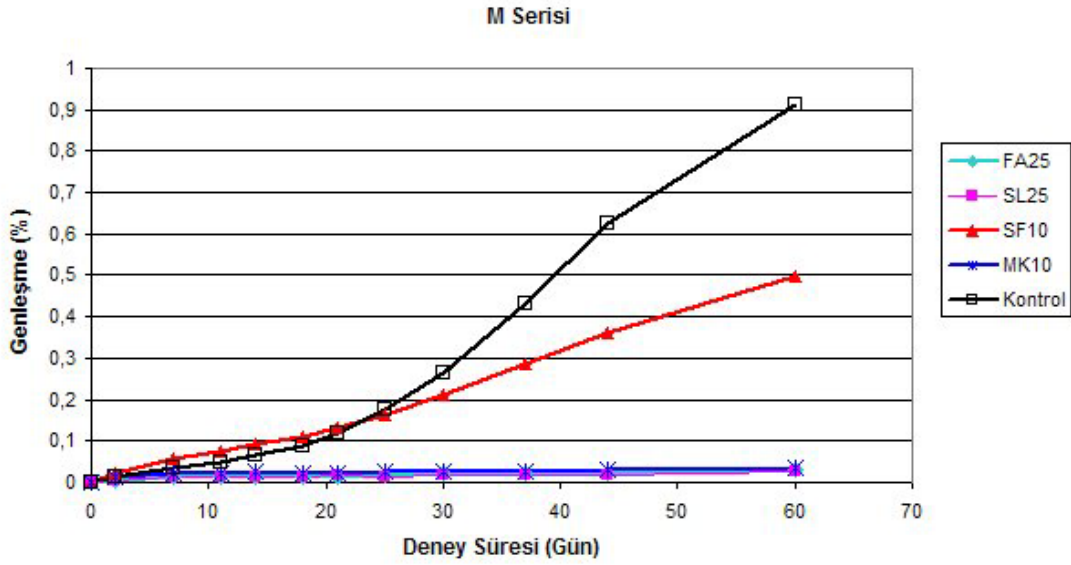
Mineral katkıları aynı zamanda GEO riskine karşı da etkilidir ve yapılan birçok araştırma bunu doğrulamaktadır [12, 15, 60, 61, 62]. Tasarımı iyi yapılmış ve iyi kür edilmiş mineral katkılı betonların geçirimsizliği oldukça az olabilmektedir. Bu bakımdan mineral katkıları GEO riskini azaltma konusunda çok etkili olabilmektedir. Ancak prefabrik eleman üreticilerinin çoğu erken dayanımlarının düşük olması sebebiyle mineral katkıları tercih etmemektedir.

Mineral katkıları üzerinde yapılan araştırmalarda farklı tür mineral katkıların GEO kaynaklı genleşmeyi önlemedeki etkilerinin de değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Fu, GEO riski olan bir çimentoyle ve belli oranlarda ikame ettiği farklı mineral katkılarıyla hazırladığı çimento harçlarına 90°C buhar kürü uygulaması sonrası ıslanma-kuruma etkisi uygulamıştır. Daha sonra suda bekletilen örneklerin 90 günlük genleşmeleri ölçülmüş ve grafiğe aktarılmıştır (Şekil 23). Grafik yorumlandığında, yüksek fırın cürufu ve F sınıfı uçucu kül diğer mineral katkılı harçlara kıyasla GEO kaynaklı genleşmeleri önlemesi bakımından daha iyi performans göstermiş olduğu görülmektedir. Yüksek fırın cürufu ve F sınıfı uçucu kül ile üretilen harçlar neredeyse hiç genleşmemiştir. En fazla genleşme mineral katkı kullanılmayan kontrol karışımlarında meydana gelmiştir [13].



Şekil 23. Farklı tür mineral katkıların GEO kaynaklı genleşme üzerindeki etkileri [13].

Tosun [42], doktora tezinde gecikmiş etrenjit oluşumu üzerine yaptığı deneysel çalışmada silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanmıştır. Şekil 24'te görüldüğü üzere, kullanılan mineral katkılardan en etkilisi yüksek fırın cürufu olmuştur. Bu sonuç Fu'nun yapmış olduğu çalışmayı desteklemektedir. Uçucu kül ve metakaolinin de oldukça iyi bir performans gösterdiği söylenebilir. Sadece, silis dumanı kullanılan örnekler diğer mineral katkılı örneklerle kıyasla daha fazla genleşmiştir. Silis dumanı, dayanım ve dayanıklılık bakımından betonda sıklıkla kullanılmasına rağmen GEO'yu önlemesi bakımından çok fazla etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 24. Mineral katkıların GEO kaynaklı genleşme üzerindeki etkileri [42].

Metakaolinin puzolan olarak çimento harcında kullanımı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık dolayısıyla 1990'lı yıllardan itibaren beton üretimindeki kullanımı yaygınlaşmıştır [63]. Metakaolinin harç ve betonda puzolan amaçlı kullanımı son yıllarda oldukça fazlaca araştırılan bir konu haline gelmiştir.

Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsinasyonu ile elde edilen metakaolin beyaz renkte ve amorf yapıda olan bir alümina silikattır. Normal ortam koşulları altında kaolin kararlı haldedir. 100-400°C civarında adsorbe sularını kaybeder, 400-650°C sıcaklık aralığında dehidrolize olarak bünyesinde bağlı bulunan suyun %14'ünü de kaybederek metakaoline dönüşür. Bu dönüşüm sonucu kaolin amorf yapı kazanır ve kimyasal olarak reaktif hale gelir [63].

Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) diğer puzolanlar gibi $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek çimentoya ekstra bağlayıcılık kazandırmaktadır. Yapılan çalışmalarda, uygun oranlarda ikame edilen metakaolinin, mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği, durabiliteyi artırdığı, kılcal su emmeyi ve geçirimsizliği azalttığı, çiçeklenmeyi kontrol altına aldığı ve özellikle ASR oluşumunu azalttığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, metakaolin kullanımı betonda sünme ve kuruma rötresini de azalttığı belirtilmektedir [64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72].

Metakaolin, $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girebilen aktif formda silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) içeren bir mineraldir. Beton ve harçta kil esaslı puzolan kullanımının ana nedenleri

bu malzemelerin kolayca ulaşılabilir olması ve dayanıklılığı olumlu yönde etkilemesidir. Ayrıca kalsinasyon sıcaklığı ve kil tipine bağlı olarak kürlemenin erken aşamalarında yüksek dayanım elde etmek de mümkündür. Bu erken dayanım artışı, metakaolinin filler etkisinden ve çimento hidrasyonunu hızlandırmasından dolayıdır [73]. Daha sonra bu etkiler, metakaolin ile $\text{Ca}(\text{OH})_2$ arasındaki puzolanik reaksiyon sonucu gelişmektedir. M.S. 127 yılında inşa edilen ve bugün halen ayakta kalabilen Roma'daki Pantheon binası, puzolan malzeme kullanmanın yararları bakımından verilebilecek en iyi örnektir. Bir başka örnek, 1960 yılında Amazon Havzası'nda inşa edilen bir rezervuar yapısıdır. Bu yapının inşasında yaklaşık 300.000 ton yerel kil kalsine edilmiş ve daha pahalı olan Portland çimentosuyla harmanlanmıştır. Yapıda yüksek oranda reaktif silika içeren agrega kullanılmasına rağmen ASR'den dolayı oluşan herhangi bir zarar tespit edilmemiştir [74]. Betona katılan metakaolin, ASR direncini artırmıştır.

Riyolit, magmanın yeryüzüne çıkışı sırasında hızla soğuyarak katılaşması sonucu oluşan amorf yapıda doğal bir kayadır. Riyolit mineralinin bu özelliği, çimentoda doğal puzolan olarak kullanılması bakımından önemli bir göstergedir [75]. Riyolit, TS EN 196-5'e göre puzolanik özellik gösteren bir mineraldir. Aynı zamanda riyolit minerali, TS 25'e göre belirlenen puzolanik aktivite değeri bakımından çimento üretiminde puzolan olarak kullanılabilir [75]. Baki [76], yüksek lisans tezinde yaptığı çalışmada betona çimento ile belirli oranlarda öğütölmüş riyolit ikame etmiş ve beton dayanımında belirgin bir azalmanın var olduğunu gözlemlemiştir. Bu husus tüm puzolanlarda rastlanmaktadır.

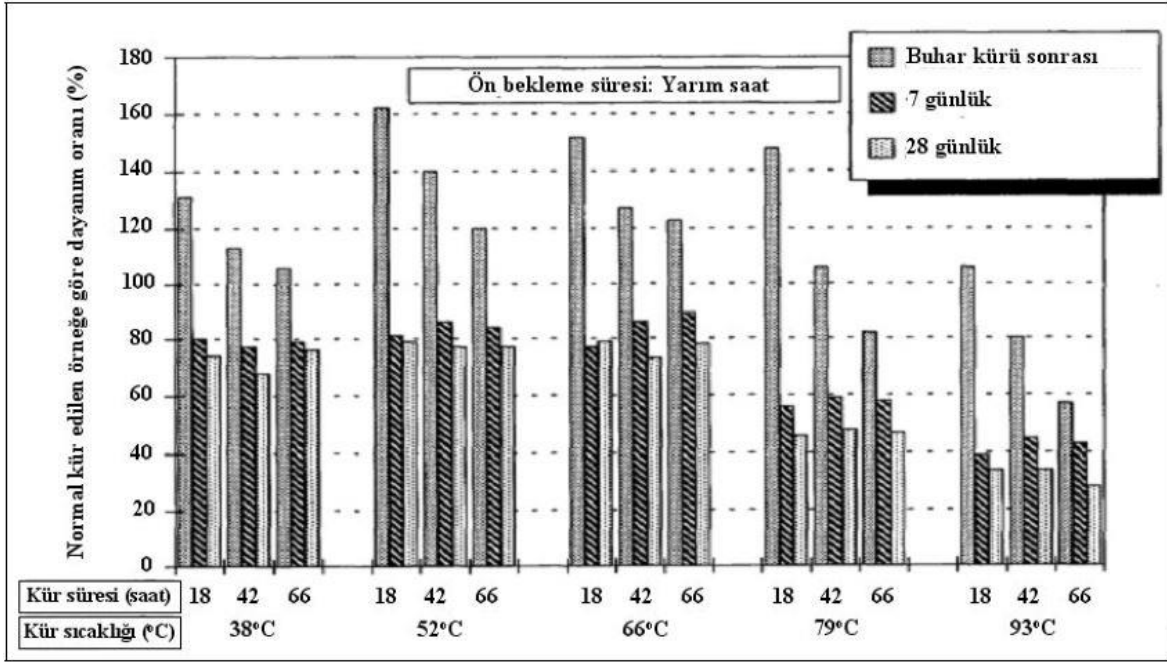
Riyolitın puzolan amaçlı kullanımıyla ilgili olarak İzlanda'dan bir örnek verilebilir. İzlanda'da agregalar çoğunlukla alkali reaktif özelliktedir. 1979 yılına kadar yerel olarak mevcut puzolanik bir malzeme olan ve toz haline getirilmiş riyolit camının betonda harmanlanmasıyla alkali reaktivite kontrol altına alınmaya çalışılmıştır. Bu karışım AAR genişmesini azaltmasına rağmen sorunu ortadan kaldırmaya yetmemiştir [77]. Ayrıca ABD'nin Güneybatı kıyılarına yakın bölgelerdeki beton kaldırımların üretiminde de düşük alkali içerikli çimentolarla birlikte belirli oranlarda riyolit ve andezit kombinasyonları kullanılmıştır [63].

Verilen saha örneklerinden de anlaşılacağı üzere, beton veya çimento harcında mineral katkı olarak riyolit kullanımı oldukça sınırlı olup daha çok agrega olarak kullanılmaktadır. Literatürde, mineral katkı olarak riyolit kullanımının gecikmiş etrenjit oluşumuna etkisiyle ilgili olarak herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Gerçekleştirilecek

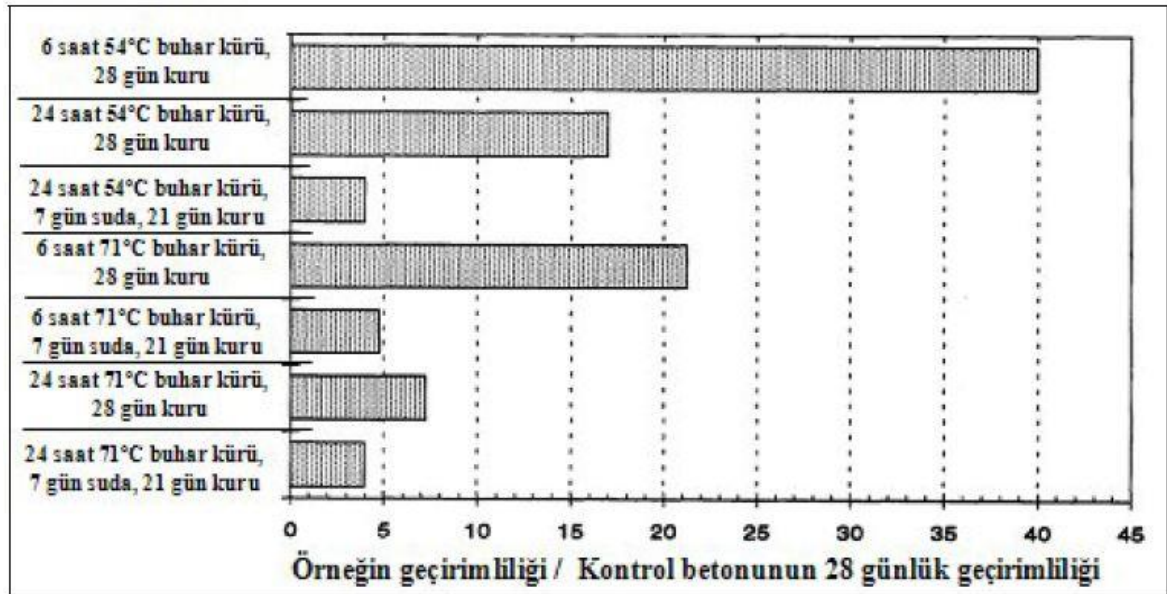
bu deneysel çalışmayla bu eksikliği gidermek adına sınırlı bir katkı yapmak amaçlanmaktadır.

1.6.6. Buhar Kürü Koşulları

Buhar kürü özellikle çimento esaslı malzemelerin hızlı dayanım kazanmasına yönelik olarak yapılan bir uygulamadır. Ancak uzun vadede dayanımda kayıp ve içyapıda porozite artışı gibi birtakım olumsuz etkilere neden olabileceği vurgulanmaktadır [31, 78, 79, 80]. Şekil 25'te, farklı sıcaklık ve sürelerde buhar kürü uygulamasının standart kür uygulamasına kıyasla erken ve nihai dayanımı ne denli etkilediği görülmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere buhar kürü uygulanmış örneğin 28 günlük dayanımı standart kür uygulanmış örneğin dayanımının %30'una kadar düşebilmektedir. Buhar kürü esnasında oluşan hidrasyon ürünlerinin düzensiz ve boşluklu yapıda olması dayanımın potansiyel değerinin altına düşmesine yol açmıştır [53, 81]. Aynı şekilde beton geçirimsizliği de farklı buhar kürü koşullarından olumsuz etkilenebilmektedir. Şekil 26'daki deney sonuçlarına göre, buhar kürü uygulanmış 28 günlük örneklerin geçirimsizliği, standart kür uygulanmış örneklere kıyasla %40 oranında artmıştır. Bu deneysel çalışmaların tümü buhar kürü uygulamasının bilinçsizce yapılması durumunda beton dayanıklılığını ve buna bağlı olarak betonun servis ömrünü olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.



Şekil 25. Farklı sıcaklık ve sürelerde buhar kürü uygulamasının erken ve nihai dayanıma etkisi



Şekil 26. Farklı buhar kürü koşullarının geçirimliliğe olan etkisi [31].

Lawrence [55], ön bekleme süresinin GEO kaynaklı genleşmeyi iki açıdan etkilediğini savunmaktadır. İlk olarak, ön bekleme süresinin çok kısa tutulması halinde, C-S-H yapısı henüz oluşmadan sıcaklık yükseldiğinden C-S-H yüzeyine adsorbe olan sülfat miktarı da azalacaktır. Böylece genleşme riski de azalmaktadır. Diğer taraftan, ön bekleme

süresinin çok uzun tutulması durumunda bu süreçte iri monosülfat kristalleri oluşmakta ve C-S-H yapısı masif hale gelerek sülfatı yapısına bağlayamamaktadır. Lawrence, C-S-H'nin sülfatı en fazla adsorbe edebileceği ve buna bağlı olarak da GEO riskini en fazla artırabileceği yaklaşık 4 saatlik pesimum bir ön bekleme süresinin olduğunu iddia etmektedir. Fu vd. [82] ise deneysel bir çalışma gerçekleştirmiş ve sonucunda, ön bekleme süresinin artmasıyla GEO kaynaklı genişlemenin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmayla, 4 saat gibi pesimum bir ön bekleme süresinin olduğu görüşü de çürütülmektedir.

Buhar kuru tepe sıcaklığı, GEO kaynaklı genişleme riski açısından buhar kuru öncesi oluşan etrenjitin stabilitesini etkileyen kritik parametrelerden bir tanesidir. Tepe sıcaklığının yüksek tutulması, etrenjit stabilitesinin azalmasına ve dolayısıyla boşluk suyuna salınan sülfat miktarının artmasına neden olmaktadır. Bilindiği üzere boşluk suyuna salınan sülfat C-S-H tarafından adsorbe edilmekte veya monosülfat oluşumuna katılmaktadır [53]. Bu nedenle birçok araştırmacı GEO riskini azaltmak amacıyla buhar kuru tepe sıcaklığına sınırlama getirmiştir. Lawrence [55], genişleme riski açısından buhar kuru tepe sıcaklığı için kritik değer olarak 65-70°C'yi tavsiye etmiştir. Day ve Lawrence literatür taramalarında, kritik buhar kuru tepe sıcaklığı için farklı araştırmacıların 70-75°C üstü ve 80°C gibi sıcaklıklar önerdiklerini de belirtmektedirler [20, 31]. Yang vd. [83] göre, tepe sıcaklığının artması GEO kaynaklı genişlemenin ortaya çıkış süresini kısaltmaktadır. Örnek vermek gerekirse, 70°C buhar kuru uygulanan bir örnekte 400 günde oluşan genişleme, 100°C buhar kuru sonrası yalnızca 90 günde oluşabilmektedir.

Isıtma hızı, GEO kaynaklı genişleme riski açısından sistematik olarak araştırılmamışsa da literatürde hızlı ısıtmanın genişlemeyi artıracak izlenimini veren çalışmalar mevcuttur [13]. Soğutma hızı üzerine yapılan çalışmalarda ise hızlı soğutmanın genişlemeyi azalttığı yönünde sonuçlar elde edilmiştir [20].

1.7. GEO Potansiyelinin Tespitinde Kullanılan Hızlandırılmış Deney Yöntemleri

Normal şartlarda GEO'nun ortaya çıkması yıllar almaktadır. Sahadaki örneklerde de genişlemenin oluşması için en azından kılcal çatlak oluşumu gibi diğer hasar mekanizmalarının devreye girmiş olması gerekir. Ayrıca laboratuvarında hazırlanan örneklerin boyutlarının küçük olması ve sürekli olarak suda bekletilmesi gibi hızlandırıcı etkilere rağmen genişlemenin oluşması zaman alıcı bir süreçtir [84, 85, 86, 87].

Normal şartlarda geçirimsiz betonlarda GEO kaynaklı genleşme oluşması çok uzun zaman almaktadır. Hızlandırıcı etkiler bu süreyi kısaltabilmektedir. GEO kaynaklı genleşme oluşumunu hızlandıran etkiler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

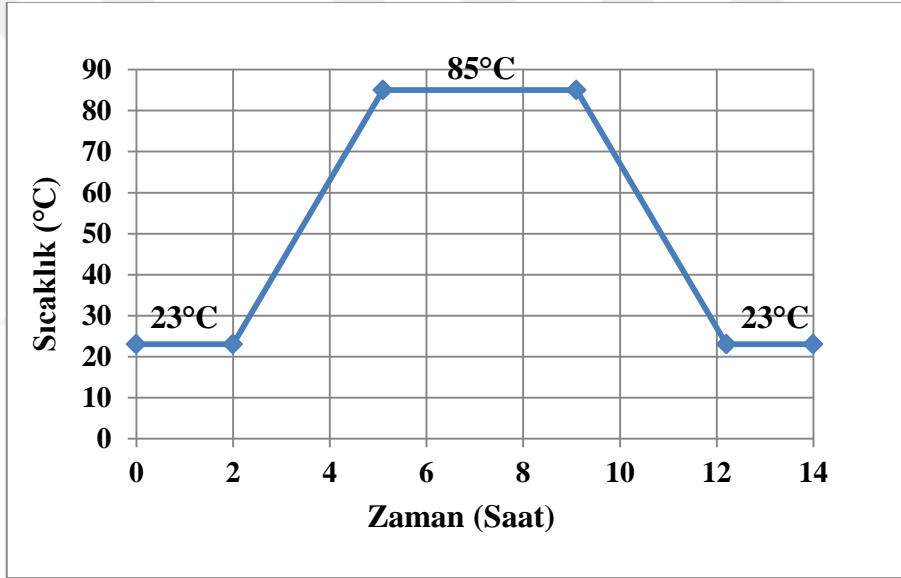
1. Hazırlanan örneklerin yüzey alanı/hacim oranının büyük olması veya boyutlarının küçük olması alkali kaçışını kolaylaştırdığı için GEO kaynaklı genleşme oluşumunu hızlandırmaktadır [58, 88, 89, 90].
2. Buhar kürü sonrası ıslanma ve kuruma etkisi gibi örneklerde ön çatlak oluşturan etkiler GEO kaynaklı genleşme oluşumunu hızlandırmaktadır [5, 13, 54, 86, 87].
3. Örnekleri saf suda bekletmek gibi içyapıdan alkali çıkışını kolaylaştıracak şekilde düzenlemek benzer şekilde GEO kaynaklı genleşme oluşumunu hızlandırmaktadır [58].
4. Küçük boyutlu örneklerde karbonatlaşma daha hızlı olacağından, CO₂ varlığı etrenjit stabilitesini kolayca etkilemektedir. Ancak su içinde bekletme durumunda ise bu etki az olmaktadır [58].

Laboratuvarda hazırlanan örneklerin GEO potansiyelini tespit etmek amacıyla ASTM veya AASHTO tarafından uygulamaya konan standart bir deney yöntemi yoktur. Bununla birlikte, araştırmacılar GEO'nun laboratuvar örnekleri üzerindeki etkisini belirleyebilecek deney yöntemleri geliştirmek için çaba göstermiştir. Yaygın olarak kullanılan ilk yöntemlerden biri Duggan yöntemidir. Attiogbe, Fu ve Kelham yöntemleri de GEO kaynaklı genleşme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan hızlandırılmış deney yöntemlerindedir. Bu yöntemler ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmektedir.

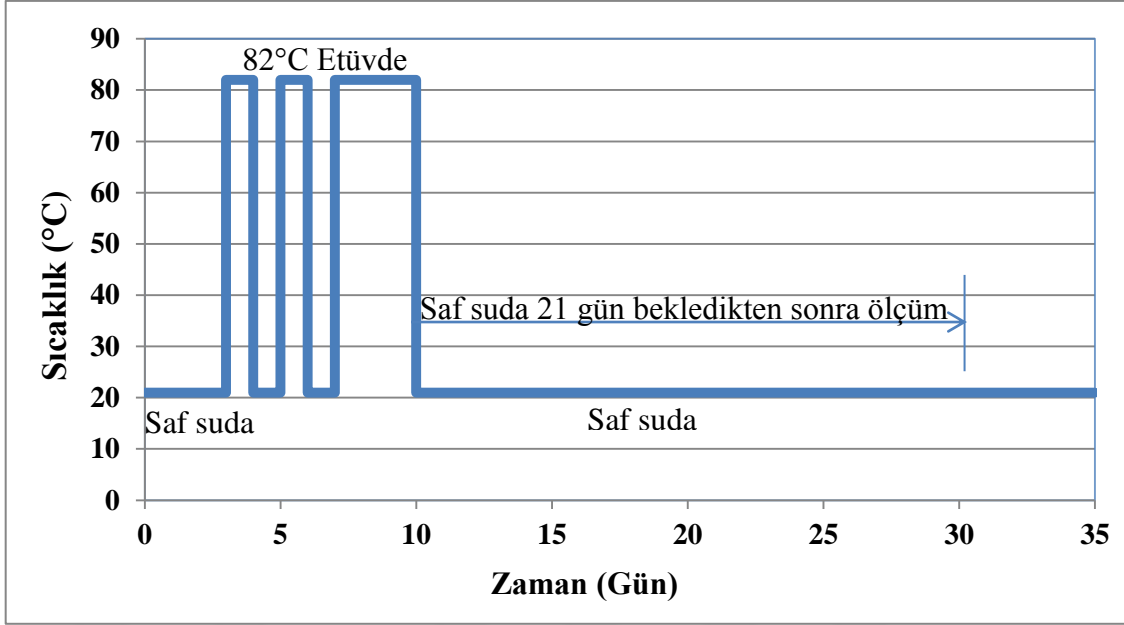
1.7.1. Duggan Yöntemi

Duggan yöntemi, öncelikle ASR ve iç sülfat kaynaklı genleşme riskini kısa sürede tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir. Önceleri beton örnekler üzerinde uygulanan bu yöntem sonrasında bazı araştırmacılar tarafından çimento harcı örneklerine de uygulanmıştır [13, 54, 84, 90, 91, 92, 93, 94]. Deney yöntemi, buhar kürü sonrası örnekler üzerinde art arda ısı ve hidrolik döngü uygulanması şeklindedir. Uygulanan buhar kürü çevrimi 2 saat ön bekleme, 20°C/saat hızla 85°C'ye kadar ısıtma, bu sıcaklıkta 4 saat bekletme ve ardından aynı hızla soğutma şeklindedir (Şekil 27). Buhar kürü sonrası saf suda 21°C oda sıcaklığında 3 gün bekletilen örneklerin 3. gün sonunda sudan çıkarılıp ilk boy ölçümleri yapılmaktadır. İlk boy ölçümü yapılan örnekler 1 gün 82°C etüvde kurutulup

ardından suya yerleştirilmektedir. Bu işlem iki kez tekrar edildikten sonra örnekler üçüncü kurutma süresi 3 gün olacak şekilde etüve yerleştirilmektedir. Etüvden çıkarıldıktan sonra soğutulan kuru örneklerin boy ölçümü yapıp bu değer başlangıç değeri olarak alınmaktadır. Sonrasında tekrar suya yerleştirilen örneklerin sudaki şişme değerleri de genleşmeye dâhil edilmektedir. Suda bekletilen örneklerin boy ölçümlerine 21 gün daha devam edilmektedir (Şekil 28) [90]. İsteğe bağlı olarak bu süre uzatılabilmektedir. Duggan, buhar kürü sonrası toplam 30 gün işlem gören beton örnekler için ASR ve iç sülfat kaynaklı genleşme riski bakımından %0.05 genleşmeyi sınır değer olarak vermektedir. Duggan yönteminde çimento harcı ile yapılan çalışmalar için herhangi bir genleşme sınır değeri önerilmemektedir.



Şekil 27. Uygulanan buhar kürü çevrimi



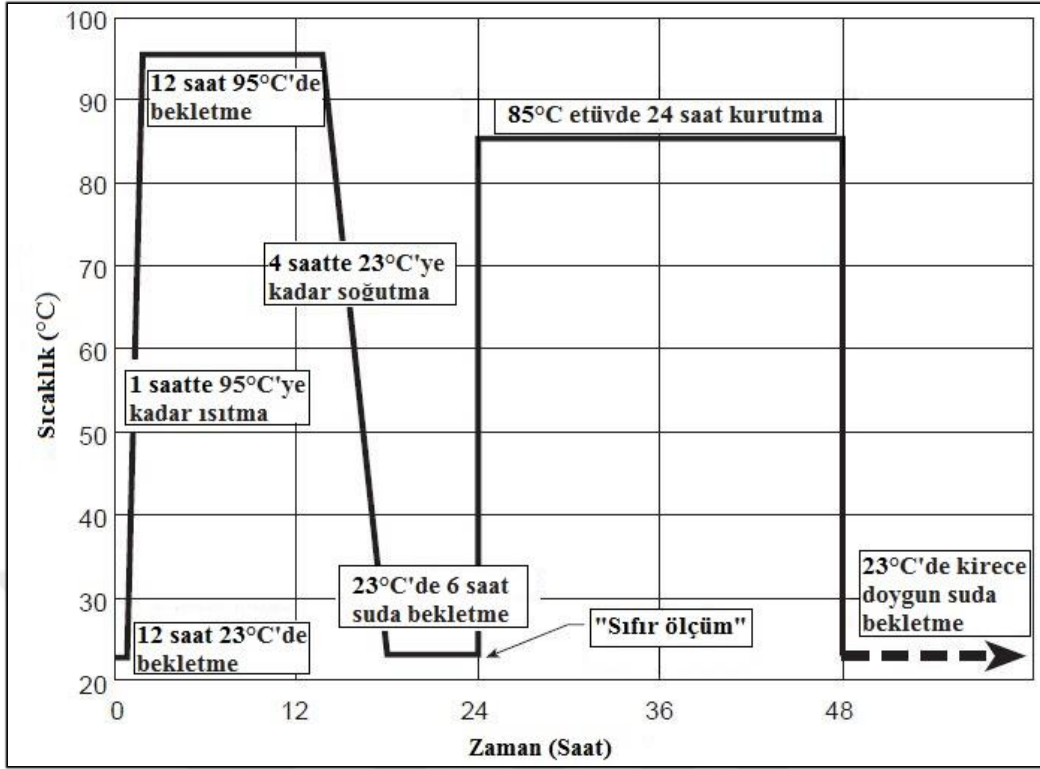
Şekil 28. Duggan yönteminin şematik olarak gösterimi [31].

Bazı araştırmacılara göre deney şartları gerçekten uzak ve aşırı etkili bulunmuş ve Duggan yönteminde önerilen sürenin çimento harcı örnekleri için yeterli olmadığı ve genleşme potansiyelinin ancak 1 yıl gibi bir sürede ortaya çıkabileceği görüşü belirtilmiştir [84, 94].

Çalışmada gecikmiş etrenjit oluşumunun tespitinde Duggan yöntemi kullanılmıştır.

1.7.2. Attiogbe Yöntemi

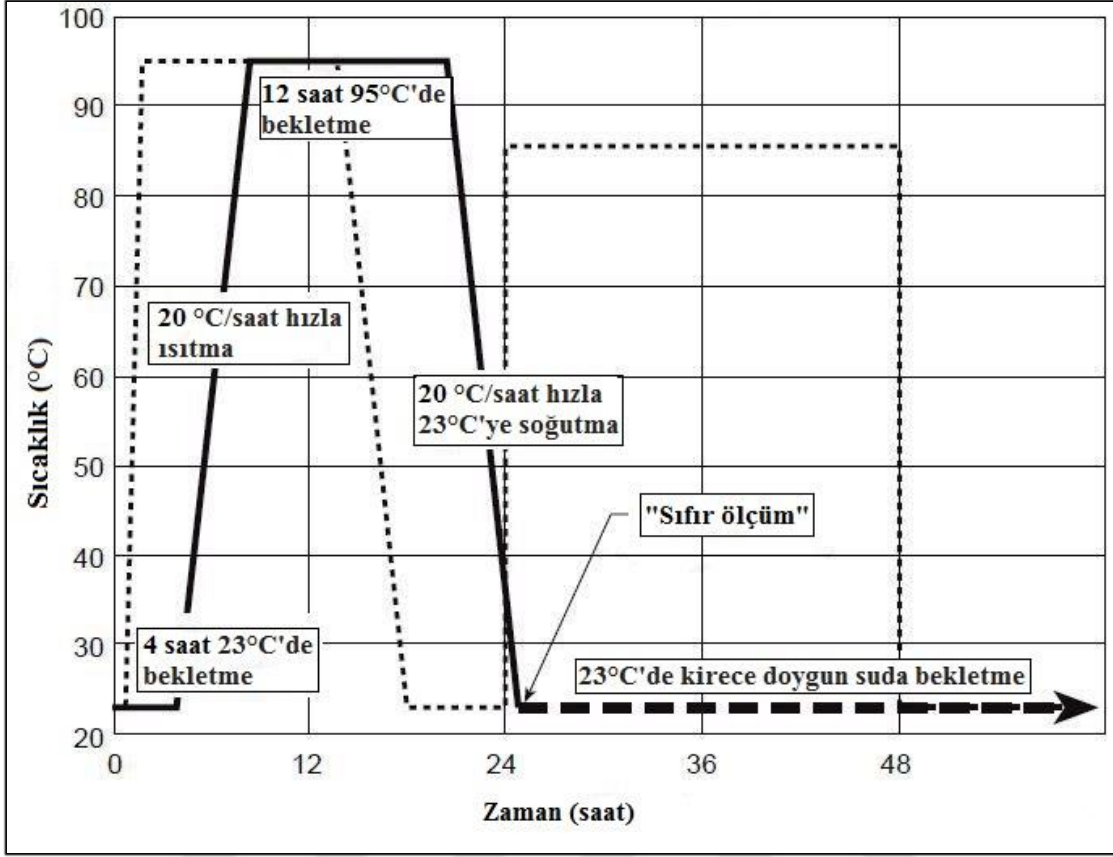
Duggan yöntemine benzeyen Attiogbe yönteminde buhar kürü sonrası uygulanan ıslanma-kuruma döngüsünde farklılıklar bulunmaktadır. Şekil 29'da Attiogbe yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemde saf suda oda sıcaklığında 2 gün bekletilen örnekler ardından 3 gün 80°C'de kurutulmaktadır. İki kez tekrarlanan bu döngünün ardından 2 gün daha su içinde bekletilen örneklerin 12. günde ilk boy ölçümü yapılmaktadır. Örneklerin sudaki şişme değerleri genleşmeye dâhil edilmemektedir. Attiogbe yönteminde kurutma süresinin uzun olması karbonatlaşmanın harç yapısının derinlerine ulaşmasını sağlaması bakımından etrenjit oluşumunu bir miktar artırıcı etki yaratabilmektedir. Yöntemde döngü sayısının az olması kılcal çatlak miktarını azaltıcı etki yaratmaktadır. Her iki yöntemin de GEO'yu hızlandırma açısından olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır.



Şekil 30. Fu yönteminin şematik olarak gösterimi [95].

1.7.4. Kelham Yöntemi

Fu yöntemine kıyasla daha hafif bir buhar kürü uygulaması gerektiren Kelham yönteminin şematik olarak gösterimi Şekil 31'de verilmektedir. Bu yöntem, 4 saat ön bekleme, ardından 20°C/saat hızla 95°C'ye ısıtma, bu sıcaklıkta 12 saat bekletme ve aynı hızla soğutma aşamalarından oluşmaktadır. Ardından örnekler herhangi bir döngüye tabi tutulmadan kirece doymun suya yerleştirilmektedir. Aslında, Kelham yönteminin yüksek kür sıcaklığı ve orta uzunluktaki kür süresi dışında normal buhar kürü koşullarına göre pek farkı bulunmamaktadır [40].



Şekil 31. Kelham yönteminin şematik olarak gösterimi [95].

2. DENEYSEL ÇALIŞMA, BULGULAR VE İRDELEME

Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri, karışımın hazırlanması, uygulanan kür yöntemi ve koşulları, deneysel sonuçlar ve mikroyapı analizleri bu bölümde sunulmaktadır.

GEO ile ilgili deneylerin tümü Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Metalografik numune hazırlama işlemleri Avrasya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda, mikroyapı analizleri ise Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

2.1. Malzeme Özellikleri

2.1.1. Çimento

Deneysel çalışmada Trabzon Aşkale Çimento Fabrikası üretimi CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

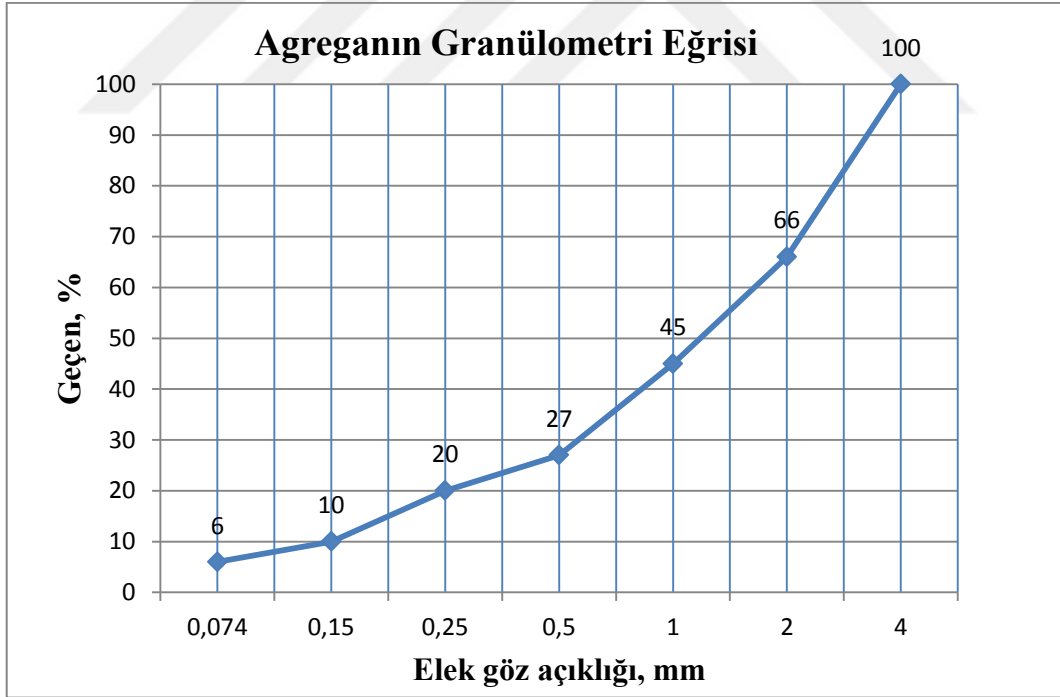
Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşen	İçerik (%)			Değerler
SiO ₂	18,1	45 µm elek üstünde kalan (%)		7,15
Al ₂ O ₃	4,48	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3,12
Fe ₂ O ₃	3,09	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)		3690
CaO	63,65	Priz Başlama (saat-dk)		2sa-31dk
MgO	2,58	Priz Sonu (saat-dk)		3sa-11dk
SO ₃	2,84	Hacim Genleşmesi (mm)		1
Kızdırma Kaybı	3,9	Su İhtiyacı (%)		29,5
Na ₂ O	0,21	Basınç Dayanımı (MPa)	2.Gün	27,9
K ₂ O	0,62			
Alkali Miktarı	0,62		28.Gün	58,0
Cl ⁻	0,015			

2.1.2. Agregada

Trabzon Aşkale Hazır Beton Tesisi'nden temin edilen kalker kökenli agrega, 4 mm göz açıklıklı elekten elenerek kullanılmıştır. Agregaya ait elek analizi ve fiziksel özellikler Tablo 2'de, granülometri eğrisi ise Şekil 32'de verilmektedir.

Tablo 2. Agreganın elek analizi ve fiziksel özellikleri

Elek Çapı (mm)	Elekten geçen (%)	Fiziksel Özellikler	
4	100	Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2,69
2	66		
1	45		
0,5	27		
0,25	20	Su Emme (%)	1,31
0,15	10		
0,074	6		



Şekil 32. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi

2.1.3. Su

Hazırlanan karışımlarda Trabzon şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Mineral Katkılar

Çalışmada kullanılan metakaolin ve riyolit minerallerine ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Metakaolin ve riyolite ilişkin kimyasal ve fiziksel özellikler

Kimyasal Bileşenler	Metakaolin (%)	Riyolit (%)
CaO	2	3,98
SiO ₂	54,93	70,76
Al ₂ O ₃	41	14,52
Fe ₂ O ₃	1,38	2,40
MgO	0,79	2,18
K ₂ O	0,21	3,64
Na ₂ O	-	4,10
SO ₃	0,06	-
P ₂ O ₅	-	0,08
TiO ₂	-	3,52
MnO	-	0,04
Kızdırma Kaybı (%)	0,21	1,50
Özgül Yüzey (m ² /kg)	2397	4303
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,79	2,17

2.1.5. Kimyasal Katkılar

Deneysel çalışmada kullanılan naftalin sülfonat esaslı MasterRheobuild 716 isimli bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır (Şekil 33). Katkıya ilişkin üretici firma tarafından sağlanan bazı teknik özellikler Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. MasterRheobuild 716 süperakışkanlaştırıcı katkı maddesine ait bazı teknik özellikler

Teknik Özellikler	Değer
Malzemenin Yapısı	Naftalin Sülfonat Esaslı
Görünüm	Kahverengi
Özgül Ağırlık (20°C'de)	1,148-1,208 kg/lt
pH Değeri	5 - 7
Alkali İçeriği (%)	≤ 5,00
Klor İyon İçeriği (%)	≤ 0,10



Şekil 33. Üretimlerde kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi

2.2. Karışımların Hazırlanması

Deneysel çalışma kapsamında üretilen metakaolin ve riyolit katkılı harçlar ile referans harç karışımları için hesaplanan malzeme miktarları kg/m^3 olarak Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmektedir. Karışımlara ilişkin ölçülen yayılma çapları da aynı tablolarda cm olarak verilmektedir. Şekil 34'te harç karışımlarında kullanılan malzemeler gösterilmektedir.

Tablo 5. Metakaolin katkılı harç karışımlarına ilişkin malzeme miktarları (kg/m^3) ve harçlar için ölçülen yayılma çapları (cm)

Karışım Kodu	Kum	Çimento	Metakaolin	Su	Süperakışkanlaştırıcı	Yayılma Çapı, cm
REF	1726,40	400	0	200	24,2	18
MK-5	1724,39	380	20	200	22	16
MK-10	1722,35	360	40	200	26	18
MK-15	1720,31	340	60	200	24	17
MK-20	1718,27	320	80	200	24	16,5

Tablo 6. Riyolit katkılı harç karışımlarına ilişkin malzeme miktarları (kg/m^3) ve harçlar için ölçülen yayılma çapları (cm)

Karışım Kodu	Kum	Çimento	Riyolit	Su	Süperakışkanlaştırıcı	Yayılma Çapı, cm
REF.	1726,40	400	0	200	24,2	18
R-5	1718,88	380	20	200	22,5	19
R-10	1711,33	360	40	200	23	18
R-15	1703,78	340	60	200	21	17,5
R-20	1696,23	320	80	200	26,1	19



Şekil 34. Harç karışımlarında kullanılan malzemeler

Gecikmiş etrenjit oluşumu deneyi için toplam 39 adet 25x25x285 mm boyutlarında prizmatik harç çubuk örnekleri hazırlanmıştır. Her bir mineral katkı oranı için 4 adet olmak üzere 16 adet numune metakaolin için ve 16 adet numune riyolit için olmak üzere toplam 32 adet prizmatik harç numunesi hazırlanmıştır. Karşılaştırma amaçlı buhar kürü uygulanan 4 adet ve buhar kürü uygulanmayan 3 adet referans harç çubuğu numunesi hazırlanmıştır. Deney süresince haftalık genleşme ölçümleri alınmıştır. Deney sonrasında her mineral katkı oranına sahip üretilen numunelerden mikroyapı incelemeleri için uygun boyutta örnekler kesilip hazırlanmıştır.

TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanan harç örnekleri, ASTM C305 ve ASTM C109 standartlarına göre karıştırılmış ve prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Harç karıştırıcının haznesine kum, çimento ve mineral katkı (metakaolin, riyolit) doldurularak 30 sn kadar karıştırılmıştır. Su ilave edildikten sonra hedef kıvamı sağlamak amacıyla karışıma ihtiyaç duyulan miktarda süperakışkanlaştırıcı ilave edilmiş ve karışım 1 dakika daha karıştırılmıştır.

ASTM C230 standardına uygun olarak tüm harçlar için yayılma çapları ölçülmüştür. Hazırlanan karışımlar kalıplara iki aşamada doldurulmuş ve titreşim uygulamak suretiyle harcın prizmatik kalıplara yerleştirilmesi sağlanmıştır. Bu süreçler sırasıyla Şekil 35-37'de verilmektedir.



Şekil 35. Malzemelerin karıştırılması



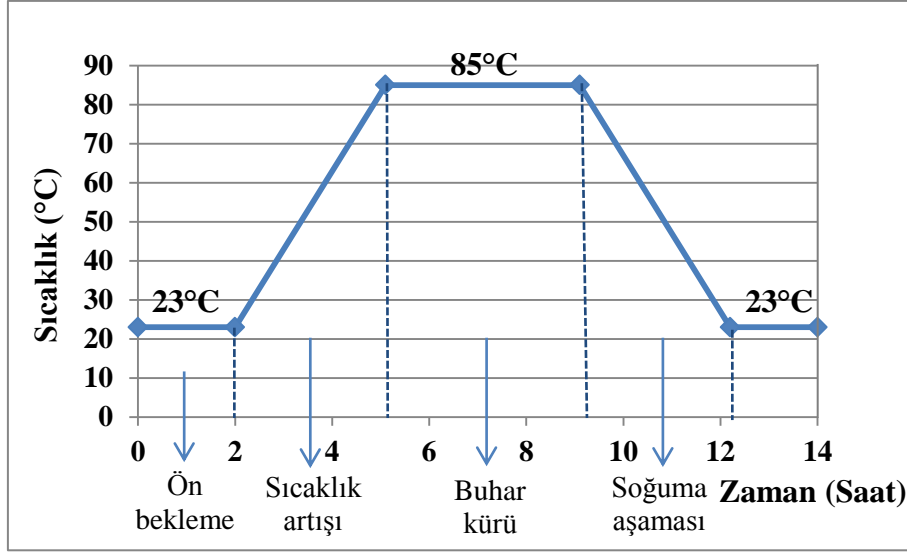
Şekil 36. Harç karışımlarının yayılma çapının ölçülmesi



Şekil 37. Hazırlanan harç çubuğu örnekleri

2.3. Kür Yöntemi ve Koşulları

Deneysel çalışmada GEO tespiti amacıyla Duggan yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan harç çubuğu örnekleri buhar kürü öncesi 2 saat standart kür odasında bekletilmiş ve sonrasında kalıplarından çıkarılmadan buhar kürüne tabi tutulmuştur. Buhar kürü sırasında sıcaklık $20^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ hızla 85°C 'ye yükseltilmiş ve bu sıcaklıkta 4 saat boyunca kür uygulanmıştır. Ardından aynı hızla soğumaya bırakılan numuneler ertesi gün kalıplardan çıkarılmıştır. Buhar kürü uygulanmayan referans numuneler ise standart kür odasında 24 saat bekletilmiş ve bu numuneler ilk ölçüm alındıktan sonra standart kür için 23°C suda bekletilmiştir. Şekil 38'de uygulanan buhar kürü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 38. Uygulanan buhar kürünün şematik olarak gösterimi

Örnekler kalıplarından çıkarıldıktan sonra ilk boy ölçümleri yapılmış ve ardından 3 gün boyunca suda bekletilmiştir. İkinci boy ölçümünün ardından örnekler sırasıyla 1 gün 85°C etüvde kurutulmuş ertesi gün 23°C oda sıcaklığında suya yerleştirilmiştir. Bu şekilde 3 devir yapıldıktan sonra 3 gün daha 85°C etüvde kurutulan örneklerin soğutulmuş kuru halde boy ölçümleri yapılmıştır. Örnekler tekrar suya yerleştirilerek haftalık ölçümler yapılmıştır (Şekil 39-43). Ölçümler bölüm 2.4.1'de verilmektedir.



Şekil 39. Buhar kürü için kullanılan kür tankı



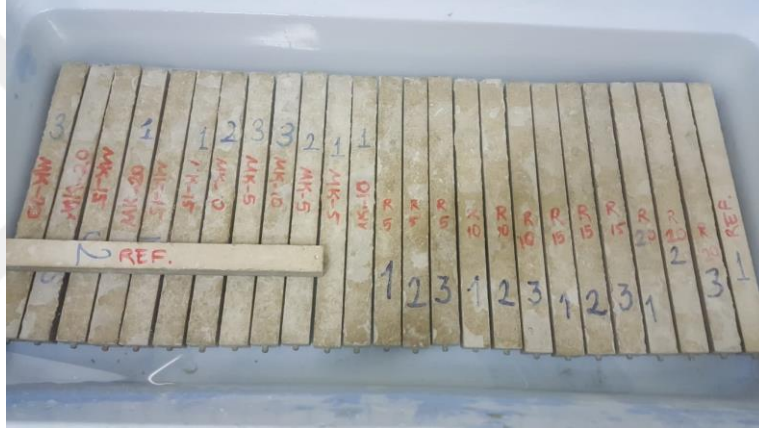
Şekil 40. Buhar kürü uygulaması sonrası numuneler



Şekil 41. Boy ölçümleri için kullanılan ölçüm cihazı



Şekil 42. Numunelerin etüvde kurutulması



Şekil 43. Numunelerin suya yerleştirilmesi

2.4. Deneysel Sonuçlar

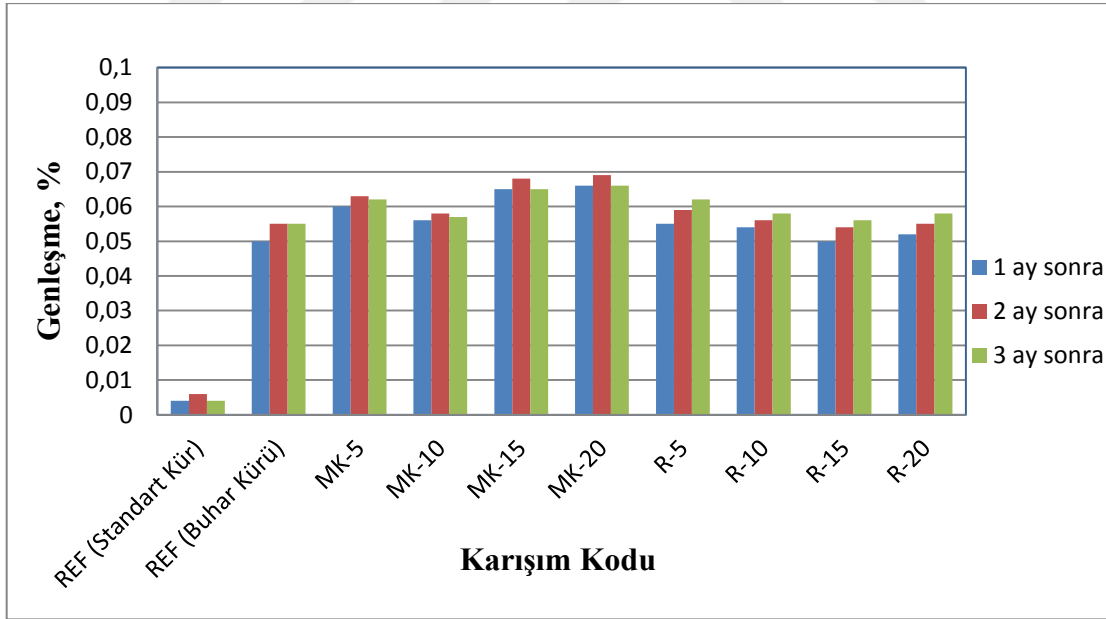
2.4.1. Genleşme Ölçümleri

Deneysel çalışmada farklı oranlarda metakaolin ve riyolit ikame edilen prizmatik harç çubuğu numunelerinin haftalık ve aylık olarak genleşme yüzdeleri hesaplanmıştır. Deneysel süresi 90 gündür. Numunelere ait genleşme-zaman ilişkileri yüzde olarak tablo ve şekillerle verilmiştir. Numuneler buhar kürü çevriminin ardından Duggan yöntemine tabi tutulmuş ve 3 ay boyunca 23°C oda sıcaklığında suda bekletilmiştir. Gecikmiş etrenjit oluşumu deneyi kapsamında kullanılan Duggan yönteminde çimento harcı örnekleri için herhangi bir genleşme sınır değeri belirtilmemiştir. Numunelerin uzun dönemdeki genleşme değişimlerini gözlemlemek amacıyla tez çalışması sonrası ölçümlere devam edilmiştir.

Tüm numunelere ait aylık olarak ölçülen genleşme değerleri Tablo 7’de verilmektedir. Şekil 44’te ise numunelerin zamana bağlı genleşme değerleri grafiğe aktarılmıştır.

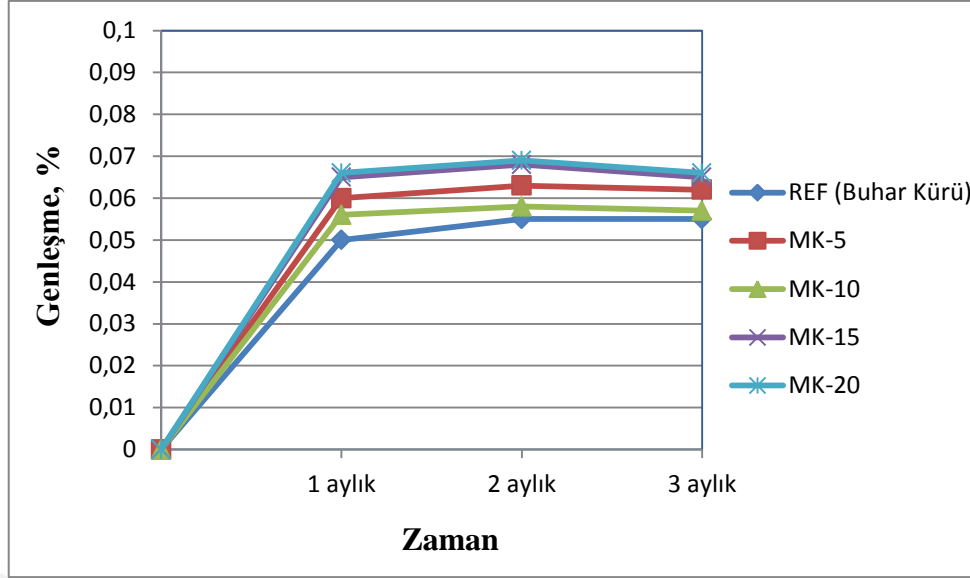
Tablo 7. Numunelerin genleşme değerleri

Karışım Kodu	Genleşme, %		
	1 ay sonra	2 ay sonra	3 ay sonra
REF (Standart Kür)	0,004	0,006	0,004
REF (Buhar Kürü)	0,050	0,055	0,055
MK-5	0,060	0,063	0,062
MK-10	0,056	0,058	0,057
MK-15	0,065	0,068	0,065
MK-20	0,066	0,069	0,066
R-5	0,055	0,059	0,062
R-10	0,054	0,056	0,058
R-15	0,050	0,054	0,056
R-20	0,052	0,055	0,058



Şekil 44. Numuneler üzerinde ölçülen zamana bağlı genleşme değerleri

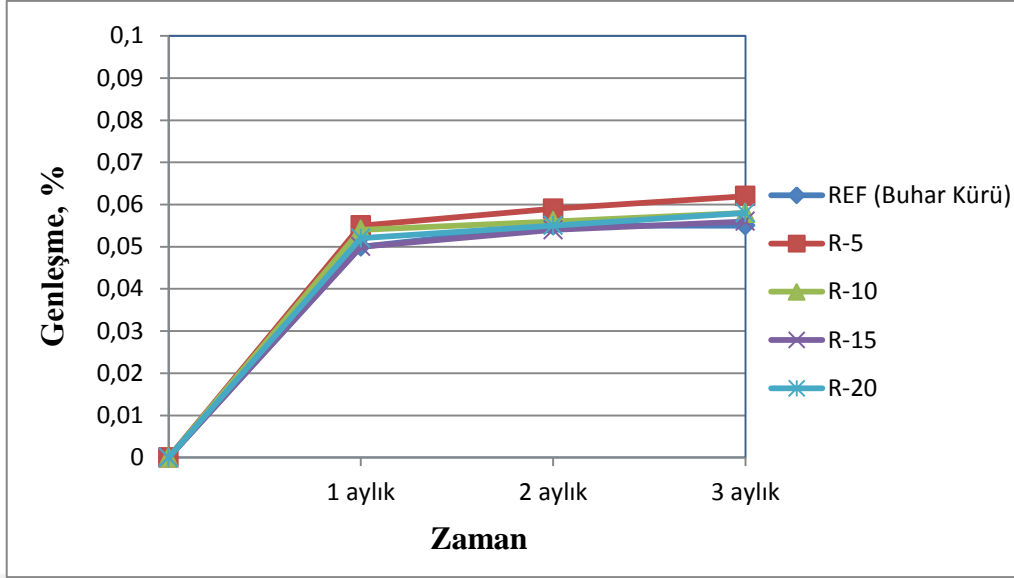
Metakaolin katkılı harç çubuğu numuneleri ile buhar kürü uygulanan referans numunesine ait aylık genleşme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 45’te verilmektedir.



Şekil 45. Metakaolin katkılı harç çubuğu numuneleri ile referans numunesinin karşılaştırılması

Üç ay sonundaki genleşme miktarları dikkate alındığında, MK-5 numunesinin %0,062, MK-10 numunesinin %0,057 ve MK-15 numunesinin ise %0,065 mertebesinde genleşme gösterdiği görülmektedir. Aynı süre sonunda en fazla genleşen numune MK-20 olmuştur genleşme değeri %0,066 mertebesinde. Elde edilen bu düşük genleşme değerlerinin literatürde mevcut kısa süreli deneysel çalışmalarda elde edilen genleşme değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir [42, 62, 96].

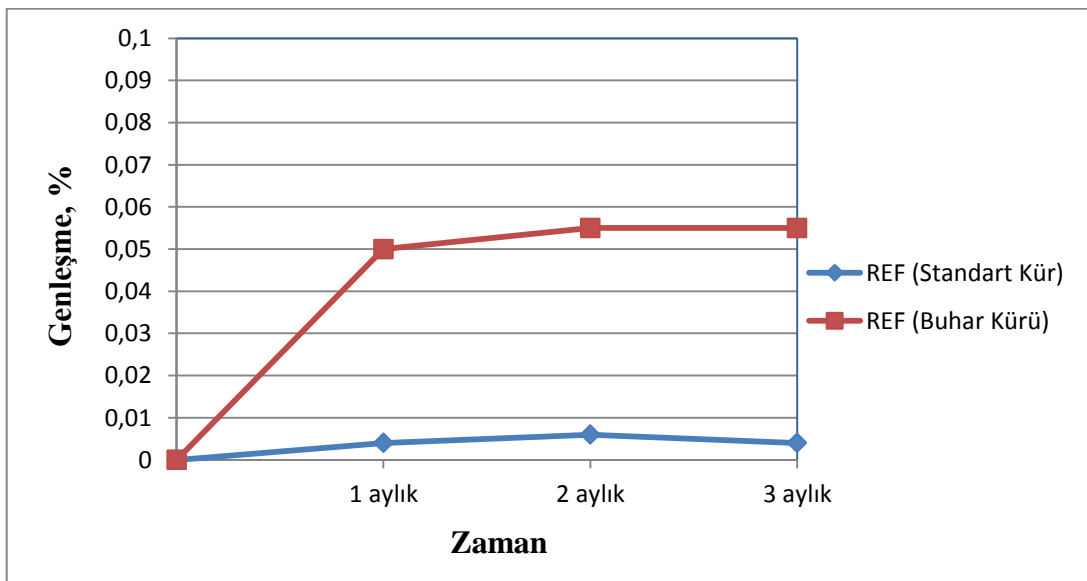
Riyolit katkılı harç çubuğu numuneleri ile buhar kürü uygulanan referans numunesine ait aylık genleşme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 46'da verilmektedir.



Şekil 46. Riyolit katkılı harç çubuğu numuneleri ile referans numunesinin karşılaştırılması

R-10 ve R-20 numunelerinin üç ay sonundaki genleşmeleri %0,058 mertebesindedir. R-15 numunesinin üç aylık genleşme değeri ise %0,056 mertebesindedir. R-5 numunesi %0,062 genleşme değeri ile üç ay sonunda en fazla genleşen numune olmuştur.

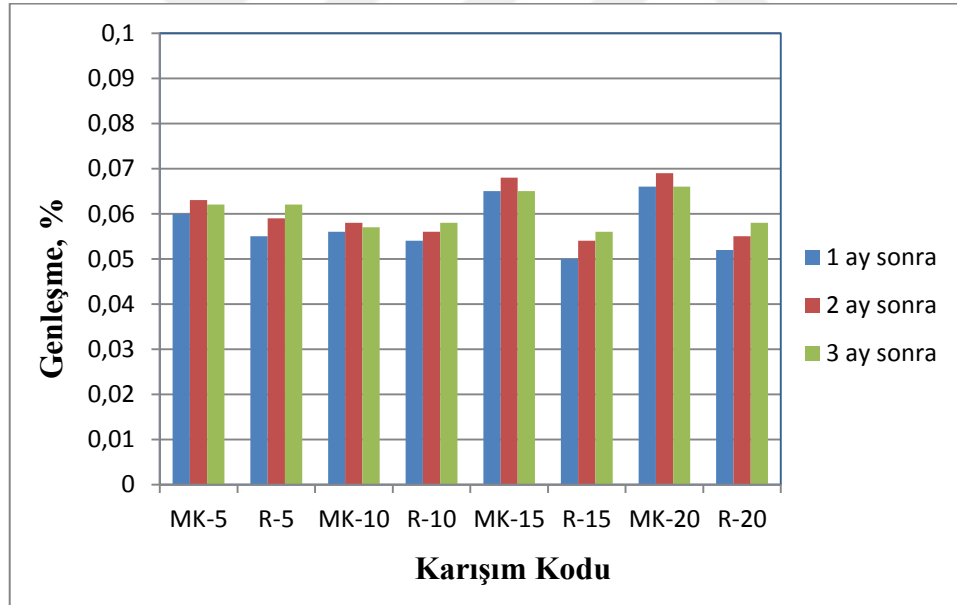
Buhar kürü ve Duggan yöntemi uygulanan referans numunesi ile standart kür uygulanan referans numunesine ait aylık genleşme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 47’de verilmektedir.



Şekil 47. Referans numunelerinin karşılaştırılması

Standart kür uygulanan referans numunesinin üç aylık genişleme değeri %0,004 mertebesindedir. Bu göreceli olarak çok düşük bir genişleme değeri olup bu numunenin pratikte genişmediği söylenebilmektedir. Buhar kürü ve Duggan yöntemi uygulanan referans numunesinin üç aylık genişleme değeri %0,055 mertebesindedir. Buhar kürü ve sonrasında uygulanan Duggan yöntemi numunenin genişmesini standart kür uygulanan numunenin genişmesine kıyasla yaklaşık 10 kat artırmıştır. Bu genişmenin nedeni daha önce de açıklandığı üzere buhar kürü esnasında etrenjitin çözünmesiyle açığa çıkan sülfatın C-S-H jeli tarafından adsorbe edilmesidir. Ardından suda bekleme esnasında adsorbe edilen sülfat, C-S-H jelinden ayrılıp boşluk suyuna geçerek boşluk suyu sülfat konsantrasyonunun artmasına ve artan sülfat konsantrasyonu ise etrenjitin yeniden oluşmasına imkân sağlamaktadır [12].

Metakaolin ve riyolit katkılı harç çubuğu numunelerine ait aylık genişleme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 48’de verilmektedir.



Şekil 48. Metakaolin ve riyolit katkılı harç çubuğu numunelerinin karşılaştırılması

Metakaolin ve riyolit ikame oranları aynı olan numuneler karşılaştırıldığında, MK-5 ve R-5 numunelerinin üç aylık genişleme değerleri %0,062 mertebesindedir. Benzer şekilde MK-10 ve R-10 numunelerinin de üç aylık genişmeleri aynı mertebededir. MK-10 numunesinin üç ay sonundaki genişmesi %0,057 iken, R-10 numunesinin üç aylık genişmesi ise %0,058 mertebesindedir. MK-15 numunesi R-15 numunesine kıyasla

yaklaşık olarak %16 daha fazla genişleme göstermiştir. MK-15 numunesinin üç ay sonundaki genişmesi %0,065 mertebesindedir. Aynı süre sonunda R-15 numunesinin genişmesi ise %0,056 mertebesindedir. Üç ay sonunda en çok genişen numune MK-20 olmuştur. MK-20 numunesi R-20 numunesine kıyasla yaklaşık olarak %14 daha fazla genişleme göstermiştir. MK-20 numunesinin üç aylık genişme değeri %0,066 mertebesindedir. R-20 numunesinin üç aylık genişme değeri ise %0,058 mertebesindedir. Riyolit katkılı numunelerden elde edilen bu genişme değerleri GEO açısından ilk olma özelliği taşımaktadır ve metakaoline kıyasla bir miktar daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Metakaolinin GEO kaynaklı genişmeyi önlemedeki etkin rolü bilinmektedir [42]. Bu sonuçlara göre riyolit de metakaolin gibi GEO kaynaklı genişmeyi önlemek amacıyla kullanılabilir. Bu anlamda daha kesin fikir sahibi olmak için daha fazla deneysel çalışmaya gereksinim vardır.

2.4.2. Mikroyapı Analizleri

Deneysel çalışmada genişme ölçümlerinin yanı sıra buhar kürü uygulaması sonrası ve buhar kürü uygulamasından 90 gün sonra örneklerin içyapılarında meydana gelen değişimi görmek amacıyla SEM-EDS analizleri vasıtasıyla mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen analizler ile örneklerde meydana gelen genişme değerleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu şekilde GEO mekanizmasının daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Bu amaçla harç çubuğu numunelerinden uygun boyutta örnekler kesilip yüzeyleri zımparalanıp parlatılmıştır. Zımparalama işlemi için sırasıyla 220, 320 ve 600 kum silisyum karbür zımpara kâğıdı, parlatma işlemi içinse 3 ve 1 µm boyutunda elmas pasta kullanılmıştır (Şekil 49).



Şekil 49. Zımparalanmış ve parlatılmış örnekler

Hazırlanan parlak kesit örnekleri üzerinde çift taraflı yapışkanlı karbon bant olan pirinç bir plaka üzerine yerleştirilmiş ve örneklerin üst kısmının kenarlarına da birer küçük bant yapıştırılmıştır. Karbon bant, seramik, beton gibi iletken olmayan malzemelerin iletkenliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Örnekler daha sonra altın kaplama için vakum pompasına yerleştirilmiştir (Şekil 50). İstenilen vakum değerine ulaşıldıktan sonra altın kaplama işlemi tamamlanmıştır. Altın kaplama işleminden sonra örnekler, JEOL JSM-6610 isimli SEM cihazına yerleştirilmiştir (Şekil 51).



Şekil 50. Örneklerin vakumlanması ve altın kaplanması



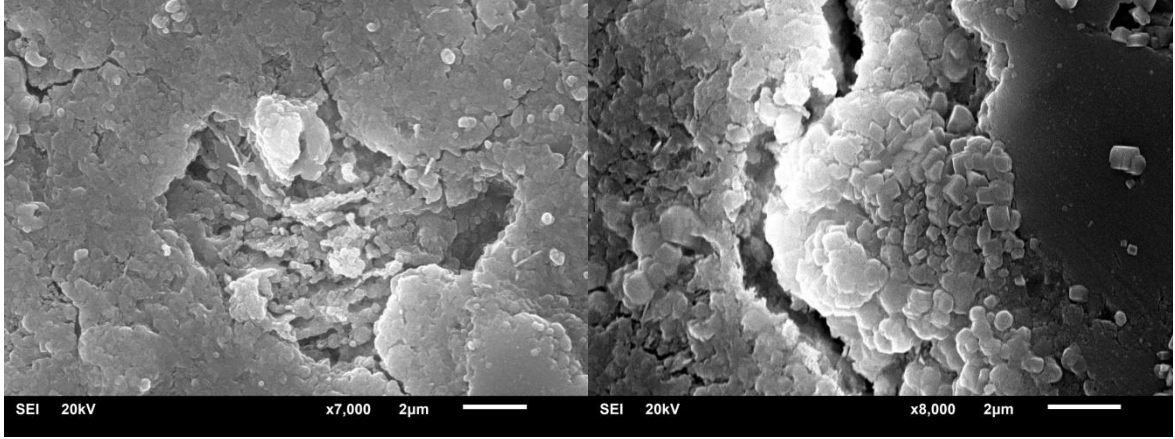
Şekil 51. Analizlerde kullanılan SEM cihazı

Mikroyapı analizlerinde çimento hamurunda ve agrega-çimento hamuru arayüzeyinde oluşan etrenjitin yapısı ile hidrate olmamış çimento taneleri ve etrafında oluşan diğer hidratasyon ürünlerinin yapısı incelenmiştir. Gerekli görülen bölgelerde EDS analizi de yapılarak element bileşimleri incelenmiştir.

EDS analizlerinden elde edilen elementlerin ağırlıkça bileşimlerinden ziyade birbirleriyle oranları sonuçların yorumlanmasında kullanılmaktadır. Özellikle S/Ca ve Al/Ca oranları ve bu oranların birbirine oranı (S/Al) teorik etrenjit ve monosülfat bileşimleri için belli olup bu oranlar bu bileşenlerin tanımlanmasında pek çok araştırmacı tarafından sıkça kullanılmaktadır [9, 63, 97]. S/Ca ve Al/Ca oranlarının 0,1'den büyük olması ve S/Al oranının 1,5 olması durumunda incelenen yapının etrenjit olduğuna, S/Al oranının 0,5 olması halinde ise yapının monosülfat olduğuna işaret etmektedir. Bahsedilen bu oranlar teorik olup pratikte yaklaşık değerler elde edilmektedir.

2.4.2.1. Buhar Kürü Uygulanmayan Referans Örneklerinin Mikroyapı Analizleri

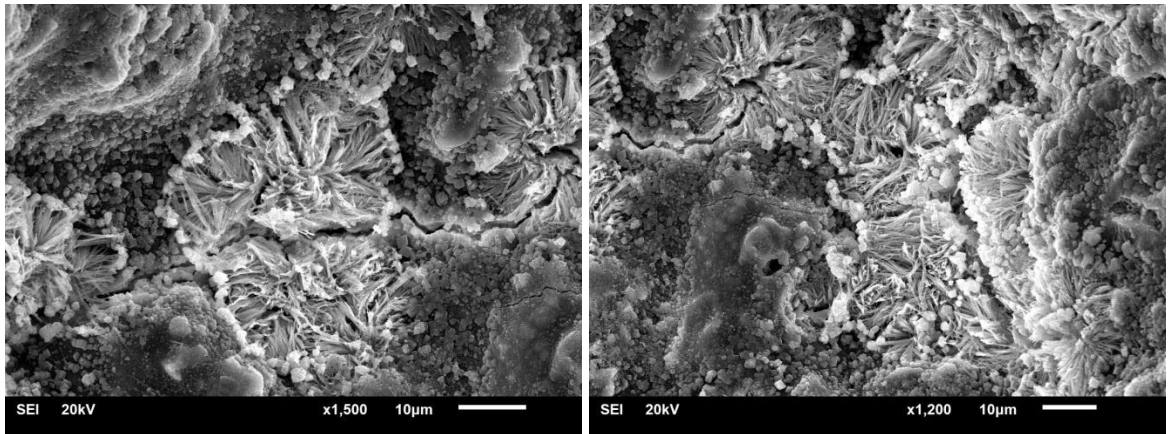
Buhar kürü uygulanmayan referans numunelerine 90 gün boyunca standart kür uygulanmıştır. Üç ay sonunda ölçülen genleşme değeri %0,004 mertebesindedir. Mikroyapı incelemesi için 90 günlük referans numunelerinden parçalar kesilip zımparalanıp parlatılmıştır. Yapılan mikroyapı incelemelerinde buhar kürü uygulanmayan referans örneğinin boşluklarında herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır (Şekil 52).



Şekil 52. Buhar kürü uygulanmayan referans örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

2.4.2.2. Buhar Kürü Uygulanan Referans Örneklerinin Mikroyapı Analizleri

Buhar kürü uygulanan referans numunelerinin yalnızca 90 günlük durumu mikroyapı analizlerinde dikkate alınmıştır. Bu numuneler üzerinde ölçülen 90 günlük genişleme değeri %0,055 mertebesinde dir. Şekil 53-a,b,c'de çimento hamurunda gözlemlenen masif etrenjit yapısı verilmektedir. Ayrıca boşluklarda kalsit kristalleri de gözlemlenmiştir. Şekil 53-d'de boşlukta oluşan top etrenjitler verilmektedir. İşaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,29 ve 0,19 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu oranların birbirine oranı olan S/Al oranı 1,53 olarak belirlenmiş olup incelenen yapının etrenjit olduğunu doğrulamaktadır.

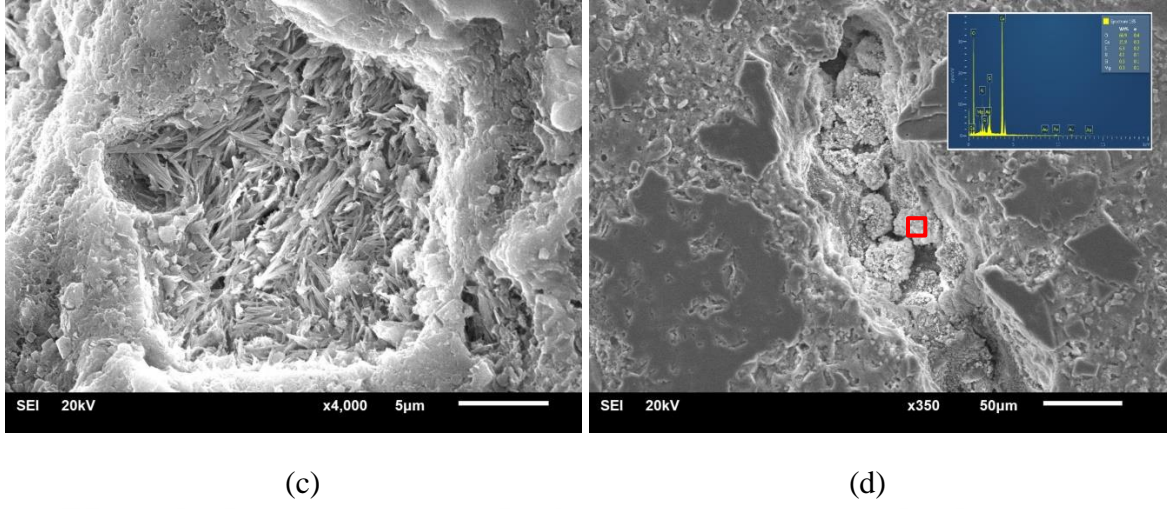


(a)

(b)

Şekil 53. Buhar kürü uygulanan referans örneğinin 80 gün sonraki içyapı görüntüsü

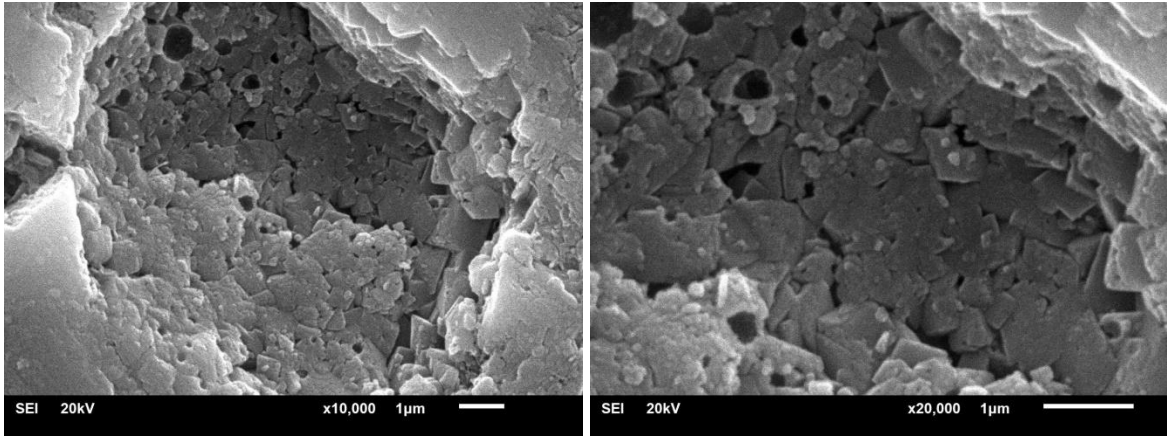
Şekil 53'ün devamı



2.4.2.3. Metakaolin Katkılı Örneklerin Mikroyapı Analizleri

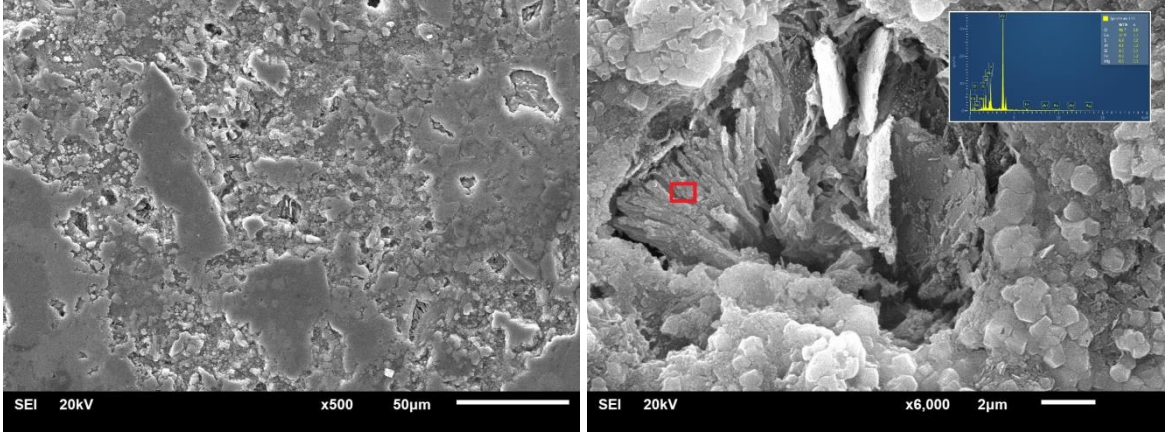
85°C buhar kürü sonrası Duggan yöntemi uygulanan metakaolin katkıli örneklerin buhar kürü uygulamasından hemen sonraki ve 90 günlük içyapıları yapılan mikroyapı analizleriyle incelenmiştir.

Buhar küründen hemen sonra incelenen MK-5 örneğinin boşlukları içinde iğnemi yapıda herhangi bir oluşuma çok yüksek büyütmelerde dahi rastlanmamıştır (Şekil 54).



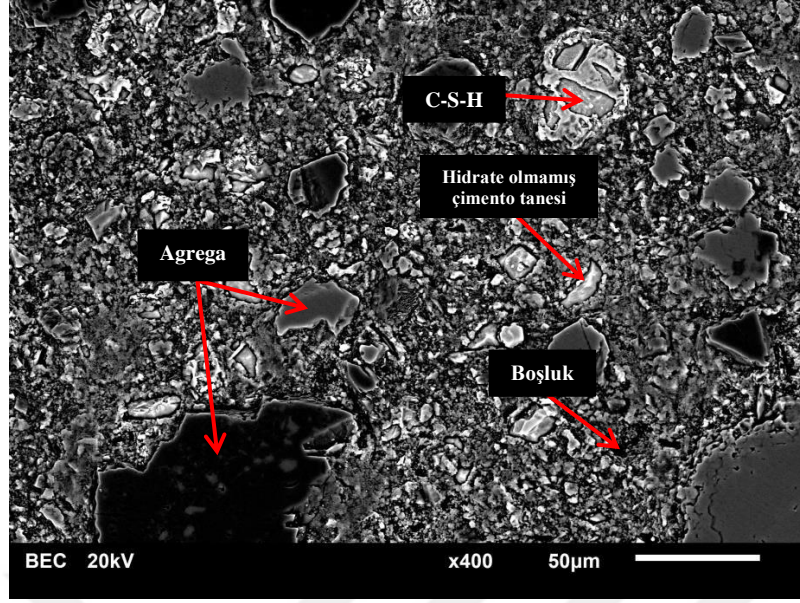
Şekil 54. MK-5 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

MK-5 numunelerinin 90 günlük genişleme değeri %0,062 mertebesindedir. 90 gün sonra yapılan mikroyapı incelemelerinde MK-5 örneğinin hamur fazında masif etrenjit oluşumları tespit edilmiştir (Şekil 55). İşaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,18 ve 0,11 olarak hesaplanmıştır.

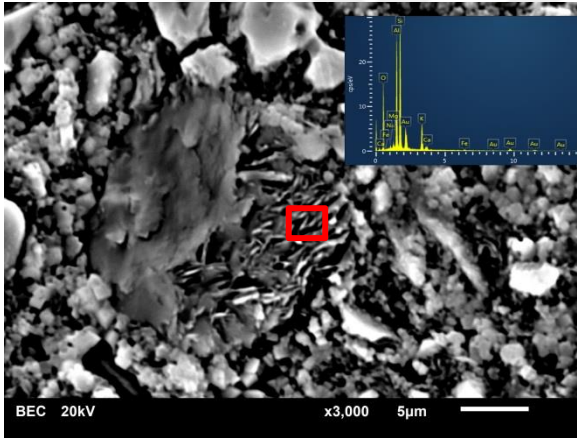


Şekil 55. MK-5 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

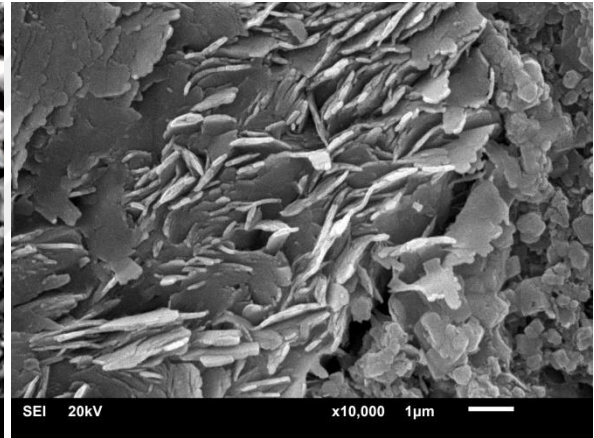
Buhar küründen hemen sonra incelenen MK-10 örneğinin 400 kat büyütme genel görünümü Şekil 56-a'da verilmektedir. Şekil incelendiğinde agrega ve hamur fazı kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Genel olarak, hidrate olmamış çimento taneleri en parlak görünür, ardından kalsiyum hidroksit (CH), kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve agrega gelmektedir. Boşluklar ise siyah renktedir. Koyu renkli agregalara EDS analizi yapılmıştır ve agreganın bileşiminde %18.1 Ca, %12.7 Mg ve %54.4 O bulunduğu belirlenmiştir. Bu dolomitik agrega olduğunu göstermektedir. Şekil 56-b'de hamur fazında bazı oluşumlar tespit edilmiştir ve bu oluşumlar üzerinde EDS analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda bu yapının %22,2 Si, %16,6 Al, %6,8 K ve %51,3 O bileşiminde olduğu belirlenmiştir. Bu oluşum yakından incelendiğinde illit mineraline benzediği görülmektedir (Şekil 56-c). İllit, kil mineralleri içinde doğada en yaygın bulunanıdır [98]. Ufak yassı levhacıklar veya düzensiz topluluklar halinde görülür [99]. İllitin kullanılan metakaolinden geldiği düşünülmektedir. Ayrıca incelenen boşluklarda herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış olup boşluklarda farklı morfolojiye sahip ürünlerle karşılaşmıştır (Şekil 56-d ve Şekil 56-e). Ürün yakından incelendiğinde, morfolojik olarak kalsit kristaline benzer yapıda olduğu görülmektedir.



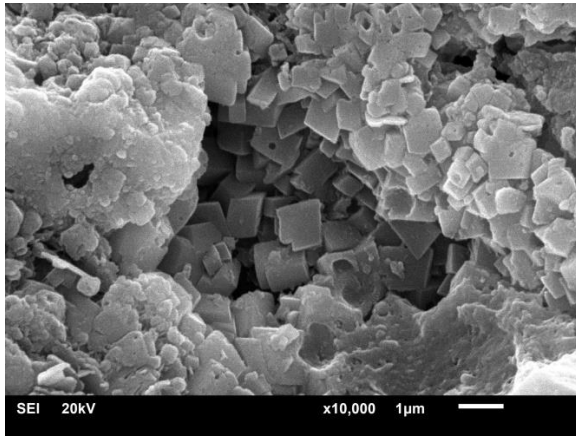
(a)



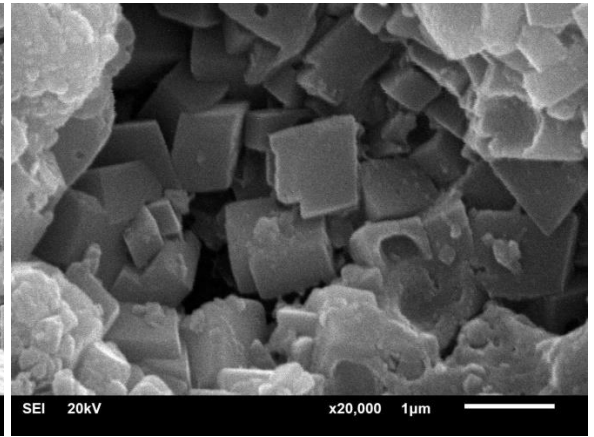
(b)



(c)



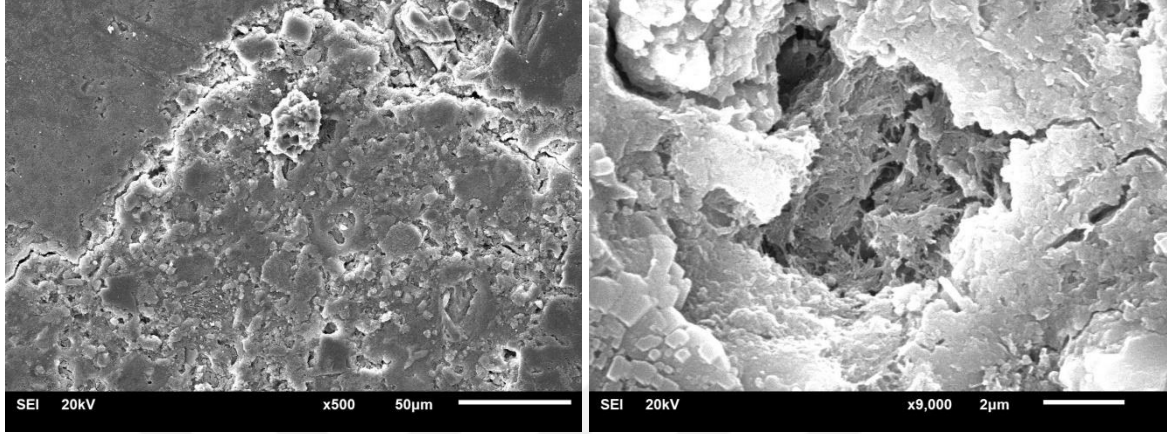
(d)



(e)

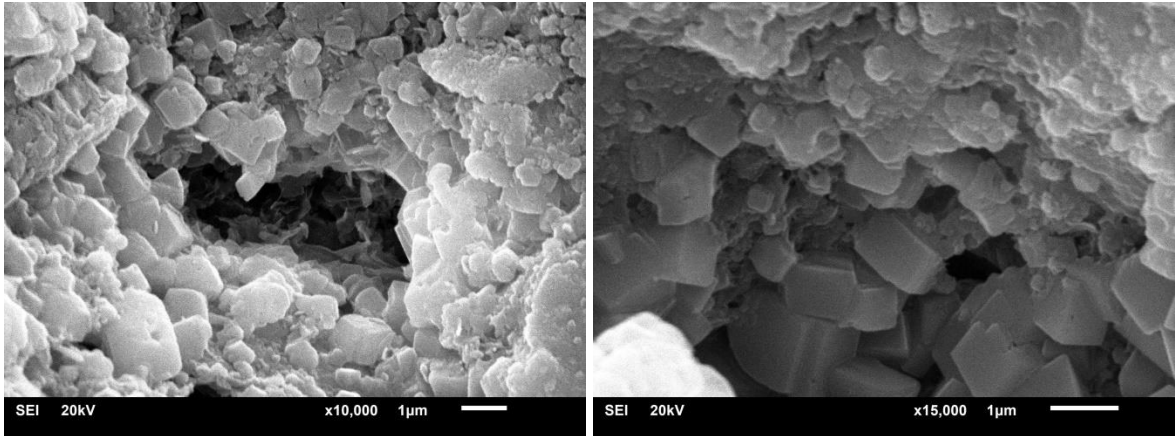
Şekil 56. MK-10 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

MK-10 numunelerinin 90 günlük genişleme değeri %0,057 mertebesindedir. 90 gün sonra yapılan mikroyapı incelemelerinde MK-10 örneğinin hamur fazında ve agrega çimento hamuru arayüzeyinde masif etrenjit oluşumları tespit edilmiştir (Şekil 57).



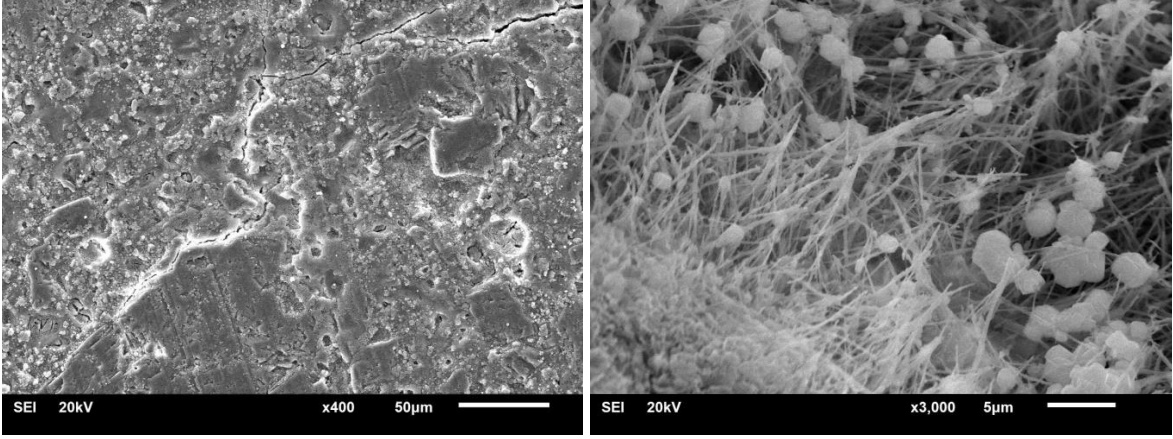
Şekil 57. MK-10 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

Buhar küründen hemen sonra incelenen MK-15 örneğinin boşluklarında herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış olup boşluklarda kalsit kristallerinin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 58).



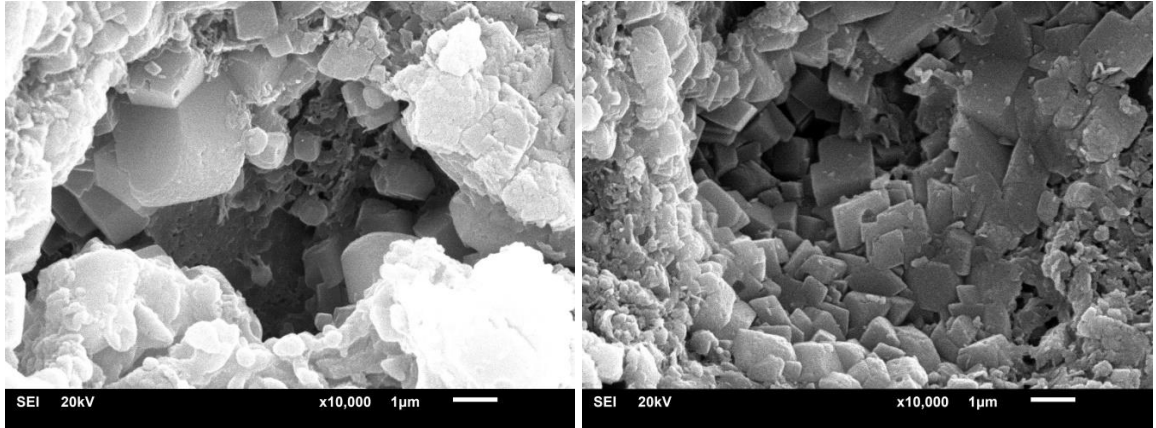
Şekil 58. MK-15 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

MK-15 numunelerinin 90 günlük genişleme değeri %0,065 mertebesindedir. Çimento hamurunda oluşan masif etrenjit ve iğnemsiz etrenjit yapısı Şekil 59'da verilmektedir.



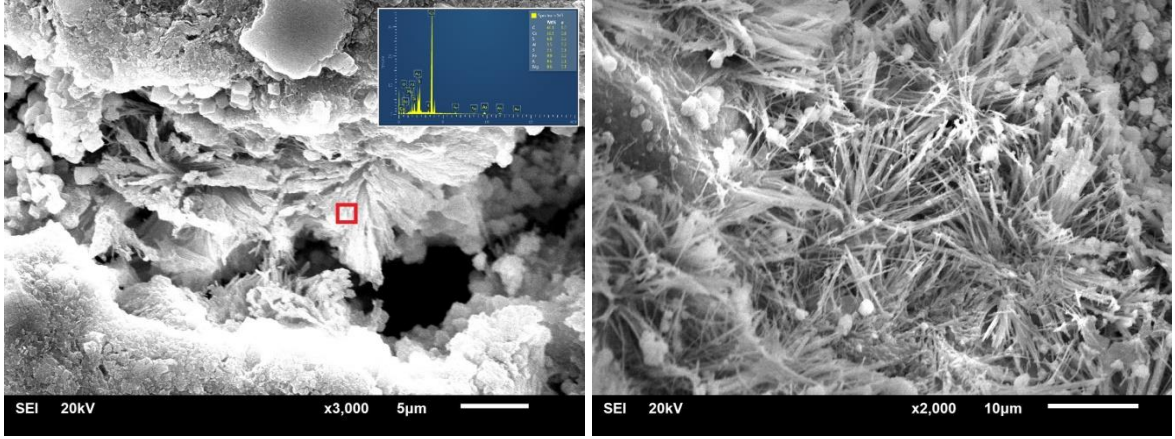
Şekil 59. MK-15 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

Buhar küründen hemen sonra incelenen MK-20 örneğinin boşluklarında herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış olup boşluklarda kalsit kristalleri görülmektedir (Şekil 60).



Şekil 60. MK-20 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

MK-20 numunelerinin 90 günlük genleşme değeri %0,066 mertebesinde dir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde MK-20 örneğinin hamur fazında masif etrenjit ve iğnems i etrenjit oluşumları tespit edilmiştir (Şekil 61). İşaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,17 ve 0,09 olarak hesaplanmıştır.

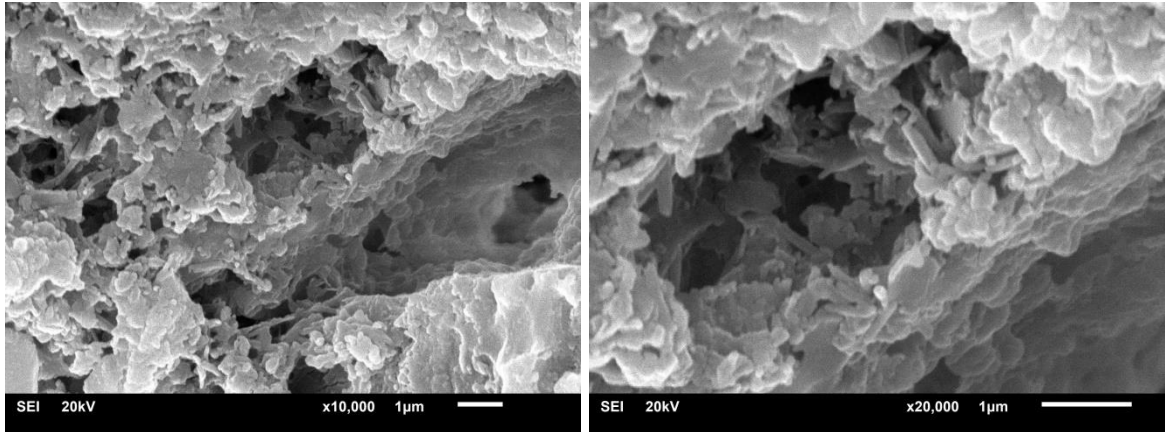


Şekil 61. MK-20 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

2.4.2.4. Riyolit Katkılı Örneklerin Mikroyapı Analizleri

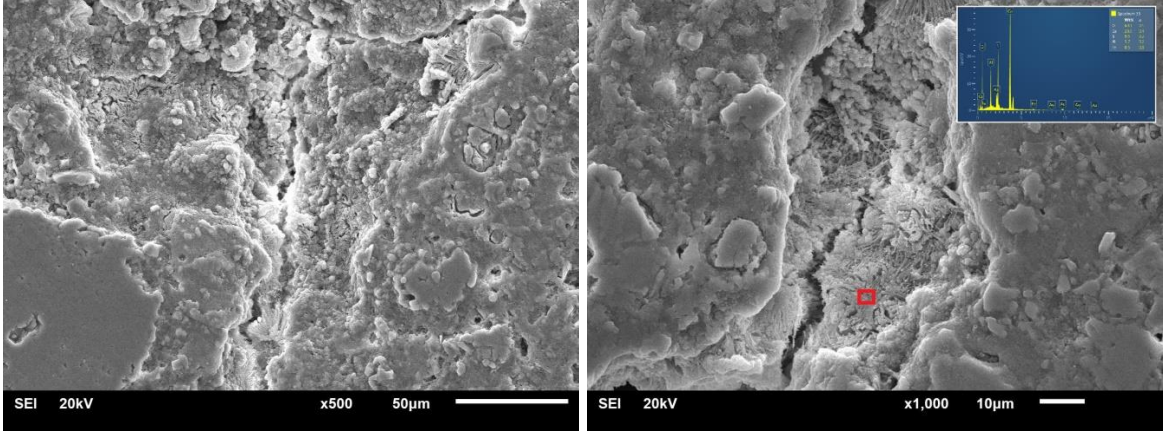
85°C buhar kürü sonrası Duggan yöntemi uygulanan riyolit katkıli numunelerin buhar küründen hemen sonraki ve 90 günlük mikroyapı analizlerine ait görüntüler aşağıda verilmektedir.

Buhar küründen hemen sonra incelenen R-5 örneğinin boşluklarında herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır (Şekil 62).



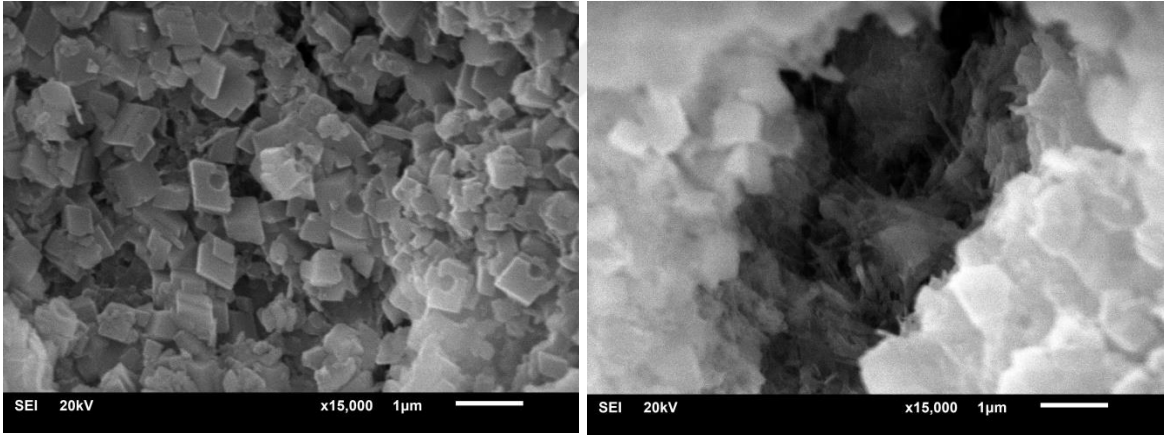
Şekil 62. R-5 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

R-5 numunelerinin 90 günlük genişleme değeri %0,062 mertebesinde dir. 90 gün sonra yapılan mikroyapı incelemelerinde R-5 örneğinin hamur fazında masif etrenjit oluşumları tespit edilmiştir (Şekil 63). İşaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,40 ve 0,24 olarak hesaplanmıştır.



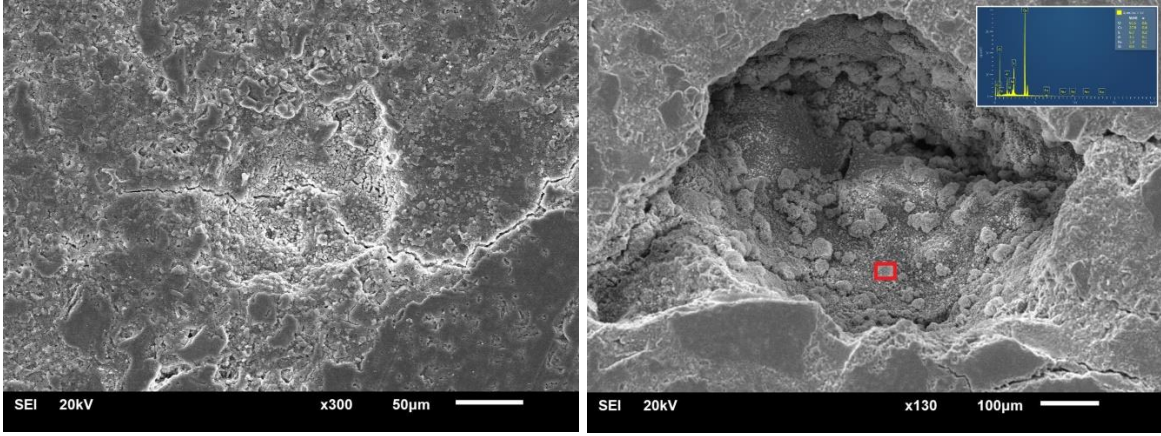
Şekil 63. R-5 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

Buhar küründen hemen sonra incelenen R-10 örneğinin boşluklarında herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış olup boşluklarda kalsit kristalleri görülmektedir (Şekil 64).



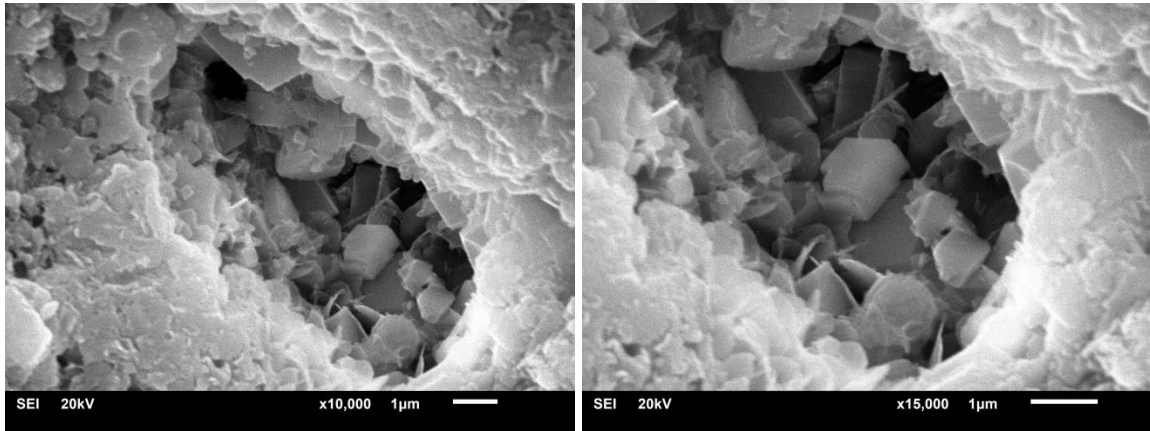
Şekil 64. R-10 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

R-10 numunelerinin 90 günlük genişleme değeri %0,058 mertebesinde dir. Şekil 65'te R-10 örneğinin genel görüntüsü ve boşlukta oluşan top etrenjitler verilmektedir. İşaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,22 ve 0,11 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca boşluklarda top etrenjitlerin yanısıra kalsit kristalleri de gözlemlenmiştir.



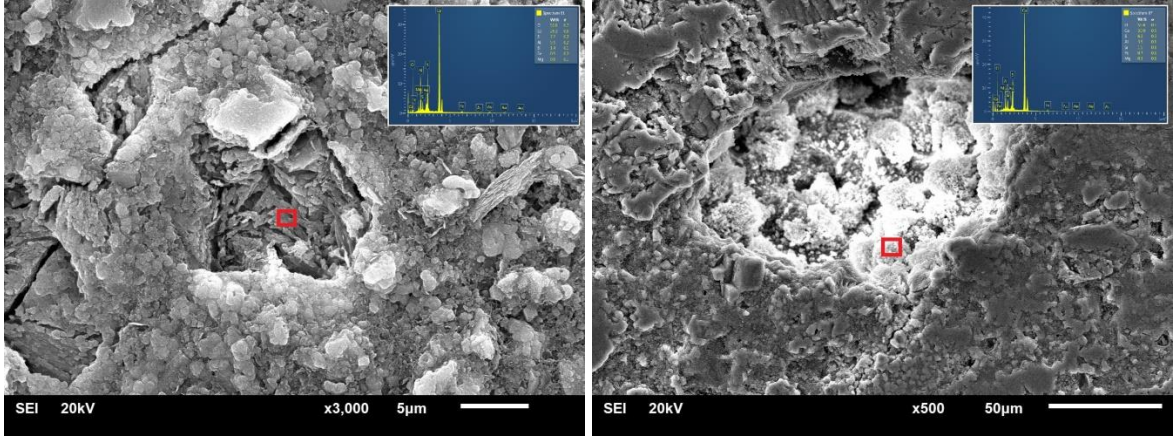
Şekil 65. R-10 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

Buhar küründen hemen sonra incelenen R-15 örneğinin boşluklarında iğnemsî yapıda bir oluşum görülmüştür ancak o bölgede EDS analizi yapılamadığından oluşumun yapısı tam olarak tespit edilememiştir. İncelenen diğer örneklerde olduğu gibi R-15 örneğinin de boşlukları içinde kalsit kristallerine rastlanmıştır (Şekil 66).



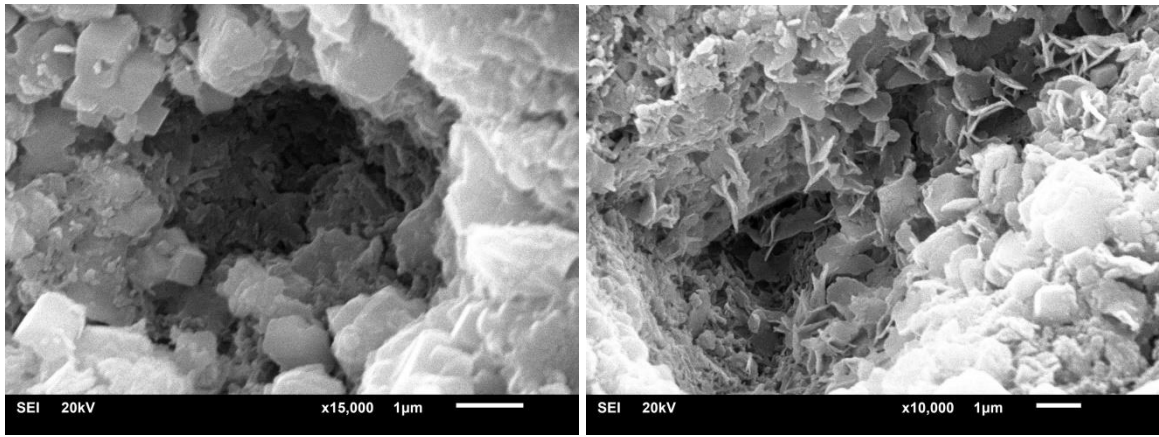
Şekil 66. R-15 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

R-15 numunelerinin 90 günlük genleşme değeri %0,056 mertebesindedir. Şekil 67'de çimento hamur fazında oluşan masif etrenjit ve boşlukta oluşan top etrenjit yapısı verilmektedir. Masif etrenjit için işaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,27 ve 0,21 olarak hesaplanmıştır. Top etrenjit için işaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,20 ve 0,13 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 67. R-15 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

Buhar küründen hemen sonra incelenen R-20 örneğinin boşluklarında herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış olup boşluklarda incelenen yüzeye dik şekilde bulunan ve kulakçık şeklinde bir morfolojiye sahip oluşumlar görülmüştür (Şekil 68-b). Monosülfat olduğu tahmin edilen bu oluşumlar üzerinde EDS analizi yapılamadığından dolayı oluşumun yapısı tam olarak tespit edilememiştir. Ancak buhar kürü nedeniyle bu tür ürünlerin oluştuğu literatürde belirtilmektedir [5].



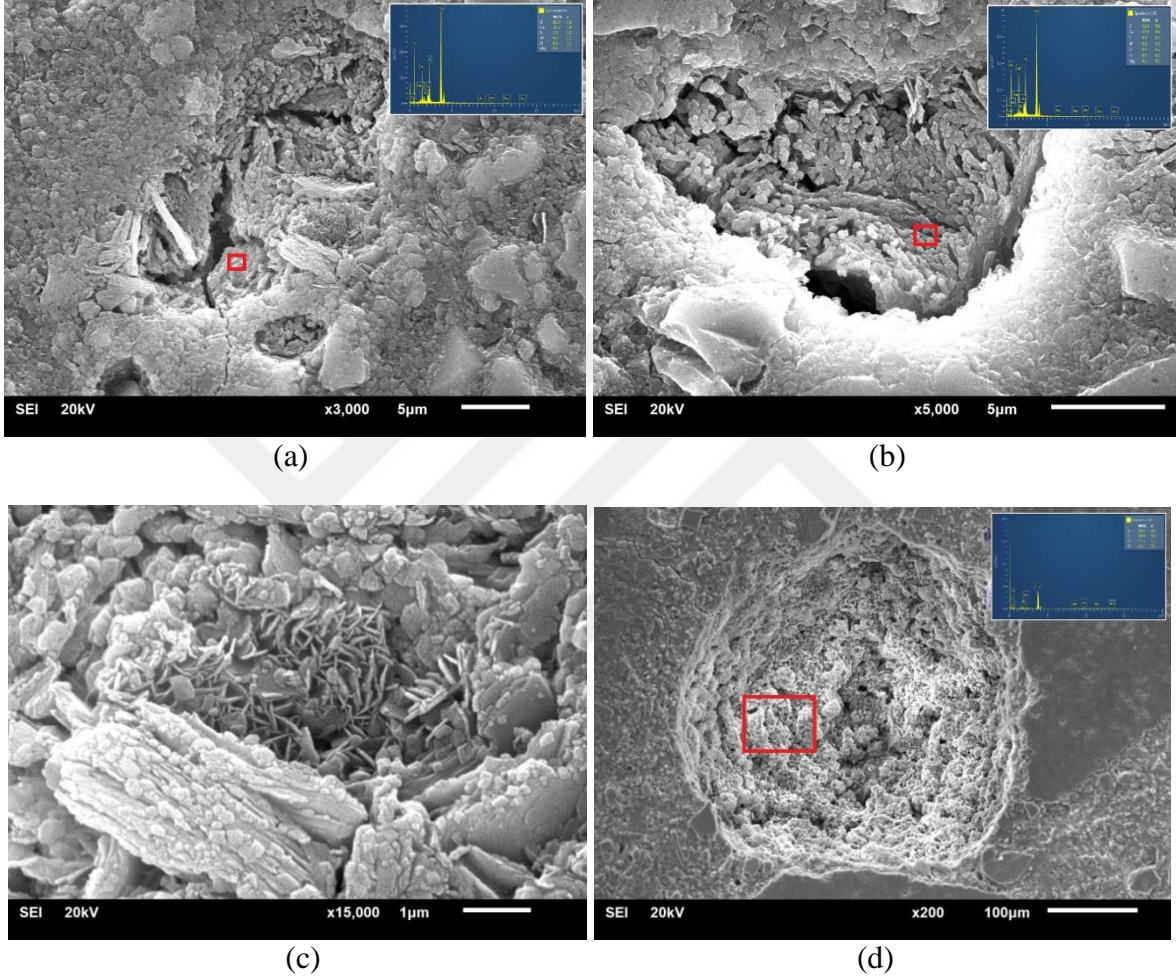
(a)

(b)

Şekil 68. R-20 örneğinin buhar kürü sonrası içyapı görüntüsü

R-20 numunelerinin 90 günlük genişleme değeri %0,058 mertebesinde dir. Şekil 69-a ve Şekil 69-b'de çimento hamuru fazında oluşan masif etrenjit yapıları verilmektedir. Şekil 69-a'da işaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,28 ve 0,19 olarak hesaplanmıştır. Şekil 69-b'de işaretli bölgeye yapılan EDS analizi

sonucunda ise S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0,33 ve 0,22 olarak hesaplanmıştır. Şekil 69-c'de hamur fazında oluşan monosülfat plakaları görülmektedir. Ayrıca Şekil 69-d'de boşlukta oluşan kalsit kristalleri verilmektedir. İşaretli bölgeye yapılan EDS analizi sonucunda yapının %60,2 O, %20,9 C, %17,5 Ca, %1,4 Si içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 69. R-20 örneğinin 90 gün sonraki içyapı görüntüsü

DeneySEL çalışma kapsamında genleşme ölçümlerinin yanısıra mikroyapı analizleri de gerçekleştirilmiştir. Yapılan mikroyapı analizlerinde toplam 158 mikroyapı görüntüsü alınmış ve 57 adet EDS analizi yapılmıştır.

Yapılan EDS analizleri sonucunda elde edilen oranların çoğunlukla 1,5 ila 2 arasında olduğu belirlenmiştir. Literatürde belirtildiği üzere S/Al oranının 1,5 olması incelenen yapının etrenjit olduğuna işaret etmektedir.

Yapılan genleşme ölçümleri ve mikroyapı analizleri sonucunda genleşme yaratan masif etrenjitlerin çimento hamuru fazında ve agrega-çimento hamuru arayüzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Genleşmelerin düşük mertebede kalması masif etrenjitlerin yoğun bir biçimde oluşmamasına bağlanabilir. Kalker kökenli agregalar ile hazırlanan harç örneklerinde masif etrenjit oluşumunun geciktiği ve genleşmelerin düşük mertebelerde kaldığı literatürde belirtilmektedir [42, 100, 101].



3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada betonun kimyasal nedenlerle bozulmasına neden olan gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO) varlığı deneysel olarak değerlendirilmiş önlenmesi hususunda metakaolin ve riyolit kullanımının etkisi araştırılmıştır. Gerçekleştirilen genleşme ölçümleri ve mikroyapı analizleri ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Üç aylık süre sonunda çimento ile farklı oranlarda ikame edilerek kullanılan metakaolin ve riyolit gecikmiş etrenjit oluşumu kaynaklı genleşme üzerinde önleyici etkisi açısından anlamlı bir fark yaratmamıştır. Bu durum tüm ikame oranları için geçerlidir.
2. Metakaolin ve riyolit birbiriyle karşılaştırıldığında, riyolitin metakaoline kıyasla gecikmiş etrenjit oluşumu kaynaklı genleşme üzerinde önleyici etkisinin bir derece daha iyi olduğunu söylemek mümkündür.
3. Metakaolinin GEO kaynaklı genleşmeyi önlemedeki etkin rolü bilinmektedir. Ancak bu anlamda riyolit ilk olma özelliği taşımaktadır. Bu çalışma ile riyolitin de metakaolin gibi GEO kaynaklı genleşmeyi önlemek amacıyla kullanılabilmesi anlaşılmaktadır. Buna ilişkin daha kesin konuşabilmek için daha fazla deneysel çalışmalara gereksinim vardır.
4. Literatürde belirtildiği üzere S/Al oranının 1,5 olması incelenen ürünün etrenjit olduğuna işaret etmektedir. Çalışmaya ilişkin yapılan SEM-EDS analizleri sonucunda elde edilen oranların çoğunlukla 1,5 ila 2 arasında olduğu tespit edilmiştir.
5. Gerçekleştirilen genleşme ölçümleri ve mikroyapı analizleri ile genleşmeye neden olan masif etrenjitlerin çimento hamuru fazında ve agrega-çimento hamuru arayüzeyinde oluştuğu tespit edilmiştir. Masif etrenjitlerin yoğun bir biçimde oluşmaması genleşmelerin düşük mertebede kalmasını sağlamış olduğu düşünülmektedir.
6. Metakaolin ve riyolitin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması açısından daha uzun süreli deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinin gerekli olduğunun altı çizilebilir.

4. KAYNAKLAR

1. Nagaraj, T.S., Shashiprakash, S.G. ve Raphuprasad, B.K., Reproportioning Concrete Mixes, ACI Materials Journal, 90, 1 (1993) 50-58.
2. Ünsal, A. ve Şen, H., Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri. <http://www.kgm.gov.tr> 21 Şubat 2019
3. Erdoğan, T.Y., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 2016.
4. Baradan, B., Yazıcı H. ve Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 298, 2002.
5. Stark, J. ve Bollmann, K., Delayed Ettringite Formation in Concrete, Nordic Concrete Research-Publications, 23 (2000) 4-28.
6. Skalny, J. ve Locher, F.W., Curing Practices and Internal Sulfate Attack - The European Experience, Cement, Concrete and Aggregates, 21, 1 (1999) 59-63.
7. Thaulow, N., Jakobsen, U.H. ve Clark, B., Composition of Alkali Silica Gel and Ettringite in Concrete Railroad Ties: SEM-EDX and X-ray Diffraction Analyses, Cement and Concrete Research, 26, 2 (1996) 309-318.
8. Sahu, S. ve Thaulow, N., Delayed Ettringite Formation in Swedish Concrete Railroad Ties, Cement and Concrete Research, 34, 9 (2004) 1675-1681.
9. Scrivener, K.L., Damidot, D. ve Famy, C., Possible Mechanisms of Expansion of Concrete Exposed to Elevated Temperatures During Curing (also known as DEF) and Implications for Avoidance of Field Problems, Cement, Concrete and Aggregates, 21,1 (1999) 93-101.
10. Shayan, A. ve Quick, G.W., Microscopic Features of Cracked and Uncracked Concrete Railway Sleepers, ACI Materials Journal, 89, 4 (1992) 348-361.
11. Thomas, M.D.A. ve Ramlochan, T., Field Cases of Delayed Ettringite Formation, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 85-97, RILEM Publications SARL, Bagneux, 2004.
12. Odler, I. ve Chen, Y., On the Delayed Expansion of Heat Cured Portland Cement Pastes and Concretes, Cement and Concretes Composites, 18, 3 (1996) 181-185.
13. Fu, Y., Delayed Ettringite Formation in Portland Cement Products, Ph.D. Thesis, University of Ottawa, Ottawa, 1996.
14. Shimada, Y., Chemical Path of Ettringite Formation in Heat-Cured Mortar and Its Relationship to Expansion, Ph.D. Thesis, Northwestern University, Illinois, 2005.

15. Stark , J., Bollmann, K. ve Seyfarth, K., Ettringite-Cause of Damage, Damage Intensifier or Uninvolved Third Party?, ZKG International, 51, 5 (1998) 280-292.
16. Heinz, D. ve Ludwig, U., Mechanism of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concrete Subjected to Heat Treatment, Special Publications, 100 (1987) 2059-2071.
17. Diamond, S., Delayed Ettringite Formation-Processes and Problems, Cement and Concrete Composites, 18,3 (1996) 205-215.
18. Lawrence, B.L., Moody, E.D., Guillemette, R.N. ve Carrasquillo, R.L., Evaluation and Mitigating Measures for Premature Concrete Distress in Texas Department of Transportation Concrete Elements, Cement, Concrete and Aggregates, 21, 1 (1999) 73-81.
19. Shayan, A. ve Ivanusec, I., An Experimental Clarification of the Association of Delayed Ettringite Formation with Alkali-Aggregate Reaction, Cement and Concrete Composites, 18, 3 (1996) 161-170.
20. Lawrence, C.D., Mortar Expansions due to Delayed Ettringite Formation. Effects of Curing Period and Temperature, Cement and Concrete Research, 25, 4 (1995b) 903-914.
21. Collepardi, M., A Holistic Approach to Concrete Damage Induced by Delayed Ettringite Formation, Proceedings of the Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Tecnology, October 1997, Rome: 373-396.
22. Divet, L. ve Pavoine, A., Delayed Ettringite Formation in Massive Concrete Structures: An Account of Some Studies of Degraded Bridges. International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 98-126, RILEM Publications SARL, Bagnex, 2004.
23. Shao, Y., Lynsdale, C.J., Lawrence C.D. ve Sharp J.H., Deterioration of Heat-Cured Mortars due to the Combined Effect of Delayed Ettringite Formation and Freeze-Thaw Cycles, Cement and Concrete Research, 27, 11 (1997) 1761-1771.
24. Gillot, J.E. ve Rogers, C.A., The Behavior of Silicocarbonatite Aggregates from to Montreal Area, Cement and Concrete Research, 33, 4 (2003) 471-480.
25. Stark, J., Ludwig, H.M. ve Müller, A., Hydrate Phase Changes at Low Temperatures, ZKG International, 46, 2 (1993) 90-94.
26. Ingham, J., Briefing:Delayed Ettringite Formation in Concrete Structures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering, Mays 2012, 59-62.
27. Wimpenny , D.E., White, P.S. ve Eden, M.A., Two Case Studies of the Management of Bridges Diagnosed with Delayed Ettringite Formation, Proceedings of 5th

- Institution of Civil Engineers International Bridge Design, Construction and Maintenance Conference, September 2007, Beijing, 448-457.
28. Ingham, J.P., *Geomaterials Under the Microscope-A Colour Guide*, Manson Publishing, London, 2011.
 29. Godart, B., Pathology, Assessment and Treatment of Structures Affected by Delayed Ettringite Formation, *Structural Engineering International*, 27, 3 (2017) 362-369.
 30. Nanayakkara, A., *Importance of Controlling Temperature Rise due to Heat of Hydration in Massive Concrete Elements*, 2011.
 31. Day, R.L., *The Effect of Secondary Ettringite Formation on the Durability of Concrete: A Literature Analysis*, PCA Research and Development Bulletin, Skokie, Illinois, USA, 1992.
 32. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul, 2010.
 33. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., *Beton*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2012.
 34. Liman, C., *Hidroklorik Asit ve (HCl) ve Nitrik Asit'in (HNO₃) Beton Dayanımına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2006.
 35. Özgen, M.M., *Betonarme Yapılarda Bozulma Süreçleri ve Beton Sınıfının Durabilitesine ve Maliyetine Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
 36. Hartman, M.R., *Investigation of the Crystalline Structure of Ettringite with in Situ Measurement of its Evolution During Formation and Thermal Decomposition*, Ph.D. Thesis, University of Michigan, Michigan, 2005.
 37. Glasser, F.P., *The Stability of Ettringite*, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 43-64, RILEM Publications SARL, Bagnex, 2004.
 38. Hartman, M.R., Brady, S.K., Berliner, R. ve Conradi, M.S., *The Evolution of Structural Changes in Ettringite During Thermal Decomposition*, *Journal of Solid State Chemistry*, 179, 4 (2006) 1259-1272.
 39. Ustabaş, İ., *Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton ve Harçların Performansının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008.
 40. Kelham, S., *The Effect of Cement Composition and Fineness on Expansion Associated with Delayed Ettringite Formation*, *Cement and Concrete Composites*, 18, 3 (1996) 171-179.

41. Glasser, F.P., The Role of Sulfate Mineralogy and Cure Temperature in Delayed Ettringite Formation, Cement and Concrete Composites, 18, 3 (1996) 187-193.
42. Tosun, K., Farklı Çimento Tiplerinin Gecikmiş Etrenjit Oluşumu Üzerindeki Etkileri, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007.
43. Van Hees, R.P.J., Wijffels, T.J. ve Van der Klugt, L.J.A.R., Thaumasite Swelling in Historic Mortars: Field Observations and Laboratory Research, Cement and Concrete Composites, 25, 8 (2003) 1165-1171.
44. Crammond, N.J., The Thaumasite Form of Sulfate Attack in the UK, Cement and Concrete Composites, 25 (2003) 809-818.
45. Rahman, M.M. ve Bassuoni, M.T., Thaumasite Sulfate Attack on Concrete: Mechanisms, Influential Factors and Mitigation, Construction and Building Materials, 73 (2014) 652-662.
46. Arjunan, P., Detailed Characterization of Current North American Portland Cements and Clinkers and the Implications for the Durability of Modern Concrete, Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2000.
47. Taylor, H.F.W., Sulfates in Portland Clinker and Cement, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 3-17, RILEM Publications SARL, Baugnex, 2004.
48. Herfort, D., Distribution of Sulfates in Portland Cement Clinker, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 18-27, Rilem Publications SARL, Baugnex, 2004.
49. Taylor, H.F.W., Distribution of Sulfate Between Phases in Portland Cement Clinkers, Cement and Concrete Research, 29, 8 (1999) 1173-1179.
50. Michaud, V. ve Suderman, R.W., Anhydrite in High Sulfur Trioxide (SO₃)/Alkali Clinkers: Dissolution Kinetics and Influence on Concrete Durability, Cement, Concrete and Aggregates, 21, 1 (1999) 196-201.
51. Michaud-P., V. ve Suderman, R.W., Sulfates in High SO₃/Alkali Clinker. Their Dissolution Kinetics and Their Influence on Concrete Workability and Durability, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite, 28-40, Rilem Publications SARL, Baugnex, 2004.
52. Shimada, Y. ve Young, J.F., Thermal Stability of Ettringite in Alkaline Solutions at 80°C, Cement and Concrete Research, 34, 12 (2004) 2261-2268.
53. Divet, L. ve Randriambololona, R., Delayed Ettringite Formation: The Effect of Temperature and Basicity on the Interaction of Sulphate and C-S-H Phase, Cement and Concrete Research, 28, 3 (1998) 357-363.

54. Fu, Y. ve Beaudoin, J.J., Mechanism of Delayed Ettringite Formation in Portland Cement Systems, ACI Materials Journal, 93, 4 (1996c) 327-333.
55. Lawrence, C.D., Delayed Ettringite Formation: An Issue? Materials Science of Concrete, American Ceramic Society, 4 (1995a) 113-154.
56. Grattan-Bellew, P.E., Beaudoin, J.J. ve Vallée V., G., Effect of Aggregate Particle Size and Composition on Expansion of Mortar Bars due to Delayed Ettringite Formation, Cement and Concrete Research, 28, 8 (1998) 1147-1156.
57. Heinz, D. ve Ludwig, H.M., Heat Treatment and Risk of DEF Delayed Ettringite Formation in UHPC, Proceeding of the International Symposium on High Performance Concrete, September 2004, Germany, 717-730.
58. Diamond, S., The Relevance of Laboratory Studies on Delayed Ettringite Formation to DEF in Field Concretes, Cement and Concrete Research, 30, 12 (2000) 1987-1991.
59. Ping, X ve Beaudoin, J.J., Mechanism of Sulphate Expansion. II. Validation of Thermodynamic Theory, Cement and Concrete Research, 22, 5 (1992) 845-854.
60. Miller, F.M. ve Conway, T., Use of Ground Granulated Blast Furnace Slag for Reduction of Expansion due to Delayed Ettringite Formation, Cement, Concrete and Aggregates, 25, 2 (2003) 59-68.
61. Shayan, A., Quick, G.W. ve Lancucki, C.J., Morphological, Mineralogical and Chemical Features of Steam-Cured Concretes Containing Densified Silica Fume and Various Alkali Levels, Advances in Cement Research, 5, 20 (1993) 151-162.
62. Ramlochan, T., Thomas, M.D.A. ve Hooton, R.D., The Effect of Pozzolans and Slag on the Expansion of Mortars Cured at Elevated Temperature, Part I: Expansive Behaviour, Cement and Concrete Research, 33, 6 (2003) 807-814.
63. Bensted, J. ve Barnes, P., Structure and Performance of Cements, 2nd Edition, Spon Press, New York, 2002.
64. Qian, X., Zhan, S. ve Li, Z., Research of the Physical and Mechanical Properties of the High Performance Concrete with Metakaolin, J. Build. Mater., 4, 1 (2001) 75-78.
65. Sabir, B.B., Wild, S. ve Bai, J., Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review, Cement and Concrete Composites, 23 (2001) 392-400.
66. Khatib, J.M. ve Clay, R.M., Absorption Characteristics of Metakaolin Concrete, Cement and concrete Research, 34, 1 (2004) 19-29.
67. Gruber, K.A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R.D. ve Thomas, M.D.A., Increasing Concrete Durability with High-Reactivity Metakaolin, Cement and Concrete Composites, 23 (2001) 479-484.

68. Bai, J., Wild, S., Ware, J.A. ve Sabir, B.B., Using Neural Networks to Predict Workability of Concrete Incorporating Metakaolin and Fly Ash, Adv. Eng. Software, 34 (2003) 663-669.
69. Al-Akhras, N.M., Durability of Metakaolin Concrete to Sulfate Attack, Cement and Concrete Research, 36 (2006) 1727-1734.
70. Ramlochan, T., Thomas, M. ve Gruber, K.A., The Effect of Metakaolin on Alkali-Silica Reaction in Concrete, Cement and Concrete Research, 30 (2000) 339-344.
71. Brooks, J.J. ve Johari, M.A.M., Effect of Metakaolin on Creep and Shrinkage of Concrete, Cement and Concrete Composites, 23, 6 (2001) 495-502.
72. Poon, C.S., Kou, S.C. ve Lam, L., Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete, Constr.Build. Mater., 20 (2006) 858-865.
73. Wild, S., Khatib, J.M. ve Jones, A., Relative Strength, Pozzolanic Activity and Cement Hydration in Superplasticised Metakaolin Concrete, Cement and Concrete Research, 26, 10 (1996) 1537-1544.
74. Saad, M.N.A., Andrade, W.P. ve Paulon, V.A., Properties of Mass Concrete Containing an Active Pozzolan Made from Clay, Concrete International, 4, 7 (1982) 59-65.
75. Baki, V.A., Erdoğan, Ş. ve Ustaş, İ., Riyolit Mineralinin Puzolanik Özellik ve Basınç Dayanımı Açısından Uçucu Kül İle Karşılaştırılması, Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5.Sempozyumu ve Sergisi, Ekim 2017, Ankara, Bildiriler Kitabı: 349-361.
76. Baki, V.A., Öğütölmüş Riyolit ve Trakit Minerallerinin Puzolanik Özelliklerinin Araştırılması, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2017.
77. Asgeirsson, H., Intermilled Silica Fume in Icelandic Cement, Concr. Int., 14, 7 (1992) 56.
78. Goto, S. ve Roy, D.M., The Effect of W/C Ratio and Curing Temperature on the Permeability of Hardened Cement Paste, Cement and Concrete Research, 11, 4 (1981) 575-579.
79. Kjellsen, K.O., Detwiler, R.J. ve Gjorv, O.E., Backscattered Electron Imaging of Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures, Cement and Concrete Research, 20, 2 (1990) 308-311.
80. Kjellsen, K.O., Detwiler, R.J. ve Gjorv, O.E., Development of Microstructures in Plain Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures, Cement and Concrete Research, 21, 1 (1991) 179-189.

81. Yang, R. ve Sharp, J.H., Hydration Characteristics of Portland Cement After Heat Curing: I , Degree of Hydration of the Anhydrous Cement Phases, J. Am. Ceram Soc., 84, 3 (2001a) 608-614.
82. Fu, Y., Ding, J. ve Beaudoin, J.J., Expansion of Portland Cement Mortar due to Internal Sulfate Attack, Cement and Concrete Research, 27, 9 (1997) 1299-1306.
83. Yang, R., Lawrence, C.D., Lynsdale, C.J. ve Sharp, J.H., Delayed Ettringite Formation in Heat-Cured Portland Cement Mortars, Cement and Concrete Research, 26, 1 (1999a) 17-25.
84. Azzam, A.E., Delayed Ettringite Formation, the Influence of Aggregate Types, Curing Conditions, Exposure Conditions, Alkali Content, Fly Ash and Mix Water Conditioner (MWC), Ph.D. Thesis, University of Maryland, Maryland, 2002.
85. Pavoine, A. ve Divet, L., Delayed Ettringite Formation in Concrete: Tests Based on Drying and Wetting Cycles, 6th CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, 2003, Thessaloniki, 989-1004.
86. Pavoine, A., Divet, L. ve Fenouillet, S., A Concrete Performance Test for Delayed Ettringite Formation: Part I Optimisation, Cement and Concrete Research, 36, 12 (2006a) 2138-2143.
87. Pavoine, A., Divet, L. ve Fenouillet, S., A Concrete Performance Test for Delayed Ettringite Formation: Part II Validation, Cement and Concrete Research, 36, 12 (2006b) 2144-2151.
88. Barbarulo, R., Peycelon, H., Prene S. ve Marchand, J., Delayed Ettringite Formation Symptoms on Mortars Induced by High Temperature due to Cement Heat of Hydration or Late Thermal Cycle, Cement and Concrete Research, 35, 1 (2005) 125-131.
89. Shayan, A. ve Quick, G.W., Relative Importance of Deleterious Reactions in Concrete: Formation of Alkali-Aggregate Reactivity Products and Secondary Ettringite, Advances in Cement Research, 4, 16 (1991) 149-157.
90. Tagnit-Hamou, A. ve Petrov, N., A New Method for Evaluating the Risk of DEF, Cement, Concrete and Aggregates, 26, 2 (2004) 52-57.
91. Ramadan, E.O., Experimental and Theoretical Study of Delayed Ettringite Damage in Concrete, Ph.D. Thesis, University of Maryland, Maryland, 2000.
92. Ceesay, J., The Influence of Exposure Conditions on Delayed Ettringite Formation in Mortar Specimens, M.S. Thesis, University of Maryland, Maryland, 2004.
93. Lane, D.S ve Özyıldırım, H.C., Evaluation of the Potential for Internal Sulfate Attack Through Adaptation of ASTM C342 and the Duggan Test, Cement, Concrete and Aggregates, 21, 1 (1999) 43-58.

94. Ekolu, S.O., Role of Heat Curing in Concrete Durability: Effects of Lithium Salts and Chloride Ingress on Delayed Ettringite Formation, Ph.D. Thesis, University of Toronto, Toronto, 2004.
95. Bauer, S., Cornell, B., Figurski, D., Ley, T., Miralles, J. ve Folliard, K., Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in Concrete: A Literature Review, 2006.
96. Tevrizci, M.M., Metakaolin Katkılı Harçların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2010.
97. Taylor, H.F.W., Famy, C. ve Scrivener, K.L., Delayed Ettringite Formation, Review, Cement and Concrete Research, 31, 5 (2001) 683-693.
98. He, C., Makovicky, E. ve Øsbæck, B., Thermal Stability and Pozzolanic Activity of Calcined Illite, Applied Clay Science, 9, 5 (1995) 337-354.
99. Yılmaz, S.G., Kılıçlı (Şile-İstanbul) Killerinin Jeokimyasal, Mineralojik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.
100. Kelham, S., Effects of Cement Parameters on Expansion Associated with DEF, International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 197-211, RILEM Publications SARL, Bagnex, 2004.
101. Yang, R., Lawrence, C.D. ve Sharp, J.H., Effect of Type of Aggregate on Delayed Ettringite Formation, Advances in Cement Research, 11, 3 (1999) 119-132.

ÖZGEÇMİŞ

Sümeyye KARAHÜSEYİN, 27.01.1994'te Giresun'da doğdu. İlköğretimi Gazi İlköğretim Okulu'nda, ortaöğretimi Giresun Mimar Sinan Anadolu Lisesi'nde okul ikincisi olarak tamamladı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Eylül 2018'de Avrasya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. Halen Avrasya Üniversitesi'ndeki akademik görevine devam etmektedir. İngilizce bilmektedir.

