

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAYBURT TAŞI OLARAK BİLİNEREN TÜFLERİN ÇİMENTO ÜRETİMİNDE
MİNERAL KATKI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hatice ŞAHİN

Aralık - 2018

BAYBURT



**BAYBURT TAŞI OLARAK BİLİNEN TÜFLERİN ÇİMENTO ÜRETİMİNDE
MİNERAL KATKI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Hatice ŞAHİN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doçent Doktor İlker TEKİN**

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAYBURT TAŞI OLARAK BİLİNEREN TÜFLERİN ÇİMENTO ÜRETİMİNDE
MİNERAL KATKI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hatice ŞAHİN

2018

BAYBURT

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAY SAYFASI

Bayburt Taşı Olarak Bilinen Tüflerin Çimento Üretiminde Mineral Katkı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Doç. Dr. İlker TEKİN danışmanlığında, Hatice ŞAHİN tarafından hazırlanan bu tez çalışması 30 / 11 / 2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Üye: Doç. Dr. İlker TEKİN

Üye: Doç. Dr. Ertekin ÖZTEKİN

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. Metin UÇURUM

Enstitü Müdür Vekili

Bu araştırma Bayburt Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: 2017/01-69003-01

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

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bu çalışmada şahsıma ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BAYBURT TAŞI OLARAK BİLİNEREN TÜFLERİN ÇİMENTO ÜRETİMİNDE MİNERAL KATKI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Hatice ŞAHİN

Bayburt Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İlker TEKİN

Çimento, yapının dayanımını ve maliyetini etkileyen en önemli bileşendir. Ancak çimento üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ dünya üretiminin %8'ini oluşturmaktadır. Bununla birlikte çimentonun özelliklerini iyileştirmek ve maliyetini düşürmek amacıyla atık malzemeler ve yeni bileşenler çimentonun yerine kullanılmaktadır. Bu bileşenler içinde en yoğun kullanılanı puzolanlardır. Bayburt ilinde bulunan ve yeşil, sarı ve beyaz olmak üzere üç farklı renkte Bayburt taşı olarak bilinen tüfler kimyasal yapısında yüksek oranda alümin ve silis bulundurmaktadır. Bu taşlar ocak işletmeciliği sırasında %70'e yakın atık oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, Portland çimentosu üretiminde maliyetleri düşürmek ve çimentonun bazı özelliklerini geliştirmek amacıyla belirli oranlarda öğütülmüş Bayburt taşları çimento yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Böylece CEM II ve CEM IV çimentolarının üretilebilirliği amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada Bayburt beyaz tüf, Bayburt sarı tüf, Bayburt yeşil tüf taşları Bayburt İli Sanayi Bölgesi atık sahasından temin edildikten sonra laboratuvar tipi konkasörde tane boyutu küçültülmüştür. Ardından malzemenin %90'ı 45 µm olacak şekilde öğütülmüştür. Öğütülen üç farklı renkteki BT çimentoya %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında ikame edilmiştir. Üretilen çimentolarla TS EN 196-3'e göre standart kıvam, priz başlangıcı ve bitişi, genleşme deneyleri yapılmıştır. İlaveten, üretilen çimentolarla TS EN 196-1'e göre 4x4x16 cm boyutlu harç numuneler üretilmiştir. Bunlar üzerinde 2, 28, 90 ve 270 gün yaşlarında eğilme ve basınç dayanımı, 2,28 ve 90 gün yaşlarında ASTM C642'ye göre su emme, ASTM C1585'e göre kapiler su emme ve 90 gün yaşında yüksek sıcaklık etkisi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hamur ve harç numuneler üzerinde 7 ve 90 gün yaşlarında XRD ve SEM analizleri yapılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; üretilen çimentoların düşük özgül ağırlıkları, 28 basınç dayanımları, düşük su geçirimsizliklerinden dolayı BT'ler katkılı çimento üretiminde kullanılabilir. BT ikameli çimentoların özelliklerinin TS EN 197-1'e uygun olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu araştırmanın sonucunda, Bayburt yöresine ait taşların çimento üretiminde sırasıyla ağırlıkça Bayburt beyaz taşının %20'si, Bayburt yeşil taşının %30'u ve

Bayburt sarı taşının %40'ı Portland çimentosunun yerine ikame olarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

2018, 216 sayfa

Anahtar kelimeler: Doğal taş, Puzolan, Bayburt, Bayburt taşı, Çimento, Traslı çimento



ABSTRACT

MS Thesis

INVESTIGATION OF USABILITY OF TUFFS CALLED AS BAYBURT STONE AS A MINERAL ADMIXTURE IN CEMENT PRODUCTION

Hatice ŞAHİN

Bayburt University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Associate Professor Doctor İlker TEKİN

Cement is one of the most important constituents which effect strength and cost of a construction. However, cement production causes approximately 8% of the world CO₂ production. Therefore, waste and new ingredients have been using in cement production in order to enhance properties and cost effectiveness. Pozzolans are the most common way to get these purpose. White, green and yellow colored Bayburt stones have high alumina and silica structures, and so they have pozzolanic reactivity. Quarry works of these stones cause roughly 70% of wastes.

In this study, grinded Bayburt stones were replaced with Portland cement at different ratios in blended cement production. This application was performed to reduce costs of cement and to enhance some of properties of cement. Thus, it is aimed to produce of CEM II and CEM IV cements. In experimental study, initially Bayburt stones were taken from industry of waste region in Bayburt province, and afterwards they crushed by laboratory type crusher. Following, materials were grinded as D₉₀: 45 µm by ball mill. Grinded three different colored Bayburt stone were replaced with Portland cement at ratios 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30% and 40%, respectively. After that, Standard consistency, initially and final setting times and soundness tests were performed according to the TS EN 196-3 on produced blended cements. Furthermore, 4x4x16 cm sized mortar specimens were produced according to the TS EN 196-1 with using produced blended cements. With these mortar specimens, Compressive and flexure tests were performed at 2nd, 28th, 90th and 270th days according to TS EN 196-1; water absorption test were performed at 2nd, 28th, 90th days according to the ASTM C642; capillary absorption test were performed at 90th day according to the ASTM C1585 and elevated temperature effect tests were performed at 90th day . Moreover, mineralogical and microscopically analysis were performed by using X-Ray Diffraction Spectroscopy (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) at 7th and 90th days.

According to the results obtained from the experiments; Due to the low specific gravity, 28 compressive strengths and low water permeability of the cements produced, they can be used in the production of BT doped cement. It has been determined that the properties of BT substituted cement are in accordance TS EN 197-1. As a result of this research, it was determined that 20% of Bayburt white stone, 30% of Bayburt green stone and 40% of Bayburt yellow stone could be used as substitute for instead of Portland cement.

2018, 216 pages

Keywords: Natural stone, Pozzolan, Bayburt, Bayburt stone, Cement, Trass cement

TEŞEKKÜR

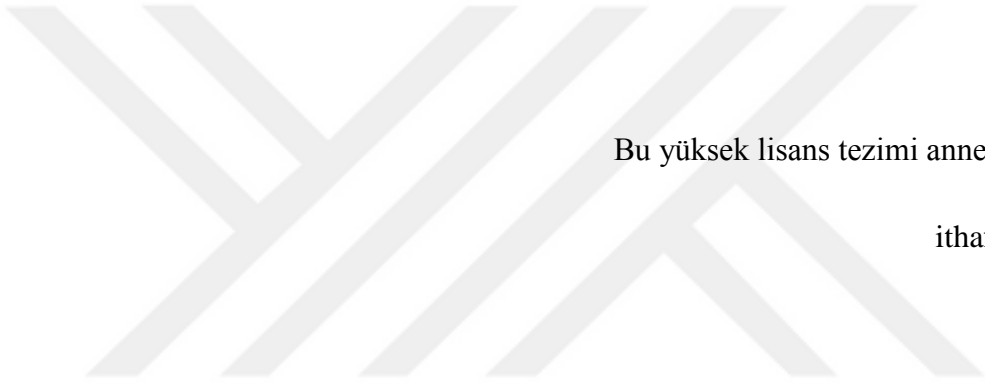
Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli ve danışman hoca statüsünü hakkıyla yerine getiren Doç. Dr. İlker Tekin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının basımı aşamasında maddi desteklerini esirgemeyen Arslantürk Yapı Malzemeleri A.Ş.'nin kıymetli başkanı Sayın Selahattin Arslantürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Yine çalışmamın her safhasında sürekli yanımda olan, desteğini ve yardımını eksik etmeyen kardeşim Mikail Şahin'e, deneysel çalışmalarda yardımda bulunan kıymetli dostum İnş. Müh. Halime Yıldızoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

Teşekkürlerin az kalacağı, hayatım boyunca kazandırdıkları her şey için minnettar olduğum ve beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bu hayattaki en büyük şansım olan başta annem Asiye Şahin ve babam Burhanettin Şahin olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hatice ŞAHİN
Aralık / 2018



Bu yüksek lisans tezimi anne ve babama
ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1 Çimento.....	5
2.1.1 Çimentonun tanımı.....	5
2.1.2 Çimentonun tarihçesi	5
2.1.3 Çimentonun üretimi	6
2.1.4 Çimento üretimindeki gelişmeler.....	7
2.1.5 Portland çimentosu.....	7
2.1.6 Portland çimentosunun hidrasyonu	10
2.1.7 Çimentoların sınıflandırılması	15
2.1.7.1 CEM I portland çimentosu.....	16
2.1.7.2 CEM II portland kompoze çimentosu.....	16
2.1.7.3 CEM III portland yüksek fırın cürüflu çimento	16
2.1.7.4 CEM IV puzolanik çimento	17
2.1.7.5 CEM V kompoze çimento.....	17
2.2 Puzolanlar.....	17
2.2.1 Puzolanların tarihçesi	18
2.2.2 Türkiye'nin puzolanik madde kaynakları ve durumu	19

2.2.3 Puzolanların sınıflandırılması	19
2.2.3.1 Doğal puzolanlar	20
2.2.3.2 Yapay puzolanlar	23
2.2.4 Puzolanik aktivite.....	23
2.2.5 Tras içeren çimentolar.....	24
2.2.5.1 Traslı çimentoların hidratasyonu	25
2.2.6 Çimentoda puzolan kullanımının etkileri.....	26
2.3 Volkanik Tüf.....	31
2.3.1 Volkanik tüflerin oluşumu	31
2.3.2 Volkanik tüflerin genel özellikleri	32
2.3.3 Volkanik tüflerin kimyasal yapısı	32
2.3.4 Volkanik tüf çeşitleri ve gruplandırılması	33
2.3.5 Türkiye’de volkanik tüflerin dağılımı.....	33
2.4 Akademik Çalışmalar.....	35
3. MATERYAL ve METOT.....	42
3.1 Materyal	42
3.1.1 Çimento	42
3.1.2 Bayburt Taşı (BT)	43
3.1.2.1 Bayburt taşının türleri	45
3.1.3 Standart CEN kumu	55
3.1.4 Su	55
3.2 Metot	56
3.2.1 Deney aşamaları	56
3.2.1.1 Aşama 1: Öğütme.....	56
3.2.1.2 Aşama 2: Kompoze çimentoların hazırlanması ve taze hamur deneyleri	59
3.2.1.3 Aşama 3: Taze harç deneyleri	64

3.2.1.4 Aşama 4: Sertleşmiş harç deneyleri	65
3.2.1.5 Aşama 5: Sertleşmiş harçlar üzerinde yüksek sıcaklık deneyleri	69
3.2.1.6 Mikroskopik ve mineralojik analizler	71
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	75
4.1 Çimento Hamurları Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları	75
4.1.1 Standart kıvam tayini deney sonuçlarının değerlendirilmesi	76
4.1.2 Priz başlangıcı ve priz bitişi tayini deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	78
4.1.3 Hacim genişmesi deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	83
4.2 Çimento Harçları Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları.....	84
4.2.1 Yayılma tablası deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi	84
4.2.2 Eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları	86
4.2.3 Basınç dayanımı deney sonuçları.....	93
4.2.4 Su emme deney sonuçları	103
4.2.5 Kapiler su emme deney sonuçları	112
4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi ve X-Işını Difraksiyonu (XRD) Analizi	115
4.3.1 Referans çimentosunun SEM ve XRD analizleri.....	116
4.3.2 BBT ikameli çimentoların SEM ve XRD analizleri	117
4.3.3 BYT ikameli çimentoların SEM ve XRD analizleri	128
4.3.4 BST ikameli çimentoların SEM analizleri	137
4.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	147
4.4.1 Renk değişimi	147
4.4.2 Kütle Kaybı	148
4.4.3 Eğilme dayanımı deney sonuçları	150
4.4.4 Basınç dayanımı deney sonuçları.....	153

4.4.5 Yüksek sıcaklık etkisi sonrası Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ve X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizi	156
5. SONUÇLAR	168
KAYNAKLAR	173
EKLER.....	185
EK 1 Deneylerde Kullanılan Aletler.....	186
EK 2 Deneylerde Kullanılan Bayburt Taşları	190
EK 3 Deneylerde Kullanılan Bayburt Beyaz Taşı	191
EK 4 Deneylerde Kullanılan Bayburt Yeşil Taşı.....	193
EK 5 Deneylerde Kullanılan Bayburt Sarı Taşı.....	194
EK 6 Çimento Hamurları	196
EK 7 Çimento Harçları.....	199
EK 8 SEM ve XRD Analizleri	210
EK 9 Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme ve Basınç Deneyleri	212
EK 10 Yüksek Sıcaklık Sonrası Renk Değişimi	213
EK-11 Elek Boyut Analizi Sonuçları	216
ÖZGEÇMİŞ.....

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	Alümin
$Ca_4Al_2Fe_2O_{10} = C_4AF$	Tetrakalsiyum alüminoferrit
$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$	Etrenjit
$Ca_3Al_2O_6 = C_3A$	Trikalsiyum alüminat
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit (Portlandit)
$Ca_2SiO_4 = C_2S$	Dikalsiyum silikat
$Ca_3SiO_5 = C_3S$	Trikalsiyum silikat
$CaSO_4.2H_2O$	Alçıtaşı
CaO	Sönmemiş kireç
cm	Santimetre
cm^2	Santimetrekare
cm^3	Santimetreküp
C/S	Kireç/Silikat
C-S-H	Kalsiyum-Silikat-Hidrat (Tobermorit)
CO_2	Karbondioksit
dk	Dakika
D_{10}	Kümülatif %10
D_{50}	Kümülatif %50
D_{90}	Kümülatif %90
Fe_2O_3	Demir oksit
g	Gram
K_2O	Potasyum oksit
kg	Kilogram
km^2	Kilometrekare
m	Metre

mm	Milimetre
mm ²	Milimetrekare
mm ³	Milimetreküp
μ	Mikron
\bar{x}	Aritmetik ortalama (İstatistik analiz)
μm	Mikrometre
MPa	Mega Paskal
MgO	Magnezyum oksit
N	Newton
Na ₂ O	Sodyum oksit
OH ⁻	Hidroksil
s	Saniye
SiO ₂	Silis
SO ₃	Kükürt Trioksit
TiO ₂	Titanyum dioksit
σ	Standart sapma
°C	Santigrat derece
%	Yüzde

Kısaltmalar

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	American Society for Testing and Materials
BT	Bilgisayarlı Tomografi
BT	Bayburt Taşı
BBT	Bayburt Beyaz Taşı
BST	Bayburt Sarı Taşı
BYT	Bayburt Yeşil Taşı
EN	Avrupa Standardı
MTA	Maden Tetkik ve Arama
ODTÜ	Ortadoğu Teknik Üniversitesi

PÇ	Portland Çimentosu
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
TS	Türk Standardı
vd	ve diğeri
VT	Volkanik Tuf
XRD	X- Işını Difraksiyonu



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Çimento hidratasyonunun şematik gösterimi	11
Şekil 2.2 Etrenjit ve monosülfat kristalleri	13
Şekil 2.3 Ana bileşen hidratasyon ürünlerinin oluşumu	15
Şekil 2.4 Puzolanların sınıflandırılması	20
Şekil 3.1 Bayburt'un Türkiye'deki yeri ve ilçelerinin haritası.....	43
Şekil 3.2 Bayburt Beyaz Taşı.....	45
Şekil 3.3 BBT'nin mineralojik analizi (XRD analizi)	46
Şekil 3.4 BBT'nin mikroskopik görüntüsü (SEM analizi)	47
Şekil 3.5 Bayburt Sarı Taşı	48
Şekil 3.6 BST'nin mineralojik analizi (XRD analizi).....	49
Şekil 3.7 BST'nin mikroskopik görüntüsü (SEM analizi).....	50
Şekil 3.8 Bayburt Yeşil Taşı	50
Şekil 3.9 BYT'nin mineralojik analizi (XRD analizi).....	51
Şekil 3.10 BYT'nin mikroskopik görüntüsü (SEM analizi)	52
Şekil 3.11 BYT'nin SEM görüntüsü üzerinde verilen EDS #1 noktasının analizi....	52
Şekil 3.12 Deney çalışmasında kullanılan Bayburt Taşlarının temin edildiği bölgeler	54
Şekil 3.13 Bayburt taşlarının MIP analizi sonucunda mikro porozite oranları.....	55
Şekil 3.14 BBT, BST ve BYT'nin öğütme sonrası elek analizi	59
Şekil 3.15 Yüksek sıcaklık etkisinin zamana bağlı değişimi.....	70
Şekil 4.1 Çimentoların standart kıvam – BT ikame oranı ilişkisi korelasyon analizi.....	77
Şekil 4.2 BBT ikameli çimentoların priz başlangıcı süreleri.....	78
Şekil 4.3 BYT ikameli çimentoların priz başlangıcı süreleri.....	79
Şekil 4.4 BST ikameli çimentoların priz başlangıcı süreleri	81
Şekil 4.5 BT ikame oranı ile priz süreleri arasındaki korelasyon ilişkisi	82
Şekil 4.6 BT ikameli harçların yayılma tablası değerleri arasındaki korelasyon ilişkisi	85

Şekil 4.7 2 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon eğrileri	88
Şekil 4.8 28 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon eğrileri	89
Şekil 4.9 90 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon eğrileri	91
Şekil 4.10 270 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon ilişkisi	92
Şekil 4.11 BT ikame oranına bağlı olarak çimentoların 2 – 270 gün arasında eğilme dayanımı gelişimi	93
Şekil 4.12 2 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi	95
Şekil 4.13 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi	97
Şekil 4.14 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi	98
Şekil 4.15 270 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi	99
Şekil 4.16 BT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımı gelişimleri	100
Şekil 4.17 BT ikame oranına bağlı olarak çimentoların 2-270 gün arasındaki basınç dayanımı gelişimleri	100
Şekil 4.18 BBT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımı değişimleri	102
Şekil 4.19 BYT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımı değişimleri	102
Şekil 4.20 BST ikameli çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımı değişimleri	103
Şekil 4.21 2 günlük porozite deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi	106
Şekil 4.22 28 günlük porozite deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi	106
Şekil 4.23 90 günlük porozite deney sonuçları regresyon analizi-BT ikame oranı ilişkisi	108
Şekil 4.24 BT ikameli çimentoların zamana bağlı porozite gelişimlerinin karşılaştırmalı grafiği	110
Şekil 4.25 BBT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı porozite değişimleri	111

Şekil 4.26 BYT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı porozite değişimleri....	111
Şekil 4.27 BST ikameli çimento harçlarının zamana bağlı porozite değişimleri	112
Şekil 4.28 BT ikame oranlarına göre hesaplanan kapiler su emme sabitlerinin korelasyon eğrileri.....	114
Şekil 4.29 Referans çimentosunun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri	116
Şekil 4.30 Referans çimentosunun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri	116
Şekil 4.31 Referans çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşındaki XRD analizi.....	117
Şekil 4.32 Toz BBT'nin SEM analizleri.....	118
Şekil 4.33 %10 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	118
Şekil 4.34 %10 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	119
Şekil 4.35 %10 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşındaki XRD analizi	120
Şekil 4.36 %20 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	121
Şekil 4.37 %20 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	121
Şekil 4.38 %20 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşlarında yapılan XRD analizleri	122
Şekil 4.39 %30 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	123
Şekil 4.40 %30 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	123
Şekil 4.41 %30 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşlarında yapılan XRD analizleri	124
Şekil 4.42 %40 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	125
Şekil 4.43 %40 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	125
Şekil 4.44 %40 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	126
Şekil 4.45 Tüm BBT ikameli çimentoların mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı	127
Şekil 4.46 Toz BYT'nin SEM analizleri	128
Şekil 4.47 %10 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	128
Şekil 4.48 %10 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	129
Şekil 4.49 %10 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşındaki XRD analizi	130
Şekil 4.50 %20 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	130
Şekil 4.51 %20 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	131

Şekil 4.52 %20 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	131
Şekil 4.53 %30 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	132
Şekil 4.54 %30 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	133
Şekil 4.55 %30 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	134
Şekil 4.56 %40 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	134
Şekil 4.57 %40 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri.....	135
Şekil 4.58 %40 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	135
Şekil 4.59 Tüm BYT ikameli çimentoların mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı.....	137
Şekil 4.60 Toz BST'nin SEM analizleri	138
Şekil 4.61 %10 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri	138
Şekil 4.62 %10 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri	139
Şekil 4.63 %10 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	139
Şekil 4.64 %20 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri	140
Şekil 4.65 %20 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri	140
Şekil 4.66 %20 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	141
Şekil 4.67 %30 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri	142
Şekil 4.68 %30 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri	142
Şekil 4.69 %30 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	143
Şekil 4.70 %40 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri	144
Şekil 4.71 %40 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri	144
Şekil 4.72 %40 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri.....	145
Şekil 4.73 Tüm BST ikameli çimentoların mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı.....	146
Şekil 4.74 BT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kaybı karşılaştırma grafiği	150

Şekil 4.75 BT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları	152
Şekil 4.76 BT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları	155
Şekil 4.77 Referans çimentosunun 90 gün yaşındaki yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri.....	156
Şekil 4.78 %10 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	157
Şekil 4.79 %20 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	157
Şekil 4.80 %30 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	158
Şekil 4.81 %40 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	158
Şekil 4.82 BBT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık sonrası mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı	159
Şekil 4.83 %10 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	160
Şekil 4.84 %20 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	160
Şekil 4.85 %30 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	161
Şekil 4.86 %40 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	161
Şekil 4.87 BYT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık sonrası mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı	162
Şekil 4.88 %10 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	164
Şekil 4.89 %20 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	164
Şekil 4.90 %30 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	165
Şekil 4.91 %40 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri	165
Şekil 4.92 BST ikameli çimentoların yüksek sıcaklık sonrası mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı	167

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları.....	8
Çizelge 2.2 Portland çimentosunun ana bileşenlerin özellikleri.....	9
Çizelge 2.3 TS 25'e göre Tras'ta aranan özellikler	24
Çizelge 2.4 Bazı yörelerdeki volkanik tüflerin kimyasal analiz sonuçları	32
Çizelge 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	42
Çizelge 3.2 Bayburt tüfit yapılı taşların fiziksel ve teknolojik özellikleri.....	53
Çizelge 3.3 Bayburt tüfit yapılı taşların kimyasal özellikleri	53
Çizelge 3.4 Kullanılan kür suyunun kimyasal özellikleri.....	56
Çizelge 3.5 Öğütülmüş toz haldeki BT'lerin fiziksel özellikleri	58
Çizelge 3.6 Katkılı çimentoların katkı oranlarına göre isimlendirilmesi.....	60
Çizelge 3.7 Hamur numunelerinin malzeme karışım miktarları.....	61
Çizelge 3.8 Harç numunelerinin malzeme karışım miktarları	64
Çizelge 4.1 BT katkıli çimento hamurları ile kontrol çimento hamuru deney sonuçları	75
Çizelge 4.2 BT ikameli harçların yayılma tablası deney sonuçları	84
Çizelge 4.3 Eğilme dayanımı deney sonuçları.....	87
Çizelge 4.4 2, 28, 90 ve 270 günlük basınç dayanımı deney sonuçları	94
Çizelge 4.5 2,28 ve 90 günlük su emme deneyi sonuçları.....	104
Çizelge 4.6 90 günlük kapiler su emme deneyi sonuçları	113
Çizelge 4.7 90 günlük BT ikameli çimento harçlarının yüksek sıcaklık sonrası kütle kayıpları.....	149
Çizelge 4.8 Yüksek sıcaklık deney sonrası eğilme dayanımları.....	151
Çizelge 4.9 Yüksek sıcaklık etkisinde BT ikameli harçların basınç dayanımı deney sonuçları	153

1. GİRİŞ

Dünya'daki gelişmeler ve hızlı nüfus artışına paralel olarak daha fazla yapıya, bu yapılaşmaya paralel olarak da daha fazla betona ve dolayısı ile de çimentoya ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılarda malzemeleri birbirine bağlamak için dünyada en fazla kullanılan bağlayıcı malzeme çimentodur ve 2014 yılındaki üretim miktarı 4,3 milyar tondur. Bu miktar yıllar geçtikçe artmaktadır. (Koçak, 2008; Nas, 2012; Köleli,2015). Portland çimentosu yaklaşık 175 yıldan beri tüm dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olmuştur (Nas, 2012).

Sürdürülebilir yapı üretimi bilincinin, yapı malzemesi üretiminden başlayarak dikkate alınması gerekir. Yaygın olarak tüketilen çimentonun maliyeti ve çevreye olumsuz etkilerinden dolayı alternatif bağlayıcı malzeme üzerindeki araştırmalar günümüzde hızla artmaktadır (Bulut vd, 2009; Tuncer, 2014). 1970'lerdeki enerji krizinden bu yana, Portland çimentolarının (PÇ) yanı sıra alternatif bağlayıcı maddeler ve/veya ikame malzemelerindeki arayış bilimsel ve endüstriyel düzeyde süregelmektedir (Massazza, 1993; Dayı, 2006; Tuncer, 2014). Çimento hem havada hem de suda sertleşebilmeleri nedeniyle hidrolik özeliğe sahip güçlü bir bağlayıcıdır. Bu nedenle birçok alanda kullanılmaktadır. Çimentonun taşıdığı özellikler betonun kalitesi ve performansı üzerinde önemli rol oynamaktadır.

PÇ klinkerinin üretiminde, kalker ve silis içerikli hammaddeler uygun oranlarda karıştırılıp öğütüldükten sonra döner fırında 1450-1650 °C sıcaklıkta pişirilerek öncelikle ara ürün olan klinker elde edilmektedir. Klinker çimento üretiminin en maliyetli kısmıdır. Klinker üretimi için yüksek enerji gerekliliği çevresel ve ekonomik açıdan önemli sorunlara neden olmaktadır (Postacıoğlu, 1986; Karakurt, 2008). Çimento üretim sürecinin en karmaşık bölümü olan klinker üretimi maliyetli ve karmaşık bir süreçtir (Topçu vd, 2007). Klinker üretimi sırasında kalsinasyon ve yanma sonucu ortaya çıkan zararlı CO₂ gazları en önemli çevre problemlerinden birisidir (Canpolat vd, 2004; Karakurt, 2008). Günümüzde üretilen CO₂ gazının %5-8'i çimento endüstrisi tarafından üretilmektedir (The Freedonia Group, 2006;

Karakurt, 2008; Tekin, 2016). CO₂ emisyonlarını azaltmak için çimento üretiminde klinker kullanımının olabildiğince azaltılması gerekmektedir (Karakurt, 2008; Tekin, 2014). Düşük klinkerli çimento; CO₂ çıkarmayan bileşenlerin çimento yerine kullanılmasıyla üretilebilir. Çimento üreticisi açısından bakıldığında katkılı çimento üretiminde bir yatırım maliyeti ile fabrika kapasitesi artırılabilir. Bugünkü eğilim, kısmen Portland Çimentosu (PÇ) yerine tek bir katkı bileşeni katarak CO₂ emisyonunu azaltmak yerine, üç veya dört bileşenli katkılı çimentoların üretilmesi yönündedir (Dayı, 2006).

Çimento üretiminde kullanılan katkı malzemelerinin çoğu puzolanik özelliğe sahiptir. Silisli veya silisli ve alüminli yapıda olup kendi başlarına bağlayıcı özelliğe sahip olmayan, ancak ince öğütülmüş halde, normal sıcaklıkta ve rutubetli ortamlarda sönmüş kireçle reaksiyona girip bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan malzemeler puzolanlar veya puzolanik malzemeler olarak isimlendirilmektedir (ASTM C 618, 1991; Yıldız 2006). Puzolanlar, doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Doğal puzolanlar, volkanik kül, pomza taşı, tras gibi volkanik orijinli ve diyatomit gibi silisli kavruların çökmesi sonucunda oluşan malzemelerdir. Yapay puzolanlar ise genellikle bir ısıtım işlemi neticesinde elde edilen silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu v.b. gibi atık malzemeler veya özellikle ısıtım işlemine tabii tutulan kil, şeyl vb. malzemelerdir (Douglas, 1985; Ulusu, 2006). Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcılık gösterebilmesi için, içerdiği silika ve alümina miktarı yüksek olmalı, amorf yapıya sahip olmalı ve en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır (Erdoğan, 2003).

Puzolanik katkıları, çimentoların performanslarının geliştirilmesinde birçok çalışmaya konu olmuştur. Puzolanlar; çimentoda ekonomiklik, geçirimsizliği azaltması, alkali-agrega reaksiyonlarının kontrolü, kimyasal dayanıklılık sağlanması, hafiflik, atıkların değerlendirilmesi, betonun büzülme davranışını azaltması ve mukavemetlerde artış sağlanması gibi avantajlar sağlanması nedeniyle üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir alandır (Koçak, 2008; Nas, 2012). Bu yüzden beton ve çimento sektöründe puzolan kullanılarak, hem ekolojik dengeye hem de ekonomiye katkı sağlanmaktadır (Nas, 2012).

Ülkemiz çoğu puzolanik özelliğe sahip olan doğal mineral katkı maddeleri bakımından oldukça zengindir. Türkiye'deki doğal puzolan yatakları hakkındaki etüt ve envanter çalışmaları Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Tamamının rezerv miktarları belirlenmemiş olmakla birlikte, ülkemizdeki yedi coğrafi bölgenin tamamında önemli doğal puzolan kaynakları mevcuttur (Leckebrush, 1984; Taşkın, 1999; Ulusu 2006). Ancak ülkemizde bu kaynakların tamamının istenilen şekilde kullanılmadığı düşünülmektedir. Çimento içerisinde yaygın olarak kullanılan mineral katkılar granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, toz halindeki kireç taşı, volkanik kökenli doğal camsı malzemeler ve taşısız volkanik tüflerdir (Fragoulis,1997; Ulusu 2006). Doğal puzolan olarak en çok kullanılan madde tras olarak bilinen volkanik tüflerdir (DPT, 2001; Tekin, 2005).

Çimento suyla birleştiğinde hidrasyon denilen ve katılaşma sürecini oluşturan bir dizi kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyonlar sırasında çimento partikülleri üzerinde jel tabakası oluşur. Jel tabakası içinde C-S-H denilen iplik şeklinde uzayan bağ tabakaları meydana gelir ve bu bağlar sayesinde çimento harcı dayanımını kazanır. C-S-H miktarı ne kadar fazlaysa dayanım da o kadar yüksek olur. Hidrasyon süreci sonunda, jelleşme sebebiyle çimento partikülleri hacimce 2,1 katı kadar büyür. Böylece heterojen yapıda olan, çimento ve agrega karışımından oluşan harç içindeki makro ve kapiler boşluklar kapanma eğilimine girer, bununla birlikte dayanım artar. Puzolan bu oluşumda çok önemli bir etkidir. Çimento harcı, dayanımının yaklaşık %90'lık kısmını 28 günde elde ederken, bu durum puzolanlı çimento harçlarında farklılık göstermektedir. Puzolanlı çimento 28 günlük dayanımdan sonra aktif olarak hidrasyon sürecine devam eder. Puzolan ikameli harçlarla yapılan çeşitli araştırmalarda, uygun koşullarda 90 günlük dayanımların normal çimentolu harçlara göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi, çimento tanelerinin hidrasyonu ve katılaşması sırasında açığa çıkan $Ca(OH)_2$ 'in, puzolanın silisli ve alüminli bileşikleriyle reaksiyona girerek 28 günden sonra da C-S-H bağlarını oluşturma sürecinin devam etmesidir. Burada dayanımı belirleyen ve katılaşmayı sağlayan C-S-H jellerinin 28 günden sonra da oluşmaya devam etmesi nedeniyle dayanım ve aynı zamanda boşlukların kapanma eğilimi artmaktadır (Özturan, 1993; Erdoğan, 2003; Tekin, 2005).

Günümüzde ocak işletmeciliği ve atölyelerde taş kesimi sırasında ilkel yöntemlerin kullanılmasından dolayı doğal taş üretiminde yaklaşık %70'e ulaşan kayıplar bulunmaktadır. Oluşan atıklar çevre kirliliğine sebep olmakta, tozmayla birlikte sağlık sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bayburt taşı (BT) olarak bilinen tüfit yapılı taşların ocak işletmeciliğinde modern yöntemlere geçilmemesi sebebiyle de %70'e varan kayıplar oluşmaktadır ve bu kayıp tarım arazilerini ve havayı kirletmekte çevre ve sağlık problemlerine sebep olmaktadır. BT'nin fazla miktarda oluşan atığı depolama sorunlarını da her geçen gün artırmaktadır. Bu sebepler ışığında, çalışmada çimento üretiminde maliyetleri düşürmek, mekanik mukavemetleri iyileştirmek, CO₂ salınımını azaltmak için klinker yerine doğal katkıları kullanılarak ülkemizde rezervi bol olan zeolit yapılı doğal puzolanların belirli oranlarda katkı olarak kullanıldığı kompoze çimento üretilmesi planlanmıştır. Bu kapsamda çalışmada farklı fiziko-kimyasal özelliklere sahip yeşil, beyaz ve sarı olmak üzere üç farklı renkteki BT'ler öğütüldükten sonra CEM I (42.5R) tipi çimentoya %0 – 40 oranlarında ikame edilerek farklı kompoze çimentoların üretimi hedeflenmiştir. Kompoze çimentoların fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla TS EN 196-3'e göre standart kıvam tayini, priz süresi ve genişleme deneyleri yapılmıştır. Fiziksel özellikleri belirlenen çimentoların mekanik mukavemetlerini belirlemek amacıyla TS EN 196-1'e göre standart 4x4x16 cm boyutlu standart harç numuneleri üzerinde 2, 28 ve 90 gün yaşlarında eğilme ve basınç dayanımı deneyleri ile ASTM C1585'e göre kapiler su emme ve ASTM C642'ye göre su emme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca sertleşmiş hamur numuneler üzerinde 7 ve 90 gün yaşlarında XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunlara ilaveten üretilen kompoze çimentoların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışlarını belirleyebilmek için 90 gün yaşında yüksek sıcaklık etkileri de görsel ve mekanik açıdan incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Çimento

2.1.1 Çimentonun tanımı

PÇ silisyum di oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) ve demir II oksitleri (Fe_2O_3) içeren hammaddelerin, teknolojik yöntem ve metotlarla sinterleşme derecelerine kadar pişirilmesi ve elde edilen ara mamul klinkerin, tek veya daha fazla katkı maddesi katılarak öğütülmesi ile üretilen hidrolik bağlayıcı madde olarak tanımlanmaktadır (Şafak, 2014). Çimento, su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonlar sonucunda priz alan ve ardından sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını, kararlılığını koruyan, aynı zamanda betonun en önemli hammaddesi olan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır (Koçak, 2008; Nas, 2012; Tekin, 2014). Çimento havada ve suda sertleşebilen bağlayıcı özellik taşır. Sertleştikten sonra su ve hava koşullarına karşı oldukça dayanıklıdır. TS EN 197-1 (2002) standardı yürürlüğe girdikten sonra özel amaçlı üç çimento standardı dışındaki tüm standartlar yürürlükten kaldırılmıştır. Buna göre çimentolar TS EN 197-1'de "CEM çimentosu" olarak adlandırılırlar. CEM çimentosu, agrega ve su ile uygun şekilde harmanlanıp karıştırıldığında, yeterli süre işlenebilirliğini koruyan ve belirlenmiş periyotlarda belirli dayanım seviyelerini kazanan, uzun süre hacim sabitliği gösteren, beton veya harç üretilen çimentodur (Ünsal ve Şen, 2008; Tekin, 2014).

2.1.2 Çimentonun tarihçesi

"Çimento" kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "caementum" kelimesinden türetilmiştir. Daha sonra bu kelime bağlayıcı anlamında kullanılmaya başlamıştır (Bilge, 2008). Bağlayıcı malzemelerin kalitesi ve kullanımı konusunda ancak 18. yy.' da kayda değer bir gelişme gösterilmiştir. 1756 yılında Eddystone Lighthouse' u yeniden inşa etmekle görevlendirilen John Smeaton kirecin kimyasal özelliklerini ilk anlayan kişi olarak bilinir. Daha sonraki gelişme ise "Roman Cement" (Roma Çimentosu), adı ile bilinen bağlayıcının Joseph Parker tarafından elde edilmesiyle olmuştur. 1824 yılında İngiltere' nin Leeds kentinde, Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustası hazırladığı ince taneli kil ve kalker karışımını pişirerek ve daha sonra

öğütürerek bağlayıcı bir ürün elde etmiştir. Bu ürüne su ve kum katıldığında ve zamanla sertleşme olduğunda, ortaya çıkan malzemenin İngiltere'nin Portland Adasından elde edilen yapı taşlarını andırdığını gören Joseph Aspdin, elde ettiği bu bağlayıcı için 21.10.1824 tarihinde "Portland Çimentosu" adı altında patent almıştır. Bu bağlayıcı daha sonraki yıllarda büyük gelişmeler gösterse de "Portland" ismi aynen korunmuştur. Aslında Joseph Aspdin tarafından üretilen bağlayıcı, üretim sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için bugünkü Portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip olamamıştır. Hammaddelerin yüksek sıcaklıklara kadar pişirilip öğütülmesi olayı daha sonra Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından 1845 tarihinde gerçekleştirilmiştir (Bilge, 2008; Nas, 2012; Şafak, 2014). İlk Çimento Fabrikası İngiltere' de 1848 yılında kurulmuştur. İlk Alman Çimento Standardı 1860 yılında oluşturulmuştur (Bilge, 2008). Döner fırındaki ilk gelişmeler 1877 yılında İngiltere'de başlamış ve Fredrick Ransome patentini 1885'de aldığı ilk döner fırınla birlikte anılmıştır. Ransome'nin fırını o devirdeki çimento dünyasında devrim niteliğinde olsa da işlevsel döner fırın uzun yıllar sonra üretime girmiştir. Amerika'daki ilk ekonomik döner fırın Hurry ve Seaman Atlas Çimento Fabrikası tarafından 1895 yılında üretime girmiştir (Koçak, 2008; Nas, 2012). Ancak modern PÇ üretimi 1950'lerden sonra başlamıştır.

2.1.3 Çimentonun üretimi

Portland çimentolarının ilkel maddesi kireçtaşı (kalker) ve kildir. Portland çimentolarının üretiminde, önce uygun miktarlarda kireç (CaO), silisyum di oksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve demir II oksit (Fe₂O₃) içeren hammaddeler belirli oranlarda karıştırılarak fırınlarda 1450°C veya 1650°C' ye kadar pişirilirlir. Yüksek sıcaklıklarda kalkerin ayrışması ile CaO₃ kilin ayrışmasında SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oluşur. Daha sonra bu maddeler sıcaklığın artmasıyla tekrar birleşip silikatları ve alüminatları oluştururlar. Fırından çıkan gri renkteki fındık büyüklüğündeki malzemeye "klinker" denir. Klinker soğutulduktan sonra öğütülür. Bu öğütme işlemi sırasında çimentonun priz sürelerini ayarlamak için %3~5 oranında alçıtaşı (CaSO₄.2H₂O) ilave edilir. 90 µ 'un altında öğütülen toz halindeki malzeme çimentodur ve bağlayıcı özellik kazanmıştır (Postacıoğlu, 1986; Özkul vd, 1999; Tekin, 2005).

2.1.4 Çimento üretimindeki gelişmeler

Çimento sektöründeki gelişmeler sadece içyapıdaki geliştirmelerle kalmamıştır. Günümüzde atık maddelerin çevreye verdiği zararlar da göz önüne alınarak, yıllardır yapılan çalışmalar neticesinde yüksek kalitede ve yüksek dayanımları verebilen çimentolar üretilmektedir. Bu çimentoların üretilme aşamalarında puzolanlar esas görevi yerine getirmektedir. Özellikle son yıllarda birkaç tip puzolanın farklı oranlardaki ikameleriyle oluşturulmuş harçlarda dayanım ve dayanıklılık açısından çok ciddi gelişmeler gözlenmiştir. Silis dumanı, uçucu kül, tras, volkanik tuf, yüksek fırın cürufu, diyatomit, pirinç kapçığı külü gibi puzolanlar araştırmacıların dikkatini çekmiş ve bu konudaki çalışmalar hızlı bir şekilde yürütülmektedir. Bütün kombinasyonlar denenerek ekonomik, sağlam ve dış etkenlere dayanıklı bir bağlayıcı elde etme isteği artmaktadır (Tekin, 2005).

Bu sebeplerle 1983'den beri CANMET ve ACI tarafından düzenlenen Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Diğer Puzolanların Betonda Kullanımı konferansı araştırmacılara iyi bir kaynak olmuştur. Buradan alınan sonuçlar şöyledir: Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kapçığı külü gibi sanayi atıkları ile doğal puzolanların oluşturduğu mineral katkıları boşluk doldurma ve puzolanik aktiviteleri nedeniyle betonun birçok özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton ve harçlarda ikincil bağlayıcı madde olarak kullanılmaktadırlar. Bu maddelerin kullanımıyla taze betonda işlenebilme iyileşmekte, terleme ve ayrışma azalmakta, hidrasyon ısı düşmekte, ancak gerekli su ihtiyacı artmakta ve süper akışkanlaştırıcı kullanmak gerekli olmaktadır. Sertleşmiş betonlarda ise ileri yaşlardaki mukavemetler artmaktadır. Röt ve sünme eğilimi azalma gösterirken, elastisite modülü değişkenlik göstermektedir. Mineral katkıların en etkili olduğu husus betonun durabilitesinin iyileştirilmesidir. Yoğun hamur yapısının oluşmasıyla geçirimsizlik azalmakta bunların sonucu olarak asit ve sülfatlara dayanıklılık, donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılık artmakta, donatı korozyon riski azalmaktadır (Özturan, 1993; Tekin, 2005).

2.1.5 Portland çimentosu

Yapısal amaçlarla kullanılan çimentolar, agregaları (kum, çakıl, kırma taş) bir arada tutmak için kullanılan, esas itibarıyla silisli ve kalkerli bağlayıcılardır. Beton yapımında kullanılan çimentolar ise, su içinde priz alma ve sertleşme özellikleri

nedeniyle hidrolik çimentolar olarak adlandırılır. PÇ, hidrolik çimentolar gurubunun en önemli üyesidir (Mindess ve Young, 1981; Dayı, 2006).

Döner fırına verilen hammadde karışımı, esas olarak kireç, silika, alümina ve demir oksitten meydana gelir. Bu oksitler, yüksek sıcaklıkta birbirleriyle reaksiyona girerek daha kompleks bileşenler oluştururlar (Mindess ve Young, 1981; Dayı, 2006). Klasik bir PÇ üretiminde kullanılan hammaddelerin oksit oranları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Çizelgedeki SO₃ dışındaki bütün oksitler çimento klinkerini de oluşturan oksitlerdir. Klinker içerisinde SO₃ bulunmamaktadır. Çimentonun içinde yer alan SO₃, çimento üretimi için klinkerin yanı sıra kullanılan alçıdan gelmektedir (Demirer, 2009).

Çizelge 2.1 Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları

Genel İsmi	Formülü	Sembölü	Miktar(%)
Sönmemiş Kireç	CaO	C	60-67
Silika	SiO ₂	S	17-25
Alümina	Al ₂ O ₃	A	3-8
Demir Oksit	Fe ₂ O ₃	F	0,5-6
Magnezyum Oksit	MgO	M	0,1-4
Kükürt Trioksit	SO ₃	S	1-3
Alkaliler	K ₂ O+Na ₂ O	K+N	0,2-1,3

PÇ’de Çizelge 2.1’de belirtilen oranlarda bulunan hammaddeler yüksek sıcaklıkta yanarak aşama aşama klinker ana bileşenlerini oluştururlar. Bunlar kısaca sırasıyla C₃S (3CaO.SiO₂), C₂S (2CaO.SiO₂), C₃A (3CaO.Al₂O₃) ve C₄AF (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) olarak gösterilir (Neville, 1981; Dayı, 2006).

Trikalsiyum silikat, (3CaO.SiO₂,C₃S) / Alit denir, C₃S saf olmayıp katı halde, özellikle MgO ve Al₂O₃ gibi bazı ikincil bileşiklerle modifiye haldedir. Klinkerin en önemli mineralidir. Mukavemet üzerinde en etkili olan yapıdır. Çimentonun kalıcı bağlayıcılık özelliğini tayin eden bileşendir. Çimentonun bağlayıcılık özelliği üzerinde her zaman etkilidir. Su ile reaksiyonu ve ortaya çıkan ısı orta değerdedir. Çimentonun erken dayanımını sağlar (Demirer, 2009; Tekin, 2014).

Dikalsiyum silikat, ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{C}_2\text{S}$) veya Belit denir. C_2S 'in değişik kristal yapıları bulunup en çok mevcut olan β - C_2S 'dir, stabilize olmuş bir yapıdır. Bir başka şekilde C_2S C_2S - γ olup hiçbir hidrolik özellik taşımadığından mevcudiyeti hiç istenmez ve çimentonun erken dayanım kazanması üzerinde etkin değildir. Çimentonun nihai dayanımı üzerinde etkilidir. Su ile reaksiyonu yavaştır, az miktarda ısı açığa çıkarır. Yüksek bağlayıcılık özelliği ileriki yaşlarda kendisini gösterir (Demirer, 2009; Tekin, 2014).

Kalsiyum alüminoferrit, ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{C}_4\text{AF}$) çimentonun rengini etkileyen bileşendir. C_4AF ne kadar fazla ise çimentonun rengi o kadar koyu olmaktadır. Mukavemet üzerinde yüksek oranda etkilidir. Su ile reaksiyonu fazla olmayıp bağlayıcılık değeri azdır (Demirer, 2009; Tekin, 2014).

Trikalsiyum alüminat, ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{C}_3\text{A}$). Bu bileşik, % 15'i nadiren aşar genellikle %9-12 miktarlarda bulunmaktadır, çimento karakteristiği üstünde önemli rolü vardır. Klinker içinde bulunun alüminatların en belirginidir. Amorf ve açık gri dikdörtgen prizmatik kristaller halindedir. Akışkanlık üzerinde etkilidir, mukavemet üzerinde etkin değildir. Su ile çok hızlı reaksiyona girip çok fazla ısı açığa çıkarır, çimentonun erken priz almasını sağlar, bu etkiyi azaltmak için klinkere bir miktar alçıtaşı katılır (Demirer, 2009; Tekin, 2014).

Çizelge 2.2 Portland çimentosunun ana bileşenlerin özellikleri

Çimento Özellikleri	Bileşenlerin Özellikleri			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Çok	Orta
Bağlayıcılık Değeri				
İlk Zamanlar	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Sonunda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

2.1.6 Portland çimentosunun hidratasyonu

Hidratasyon, çimentonun içindeki bileşiklerin suyla tepkimeye girmesi ile yeni ürünlerin ortaya çıkması olayıdır. Hidratasyon reaksiyonları ekzotermik (ısı açığa çıkaran) tepkimeler zinciridir ve belirli bir zaman içinde olup bitmez, sürekli bir olaydır. Diğer bir deyişle tepkimeler azalarak malzemenin ömrü boyunca sürer. Çimento toplam dayanımının % 90'lara yakını 28 gün içerisinde kazanmaktadır. Bu süreç içinde hidratasyon çok hızlıdır. Çimentonun prize başlaması ile başlayan sertleşme süreci, çimentonun dayanımını kazandığı katılaşma süreci ile devam eder. Hidratasyon süresinde iyi kürlenmiş çimento dayanıklı ve dayanımlı bir yapı sergiler (Erdoğan, 2003; Postacıoğlu, 1986; Tekin, 2005).

Çimentonun hidratasyonu sırasında süregelen tepkimelerin devamı için, çimento hamurundaki su dört değişik karakterde bulunmaktadır. Bunlar:

1. Serbest su: Bir cismin boşluklarında bulunan sudur. Bu su kurur bir mekânda tutularak ya da ısıtılarak uzaklaştırılabilir.
2. Adsorbsiyon suyu: Cisimlerin üzerinde Van der Waals kuvvetleri tarafından tutulan sudur. Kristal yapıdaki cisimlerin yüzeyindeki suya zeolitik suyu denir.
3. Hidratasyon veya kristalleşme suyu: Cismin yapısındaki sudur. Fakat yapı ile su arasında bir kimyasal bağ oluşmamıştır. Bu su cismin molekülleriyle birleşmiştir. Bundan dolayı yapıdaki suyun herhangi bir şekilde ayrılması ile cismin fiziksel yapısı tamamen bozulur. Karışık bileşimlerin su ile yaptıkları reaksiyon sonunda oluşan hidrate elemanlardaki su böyledir.
4. Oluşma suyu: Bu haldeki su artık molekül halinde değildir. Tek valanslı ve negatif elektrik ile yüklü (OH) olarak cisim içinde yer almaktadır. Kaolinit içindeki su bu suya iyi bir örnektir (Postacıoğlu, 1986; Tekin, 2005).

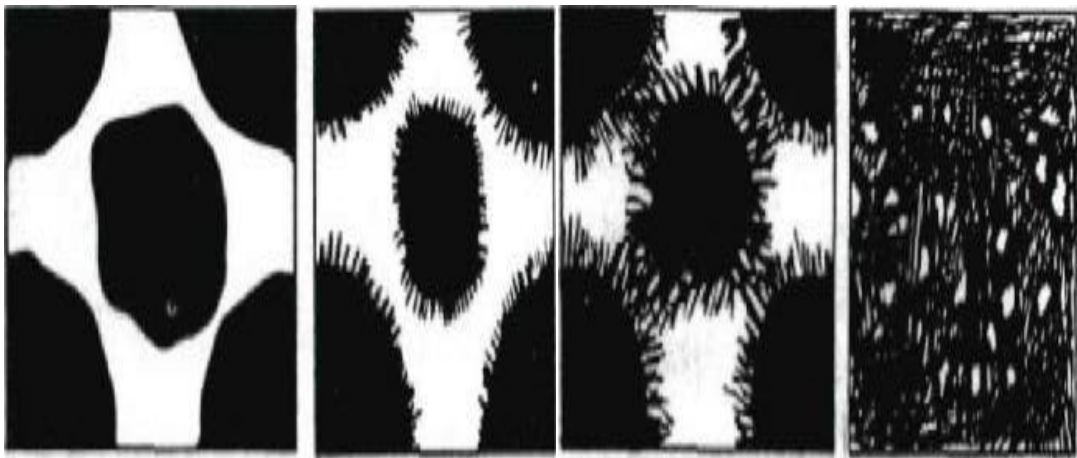
Bu şekilde bulunan suyun miktarları tüm hidratasyon süreci boyunca tepkimeler olurken kullanılarak değişmektedir. Sertleşmenin başlangıcında suyun yaklaşık %50'si Van der Waals kuvvetleri ile çimento partiküllerine tespit edilen adsorbe sudur, çimento hamurunun başlangıçtaki mukavemetin elde edilmesi bu adsorbe su sayesinde gerçekleşmektedir. Fakat zamanla hidratasyon ilerledikçe adsorbe suyun kalınlığı azalır. Su, hidratasyon ve oluşma suyu haline dönüşür. Böylelikle hidrate elemanların

miktarının artmasıyla mukavemet zamanla bir artış gösterir (Erdoğan, 2003; Postacıoğlu, 1986; Tekin, 2005).

Çimento tanecikleri, su içinde yavaşça çözünür. Çözünme katı parçacık yüzeyleri üzerinde yürür. Çözünen bileşikler hemen hidrate hale gelerek parçacık yüzeyini jel halinde kaplarlar. Böylece henüz reaksiyona girmemiş olan klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmiş olur. Diğer taraftan çözeltiye geçmiş olan klinker bileşikleri de çözelti içinde doymun hale gelerek çözünme hızının yavaşlamasına yol açar. Bu etkiler hidrasyon hızının zamanla azalmasına neden olur (Dayı, 2006; Koçak, 2008; Demirer, 2009; Nas, 2012).

Çimento bileşenlerinin tam olarak hidrate olması için uzun sürenin geçmesi gerekir. Örneğin, hidrasyonun 28. gününde, tanecik yüzeylerinde hidrasyon penetrasyonu derinliği ancak 4 μm kadardır. Bu derinlik 1 yılsonunda 8 μm 'ye ulaşabilir. 50 μm çapında bir klinker partikülünün tam olarak hidrate olması için yaklaşık 5 yılın geçmesi gerekir (Dayı, 2006; Koçak, 2008; Demirer, 2009; Nas, 2012).

Çimento hamurunun bağlayıcılık kazanma hızı ve miktarı, çimento ile su arasındaki hidrasyonun ne derecede gerçekleştiğine bağlıdır. Hidrasyonun hızı ise, sıcaklık ve rutubet ortamlarına ek olarak, büyük ölçüde, çimento kompozisyonuna, çimento inceliğine ve betonda kullanılan çimento miktarına bağlıdır (Dayı, 2006; Koçak, 2008; Demirer, 2009; Nas, 2012).



Şekil 2.1 Çimento hidrasyonunun şematik gösterimi

Çimento hidratasyonu genel olarak dört aşamada meydana gelmektedir (Şekil 2.1).

Birinci aşamada, suyla karıştırıldıktan hemen sonra çimento hamuru en akışkan halindedir. Çimento taneleri karışım suyunun içinde askıdadır. Çimento taneleri arasındaki mesafe su/çimento (s/ç) oranına bağlı olarak değişir.

İkinci aşamada, bir kaç saat sonra, çimento hamurunun akışkanlığı azalmıştır. Ancak, hala işlenebilir durumdadır. Çimento tanelerinin yüzeyinde çubuk şeklinde etrenjit, iğne şeklinde C-S-H gözlemlenebilir. Bu sırada, karışım suyu kireçle doymun hale gelir ve çimento taneleri arasında da yer yer C-S-H görülür.

Üçüncü aşamada, en geç birinci günün sonunda çimento hamuru artık tamamı ile prizini almış ve sertleşmiş çimento hamuruna dönüşmüştür.

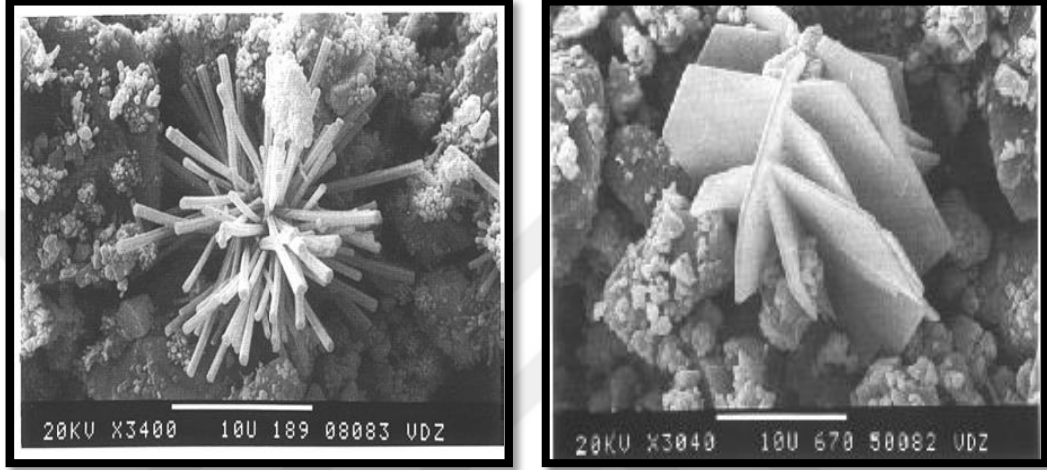
Dördüncü aşamada, üç günden sonra sertleşmiş çimento hamuru artık dikkate değer bir dayanım kazanmıştır. Ancak, hidratasyon daha uzun süre devam edecektir. Çimento hamurunun yapısı giderek daha yoğunlaşmaktadır. Yine de yer yer kapiler boşluklar bulunur.

Çimentonun hidratasyonu çok genel hatlarıyla ele alındığında, çimento-su reaksiyonu başlangıçta her bir bileşenin tek başına suyla reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu reaksiyonlar ilk aşamada, C_3A , C_4AF , C_3S ve C_2S sırasıyla oluşur (Erdoğan, 2006; Koçak, 2008).

C_3A Anabileşenin hidratasyonu

C_3A , su ile en hızlı reaksiyona giren çimento bileşenidir ve çok yüksek ısı açığa çıkar. İlk olarak C_4AH_{14} ve C_2AH_8 gibi ürünler elde edilmektedir. Ancak bu ürünler kararlı bir yapıda olmadığı için $C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$ denklemi elde edilebilir. Bu esnada ani priz meydana gelmekte ve işlenebilme özelliğinin olmamasına yol açmaktadır. Katılaştıran çimento hamurunda çatlaklar görülmekte ve fazla dayanım elde edilememektedir. Bu reaksiyonu yavaşlatmak için alçı taşı klinker ile birlikte öğütülmektedir (Aruntaş, 1996; Yeğınobalı, 1999; Koçak, 2008).

Alçılı ortamda C_3A 'nın hidratasyonu ile $C_3A + 3CSH + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$ (etrenjit) reaksiyonu gelişir. Etrenjit kısa iğneler şeklinde kristalleşmekte ve hacim genişmesi meydana getirmektedir. Zamanla ortamdaki sülfat azalmakta ve C_3A 'nın devam etmekte olan hidratasyonu sonucunda etrenjit, monosülfat hidrata ($C_6AS_3H_{32} + 2C_3A + 4H \rightarrow 3C_4ASH_{12}$) dönüşmektedir (Şekil 2.2) (Aruntaş, 1996; Yeğınobalı, 1999; Griesser, 2002; Koçak, 2008).



Şekil 2.2 Etrenjit ve monosülfat kristalleri

İleri yaşlarda çimento içinde monosülfat bulunur. Etrenjit oluşumu sırasındaki hacim genişmesi çimento hamuru henüz plastikken meydana geldiği için bir sakınca oluşturmamaktadır. Ancak betonun sertleşmesinden sonra sülfatlar ortama girerse monosülfat hidrat tekrar etrenjite dönüşürse hacim genişmesi olmakta ve betonda çatlamalara yol açmaktadır (Yeğınobalı, 1999; Koçak, 2008).

C_4AF Anabileşenin hidratasyonu

Gerçekte C_2A ve C_2F katı eriyiğinin ortalama bileşiği olan C_4AF 'nin hidratasyonu, hidratasyon hızı daha az olmakla birlikte C_3A 'nın hidratasyonuna benzer. C_3A 'nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demiroksit almaktadır. Hidratasyon reaksiyonu sonunda alçı bulunmadığı ya da belli bir değerin altında olması halinde hidrogarnet ($C_4AF + (6+n)H \rightarrow C_3AH_6 + CFH_2$) oluşmaktadır (Yeğınobalı, 1999; Erdoğan, 2003; Yalçın ve Gürü, 2006; Koçak, 2008).

Daha sonra alçılı ortamda sülfat yoğunluğuna bağlı olarak $C_4AF + 3CSH + 26H \rightarrow C_6AFS_3H_{32}$ ve $C_4AF + CSH + 26H \rightarrow C_4A(F)SH_{18}$ gibi, sırası ile etrenjit ve monosülfat hidrata benzeyen yapılarda bileşikler meydana gelmektedir (Aruntaş, 1996; Neville, 2006; Koçak, 2008).

Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı takdirde, C_4AF anabileşeninin göstereceği hidrasyon, C_3A anabileşeninin hidrasyonu kadar şiddetli olmasa bile oldukça hızlıdır ve açığa büyük miktarda ısı çıkaran türdendir. C_3A oranı düşük, C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat hücumlarına oldukça dayanıklı olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni tam olarak bilinmemekle birlikte, demir iyonu içeren kalsiyum-alümino-monosülfat ürünleri, sülfatlı ortamda etrenjit haline dönüşmemektedir (Erdoğan, 2003; Koçak, 2008).

C₃S ve C₂S Anabileşeninin hidrasyonu

Çimentonun yaklaşık %75'ini oluşturan kalsiyum silikatların hidrasyonları sonucu lifli düzensiz yapı ile örgü yapı arasında değişen bir dizi hidrat meydana gelmektedir. CaO/SiO_2 oranları ve kristal suyu miktarları değişmekle beraber fiziki yapıları boşluklu bir rijit jel olarak birbirine benzeyen bu hidratlar, C-S-H veya tobermorit jeli olarak adlandırılır (Yeğınobalı, 1999; Koçak, 2008).

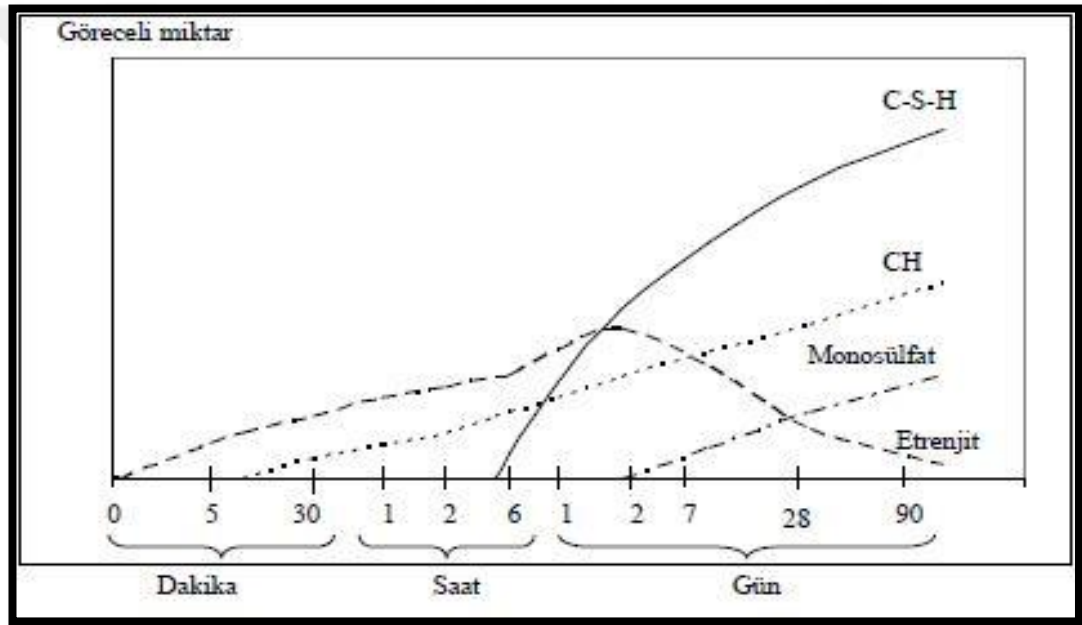
C-S-H jelleri zayıf kristalli kolloideal parçacıklardan oluşmaktadır (C-S-H kristalleri tipik olarak $1 \times 0,1 \times 0,01$ mm 'den daha küçüktür). Lif şekilli bu kristallerin dağılımında bir düzen yoktur. Elektron mikroskopla incelendiğinde C-S-H jelleri üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedir. C-S-H jellerinin yapısının bir parçası olarak kolloidal tabakada adsorbe durumunda su yer almaktadır. Katı kolloidal tabakalarının arasında çok küçük boyutlu jel boşlukları bulunmaktadır (Erdoğan, 2003; Koçak, 2008).

Hidrasyon sonucu elde edilen ürün aynı olmakla birlikte C_2S 'nin reaksiyonu C_3S 'ye göre daha yavaştır. Dolayısı ile C_3S erken dayanım C_2S ise geç dayanım üzerinde etkili olmaktadır (Erdoğan, 2003; Koçak, 2008).

Trikalsiyum silikat (C_3S) ile su arasındaki reaksiyon $2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$ denklemi ile ve dikalsiyum silikat (C_2S) ile su arasındaki reaksiyon $2C_2S + 4H \rightarrow$

$C_3S_2H_3 + CH$ şeklinde ile gösterilmektedir (Erdoğan, 2003; Koçak, 2008). Reaksiyonlarda görüldüğü gibi çimentonun bağlayıcı özelliğini sağlayan C-S-H'n yanı sıra bu reaksiyonlar sonucunda ayrıca kalsiyum hidroksit (CH) de oluşmaktadır. İki bileşenin hidratasyonu sonucunda meydana gelen ürünlerin %60-65'i C-S-H jeli, yaklaşık %20'si de CH'dır (Aruntaş, 1996; Koçak, 2008).

Çimento içindeki ana bileşenler birbirlerinin davranışlarını etkilemektedirler. Bir portland çimentosu hidratasyonu sonucunda meydana gelen ürünler ve göreceli miktarları Şekil 2.3'de gösterilmektedir (Yeğınobalı, 1999; Koçak, 2008).



Şekil 2.3 Ana bileşen hidratasyon ürünlerinin oluşumu

2.1.7 Çimentoların sınıflandırılması

Dünyada en yaygın olarak kullanılan çimentolar Portland tipi çimentolardır. Ancak zamanla klinkere çeşitli mineral ve kimyasal katkıların katılmasıyla farklı karakterlere sahip çimentoların üretimi zamanla yaygınlaşmıştır. Betonda bağlayıcı olarak kullanılan çimento tipleri ve uygunluk değerlendirmesi TS EN 197 (2002) çimento standardı ile standartlaştırılmıştır. TS EN 197-1 (2002) standardı yürürlüğe girdikten sonra özel amaçlı üç çimento standardı dışındaki tüm standartlar yürürlükten kaldırılmıştır. Çimentolar TS EN 197-1 (2002)'de "CEM çimentosu" olarak

adlandırılırlar. Ayrıca bir klinker standardı olmadığı için klinkerde aranan özellikler de çimento standardının içinde değerlendirilmiştir. TS EN 197-1 (2002) standardı genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) 5 ana tip içerisinde tanımlamaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006; Karakurt, 2008).

2.1.7.1 CEM I portland çimentosu

Çimento klinkerinin bir miktar alçıtışı kullanılarak öğütülmesiyle elde edilen genel kullanıma uygun bir çimento tipidir. Bina, köprü, yol, prefabrike elemanlar ve yüksek dayanımlı betonların üretimine uygundur. Erken yaşlardaki dayanımı yüksek olanlar (R) eki ve normal erken dayanıma sahip olanlara ise (N) eki ile tanımlanmaktadır. Ülkemizde hazır beton ve inşaat sektöründe en yaygın kullanılan çimento tipidir. Özellikle soğuk havalarda dökülen betonlarda ve erken kalıp alınması gereken inşaat uygulamalarında yüksek hidrasyon ısı nedeniyle tercih edilmektedir (Yalçın ve Gürü, 2006; Karakurt, 2008).

2.1.7.2 CEM II portland kompoze çimentosu

Portland çimentosu klinkerinin % 35 oranına kadar farklı mineral katkı içeren karışımla beraber ya da ayrı ayrı öğütülmesiyle elde edilir. Bu çimentolarda klinker kullanımının azaltılması nedeniyle özellikle Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaktadır ve çevreci çimento olarak bilinmektedir. Bu tip çimentolar yüksek dayanımın gerekli olmadığı genel beton uygulamalarında kullanılır. Erken dayanımları katkı miktarındaki artışa bağlı olarak azalmaktadır. Hidrasyon ısılarının düşük olması nedeniyle özellikle kütle betonu uygulamalarında kullanımı uygundur. Soğuk havalarda yapılacak beton uygulamalarında dikkatli kullanılmalıdır. Çok soğuk ve erken kalıp alınması gereken uygulamalarda kullanmaktan kaçınılmalıdır. İleri yaşlarda pozolanik aktivitenin ortaya çıkmasıyla beton dayanımını artırıcı özellik taşırlar. Silis dumanı katkısı içeren kompoze çimentolar yüksek dayanımlı beton üretimi için çok uygundur. CEM II tipi çimentoların (A) tipleri en çok % 20, (B) tipleri ise en çok % 35 oranında katkı içerirler (Yalçın ve Gürü, 2006; Karakurt, 2008).

2.1.7.3 CEM III portland yüksek fırın cürüflü çimento

Portland çimentosu klinkeriyle yüksek fırın cürufunun birlikte ya da ayrı ayrı öğütülmesiyle elde edilen bir çimentodur. Kendi içinde çimento bileşiminde kullanılan

cüruf miktarına bağlı olarak sırasıyla A (% 36-65), B (% 66-80) ve C (% 81-95) olmak üzere üç farklı tipe ayrılmaktadır. CEM III/A ve CEM III/B tipi çimentolar düşük hidrasyon ısıları ve yüksek dayanıklılıkları nedeniyle özellikle kimyasal etkilere dayanıklı beton üretimi için çok uygundur. CEM III/C tipi çimento ise sülfata dayanıklı beton üretimi için geliştirilen C_3A miktarı % 5'in altında olan özel çimentolardır (Yalçın ve Gürü, 2006; Karakurt, 2008).

2.1.7.4 CEM IV puzolanik çimento

Portland çimentosu klinkeriyle % 11-55 oranında puzolanik katkının birlikte öğütülmesiyle elde edilen katkılı bir çimento tipidir. Kimyasal etkilere açık beton uygulamalarında kullanımı uygundur. Üretimi CEM I tipi çimentoya göre ekonomiktir. Hidrasyon ısıları düşük olduğu için kütle betonlarında kullanımı uygundur (Yalçın ve Gürü, 2006; Karakurt, 2008).

2.1.7.5 CEM V kompoze çimento

Kompoze çimentolar adından da anlaşılacağı gibi Portland çimentosu klinkeriyle birden fazla puzolanın birlikte ya da ayrı ayrı öğütülmesiyle elde edilen çimentolardır. Kompoze çimento karışımında % 18-50 arasında değişen oranlarda katkı kullanımına olanak vermiştir. Birden fazla puzolanın bir araya gelmesi nedeniyle kompoze çimentoların puzolanik etkileri yüksek ve çevresel etkilere karşı dayanıklıdır. Kompoze çimentolar diğer katkılı çimentolar gibi üretiminin ekonomikliği, çevreci ve hidrasyon ısılarının düşük olması nedeniyle tercih edilen çimentolardır (Yalçın ve Gürü, 2006; Karakurt, 2008).

2.2 Puzolanlar

ASTM C 618'e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak ince toz halde uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25'den az olmamalıdır. Çünkü doğal halinde birleştirici olmayan bu madde, çok ince öğütülüp kireçle sulu ortamda karıştırıldığında yoğun hidrolik özellik göstermektedir. Böylece, yontulmuş

taşlar arasına yayılan bu bileşim, çimento gibi katılaşmakta ve arasına girdiği elemanları birbirine bağlamaktadır. İnsanların su içinde priz yapabilen, su etkisiyle erimeyen bağlayıcı üretme çabaları çok eski çağlara kadar uzanır. Sorunun kesin çözümü çimentonun icadı ile mümkün olabilmiştir. Bununla beraber aktif, camlaşmış silis (SiO_2) içeren toprakların kireçle karıştırılmaları durumunda bu özelliğin kısmen sağlandığı da gözlenmiştir (Akman, 1990; Tuncer, 2014).

Eski Mısır'da tuğlanın (pişmiş kil) öğütülerek kirece katılması ile elde edilen harca "horasan harcı" denilmektedir. Osmanlılar bu harcı geniş ölçüde kullanmışlardır. Avrupa'da ise Romalılar Napoli civarındaki Puzzuoli kasabasının toprağından yararlanmışlardır (Akman, 1990; Tuncer, 2014). Puzolanlar, doğal olarak oluşan (başlıca volkanik orijinli malzemeler) ve kül, yüksek fırın cürufu gibi yapay malzemelerdir (Gani vd, 1997; Tuncer, 2014). Puzolan terimi, genel bir ifade olmakla beraber buldukları ülkelere göre özel adlar almıştır. Mesela, Almanya'da, "Tras" adı ile Yunanistan'da "Santorin toprağı" olarak anılmıştır. Ülkemizde bu tip volkanik tuf karakterli puzolanlara tras denilmektedir (Okucu, 1998; Tuncer, 2014).

2.2.1 Puzolanların tarihçesi

"Puzolan" terimi İtalya'daki Vezüv yanardağının eteklerinde bulunan "Puzzuoli" kasabanın adından alınmıştır. Milattan yaklaşık 100 yıl önce, eski Romalılar, Puzzuoli kasabasının civarında volkanik kül ile söndürülmüş kirecin suyla birlikte karılmasıyla elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterdiğini fark etmişlerdir. Su altında sertleşme gösterebilen bu malzeme, "puzolan" ismiyle anılmaya başlanmıştır (Vitruvius, 1960; Dayı, 2006).

Türkiye'de Çatalhöyük'teki eski yapılar üzerinde yapılan incelemelerde, bu yapılarda kullanılan harcın 8000 yıl eski olduğu ortaya çıkarılmıştır (Davidovitz, 1987; Dayı, 2006). Bilindiği gibi, sadece kireç veya alçıdan elde edilen bağlayıcılar, özellikle sulu ortam koşullarına karşı dayanıklı değildirler ve bu bağlayıcıların bu kadar uzun süre dayanıklılık göstermeleri mümkün değildir. O nedenle, 8000 yıl ömürlü harcın puzolanik malzemelerle yapıldığı düşünülmektedir. Bir başka deyişle, Romalılardan çok uzun yıllar önce de, puzolanik malzemeler eski insanlar tarafından bir şekilde kullanım bulmuşlardır (Ramachandran, 1995; Dayı, 2006).

2.2.2 Türkiye'nin puzolanik madde kaynakları ve durumu

Puzolanlar karakter itibariyle çimentoya yakın bir oksit bileşimi gösterdikleri için bunlar pişirmeden doğrudan klinkere katılabilmektedir. Böylece termik enerjiden kazanç sağlanmaktadır. Böylece enerji tasarrufu bakımından uygun olan hammadde kullanımını ülkemiz ekonomisine katkı üretmektedir. Ülkemizde İç Anadolu, İç Ege, Marmara, Karadeniz, Akdeniz Bölgelerinde bol miktarda tras kaynakları bulunmaktadır. Türkiye jeoloji haritasına bakıldığında zaman 155.000 km² alanı kaplayan volkanik kayalık oluşumlarının varlığı görülür. Bu alan Türkiye yüzölçümünün hemen hemen 1/5'i kadardır. Bu değerlere göre ülkemiz, tras hammaddesi bakımından oldukça zengindir. Diğer taraftan, 1985 – 1990 yılları arasında üretilen çimentoların %14,6'lık kısmı traslı çimento iken, bu oran 1992 – 1994 yılları için %36,31'e çıkmıştır (Okucu, 1998; Tuncer, 2014).

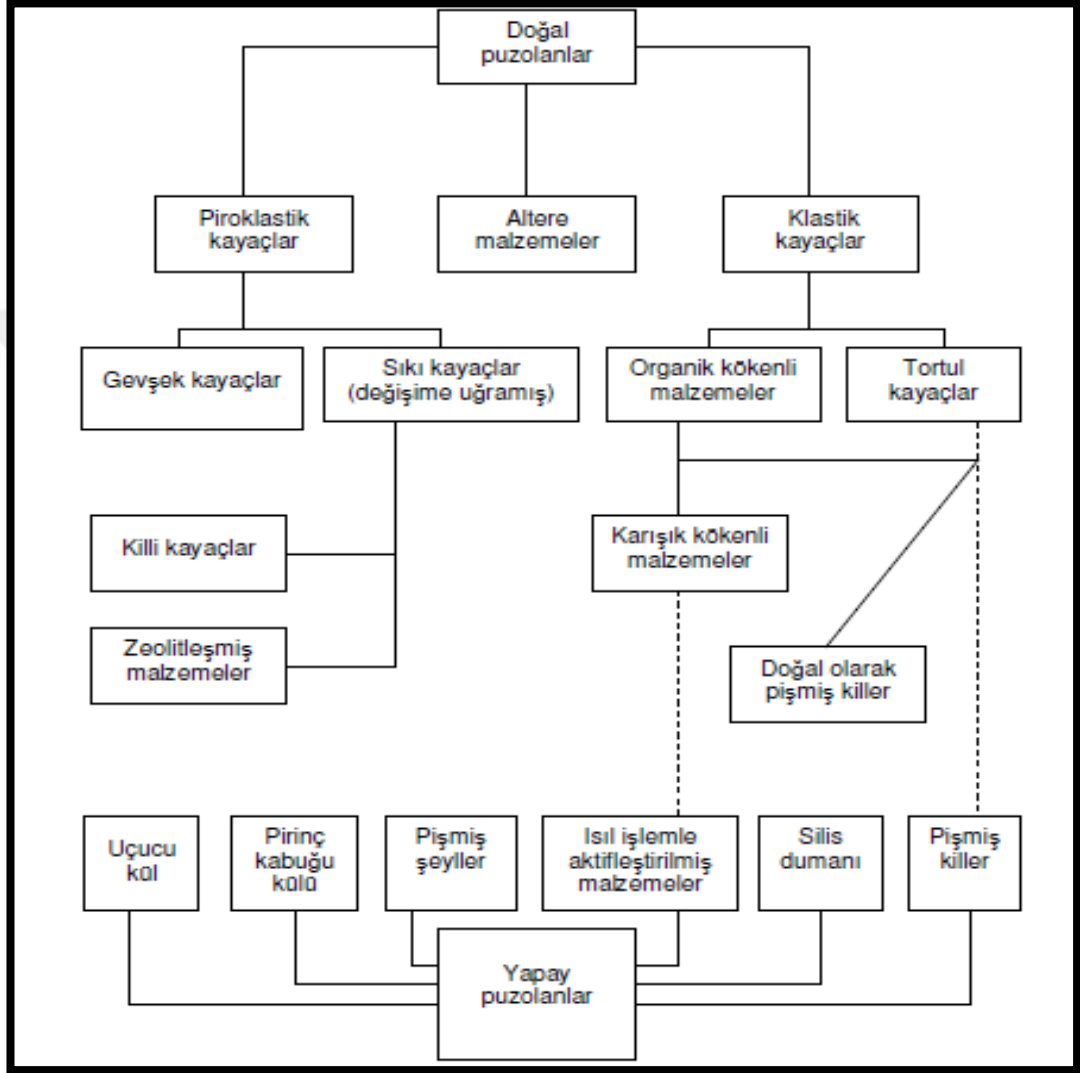
Doğal puzolanların yapıları volkanizmanın oluşumu, yapısı, mekanizması ve volkanik geçmiş ile doğrudan ilgilidir. Ülkemizde doğal puzolan oluşumlarının yer aldığı geniş alanlar olmasına rağmen kalite ve potansiyelleri bugüne kadar tespit edilememiştir. (Tokuy vd, 1997; Tuncer, 2014).

2.2.3 Puzolanların sınıflandırılması

Puzolan terimi kimyasal bileşimleri, mineralojik doğaları ve jeolojik kökenleri farklı olan birçok malzemeyi kapsadığından dolayı sınıflandırılması oldukça zordur (Massazza, 1998; Ulusu, 2006). En yaygın kabul gören sınıflandırma sistemi, puzolanların kökenlerini esas alan sınıflandırma sistemidir. (Massazza, 1998; Ulusu, 2006). Puzolanlar, oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal ya da yapay tüm puzolanlar, reaksiyon kapasiteleri bakımından üç bileşenden oluşurlar (Leckebush, 1984; Okucu, 1998; Massazza, 1989; Akgül, 2006; Dayı, 2006, Yıldız, 2006; Ulusu, 2006; Tuncer, 2014).

1. Aktif tertip maddeleri: Az ya da çok değişmiş cam fazları, opal, silisli toprak, zeolitler.
2. Atıl bileşenler: Zeolitlerden farklılık gösteren kristal fazları (augit, piroksen ve saf çini).
3. Zararlı (istenmeyen) bileşenler: Organik maddeler, kalay ve karbon maddeleri.

Massazza'nın puzolan sınıflandırma sistemi, esas olarak 1974 yılında Moskova'da yapılan 6. Uluslararası Çimento Kimyası Kongresinde önerilen sınıflandırmaya çok benzerdir (Douglas, 1985; Swamy, 1986; Massazza, 1998; Ulusu, 2006).



Şekil 2.4 Puzolanların sınıflandırılması

2.2.3.1 Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar, yaygın olarak bilinen adıyla traslar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip olmasalar da çok ince öğütüldüklerinde, normal sıcaklıklarda, sulu ortamlarda kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen, silis ve alümin oksitlerince zengin tuf çeşidi malzemelerdir. Türkiye doğal puzolan kaynakları

bakımından zengin bir ülkedir (Çavdar ve Yetgin, 2004; Tuncer, 2014). Ülkemizde üretilen çimentoların yaklaşık 1/3'ü Traslı Çimento'dan oluşmaktadır (Tokyay vd, 1997; Tuncer, 2014). Doğal puzolanlar ince öğütülebilme yetenekleri sayesinde çimento hamurundaki mikro boşluklara kolayca girmekte ve çimento hamurunun iskelet yapısını değiştirerek dayanıklılığını artırmaktadırlar (Pan vd, 2003; Sabir vd, 2001; Shannag, 2000; Tuncer, 2014). Buna ilaveten doğal puzolanlar, ince taneli olmaları sayesinde çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı bir etki de ortaya koymaktadırlar. Bu etki taze betonun kıvamını ve dolayısıyla işlenebilirliğini iyileştirmektedir (Pan vd, 2003; Tuncer, 2014). Ancak doğal puzolanlar, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırabilmektedirler (Vu vd, 2001; Tuncer, 2014).

PÇ'nin ve doğal puzolan ile oluşturduğu kompoze çimento ile üretilen harçlarda ve betonlarda katılma sürelerinin, puzolanın katılım oranına, inceliğine ve reaktivitesine bağlı olarak gelişme gösterdiğini ifade etmektedirler (Taşdemir, 2003; Öner vd, 2003; Tuncer, 2014). Doğada bulunan, bir ön işlem yapılarak ya da doğrudan öğütülerek kullanılan puzolanlar az veya çok değişikliğe uğramış volkanik kökenli doğal tortul kayaçlardan oluşurlar. Doğal puzolanlar; Piroklastik kayalar (Volkan tüfleri, diyatomit, tras, killi maddeler ve zeolitli maddeler vb.), değişik orijinli maddeler (beyaz İtalyan toprakları) ve kırıntı taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tip puzolanlar, öğütülerek kullanıldığı gibi bazıları doğal olarak da kullanılmaktadır (Yıldız, 2006; Ramachandran, 2001; Tuncer, 2014).

Doğal puzolanların çoğu piroklastik yapılıdır. Piroklastik kayalar bir volkanik patlama sırasında volkan bacasından havaya fırlar ve volkanik parçacıklar zamanla yatak oluştururlar. Piroklastik kayalar oluşumları sırasında ortam koşullarının bir sonucu olarak iki önemli karakteristik özelliğe sahiptir:

1. Maddelerin hızlı soğumasına bağlı olarak fişkıma sürecinde oluşan sıvı kristalleşmez ve volkanik cam olarak katılır.
2. Yeryüzüne yaklaştığında basınç azalır ve gazların (genellikle H₂O) serbest kalmasına neden olur. Boşluklu ve kabarcıklı bir yapı meydana gelir. Bu yapı ya olduğu gibi kalır ya da serbest kalan gazların patlayıcı etkisiyle az çok bozularak kavisli ve iğnemi bir yapı oluşur. Her iki durumda da özgül yüzey büyüktür.

Fıskıran madde katılaşma sürecinde camsı bir yapı kazanmaya başlar. Fakat sadece camsı fazdan oluşan piroklastik kaya yoktur (Leckeubush, 1984; Dayı, 2006; Tuncer, 2014). Bunun sebepleri şunlardır:

1. Fıskıran parçacıklar az ya da çok miktarda (%1-61) fenokristaller şeklinde kristalize madde içerirler. Piroklastik kayalarda feldspat, kuvars, biotit, magnetit, hornblend ve ojit en fazla bulunan fenokristallerdir.
2. Volkanik camsı fazın kimyasal kararsızlığından dolayı, mevcut olan mineraller değişime uğrar ve yeni mineraller oluşur. Bu dönüşümün sonucu olarak feldspat ve kristobalit mineralleri meydana gelir. Feldspat ve tridimit önceden oluşan camsı yapının yüzeyindeki gaz fazlarının etkisiyle büyüyebilir. Hava koşullarının kimyasal ve fiziksel değişikliklerin etkisi, zeolitlerin ve kil minerallerinin de oluşumuna neden olur. Bu minerallerin en sık görülenleri:
 - a. Buhar fazında ve/veya devitrifikasyonla (camsı yapıdan çok kristalli yapıya dönüşüm) meydana gelen mineraller; feldspat, kristobalit, tridimitdir.
 - b. Bozunma ve diajenezle meydana gelen mineraller; (kil ve zeolit) (Leckeubush, 1984; Dayı, 2006; Tuncer, 2014).

Genellikle iyi bir puzolan, düşük miktarda kil mineralleri yüksek miktarda zeolit ve volkanik cam mineralleri içermektedir. Kil mineralleri ısı ileme tabii tutuldukları sürece iyi birer puzolanik özelliğe sahiptir (Tuncer,2014). İnce taneli doğal puzolanların bağlayıcı olarak görev yaptıkları değişik kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır;

1. Söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirilerek, çok eski zamanlarda olduğu gibi doğrudan,
2. Kompoze çimento üretiminde, portland çimentosunun klinkeri ile birlikte öğütülerek,
3. Beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar.

İlk sırada yer alan kullanım günümüzde pek yaygın değildir. Doğal puzolanlar, genellikle kompoze çimento ve puzolan katkılı beton üretiminde kullanılmaktadırlar (TS 25, 1975; Tuncer, 2014).

Doğal puzolanların yapısında bulunan CaO, MgO ve SO₃ gibi bazı maddelerin hacim genleşmesini artırdığı belirlenmiştir (Tuncer, 2014).

2.2.3.2 Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar, genel olarak sanayi üretim atıklarıdır. Yapılarında doğal puzolanlardaki gibi aynı oksit bileşenleri içermelerinden dolayı puzolan ve belli imalatların ısıtma işlem ürünleri oldukları için de yapay sınıfta verilerle yapay puzolan denilmiştir. Atıktaki silisin aktifliği, puzolanın aktifliğini belirler. Yapay puzolanlar, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve pirinç kabuğu külüdür (Okucu, 1998; Dayı, 2006; Tuncer, 2014)

2.2.4 Puzolanik aktivite

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, puzolanik aktivite olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin aktive olması için ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda silis + alümin + demir oksit içermesi gereklidir (Erdoğan, 2003; Tuncer, 2014).

Yüksek aktiviteye sahip puzolanların aşağıdaki özelliklere sahip olduğu deneysel olarak belirlenmiştir:

1. Yüksek SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali miktarı
2. Yüksek camsı faz miktarı
3. Büyük özgül yüzey

Bir malzemenin puzolan olduğunun belirlenebilmesi için puzolanik aktivite deneyi yapılmalı ve deney sonucunun standartlarca belirlenmiş prensipler içinde olması gerekmektedir. Bu deneyler puzolanlarda mekanik ve kimyasal olarak iki farklı şekilde yapılabilir. Mekanik deneyler; puzolan + kireç, puzolan + çimento harçları üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımı deneyleridir. Kimyasal deneyler ise puzolanlı çimentonun su ile yaptığı hidrasyon sonunda çözeltide oluşan kireci saptamaya dayanır. Ayrıca puzolanların reaktivitesi spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemlerle de saptanabilir (Dayı, 2006). Puzolanik maddeleri değerlendirmenin diğer ölçütü puzolan içeren çimento pastalarındaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir (Massazza, 1989; Dayı, 2006).

İyi bir puzolan genel olarak açık renklidir. Konsolide ve homojen bir yapıya sahip ve orta yoğunlukta ($2.00-2.30 \text{ g/cm}^3$) dir. TS 25'e göre puzolan + kireç reaksiyonu sonunda eğilme dayanımı 10 kg/cm^2 'den, basınç dayanımı 40 kg/cm^2 'den az olmamalıdır. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ miktarı %80, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ miktarı %5, çözünmeyen kalıntı %80, kızdırma kaybı en fazla %8 civarında olmalıdır. $\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %8'i geçmemelidir. Fe_2O_3 en fazla %6 olmalıdır (Dayı, 2006). Mineralojik yapısı, camı faz miktarı yüksek (%8 ve daha fazla) alkali feldspat (ortoklas, sanidin, albit, oligoklas) miktarı yüksek, kil mineralleri (montmorillonit, kaolinit, halosit) düşük miktarda olmalıdır. Çizelge 2.3'de TS 25'e göre traslarda aranması gereken kimyasal özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.3 TS 25'e göre Tras'ta aranan özellikler

Kimyasal İçerik	% Değerleri
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq \% 70$
MgO	$\leq \% 5$
SO_3	$\leq \% 3$
Rutubet	$\leq \% 10$

2.2.5 Tras içeren çimentolar

Tüm puzolanlar özel şartlar altında kireçle tepkime veren malzemelerdir. Kireç-doğal puzolan tepkimesi aynı şekilde portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında da görülür. Çünkü bilindiği gibi portland çimentosunda bulunan C_3S ve C_2S minerallerinin hidrasyonu ile Ca(OH)_2 açığa çıkar ve gözeneklerde çözelti halinde birikir. Portland çimentosu hidrasyonu ile açığa çıkan Ca(OH)_2 suda çözünür ve yıkanmayla geride boşluklar bırakarak ortamı terk edebilir. Ayrıca Ca(OH)_2 betonda zararlı kimyasal etkilere en açık bileşiktir. Dolayısıyla, traslı çimentolarda portland çimentosu kısmının hidrasyonu ile açığa çıkan Ca(OH)_2 'in puzolanlarla birleşerek dayanım kazanımını sağlayan CSH jelleri vermesi betonun dayanıklılığı açısından olumlu gelişmeler sağlar (Erdoğan vd, 2009).

Tras içeren çimento üretiminde Tras, PÇ klinkeri ve bir miktar alçıtaşı beraber öğütülür veya klinker alçıtaşı karışımı ayrı, tras ayrı öğütülür ve elde edilen öğütülmüş iki malzeme karıştırılır. Beraber öğütme tekniğiyle daha homojen bir karışım elde edilebilmesine rağmen, üretilen çimentoda tane boyutu dağılımını kontrol etmek daha zor olabilir. Çünkü daha sert olan klinker, belirli bir incelikte çimento üretildiğinde trasa göre daha kaba kalır. Diğer yandan, trasın ve klinkerin ayrı ayrı öğütülüp sonradan karıştırıldığı üretim tekniğinde çimentodaki klinker ve tras bileşenlerinin tane boyutu dağılımını daha iyi ayarlanabilmekle beraber, karışımın homojenleştirilmesi problemi vardır. Bu durum fabrikalarda uygun karıştırma sağlayan ekipmanlara ihtiyaç doğurmaktadır. Türkiye’de genel olarak traslı çimentolar beraber öğütme tekniğiyle üretilmektedir. Beraber öğütme tekniğiyle üretilen traslı çimentoların değirmende belirli bir inceliğe ulaşmaları için ton başına gereken enerji miktarını inceleyen bir araştırmada, aynı inceliğe ulaşmak için PÇ’ye göre traslı çimentolar, çok daha az enerji tüketmiştir. Araştırmaya göre klinkerin trasla ikame oranı arttıkça bu durum daha da belirginleşmiştir. Aynı incelikteki PÇ üretimi için gereken enerjinin yüzdesi olarak ifade edildiğinde, üretilen traslı çimentonun inceliği arttıkça, değirmende tüketilen enerji miktarı azalır. Başka bir deyişle yüksek incelikte traslı çimento üretimi, aynı incelikteki PÇ üretimine göre daha yüksek oranlarda enerji tasarrufu sağlar (Erdoğdu, 1996; Erdoğan vd, 2009).

2.2.5.1 Traslı çimentoların hidrasyonu

Esas olarak, kireç-doğal puzolan karışımlarında oluşan tepkimeler PÇ-doğal puzolan karışımlarında da olur. Fakat PÇ-doğal puzolan karışımlarında doğall puzolanın tepkime verebilmesi için gerekli kireç, karışımın suyla karıştırıldığı ilk anda ortamda yoktur. Zamanla PÇ’deki C₃S ve C₂S minerallerinin hidrasyonu ile ortamda Ca(OH)₂ birikir ve tras puzolanik tepkimelerin neticesinde CSH jelleri oluşturur.

Çeşitli doğall puzolanlarla yapılan araştırmalara göre doğall puzolanlı çimentolarda bulunan PÇ kısmının hidrasyonu trasın etkisiyle hızlanır. Bu durum genel olarak tüm ince öğütülmüş puzolanlar için geçerlidir (Swamy, 1986; Massazza, 1992; Erdoğan, 2009). Ayrıca opal ve allophane içeren doğall puzolanlar volkanik camsı faz içerenlere göre C₃S ile daha reaktiftir. Bir başka araştırmada ise yüksek aktifliğe sahip bir tuf kullanımıyla C₃S hidrasyonunun hızlandığı tespit edilmiştir (Massazza, 1992; Erdoğan, 2009). Bu durum, doğall puzolan parçacıklarının, yüksek incelikleri

nedeniyle, ortamda hidratasyon ürünü olan CSH jellerinin toplanabileceği bir yüzey oluşturmaya çalışılmaktadır. Böylelikle doğal puzolan, ortamda CSH jellerinin toplandığı bir çekirdek görevi görmekte ve C₃S hidratasyonu ile açığa çıkan, göreceli olarak daha az geçirgen olan ve dolayısıyla, C₃S hidratasyonunu yavaşlatan CSH jellerinin C₃S üzerinde birikmesini önlemektedir. Ayrıca ortamda doğal puzolanın varlığı C₃S hidratasyonunda hidratasyon ısı-sı-zaman eğrisinde bazı değişikliklere yol açar. Eğride görülen durgun dönem kısalmış ve ikinci tepe noktası doğal puzolan olmayan duruma göre biraz daha yükselir (Swamy, 1986; Erdoğan, 2009).

Ortamda doğal puzolan bulunması, C₃A hidratasyonunun hızını azaltır. Bu durum C₃A hidratasyon ısı-sı-zaman grafiğinde ikinci tepe noktasının doğal puzolan bulunmayan duruma göre azalmasından kaynaklanır. İkinci tepe noktasının azalması puzolanın tipine veya puzolanın inceliğine bağlıdır. Yapılan bir araştırma doğal puzolanın inceliğinin artmasının C₃A hidratasyon hızını yavaşlattığını göstermektedir. Fakat tüm parametreler yeterince incelenmemiştir ve C₃A hidratasyon hızındaki yavaşlama esas olarak başka sebeplerden de kaynaklanabilir (Plowman, 1981; Erdoğan, 2009). Aynı çalışmada doğal puzolanların hem laboratuvar ortamında üretilen C₃A'nın hem de klinkerden ayırma yöntemiyle elde edilen C₃A'nın hidratasyon hızını azalttığı tespit edilmiştir. Genel olarak bu yavaşlatıcı etki klinkerden ayırma yöntemiyle elde edilen C₃A üzerinde daha etkilidir. 7 günlük kürlenme neticesinde kullanılan puzolanın tipi ve varlığından bağımsız olarak C₃A'nın hidratasyon derecesi % 90 civarında sabit olarak tespit edilmiştir (Collepardi, 1978; Erdoğan, 2009).

PÇ'nin yerine doğal puzolan ikame edildiği durumlarda hidratasyon ısı-sı-zaman eğrisinde görülen durgun dönem kısalmış, hidratasyon ısı-sı-zaman eğrisinde ikinci tepe noktası bir miktar yükselir, doğal puzolan katkılı çimentonun klinker kısmının hidratasyonu hızlanır. Özgül yüzey alanı, kimyasal kompozisyon, yüzeyin fiziksel durumu ve alkalilerin çabuk ya da yavaş açığa verilmesi gibi puzolan özelliklerinin hepsinin klinker hidratasyonunun hızlanmasına etkisi olduğu söylenebilir (Takemoto, 1980; Hewlett, 1998; Erdoğan, 2009).

2.2.6 Çimentoda puzolan kullanımının etkileri

Mikro yapı: Agregat taneciklerinin varlığı dikkate alınmadığında, puzolan içeren harçların mikro yapıları benzer pastalardan çok az farklılıklar gösterir. SEM

gözlemleri, kalsiyum hidroksitin puzolan tarafından tüketilmesinin tüm pasta hacminde olduğu gibi, agrega macun birleşim yerindeki portlandit kristallerinin sayısında ve büyüklüğünde de bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Serbest kireçteki azalma harç içerisindeki çatlakları azaltır ve homojenliği iyileştirir (Atkins, 1993; Ulusu, 2006). Genellikle puzolanik çimentolarla yapılan harçlar, benzer PÇ ile yapılan harçlardan daha yüksek bir poroziteye sahiptir.

Kıvam ve İşlenebilirlik: PÇ ve doğal puzolan karışımının kullanıldığı betonlarda aynı kıvamı sağlamak için gerekli su bir miktar daha fazla olabilir (Davis vd; Tuthill vd; Erdoğan vd, 2009). Beraber öğütme tekniğiyle üretilen ve PÇ klinkeri yerine Türkiye'deki iki farklı trasın %20, 30 ve 40 oranlarında kullanıldığı farklı inceliklerdeki çimentoların normal kıvamı üzerine yapılan bir çalışmada, doğal puzolanın çimentodaki ikame oranı arttıkça, normal kıvam için gerekli su miktarı da artmaktadır. Ancak % 30 düzeyindeki tras miktarlarından sonra su ihtiyacı kayda değer derecede değişim göstermemektedir (Erdoğan, 1996; Erdoğan vd, 2009). Doğal puzolanlı harçlar üzerinde yapılan bir çalışmada, doğal puzolanların PÇ yerine bir miktar kullanıldıklarında harçların işlenebilirliğini düşük mertebelerde azalttığı tespit edilmiştir (Stuart,1980; Erdoğan vd, 2009)

Priz Süreleri: Doğal puzolanlı kompoze çimentoların kullanıldığı betonlarda priz başlangıcı ve sonu süreleri puzolanın PÇ yerine ikame miktarına, inceliğine ve reaktifliğine bağlıdır. Farklı iki araştırmada % 20 ve % 25 mertebesinde doğal puzolan içeren çimentolarda, PÇ içeren kontrol numuneleriyle yaklaşık aynı priz süreleri gözlenmiştir (Davis vd; Efes, 1980; Erdoğan vd, 2009) Bununla beraber, yüksek miktarlarda doğal puzolan kullanımının (%30-70 arası) priz sürelerini önemli miktarlarda geciktirdiği tespit edilmiştir. Türkiye'de bulunan iki doğal puzolanla (Bayburt ve Kula Traslari) yapılan bir araştırmada; klinker ve doğal puzolanın %4 alçıtışı ilavesiyle beraber öğütülmesi neticesinde üretilen farklı inceliklerdeki çimentolarda priz süresi üzerine incelemeler yapılmıştır. Bu çalışmada her iki tras da kullanılarak üretilen çimentoların priz alması için aynı klinkerden üretilen PÇ'ye göre bir miktar daha uzun süreler gerektiği gözlenmiştir (Erdoğan, 1996; Erdoğan vd, 2009).

Terleme: Betonda ya da çimentoda bir miktar PÇ yerine doğal puzolan kullanılması terleme miktarını kayda değer oranda azaltır (Mather; Saad vd; Erdoğan vd, 2009).

Dayanım: Puzolan, klinkerin hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile biraz gecikmeli olarak reaksiyona başlar ve bundan dolayı en azından başlangıçta karıştırıldığı PÇ'yi seyrelten, etkisiz bir malzeme gibi davranır. Bununla birlikte puzolan suyla karıştırıldıktan 8 saat sonra, klinker bileşenlerinin erken hidratasyonunu hızlandırır. Bir bütün olarak ele alındığında, PÇ'nin kısmi olarak puzolanlarla yer değiştirmesi, genellikle çimento sertleşmesinin başlangıç oranını azaltır. Fakat daha ileri yaşlarda durum tersine döner ve puzolan içeren çimentolar, benzer kontrol PÇ ile aynı, hatta daha yüksek mukavemete ulaşabilirler (Giergiczny vd, 1989; Kohnovd, 1989; Ulusu, 2006).

İtalyan doğal puzolanları ile hazırlanan kompoze çimento harçlarında PÇ yerine öğütülmüş doğal puzolan ikamesinin etkileri incelenmiştir. Öğütülmüş doğal puzolan ikamesi yapılmış harçların erken dayanımlarının düştüğü fakat % 30 gibi yüksek doğal puzolan ikamesi oranlarında bile 1 yılda puzolanlı harçların kontrol numunelerinin değerlerini yakaladığı ve hatta geçtiği görülmektedir (Erdoğan, 2009).

Gözeneklilik ve Geçirgenlik: Bir kısım PÇ'nin belirli bir miktarda puzolan ile ikame edildiği çimento pastalarında toplam gözeneklilik PÇ içeren kontrol numunelerinden daha fazladır (Massazza vd, 1977, 1980; Costa vd, 1981; Massazza, 1983; Mehta, 1988; RILEM 73, 1988; Erdoğan vd, 2009). Bu durumun hem uçucu kül hem de doğal puzolan içeren pastalar için geçerli olduğu tespit edilmiştir (Turanlı, 1995; Erdoğan, 2009). Puzolanın tipi ne olursa olsun toplam gözeneklilik zamanla azalır fakat yine de PÇ içeren pastanınkinden yüksektir (Massazza, 1980; Costa vd, 1981; Erdoğan vd, 2009). Puzolanlar genellikle 2,3- 2,6 g/cm³ özgül ağırlığına sahiptir. Bu yüzden mutlak katı hacimleri aynı hacimdeki PÇ'ye göre %15- 25 daha büyüktür. Bu sebeple her bir puzolan tanesi ve çimentonun meydana getireceği silikat jel miktarının daha fazla olması nedeniyle geçirimsizlik da düşüktür. Diğer taraftan puzolan maddesinin çimentoya oranla özgül yüzey alanın daha büyük oluşu nedeniyle çimento hamurunun tanecik sayısını arttırmakta ve hamurun boşluk yapısı küçülmektedir. Bu durum betonu suya karşı daha geçirimsiz hale getirir (Postacıoğlu vd, 1960; Akgül, 2006).

Sülfatlara Karşı Dayanıklılık: Uygun tipte puzolanın çimentonun bir kısmının yerine kullanılmasının sülfat dayanıklılığına etkisi üç yolla olur. Birinci olarak, puzolan kullanılması ortamdaki Ca(OH)_2 miktarını azaltacaktır. Böylece sülfatların betona zararlı ürünler oluşturabilmesi için gerekli Ca(OH)_2 ortamdan çekilmiş olacaktır. İkinci olarak, bir kısım çimentonun puzolan ile yer değiştirmesi ortamdaki C_3A miktarını göreceli olarak azaltacaktır. Bu durum yine sülfatların C_3A ile yaptıkları zararlı tepkimelerin azalmasını doğurur. Üçüncü olarak ise, puzolanlar uygun miktarlarda kullanıldığında betonun geçirimsizliğini artırdıklarından betona sülfat girişini önlerler. Fakat sonuç olarak, her puzolanın sülfat direncini artıracığı gibi bir yargıya varılmamalıdır. Kullanılacak olan puzolan düşük oranlarda CaO içermelidir (Ludwing vd; Erdoğan, 2009)

Klor Etkisine Dayanıklılık: Betona dışarıdan klor nüfuz etmesi halinde doğal puzolan kullanımı betona klor girişini azaltır (Collephardi vd, 1970; Erdoğan vd, 2009). Aynı şartlar altında portland çimentolu harcın, traslı çimentolu harca göre 5 kat daha fazla klor giriş derinliğine sahip olduğu görülmüştür (Gjorv vd, 1979; Erdoğan vd, 2009).

Alkali Agregaya Reaksiyonuna Dayanıklılık: Çimento içinde bulunan alkali (Na ve K) oksitleri agregaya içinde bulunan ve aktif silis ihtiva eden bazı minerallerle de reaksiyona girerek alkali silikat hidrat jelleri meydana getirirler. Sertleşmiş beton içinde meydana gelen bu alkali silikat hidrat jelleri fazla miktarda su absorbe ederek genişlemek suretiyle betonun yer yer çatlamasına sebep olurlar. Dolayısıyla, puzolan kullanıldığında, puzolanlı çimentolarda, bu alkali silikat reaksiyonuna engel olarak alkali-agrega reaksiyonunun neden olduğu genişmeleri azaltmaktadır. Çünkü suda çözünebilen alkaliler, genişmeyen C-S-H bileşimini oluşturmakta, ayrıca pore çözeltisinde pH'ı düşürmekte ve sonunda alkali silikattan meydana gelen genişmeler olmamaktadır (Erdoğan, 2013).

Donma Çözünme Etkisine Dayanıklılık: Puzolanlı çimentoların hidratasyon hızlarının aynı incelikteki PÇ'ye göre daha yavaş olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, puzolanlı çimento içeren betonlar donma çözülme döngülerine karşı yeterli dayanıklılığı aynı incelikteki PÇ'li betonlara göre biraz daha geç kazanırlar. Literatürdeki veriler; puzolan içeren çimentoların katkısız çimento ile aynı erken dayanımı verecek kadar ince olması halinde veya yeteri kadar uzun kürlemeden sonra donma çözülme

döngülerinde PÇ'ye benzer ya da daha iyi performans sergileyebileceğini göstermektedir (Kılınçkale,2005). Genelde, donma-çözünme döngülerine karşı betonda dayanıklılık sağlamak için betona hava sürüklenmesi en kabul görmüş uygulamadır. Betona hava sürüklenmesi halinde betonların dayanımları aynı olmak kaydıyla, betonda doğal puzolan, uçucu kül ya da mikrosilika kullanımının PÇ kullanımıyla karşılaştırıldığında donma-çözünme dayanıklılığı açısından olumsuz etkileri olmadığı belirtilmiştir (Hewlett, 1998; Erdoğan vd, 2009).

Büzülme (Rötre): Genel olarak, çimentoya alışlageldik dozajlarda puzolan ilavesiyle harçlardaki kuruma büzülmesinin küçük bir miktar arttığı söylenebilir (Hewlett, 1998; Erdoğan vd, 2009). PÇ kullanılan bir betonla, doğal puzolanlı çimento kullanılan bir betonun aynı erken dayanıma sahip olmalarını sağlamak için, doğal puzolanlı çimento içeren betonun çimento dozajı diğerine göre biraz daha fazla olmalıdır ya da puzolanlı çimento bir miktar daha ince olmalıdır. Çimento dozajının veya inceliğinin artması ise betonda büzülmeyle genellikle artırır (Shoya; Erdoğan vd, 2009).

Hidratasyon Isısı: PÇ'nin toplam hidratasyon ısısı PÇ-doğal puzolan karışımından genellikle daha fazladır. Bununla beraber, puzolanik tepkimelerin de ısı açığa çıkarttığı unutulmamalıdır. Çimentoya puzolan katılması hidratasyon ısısı hızı-zaman diyagramının daha dikleşmesine, pasif dönemin kısılmasına ve maksimum değere daha erken ulaşılmasına sebebiyet verir (Grzymek vd, 1980; Erdoğan vd, 2009). Bu doğal puzolanların alit (C₃S) hidratasyonunu hızlandırdığı yolundaki düşüncüyü desteklemektedir. Alit hidratasyonunun doğal puzolanlar tarafından hızlandırılmasının sebebi henüz tam olarak açıklanamamıştır.

Puzolanlı çimentoların enerji maliyetine etkisi: Çimento üretim süreci enerjinin etkin kullanıldığı teknolojilerden biridir. Çimento üretiminde kullanılan enerjinin büyük çoğunluğunu elektrik enerjisi teşkil eder. Üretim maliyetinde birinci derece rol oynayan enerjinin gerektiği kadar kullanılması ve tasarruf edilmesi maliyeti düşürecektir. Puzolanik katkı maddeleri çimento üretiminin ikinci safhasında devreye girdiğinden birim klinker başına üretilen çimento miktarını arttırmakta, dolayısıyla hem enerji tasarrufuna hem de fabrika bacalarından daha az zehirli gaz atılmasına imkân sağlamaktadır. Puzolanlar çimentoya katıldığında hem çimentonun özelliklerini iyileştirmekte, hem de ekonomik olmaktadır.

2.3 Volkanik Tüf

Volkanik tüfler, volkanik patlamalar sonucunda atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarından oluşur. Magma, yerin derinliklerinde belirli basınç ve sıcaklık altında bulunduğu çeşitli gaz ve çözeltileri içeren bir sıvı özelliğindedir. Bu durumdayken magmanın içindeki farklı silikat yapılar kendi aralarında etkileşime girerek, ortamın fiziko-kimyasal koşulları altında kristalleşir. Yarı kristalleşmiş sıvı magma kırık ve kanallardan yeryüzüne ulaştıktan sonra ani basınç ve sıcaklık düşmesi sebebiyle hızla soğur. Böylece yerinde katılaşıp ve camsı veya yarı camsı yapılar oluşur. Volkanik ürünlerin yüzeyde katılaşmaları, volkanizmanın karakterine ve ortam koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Erguvanlı vd, 1955; Sınıksaran, 2012). Malzemenin hava etkisinde kalması tüfün camsı yapısının zeolitlenmesine neden olur. Zeolitlenme malzemenin puzolanik özelliğini artırır (Liebig vd, 1998; Sınıksaran, 2012).

2.3.1 Volkanik tüflerin oluşumu

Volkan bacalarından çıkan lavların oluşturduğu kayalar, volkandan çıkan gazların dışında diğer bir volkanik malzeme çeşidi olan değişik büyüklükteki magma parçalarından oluşmuştur. Bu malzemelere ‘piroklastik’ malzemeler denilmektedir. Piroklastik malzemeler büyük kütlelerden küle kadar değişik büyüklüklerde olabilir. Volkan külü denilen ince taneli maddelerin yamaç, göl veya denizlerde birikmesiyle meydana gelen oluşuma da Volkanik tüf denir (Erguvanlı vd, 1955; Sınıksaran, 2012). Piroklastik malzemenin volkan bacasından ayrıldığı andaki sıcaklığı ve soğuma hızı oluşan malzemenin içindeki yapı ve parçacıkların büyüklüğünü etkileyen ana etkenlerdir. Yüksek bir sıcaklıktayken ani soğuyan malzemeler ince taneler halinde çökelirler (Erguvanlı vd, 1955; Sınıksaran, 2012).

Patlama sırasındaki ani basınç düşüşü sıvı magma içerisinde çözülmüş olan gazların açığa çıkmasına sebep olur. Açığa çıkan gazların geride boşluklar bırakması nedeniyle katılaştıran parçacıklarda mikroskopik ve makroskopik boşluklu yapı görülür. Bu sebeple soğuma şekline ve içindeki gaz miktarına bağlı olarak oluşan tanelerin kendi bünyelerinde değişik oran ve boyutlarda boşluklar oluşmaktadır (Erguvanlı vd, 1955; Sınıksaran, 2012).

2.3.2 Volkanik tüflerin genel özellikleri

Tüfler, içindeki boşluklar nedeniyle hafif doğal yapı taşlarıdır. İçeriğinde bazen fosil de bulunabilir. Bazı tüfler içinde büyük hornblend, ojit, idokraz ve lösit mineralleri bulunmaktadır (Sınıksaran, 2012).

İçerisinde silis ve alüminyum bileşikleri bulunan tüfler çok gevsek yapı ve kırılırlardır. Tabiatıta toz halinde kum ve çakılla karışık olarak buldukları gibi sıkışmış kütleler halinde, çok gözenekli iri çakıl büyüklüğünde de bulunurlar. Buldukları şekle göre çeşitli isimler alırlar. Kolayca aşınıp toz haline gelirler ve birim ağırlıklarının küçük olması sebebi ile bazen su yüzünde dahi yüzebilirler. Tüfün birbirine kaynaşma (priz yapma özelliği), içerisindeki ince tanelerin çokluğuna ve kimyasal yapısına bağlı olarak değişir (Arıcı, 1997; Sınıksaran, 2012).

2.3.3 Volkanik tüflerin kimyasal yapısı

Çizelge 2.4 Bazı yörelerdeki volkanik tüflerin kimyasal analiz sonuçları

Oksitler	Gölcük Yöresi	Nevşehir Yöresi	Van-Bitlis Yöresi (Ahlat Dağı)	Dünyanın 80 Değişik Yöresinin Ortalaması
SiO ₂	61,55	68,50	69,00	70,38
Al ₂ O ₃	15,50	14,00	14,65	15,82
Fe ₂ O ₃	6,05	3,00	2,50	1,50
CaO	2,24	1,50	1,10	1,56
MgO	2,40	1,40	0,53	0,48
Na ₂ O	3,30	3,25	3,50	3,70
K ₂ O	3,43	3,50	3,50	4,10
TiO ₂	0,40	0,25	0,38	-
SO ₃	0,94	0,002	0,40	-
Kızdırma Kaybı	1,40	3,90	4,63	3,62

Kimyasal yapı yönünden tüfler benzer maddelerden meydana gelmiştir. Ancak maddelerin tüf içinde bulunma oranları değişiktir. Tüfler ve diğer puzolanlar içerisinde genel olarak SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O ve H₂O

bulunmaktadır. Tüfte SiO₂ oranı diğerlerine göre yüksektir ki bu oran %46-80 arasında değişir. CaO ve MgO genel olarak %10'dan azdır. Alkali miktarı %8'in altına düşmez (Doruk, 1974; Sınıksaran, 2012). Bu çerçevede bazı volkanik tüflerin kimyasal özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir.

2.3.4 Volkanik tüf çeşitleri ve gruplandırılması

Piroklastik malzemelerin büyüklüğü toz halinden blok haline kadar değişmektedir. Tüf depolarını oluşturan malzeme çakıl büyüklüğüne kadar olan malzemelerdir. Şüphesiz tüfün tabiatta bulunuş şekli daima taneler halinde ve tek boyutlu taneler halinde değildir. Portland çimentosu veya kireç gibi hidrolik bir bağlayıcı ile karıştırıldığında hidrolik bağlayıcının özelliklerini geliştiren tüfe tras veya traslı tüf adı verilmektedir. Traslı tüfler; ince parçaları kızgın halde iken su veya su buharı vasıtası ile ani olarak soğumuş piroklastik malzemelerdir. Ani soğuma nedeni ile bu çeşit tüflerde camsı kısımlar diğerlerinden fazladır. Bu tüfler ince olarak öğütüldüklerinde aktiviteleri artar. Traslı tüfler genellikle yeraltı su seviyesinin altındaki kısımlarda bulunurlar. Taneli veya bloklaşmış yapıda bulunabilirler. Sığ deniz veya göl tabanlarında piroklastik malzeme çökerken normal olarak araya volkanik olmayan diğer parçalar karışmaktadır. Böylece tüfit adı verilen ve tabakalaşma gösteren yeni doğal kayaçlar oluşur. Bugün topografik yüzeyde görülen tüfitler daha çok düşey doğrultudaki yer kabuğu hareketleri sonunda su yüzüne çıkmışlardır. Oluşum şeklinin doğal bir sonucu olarak tüfitlerin içinde değişik oranlarda kil, karbonat vb. gibi elemanlar bulunmaktadır. Piroklastik malzemenin doğal yoldan birbirine bağlanıp çimentolaşmasında bazen bu maddeler silisten daha önemli bir rol oynayabilir. Ayrıca pomza taşı veya sünger taşı adında bir tüf çeşidi daha vardır. Pomza taşları magmatik parçaların çok çabuk soğuması ile meydana gelirler. Erimiş kütlenin emdiği gazların ani soğuma ile kütleyi terk etmesi sonucunda bu tüfler süngerimsi bol boşluklu bir yapıya sahip olurlar. Pomzanın içerisindeki silikat miktarları çok fazladır ve bunların yoğunlukları genellikle 1 kg/dm³ 'ten daha azdır (Doruk, 1974; Arıcı, 1997; Ertek, 2008; Sınıksaran, 2012).

2.3.5 Türkiye'de volkanik tüflerin dağılımı

Volkanik tüfler İç Anadolu Bölgesi başta olmak üzere Türkiye'nin birçok yerinde görülmektedir. Özellikle, Ankara, Eskişehir, Kayseri, Konya, Niğde, Nevşehir gibi

şehirlerde çeşitli minerallere sahip volkanik tüfler bulunmaktadır. Anadolu'da volkanik faaliyetlerden dolayı toptan yükselmelerle birlikte derin ve sürekli kırılmalar meydana gelmiştir. Kuzey Anadolu'da, özellikle Samsun-Çorum arasındaki dağ kitleleri içinde volkanik malzeme çok yaygındır. Bunlar daha çok anglomera-volkanik breş görüntüsünde, özellikle bazaltik veya andezitik lavlardan oluşmuşlardır. Batıda başlayıp Orta Toroslar üzerinden geçen büyük tabaka Malatya yöresinde ikiye ayrılır. Bunlardan biri Bitlis-Hakkâri doğrultusunda diğeri Tunceli-Ağrı yönünde uzanır. Bu tabakaların Güneydoğu ve Kuzey kenarlarında kısmen tahrip olmuş büyük volkan konileri görülür. Nemrut, Süphan, Tendürek ve Ağrı volkanlar dizisi burada bulunur. Bu büyük volkan konilerinden başka fay hatları boyunca lav oluşumları yüksek yaylalar boyunca uzayıp gider. Bu yeni volkan arazisinin bazı yerlerinde mahallî olarak bazı yerlerinde ise daha sınırlı boyutlarda, değişik kalınlıklarda, ara tabakalar şeklinde tüf tabakalarına rastlanır. Malatya-Bitlis-Hakkâri doğrultusunda uzanan Doğu Toros yayının güney tarafında volkanların çıkarmış olduğu bazaltik lavlar Diyarbakır platformu üzerine uzanır. Az miktardaki tüf kütlelerinin dışında Güneydoğu da volkanik arazi genellikle bazalt cinsinden volkanik kayalarla temsil edilir. Toroslardan, Anadolu'nun tabanında kalan eski masif sahalara doğru olan geçiş bölgelerinde volkanik kayalar bulunur. Erciyes, Melendiz, Hasandağı ve Karacadağ ile bunların etrafında bulunan küçük volkanik koniler burada yer alır. Bu küçük konilerin pek çoğu tüf ve cüruftan oluşmuşlardır. Göreme, Kayseri, Ihlara, Afyon ve Isparta tüf alanları bu yörededir. Batı Anadolu'da biri Kula yöresinde diğeri Aşağı Gediz vadisinde olmak üzere iki volkanik saha vardır. Burada sekiz küçük koni ile 53 volkan merkezi tespit edilmiştir. Ayrıca, aşağı Gediz Vadisi kesiminde İzmir-Bergama-Akhisar arasındaki bölgede Dumanlı Dağ Krateri içinde dışa doğru meyilli lav, tüf ve cüruflar ara tabakalı bir vaziyette bulunurlar. Foça-Eski Foça arasındaki Şaphane Dağı dışa doğru meyilli lav ve tüf tabakalarından oluşmuştur. Marmara bölgesindeki volkanik bölge özellikle Kütahya, Balıkesir, Çanakkale hattı üzerinde ve bu hattın güneyinde önemli bir yer kaplar. Buralarda daha çok andezit ve andezit tüfler yer alır. Ayrıca Marmara bölgesinde Biga-Lapseki arasına rastlayan bazı volkanik tüf oluşumları görülürken Trakya'da da Enez civarında bir volkanik tüf sahası bulunur (Doruk 1974; Arıcı, 1997; Sımsıran,2012).

2.4 Akademik Çalışmalar

Bu bölümde, tez konusunu ilgilendiren inceleme alanı öncelikli olmak üzere, ülkede bulunan diğer puzolan yataklarının yararlılığı hakkında yapılan çalışmalardan bazıları seçilerek, bunlardan elde edilen sonuçlar ile ilgili özet bilgi verilmiştir.

Duda (1977), tarafından yapılan çalışmada Portland çimentosunun dayanım kazanmasındaki en önemli faktörlerden birisinin çimento inceliği olduğu söylenmiş, 3 µm - 30 µm inceliğin çimentonun dayanım mekanizmasını etkilediği, 3 µm altındaki inceliklerde erken dayanım kazanıldığı ve hidrasyon reaksiyonlarının ilk gün olduğu, partiküllerin 3 µm - 30 µm arasında olmasıyla yaklaşık % 40-50 ortalama dayanım artışına sahip olunabileceği belirtilmiştir (Delibaş, 2012; Tekin, 2014).

Hopkins vd (1998), yaptıkları çalışmada, taban külü boyutunun 45 µm'nin altına değin azaltılmasıyla, çimentonun özelliklerini arttırabileceği aynı zamanda parçacık boyutunun sınır limitinin 1-2 µm'den daha az olmaması gerektiği aksi takdirde yüksek öğütme maliyetinin söz konusu olabileceği söylenmiştir (Tekin, 2014).

Kavas vd (2001), Ayazini (Afyon) civarında yüzeylemiş olan tüflerin çimento sanayinde tras olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ayazini tüflerinin kimyasal, mineralojik, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir, TS 25 standartlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Üretilen tuf katkılı çimento örneklerine yapılan basınç dayanımları 5,7 - 10,6 N/mm² arasında değişirken, eğilmede çekme dayanımları 1,4 - 2,5 N/mm² olarak bulunmuştur. Yapılan testler sonucunda Ayazini bölgesinde bulunan tüflerin katkılı çimento üretiminde tras olarak kullanılabilceği görülmüştür.

Hossain (2003), Papua Yeni Gine'de bulunan Tavurvur adıyla bilinen volkanik kökenli bir dağın, volkanik tuf tozu ve volkanik külü çimentoya ikame edildikten sonra üretilen çimentoların bazı özelliklerini araştırmıştır. Çimento ağırlığınca, % 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 35 ve % 50 oranlarında ikame edilmiştir. Çalışmada volkanik kül ve tuf tozunun çimento hamur ve harcında kıvam, priz, basınç dayanımına etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, volkanik tuf ve tuf tozunun priz süresini uzattığı, 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını düşürdüğü, ikame oranı arttıkça da kıvamın düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda % 20 ikame oranlarının hidrasyon ısını düşürdüğü görülmüştür (Tekin, 2014).

Pan vd (2003), yapmış olduğu çalışmada doğal puzolanların ince öğütölmeleriyle özgül yüzey alanlarının arttırıldığı, artan toplam yüzey alanının su ihtiyacında artış oluşturabileceği aynı zamanda ince taneciklerin küçük boşluklara girmesiyle çimentoda durabiliteyi arttırabileceği belirtilmiştir.

Alp vd (2004), Taşhane andezitik tüflerinin katkılı çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Örneklerin mineralojik, petrografik ve kimyasal analizleri, malzemenin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam içeriği % 79,86 olan volkanik orijinli porfirik traki andezit olduğunu göstermiştir. Bu bulgular ve kireç ile yapılan puzolanik aktivite testleri, malzemenin TS 25 tarafından istenen tras özelliklerine uygun olduğunu göstermiştir. Üretilen katkılı Portland çimentoları üzerinde yapılan testler sonucunda, Taşhane andezitik tüflerinin TS 26 da belirtilen traslı çimento için istenen özelliklere göre değerlendirildiğinde Portland çimentosu klinkerine %27 oranına kadar katılarak katkılı çimento üretiminde kullanılabilirliği bulunmuştur.

Çelik vd (2004), farklı puzolanik katkıların çimento harçlarının mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Soma termik santralinden elde edilen uçucu kül, iki farklı tras (Yenişehir, Bilecik) ve silis dumanı, çimento klinkerinin bir kısmı yerine katılmış ve elde edilen harçların basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Yapılan denemelerde en yüksek dayanım değerlerinin Bilecik trası ile hazırlanan ve yüksek inceliğe sahip olan puzolan içeren harçlarda elde edildiği saptanmıştır.

Yılmaz vd (2004), Manisa-Gördes yöresinden elde edilen doğal zeolit ve Soma Termik Santral atığı olan taban külünün çimento üretiminde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Manisa-Gördes doğal zeoliti % 10, % 20, % 30, doğal zeolit katkılı (ZKÇ) ve doğal zeolit + taban külü katkılı (ZTKKÇ) çimentolarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri birbirleriyle ve kontrol çimentoları olan PÇ 32,5 ve PÇ 42,5 ile karşılaştırılmıştır. Manisa - Gördes yöresinden alınan doğal zeolit ve Soma termik santralinden alınan taban külü değişik oranlarda klinkerle birlikte öğütölmüş ve elde edilen çimentolarla hazırlanan hamur ve harçların, çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu katkılı çimentoların kimyasal bileşimleri ile normal kıvam suyu, priz süreleri, öğütme süreleri, özgül yüzey ve özgül ağırlık gibi

fiziksel özelliklerinin yanı sıra, 2, 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu çalışmada edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Zeolit miktarı % 30'e çıkarıldığında öğütme süresi % 30 azalmaktadır. Bu da enerji tasarrufu sağlayarak çimento üretim maliyetini düşürecektir.
2. Manisa-Gördes yöresi doğal zeoliti kontrol çimentosuna göre katkı oranı arttıkça incelikle beraber su ihtiyacını da artırmaktadır.
3. Doğal zeolit (ZKÇ) ve taban külü katkılı (ZTKKÇ) çimentoların ilk priz süreleri azalmaktadır. Bu azalma, katkı miktarı ve çimento inceliği ile doğru orantılıdır.
4. Doğal zeolit hacim genleşmesini azaltmaktadır.
5. Doğal zeolit (ZKÇ) ve Taban külü katkılı (ZTKKÇ) çimentoların özgül ağırlığını katkı miktarı artışıyla ters orantılı olarak azalmaktadır.
6. ZKÇ ve ZTKKÇ'ların kimyasal kompozisyonu, priz süresi, hacim genleşmesi ve incelik değerleri, ilgili standartlara TS 10156, TS 25 ve TS 640'a uygundur.
7. Doğal zeolit eğilmede çekme ve basınç dayanımı katkı miktarı % 10-20 den sonra artıkça azalmaktadır. % 30 zeolit katkılı (ZKÇ) ve % 30 Zeolit + % 5 taban külü katkılı (ZTKKÇ) kontrol çimentosu PÇ 42,5'dan daha yüksek dayanım göstermektedir.
8. Manisa-Gördes doğal zeoliti % 10-30 oranlarında katkılı çimento üretiminde kullanılabilir.

Tekin (2005), çalışmasında çimento harçlarının porozitesini bilgisayarlı tomografi ile belirlemeyi hedeflemiştir. Çimento harç karışımlarında PÇ 42,5 çimentosu yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında volkanik tuf (VT) ikame edilmiştir. Hazırlanan harçlar 100 günlük laboratuvar kürü sırasında 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21, 28, 42, 70 ve 100. günlerde BT ile görüntülenmiştir. Poroziteleri belirlenmiş olan çimento harçları, 28 ve 100 gün sonunda kırılarak basınç dayanımları bulunmuştur. Araştırmanın sonucunda, VT ikamesi arttıkça basınç dayanımının ve porozitenin düştüğü görülmüştür.

Çavdar vd (2005), doğal puzolanların katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genleşmesi özelliklerine etkisini araştırmıştır. Deneyleerde kullanılan volkanik ürün Alaçam yöresinden (Maçka-Trabzon) alınmıştır. Malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve malzemenin ilgili

standarda (TS 25) uygunluğu görülmüştür. Doğal puzolan türü ve inceliği sabit tutularak, %0, %10, %20, %25, %30, %35 kütle oranlarında tras içeren çimento üretilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, doğal puzolan içeren çimentolar, ilk günlerde portland çimentosundan elde edilen çimentoya göre daha düşük bir basınç dayanımı sergilemelerine rağmen, ilerleyen günlerde bu fark gittikçe azalmıştır. Diğer yandan tras oranı arttıkça işlenebilirlik koşullarının iyileşmiş olduğu, özdeş kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarının göreceli de olsa artmakta olduğu görülmüştür. Ayrıca tras oranının artmasıyla katılaşma başlangıç ve sonlanma sürelerinde belirgin bir uzamanın yanında, çimento hamurunun hacim genleşme değeri de yaklaşık 2/3 oranında bir düşüş göstermiştir (Çavdar 2005).

Yazıcıoğlu vd (2006), Elazığ yöresi pomzasını, hidrasyon reaksiyonu yapabilmesi için çimento inceliğinde öğütüp, ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento ile yer değiştirerek yeni karışımlar oluşturmuştur. Pomzanın 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değeri kaydedilmiştir. Ayrıca 28 günlük beton numuneler porozite ve ultrasonik test deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, pomzanın %20 oranına kadar çimento ile ağırlıkça yer değiştirmesiyle, çimento miktarındaki azalmadan dolayı numunelerin basınç dayanımlarının kontrol betonuna göre daha düşük çıktığı görülmüştür. Fakat kür yaşı arttıkça dayanımdaki bu düşüş azalmıştır.

Yıldırım (2007), Manisa-Gördes yöresinden elde edilen doğal zeolitin çimentoda katkı uygunluğunu araştırmıştır. Manisa-Gördes doğal zeolitinin %0, % 15 ve %30 doğal zeolit katkı ve doğal zeolit + süperplastikleştirici katkı çimentoları fiziksel ve kimyasal özellikleri yönünden birbirleriyle ve kontrol çimentosu olan PÇ 42,5 ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan zeolitli hamur numuneleri üzerinde X-ray difraksiyon ve SEM fotoğraf araştırması yapılmıştır. %15 doğal zeolit katkı numunelerin çimentoda uygun olduğu görülmüştür.

Taban vd (2008), zeolitik tuf (ZT) katkı oranı ve deniz suyunun çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. ZT örneğinin kimyasal, fiziksel, mekanik özellikleri belirlenmiştir. ZT % 0, % 10, % 20, % 30 ve % 40 oranlarında CEM I 42,5 R çimentosu yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Çimento hamurunun priz süresi, hacim genleşmesi ve harç prizmalarının 7, 28, 90 günlük eğilme ve basınç dayanımlarına etkileri test edilmiştir. Çimento içerisindeki ZT ikame oranı arttıkça,

normal kıvam için gereken su miktarı artmıştır. % 30 ZT miktarından sonra su ihtiyacı önemli derecede değişim göstermemiştir. Hacim genişmesi değerleri % 20 ve üzeri zeolitik tuf karışım oranlarında artmıştır. Priz başlangıcı ve sonu süreleri kısalmış, % 20 ZT ikameli çimento hamurunda daha kısa sürede priz başlamış ve daha kısa sürede priz sona ermiştir. 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımlarında en yüksek dayanımı kontrol örnekleri verirken, en düşük dayanımı % 40 ikameli karışım örnekleri vermiştir. ZT'ün 90 gün sonraki yaşlarda eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkisi görülmüştür. Kontrol örneklerinden sonra en yüksek eğilme ve basınç dayanım değerini % 10 ZT katkı oranındaki çimento harçları vermiştir (Taban ve Şimşek, 2009; Taban, 2010).

Çavdar vd (2009), tane inceliğinin traslı çimento özelliklere etkisini araştırmıştır. Ele alınan traslı çimento örneğinin tane inceliği değiştirilerek, bu değişimin bu çeşit çimentolarda dayanım, hacim genişmesi, katılma süresi gibi özelliklere nasıl etki ettiği deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sırasında tras oranı, türü sabit tutulmuştur. Karışım örneği değişik sürelerde öğütülmek suretiyle beş farklı incelikte çimento elde edilmiştir. Traslı çimentonun özgül yüzeyi dolayısıyla tane inceliği arttıkça; basınç dayanımında kabul edilebilir bir doğrusallıkla yükselme, katılma başlangıç ve sonlanma süresinde kısalma, hacim genişmesinde daha çok azalan bir artışla eğrisel bir yükselme olduğu görülmüştür. Sonuç olarak yapılan bu çalışma ile düşük sayılabilecek oranda tras karıştırılmasıyla çimentonun tane inceliğinin daha az enerji harcanarak arttırılabileceği, bu sayede taze betonun işlenebilirliğine katkı sağlanabileceği, katılma süresinin uzatılabileceği ve böylece çimentonun genel olarak dayanıklılığını arttırılabileceği ortaya konulmuştur.

Tekin (2014), farklı inceliklere sahip mineral ve iki farklı firmaya ait aynı tip kimyasal katkıların, kompoze çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmıştır. 63 ve 125 µm incelikte puzolanik özellikli, öğütülmüş Bayburt Taşı (BT) ile Yatağan Termik santral Taban külü (TK) CEM I tip çimentoda % 0, 10, 20 ve %30 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Çimento hamurları üzerinde standart kıvam, priz başlangıcı- bitişi süreleri ve hacim genişleme deneyleri ile çimento harçları üzerinde basınç mukavemeti, yayılma verileri elde edilmiştir. Sonuç olarak, mineral katkıların dane boyutuna bağlı özgül yüzey alanındaki değişiklikler, harçların fiziksel, mekanik ve reolojik özelliklerinde önemli farklılıklar oluşturmuştur. Çimento

hamurunda BT ve TK ikamesi arttıkça standart kıvam ve priz bitişi süreleri artmıştır. %10-20 oranlarında BT ve TK kullanılan katkılı çimentolar 28 gün kürlenme süresi sonunda kıyaslanabilir sonuçlar vermişlerdir. Çimento yüzey alanının artması ile katkılı çimentoların basınç dayanımı artmıştır. Ayrıca Portland çimentosunun mineral katkılarla yer değiştirmesi, çimento hamurunun hacim genişmesinde kayda değer bir değişiklik oluşturmamıştır.

Tuncer (2014), Gümüşhane yöresi volkanik kayaların puzolanik aktivitesini araştırmıştır. Gümüşhane civarındaki volkanik kayaların mineralojik, petrografik ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Çimento ve harçların üretilmesinde Gümüşhane yöresinde Aysima bölgesinden (volkanik tüf ve andezit), Süleymaniye bölgesinden (andezit), Tekke Bölgesinden (andezit, dasit), Refene Bölgesinden (volkanik tüf) ve Gümüşhane yöresine komşu olan Bayburt İlinden alınan volkanik tüflerden elde edilen puzolanlar çimento inceliği 90 µm olacak şekilde öğütülerek deneylerde kullanılmıştır. Puzolanlar portland çimento ağırlığının %0, %10, %20, %30, %40, %50'si oranında ikame şeklinde katılarak harçlar üretilmiştir. Harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme, basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızı değerleri saptanmıştır. Sonuç olarak, volkanik tüflerin özgül ağırlıkları, puzolanik aktivitesi, kolay öğütülebilirlik ve basınç dayanımlarıyla katkılı çimento üretiminde kullanılabileceği belirlenmiş olup, tras oranı artışının, çimentonun erken yaştaki dayanımını, beklendiği gibi belirgin ölçüde düşürdüğü gözlenmiştir. Sonuç olarak puzolanların %10 kullanımının en uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Atan (2015), yaptığı çalışmada Kapadokya Bölgesi'ne ait doğal tüfü, mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri bakımından, çimento katkı malzemesi olarak araştırmıştır. Deneyler sonucunda, %0, %25 ve %50 puzolan katkılı çimentonun, çimento yapımında kullanılabilmesi için gerekli test sonuçları elde edilmiş olup, bu sonuçlar, malzemenin %50 ye kadar çimento katkısı olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Belirli bir incelekte, malzeme otoklav genişmesini ve alkali-agrega reaksiyonunu azaltmıştır. Bunun yanında, hidrasyon ısısının da artan puzolan miktarıyla azaldığı gözlenmiştir. Yine artan puzolan miktarıyla beraber, su ihtiyacı da artmış, ilk ve son priz süreleri de uzamıştır. Kapadokya tüfü katkılı çimentolarda, erken dayanım azalmış fakat 90. ve 180. günler sonunda, basınç dayanımının fark edilir şekilde artmaya devam ettiği gözlenmiştir.

Okucu, zeolitik tüflerin imento katkı maddesi olarak değerlendirilebilmesini araştırmıştır. Balıkesir ili Bigadiç ilçesinden zeolit minerali içeren 2 farklı tf numunesi alınmıştır. Tüflerin kimyasal özellikleri ve puzolanik aktiviteleri belirlenmiştir. Zeolitik tüflerle endüstriyel kullanıma yakınlık açısından %24, %26, %28 katkı oranlarında çimentolar hazırlanmıştır. Bu imentolarla 4×4×16 cm'lik prizmatik harç numuneleri üretilmiş ve numuneler su içinde kr edilerek 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, zeolitik tüflerin düşük özgül ağırlık, yüksek puzolanik aktivite, yüksek özgül yüzey, kolay öğütülebilirlik ve yüksek basınç dayanımlarıyla katkılı imento üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir.



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Materyal

Deneysel çalışmalarda kompoze çimentoların üretiminde TS EN 196-3 ve TS EN 196-1 standartları kullanılmış olup bu standartlara göre çimento hamur ve harçlarının hazırlığında standart CEN kumu, PÇ 42,5 çimentosu, üç farklı bileşende Bayburt Taşı ve su kullanılmıştır. Bu malzemelere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.1.1 Çimento

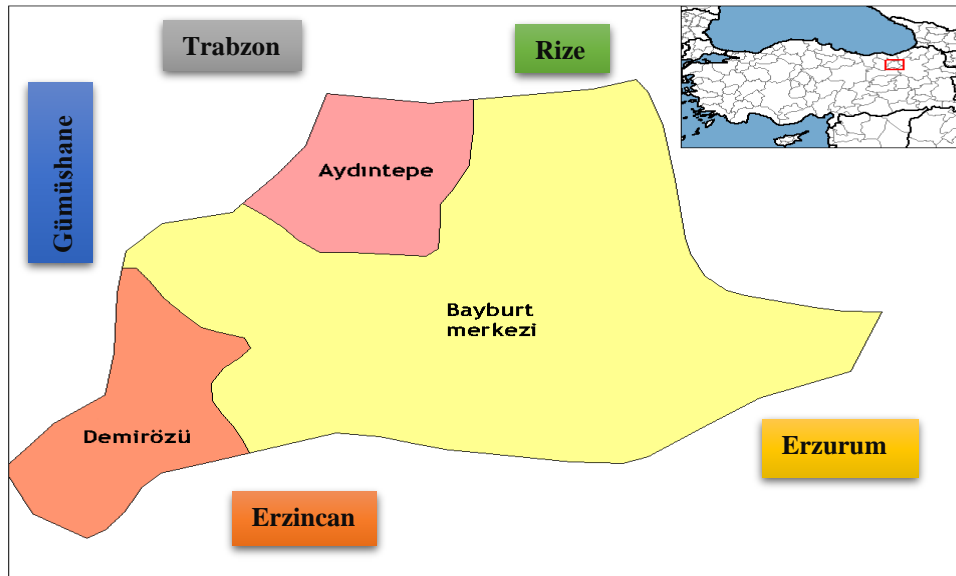
Çalışmada, TS EN 197-1'e uygun Erzurum Aşkale Çimento fabrikasından temin edilen CEM I (PÇ 42,5 R) tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşimi	(%)	Fiziksel Özellikleri	
SiO ₂	18,21	İncelik (45 µm elek üstü %)	7,17
Al ₂ O ₃	4,54	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12
Fe ₂ O ₃	3,1	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3616
CaO	63,5	Priz Başlangıcı (dakika)	146
MgO	2,57	Priz Sonu (dakika)	189
SO ₃	2,82	Hacim Genleşmesi (mm)	1
Kızdırma Kaybı	3,87	Su İhtiyacı %	29,5
Na ₂ O	0,22	Mekanik Özellikler	
K ₂ O	0,65		
Cl ⁻	0,0144		
Ölçülemeyen	0,51	Basınç Dayanımı	N/ mm ²
Toplam	100	2 günlük	27,72
Serbest CaO	0,49	28 günlük	58,81
* Veriler Aşkale Çimento A.Ş. Kalite Kontrol laboratuvarları tarafından üretilmiştir.			

3.1.2 Bayburt Taşı (BT)

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi Bayburt ili, doğusunda Erzurum, batısında Gümüşhane, kuzeyinde Trabzon ve Rize, güneyinde Erzincan illeri ile çevrili Anadolu’nun kuzey doğusunda Çoruh Nehri kenarına kurulmuş bir ildir. Bayburt sahip olduğu jeolojik yapı gereği çeşitli maden yataklarının oluşumu için uygun bir ortam sunmaktadır. Bununla birlikte bilinen maden yataklarının sayısı oldukça azdır. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü’nün (MTA) yaptığı “Bayburt İli Maden ve Enerji Kaynakları” raporuna göre; Bayburt ilindeki metalik madenler: bakır ve krom yatak ve zuhurlarıdır. Bölgede kireçtaşları, kumtaşları, mermer, traverten, granit, tuf, hematit, bazalt gibi çok çeşitli tipte kayaca rastlamak mümkündür (Tekin vd, 2017). Bayburt ili ve civarında bulunan ve “Bayburt Taşı” olarak bilinen Bayburt tuf ve tüfitleri il ekonomisinde ticari bir öneme sahiptir (Önenç vd, 2005). Tüfler yörede yaygın olarak kullanılan endüstriyel hammadde kaynaklarından biridir. Hafif ve kolay işlenebilir olmalarından dolayı yapı taşı olarak özellikle camii yapımında ve tarihi eserlerin onarımında kullanılmaktadır. Özer (1984), yaptığı çalışmada tuf ve tüfitlerin dasitik bileşimli olduklarından bahsetmektedir. Tarhan ve Bulut (1989) bu kayalarda açılan taş ocakları ve çevresinde yaptıkları çalışmalar ile tüflerin mekanik özelliklerini ortaya koymaya çalışmışlardır (Arslan vd, 2005).



Şekil 3.1 Bayburt’un Türkiye’deki yeri ve ilçelerinin haritası

Bayburt tüfleri genelde az engebeli özellikle tepe ve sırtlarda bulunmaktadır. Kilmarn-kumtaşı-tüf-tüfit-kireçtaşı seviyeleri ile sıralanmaktadır. Tüfler iki seviye halinde görülmektedir ve her seviye iri taneliden başlayıp ince taneli ile son bulmaktadır. İri ve ince taneli tanımı kayacı oluşturan tüm bileşenlerin büyüklüğü esas alınarak yapılmış olup, iki seviye halinde gözlenen tüflerin makroskopik özelliklerini de yansıtmaktadır. Genel olarak tüfler cam parçaları, pomza, kristal parçaları (plajiyoklas, kuvars, biyotit, sanidin) ve nadiren de büyüme lapillisi içerirler. İri taneli örneklerde baskın olarak kristal ve kristal parçaları gözlenirken ince tanelilerde cam/cam kıymıkları ve pomza yaygın olarak bulunmaktadır. İri taneli seviyeler %40-50 kristal, % 40-50 cam ve pomza, buna karşın ince taneliler %20-25 kristal, %75-80 cam ve pomza içermektedir. Bu nedenle iri ve ince taneli seviyeler sırasıyla 1:1 ve 1:3 olan kristal parçası/cam parçası oranları ile karakterize edilirler. Bu şekildeki bir modal bileşime göre iri taneli seviyeler vitrik-kristal tüf, ince taneli seviyeler ise vitrik tüf olarak tanımlanmaktadır. Tüfler genel olarak krem ve sarımsı-krem renklerine sahiptir. Fakat bazı kısımlarda oldukça çatlaklı ve ayrıışmışlardır. Ayrıışma yüzeyleri sarımsı kahve renklerde. Taş ocaklarında, tüflerin içlerinde yeşil renkli (klorit ve zeolit) beneklerin olduğu hatta bazı yerlerde kayacın yoğun kloritleşme ve zeolitleşme nedeniyle tamamen yeşilin tonlarına sahip olduğu görülmüştür. İnce taneli tüflerde klorit mineralinin bozuşması ve yağışlarla kolayca yıkanıp gitmesi sonucu kayaçlarda ikincil küçük gözenekli bir görünüm ortaya çıkmıştır (Arslan vd, 2005).

BT'nin, Bayburt Merkez, Danişment, Toptepe, Sırataşlar, Konakdağ ve Gevenli sahalarında ocakları bulunmaktadır. BT'ye renk olarak benzeyen, fakat sertliği ile ondan ayrılan tüflü seviyeler aynı oluşumun üst kısımlarında yer alır. Bu oluşumlar Gümüşdamla, Erikdibi, Adabaşı, Çayırözü, Gökçeli sahalarında bulunmakta olup çok büyük potansiyele sahiptir. BT'nin yataklandığı Yazyurdu formasyonu 1500 km² lik bir alanı kapsamaktadır. Yazyurdu oluşumu batıda Gümüşhane ilini ve doğuda ise Erzurum ili sınırlarını geçmektedir. Taşın rezervi, tahmini blok verimi ile çarpıldığında 453.382 ton işletilebilir rezerv bulunmaktadır. İşletmede kayıpların azaltılması ve günün teknolojisine göre yapılacak üretimlerle BT'nin veriminin arttırılması mümkün görülmektedir. BT'nin görünür rezervinin yıllık 15.000 ton üretim yapan 10 adet işletmeyi 20 yıl boyunca besleyecek potansiyeli bulunduğu çalışmalar sonucunda

belirlenmiştir (Önenç vd, 2005; Kaçar, 2014). Toptepe, Sırataşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüştamla sahalarında yapılan çalışmalar sonucunda BT'nin tahmini rezervleri;

1. Görünür rezerv: 2.535.729 ton
2. Muhtemel rezerv: 643.070 ton
3. Mümkün rezerv: 599.200 ton olarak hesaplanmıştır.

3.1.2.1 Bayburt taşının türleri

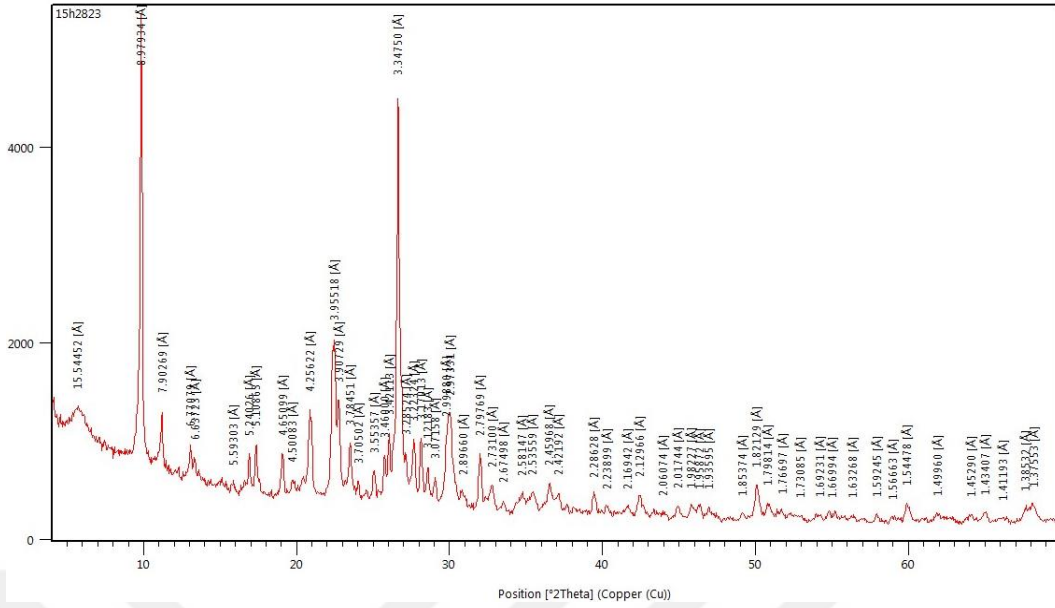
Bayburt taşının işleme alanında kullanılan üç türü vardır. Bunlar beyaz, sarı ve yeşil olmak üzere renklerine göre sınıflandırılmıştır.

- **Bayburt Beyaz Taşı (BBT)**



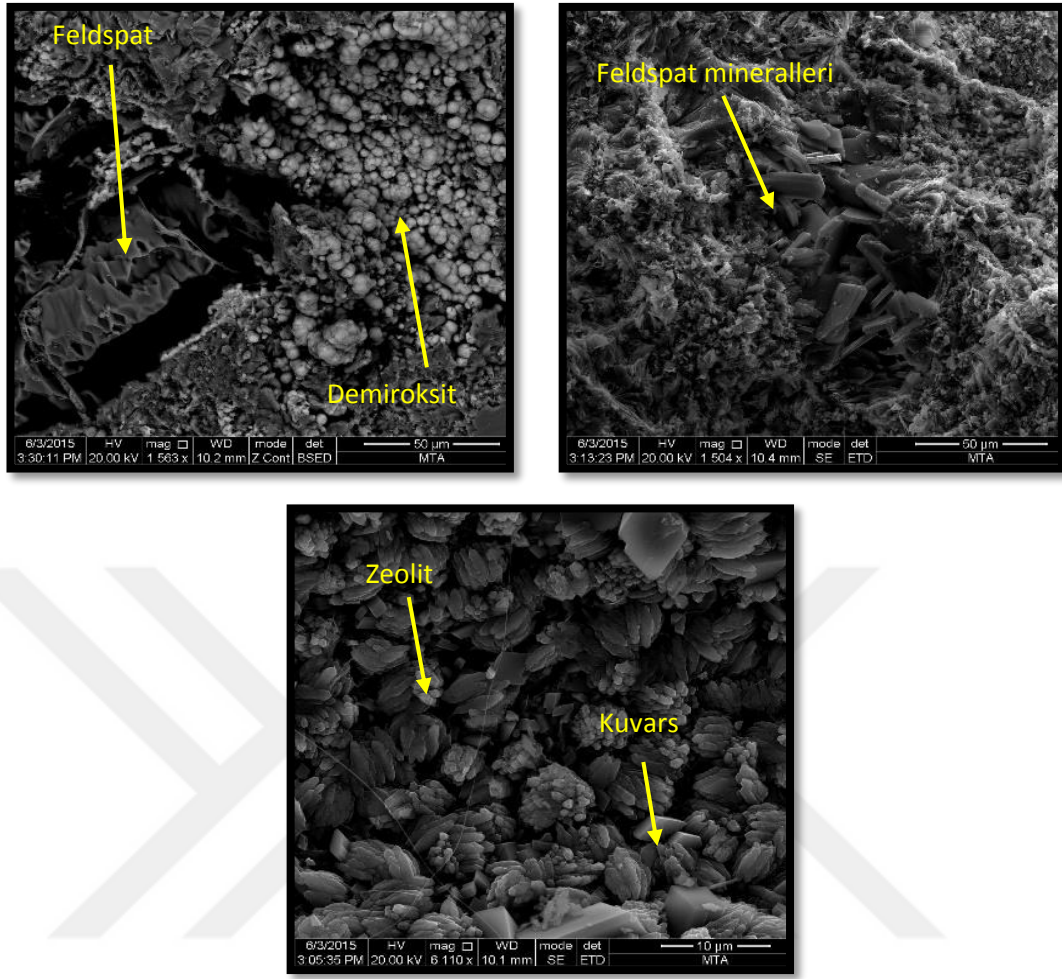
Şekil 3.2 Bayburt Beyaz Taşı

Bayburt Beyaz Taşı (BBT) riyo-dasitik bileşimli vitrik tüf olup, kayaç içerisinde volkanik malzemelerden oluşan bir matriks ve matriks içerisinde kuvars, plajiolaz, biyotit ve kaya parçaları bulunmaktadır (Kudaka, 2014; Yılmaz,2015). Matrikste, pekişmiş volkanik malzemelerin yanı sıra kuvars ve feldispat mikrolitleriyle demiroksit ve alterasyon ürünü mineral oluşumları da gözlemlenmektedir (URL-1, 2014; Yılmaz,2015). BBT birçok bina, köprü, cami ve çeşme gibi yapılarda tercih edilen bir yapı malzemesidir. BBT'nin fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri Çizelge 3.2 ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 BBT'nin mineralojik analizi (XRD analizi)

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü mineraloji ve petrografi laboratuvarında Bayburt taşları üzerinde gerçekleştiren analizlere göre: BBT makroskobik tanımlamaya göre zeolitik tüf olarak adlandırılmış, sarımsı gri renkte, masif dokulu ve ince taneli bir yapıya sahiptir. Mikroskobik tanımlamada ise porfirik dokulu, kuvars, alkali feldspat, zeolit ve opak minerallerinden oluşmuş zeolit formda höylandit, klinoptilolit benzeri yapılara sahiptir. Şekil 3.3'de verilen XRD analizine göre yüksek oranda amorf yapı, zeolit minerallerince zengin (höylandit ve klinoptilolit) hamur içinde kuvars ve feldspat mineralleri kırıklı yer yer köşeli olarak gözlenmiştir. İnce kesitte yer yer akma dokusu da gözlenmiştir. Olası kırıklı volkanik camsı parçalar da yapıda görülmüştür. Şekil 3.4'te gösterilen SEM görüntülerinde yoğun demir, zeolit ve kuvars mineralleri bulunmaktadır.



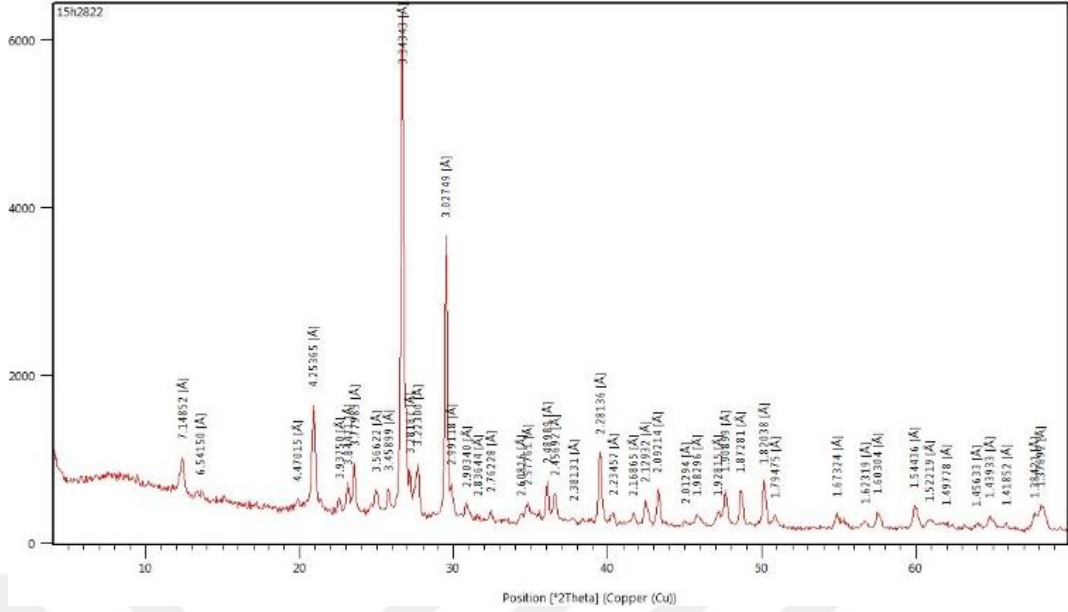
Şekil 3.4 BBT'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi)

- **Bayburt Sarı Taşı (BST)**



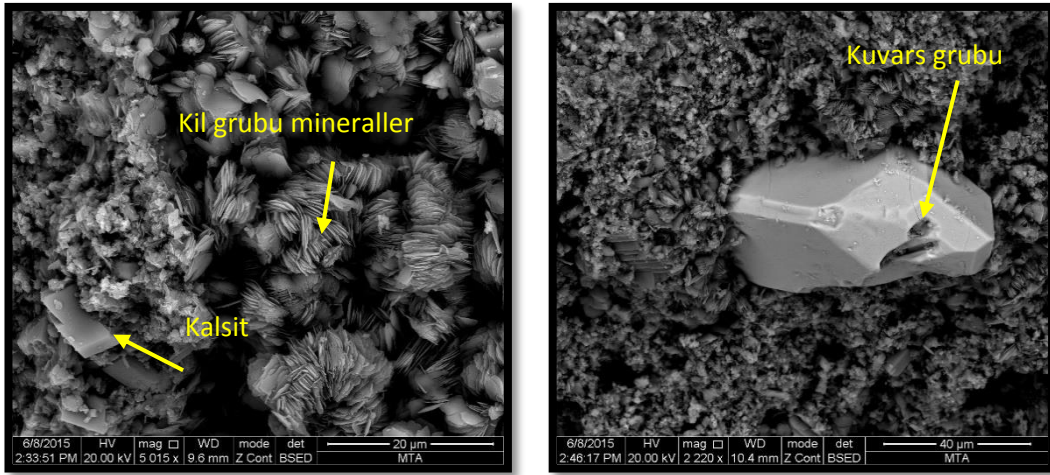
Şekil 3.5 Bayburt Sarı Taşı

Bayburt Sarı Taşı (BST) içinde altere olmuş volkanik malzemelerden oluşan bir matriks ve matriks içerisinde kuvars, plajiolaz ve kaya parçaları bulunmaktadır (Kudaka, 2014; Yılmaz,2015). Matriks ise tamamen bozunmuş olup içerisinde karbonat, serisit ve demiroksit oluşumları gözlemlenmektedir (URL-1, 2014; Yılmaz,2015). Piroklastik kayalarda feldspat, kuvars, biotit, magnetit, hornblend ve ojit en çok miktarda bulunan fenokristallerdir (Leckebush, 1984; Çimen, 2005). Diğer Bayburt taşlarında olduğu gibi sarı renkteki bu taşın da rezervi fazla olmakla birlikte tarihi yapılarda, dekoratif işlerde ve buna benzer mimari tasarımlarda kullanım alanı oldukça geniştir. Tüm BT kullanımlarında öne çıkan en büyük özellik, taşların işlenebilirliğinin kolay olması dolayısıyla daha çok dekoratif işlerde ve kaplama malzemesi olarak kullanılmasıdır. BST'nin fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri Çizelge 3.2 ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.6 BST'nin mineralojik analizi (XRD analizi)

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü mineraloji ve petrografi laboratuvarında Bayburt taşları üzerinde gerçekleştiren analizlere göre: BST kırıntılı kireçtaşı olarak adlandırılmış olup, sarımsı turuncu renkte, masif küçük taneli makroskobik yapıya sahiptir. Mikroskobik olarak kırıntılı karbonat (kalsit) grubu mineraller, kuvars mineralleri, feldspat grubu mineraller, fosil taneleri ile opak mineralleri bünyesinde bulundurmaktadır. BST baskın oranda kalsit minerallerinden oluşmaktadır. Kuvars ve feldspat mineralleri karbonat çimento içinde dağılmış kırıklı, köşeli, küçük tane boyulu olarak gözlemlenmiştir. Kayaç bol miktarda farklı taneli büyüklüğe sahip fosil ve fosil kavkısı içermektedir. Kayaçta homojen olarak yayılmış olası erime boşlukları dolgusuz olarak görülmüştür. Şekil 3.6'da verilen XRD analizine göre BST düşük amorf yapılı bir taş olup yapısında kalsit, kuvars, feldspat grubu mineraller, kil grubu mineraller ve piroksen grubu mineraller bulunmaktadır. Şekil 3.7'de verilen SEM görüntülerinde kil, kalsit ve kuvars grubu mineral yapılar gösterilmiştir.



Şekil 3.7 BST'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi)

- **Bayburt Yeşil Taşı (BYT)**

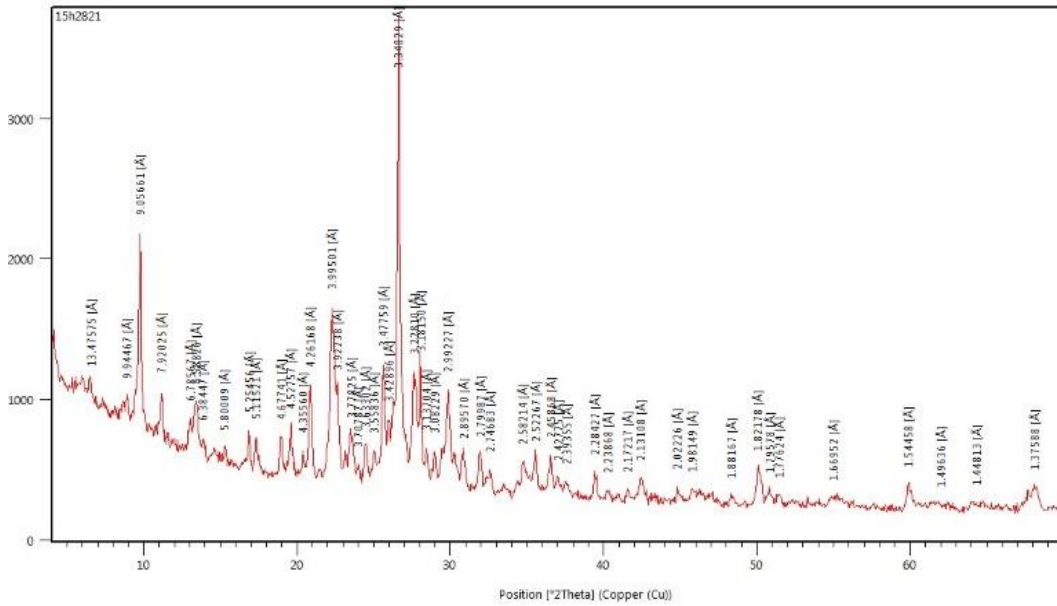


Şekil 3.8 Bayburt Yeşil Taşı

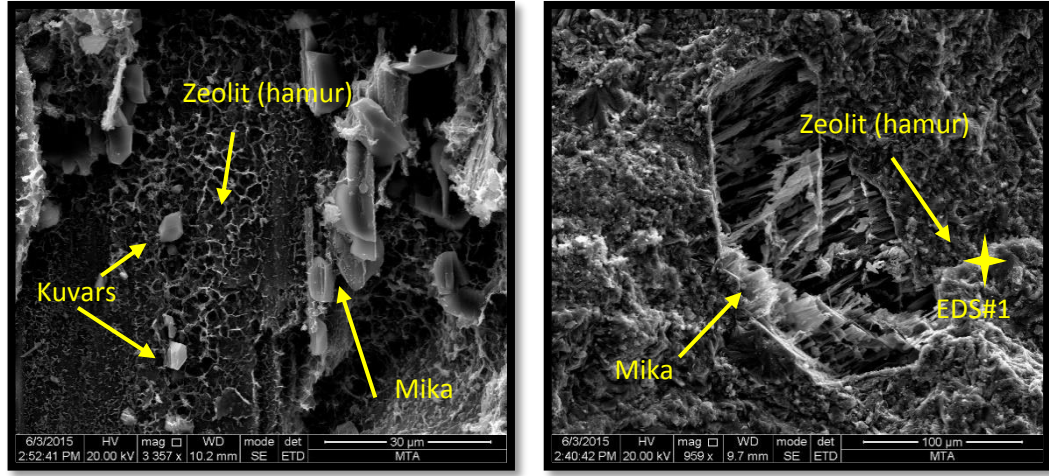
Bayburt Yeşil Taşı (BYT), sertliği, doluluk oranı, sıklığı, basınç ve çekme mukavemet değerleri ile Türkiye'nin ve Bayburt'un diğer tüf formatlarından farklılık arz etmektedir. BYT riyoitik bir tüf olup, kayaç içinde volkanik malzemelerden oluşan bir matriks ve bu matriks içerisinde kuvars, plajiolaz ve kloritleşmiş biyotit mineralleri bulunmaktadır (Kudaka, 2014; Yılmaz,2015). Matriks ise, kuvars ve feldispat miktolitleri ile karbonat, serisit, klorit ve volkanik malzemelerden meydana

gelmektedir. Yoğunluğunun düşük, ağırlıkça su emme oranının yüksek olmasına karşın basınç, eğilme ve aşınma dirençleri iyidir. (URL-1, 2014; Yılmaz, 2015). Ülkemizde, Bayburt şehrinde ve diğer illerimizde inşaat malzemesi olarak BYT kullanımını gün geçtikçe artış göstermektedir. BYT'nin fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri Çizelge 3.2 ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

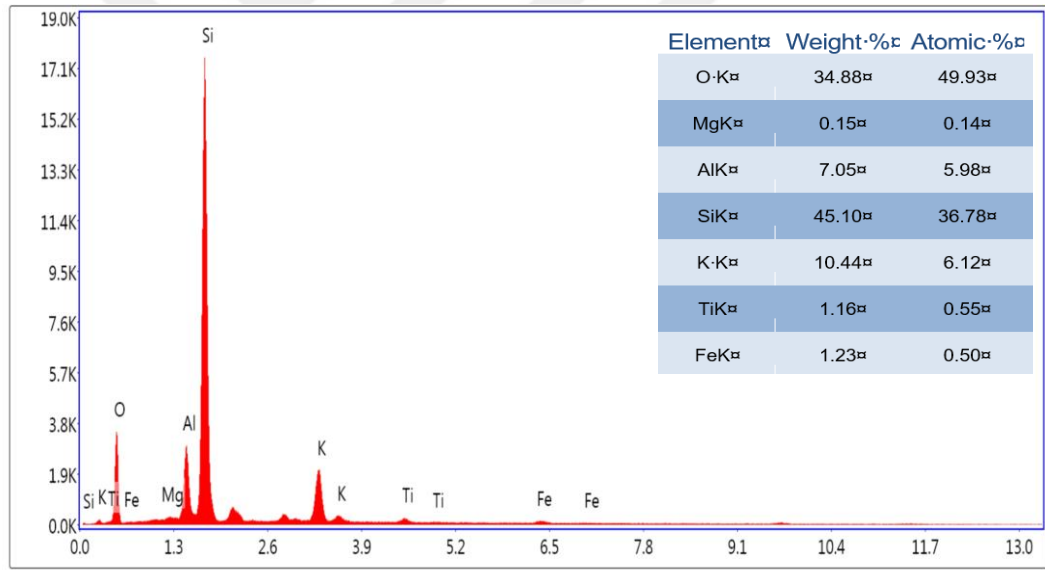
Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü mineraloji ve petrografi laboratuvarında Bayburt taşları üzerinde gerçekleştiren analizlere göre: BYT grimsi yeşil renkte, masif yapılı, ince taneli bir makroskobik yapıya sahiptir. Mikroskobik olarak ise porfirik dokulu, içinde kuvars, alkali feldspat, biyotit, plajiyoklas, zeolit ve opak mineraller barındırmaktadır. Ayrıca tipik tuf dokusu gözlenen kayaçta hamur içinde dağınık fenokristaller gözlenmektedir. Hamur تماما yakın zeolit grubu minerallerden oluşmuş, belli belirsiz akma dokuları boyunca biyotit mineralleri gözlenmiştir. Biyotit minerallerinde yer yer olası klorit dönüşümleri de vardır. Plajiyoklas mineralleri alkali feldspat minerallerine göre eser oranda bulunmaktadır. Şekil 3.9'da verilen XRD analizine göre amorf yapılı, yoğun olarak kuvars, zeolit, feldspat ve mika grubu mineraller görülmüştür. Şekil 3.10'de verilen SEM görüntülerinde de bilgiler desteklenir niteliktedir. Şekil 3.10'de zeolit formun bulunduğu alandan alınan bir noktada EDS analizi yapılmış ve Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.9 BYT'nin mineralojik analizi (XRD analizi)



Şekil 3.10 BYT'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi)



Lsec: 24.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Plus Det

Şekil 3.11 BYT'nin SEM görüntüsü üzerinde verilen EDS #1 noktasının analizi

Çizelge 3.2 Bayburt tüfit yapıli taşların fiziksel ve teknolojik özellikleri (MTA 2005)

	BBT	BST	BYT
Özgöl ağırlık (Taş blok halde)	2,37	2,71	2,74
Sertlik (Mohs)	4-5	2-3	3-4
Birim hacim ağırlık (kN/ m ³)	17	1,84	22,6
Görünür porozite (%)	20,6	24	13,3
Basınç dayanımı (MPa)	44,1	27,7	60,8
Darbe dayanımı (MPa)	0,8	0,4	3,7
Eğilme dayanımı (MPa)	12,3	5,9	22,9
Ortalama Aşınma dayanımı (cm ³ /50 cm ²)	25	63,6	26,4

Çizelge 3.3 Bayburt tüfit yapıli taşların kimyasal özellikleri (URL-1, 2014)

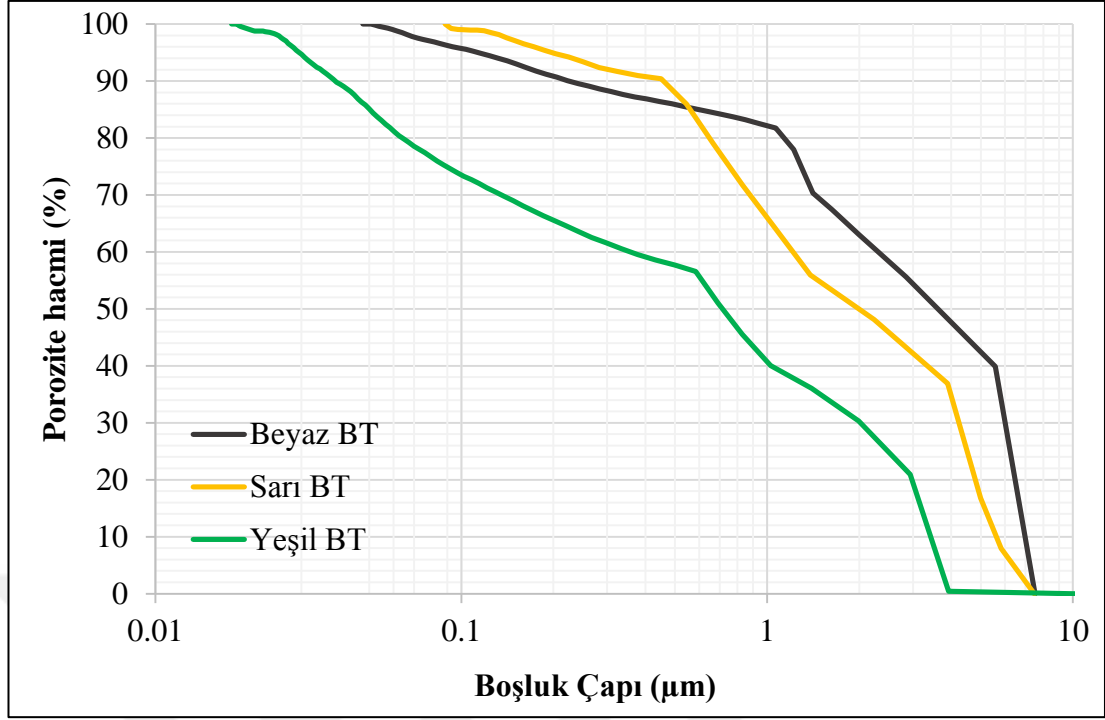
Oksitler	BBT	BST	BYT
SiO ₂	68,92	70,37	49,92
Al ₂ O ₃	11,96	11,01	10,25
Fe ₂ O ₃	0,34	0,83	6,00
CaO	3,85	2,87	13,10
MgO	1,29	0,87	2,57
SO ₃	0,21	0,15	0,26
Na ₂ O	0,23	1,36	1,45
K ₂ O	2,38	1,79	1,82
Toplam Alkali	1,80	2,54	2,65
Toplam	99,31	99,33	99,41
K.K	10,13	10,08	14,04

Çalışmada kullanılan BBT, BST ve BYT Bayburt İli Sanayi Bölgesi'nden temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan Bayburt beyaz tüfün Bayburt (Merkez)'den, Bayburt sarı tüfün Aydın-tepe ilçesine bağılı Erikdibi (Paynık) ve Akbulut (Abrans) köylerinden ve Bayburt yeşil tüfün ise Aydın-tepe ilçesine bağılı Gümüşdamla (Zargidi) köyünden çıkarıldığı tespit edilmiştir. Yerlerin bölgesel haritaları Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12 Deney çalışmasında kullanılan Bayburt Taşlarının temin edildiği bölgeler (Koral Madencilik)

Bayburt taşlarının mikro porozite analizleri ODTÜ Merkez Laboratuvarı civa iç püskürtmeli porozimetre (MIP) Quantachrome Corporation, Poremaster 60 cihazı ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.13’de verilmiştir. Buna göre 100 nm’nin altında bulunan mikro porozite yaklaşık olarak beyaz BT’de %4, sarı BT’de %1, yeşil BT’de %28 civarlarında, 1 µm altında bulunan mikro porozite beyaz BT’de %19, sarı BT’de %36, yeşil BT’de %60 hesaplanmıştır. Böylece beyaz BT’de mikro gözeneklerin en az yeşil BT’de mikro gözeneklerin en fazla oranda olduğu söylenebilir.



Şekil 3.13 Bayburt taşlarının MIP analizi sonucunda mikro porozite oranları

3.1.3 Standart CEN kumu

Harç numunelerinin hazırlanmasında, Tekirdağ Pınarbaşı yöresinin, Set Italcementi Trakya Çimento A.Ş. ürünü TS EN 196-1 standardına uygun %98 SiO₂ yapıya sahip standart CEN kumu kullanılmıştır. CEN kumu en büyük dane boyutu 2,3 mm olup 1350 g ağırlıkta poşetlerde temin edilmiştir.

3.1.4 Su

Deneyleerde, Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında bulunan saf su cihazından elde edilen saf su, karışım suyu olarak kullanılmıştır (EK-1b). Kullanılan su TS EN 196-1’de belirtilen şartlara uygundur. Kür suyu olarak Bayburt ilinin şebeke suyundan yararlanılmıştır. Şebeke suyunun kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Kullanılan kür suyunun kimyasal özellikleri

Kimyasal İçerik	Kür Suyu	Kimyasal İçerik	Kür Suyu
Amonyum (mg/L)	< 0,05	Sertlik	32,0
Nitrit (mg/L)	< 0,07	Bakır (mg/L)	< 0,10
Ph	6,65	Siyanür (µg/L)	< 0,010
Bulanıklık	0,57	Arsenik (µg/L)	0
İletkenlik (µg/L)	727	Nikel (µg/L)	0,46
Nitrat	6,5	Mangan (µg/L)	0,09
Alüminyum (µg/L)	< 0,1	Klorür (mg/L)	0,23
Demir (µg/L)	< 0,05	Flor (µg/L)	0,8
Kadmiyum (µg/L)	0,143	Sülfat (µg/L)	22
Renk		3	
* Veriler Sağlık Bakanlığı Halk Sağlığı Müdürlüğü Bayburt Halk Sağlığı Laboratuvarı tarafından üretilmiştir.			

3.2 Metot

Deneysel çalışmalarda 4 aşama uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama: ikame yapılacak BT'lerin öğütülmesidir. İkinci aşama: hamur numunelerin üretilmesi ve üretilen taze hamurların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi deneylerini kapsar. Üçüncü aşama: harç numunelerinin üretilmesi ve taze harçlar üzerinde kıvam deneyleridir. Dördüncü aşama: sertleşmiş harç numuneler üzerinde mekanik mukavemet deneyleridir. Beşinci aşama: sertleşmiş harç numuneler üzerinde yüksek sıcaklıkların mekanik mukavemetlere etkilerinin değerlendirilmesi olarak planlanmıştır. Altıncı aşama: mikroskopik ve mineralojik analizlerin gerçekleştirilmesidir.

3.2.1 Deney aşamaları

3.2.1.1 Aşama 1: Öğütme

Deneysel çalışmalara başlamadan önce Bayburt taşları en büyük dane boyutu 45 µm olacak şekilde öğütülmüştür. Öğütme prosesi aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır:

Deneysel çalışmalarda kullanılacak istenilen inceliğe ulaşmak için Bayburt beyaz, sarı ve yeşil taşları kademeli bir şekilde öğütülmüştür. Bayburt taşları ilk olarak balyoz yardımıyla parçalanarak belirli bir boyuta getirilmiştir (EK-2). Daha sonra laboratuvar tipi konkasör yardımıyla kırılarak malzeme boyutunda 0 – 2 mm boyut aralığına ulaşılmıştır. Konkasörden alınan malzemeler etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta en az bir gün bekletilmiştir. Bayburt taşları bu süre sonunda sırasıyla Los Angeles ve diskli öğütücüde 45 µm ve altı oluncaya kadar öğütülmüştür (EK-1a).

BBT'yi 45 µm boyuta indirebilmek için öncelikle 10 kg BBT 40 kg çeşitli boyutlardaki çelik bilyeler ile yatay eksenli bilyeli öğütücüde (8510/44) dk süreyle öğütülmüştür. Elde edilen toz malzemeler etüve bırakılmıştır. 105 ± 5 °C'de en az bir gün kurutulmuş toz malzemedan terazide 10 g tartılarak alınmıştır. 10 g'lık toz BBT Bayburt Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan vakumlu eleme cihazıyla 45 µm elekten 1,5 dk içerisinde elenmiştir. Eleme işlemi sonunda, elekler üzerinde kalan miktarlar tartılarak kaydedilmiştir. Gerekli hesaplamalar yapılarak elekten geçen miktar hesaplanmıştır. Malzemenin % 92'nin geçmesi sebebiyle BBT de istenilen inceliğe ulaşılmıştır. Toplam 30 kg toz halde BBT aynı işlemlerle öğütülmüştür. Aynı işlemler Bayburt sarı ve yeşil tuf içinde tekrarlanmıştır (EK-3a, EK-3b).

BST'yi 45 µm boyuta indirebilmek için 10 kg BST 40 kg çeşitli boyutlardaki çelik bilyeler ile yatay eksenli bilyeli öğütücüde (19000/45) dk süreyle öğütülmüştür. Öğütme sonrası malzemedan 10 g alınıp vakumlu eleme cihazıyla elek analizi gerçekleştirilmiştir. Malzemenin % 90'nin 45 µm geçmemesi sebebiyle BST'lere diskli öğütücüde 4 kere her seferinde 10 dk öğütme işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda BST'de istenilen inceliğe ulaşılmıştır (EK-5a)

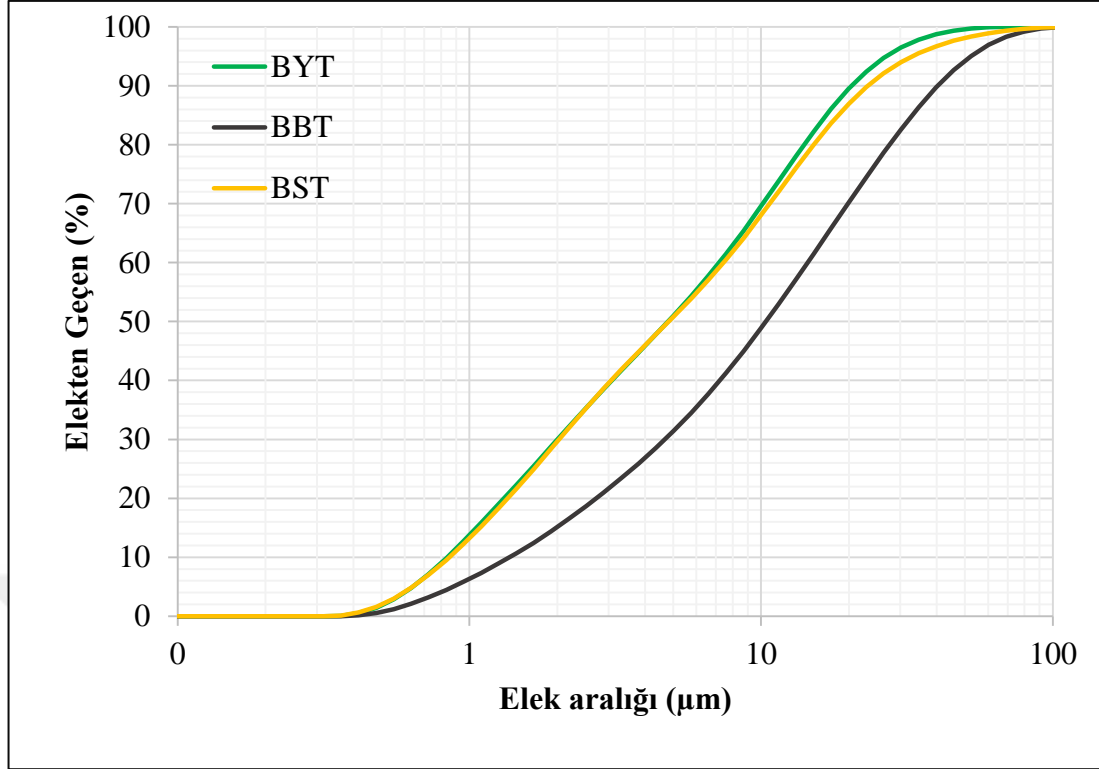
BYT'yi 45 µm boyuta indirebilmek için 10 kg BST 40 kg çeşitli boyutlardaki çelik bilyeler ile yatay eksenli bilyeli öğütücüde (42000/45) dk süreyle öğütülmüştür. Öğütme sonrası malzemedan 10 g alınıp vakumlu eleme cihazıyla elek analizi gerçekleştirilmiştir. Malzemenin % 90'nin geçmemesi sebebiyle BYT'lere diskli öğütücüde 10 kere her seferinde 10 dk öğütme işlemi yapılmıştır. Böylece BYT'nda istenilen inceliğe ulaşılmıştır (EK-4a). Homojenliği sağlanan BT'lerin ayrı ayrı 1 kg olacak şekilde paketlenmesiyle hava geçirmesi engellenmiştir (EK-3b).

Öğütülen BT'lerin özgül yüzey analizleri MTA Endüstriyel ve Teknolojik analiz laboratuvarında bulunan BET çok nokta yüzey analizi ile gerçekleştirilmiştir. BT'lerin özgül ağırlıkları ise Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Öğütülmüş BT'lerin tane dağılım analizleri Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Malvern-Mastersizer 3000 model laser particle sizer ile gerçekleştirilmiştir. BT'lerin özgül yüzey ve özgül ağırlık verileri ile tane dağılımı ile ilgili önemli bilgiler Çizelge 3.5'te verilmiştir. BT'lerin tane dağılım analizi Şekil 3.14'da logaritmik eksen üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 ve Şekil 3.14'a bakıldığında en kaba olanı BBT iken inceliği en fazla olan BST olmuştur. Çizelge 3.5' de verilen BT'lerin özgül yüzey değerleri sırasıyla 16880 cm²/g, 24220 cm²/g ve 20450 cm²/g olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan CEM I 42,5 çimentosunun özgül yüzey değerinin 3616 cm²/g olması artan ikame oranıyla birlikte özgül yüzey büyüyecek ve tanelerin su ihtiyacı artacaktır. Bu nedenle inceliğin yüksek olması üretilecek çimentoların su gereksinimini artıracaktır. Çizelge 3,5'de öğütülmüş Bayburt taşlarının özgül ağırlık değerlerine göre BBT: 2,46, BST: 2,61, BYT: 2,69 oldukları görülür. Bu değerler de BT ikameli çimentoların özgül ağırlıklarının normal bir çimento ağırlığından daha düşük değerler alacağını göstermektedir. Bu bilgiler ışığında CEM I 42,5'e göre hazırlanan çimento harçlarının su ihtiyaçlarının, çimento yerine geçecek BT'lerin oranının artmasına, tipine, inceliğine bağlı olarak değişebileceği görülmektedir.

Çizelge 3.5 Öğütülmüş toz haldeki BT'lerin fiziksel özellikleri

Özellik	Mineral Katkı Adı		
	BBT	BST	BYT
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	16880	24220	20450
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,460	2,610	2,693
% 10 geçtiği elek (µm)	1,375	0,853	0,839
% 50 geçtiği elek (µm)	10,391	4,824	4,798
% 90 geçtiği elek (µm)	40,271	23,210	20,400



Şekil 3.14 BBT, BST ve BYT'nin öğütme sonrası elek analizi

Şekil 3.14'da görüldüğü gibi beyaz Bayburt taşı diğer taşlarla aynı öğütme prosesi uygulanmasına rağmen D_{50} ve D_{90} değerleri hemen hemen iki kat daha kabardır. Bunun sebebi zeolitik karakterli yapıda bulunan molekül suyu malzemenin belli bir incelik altına inmesini zorlaştırmasındandır.

3.2.1.2 Aşama 2: Kompoze çimentoların hazırlanması ve taze hamur deneyleri

Hazırlanan toz haldeki BBT, BYT ve BST çimentoya %0 (referans), %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında ikame edilmiştir. Karışımların homojenliğini sağlamak için BT'ler her bir deney öncesinde kap içerisinde çimentoyla kuru olarak harmanlanarak yaklaşık 1 dk karıştırılmıştır. Çalışmada aynı inceliğe sahip 3 mineral katkı ve 7 farklı ikame oranının olması sebebiyle kontrol çimentosu (R) hariç toplam 18 tip çimento hazırlanmıştır. Üretilen çimentolarla ilgili bilgiler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Katkılı çimentoların katkı oranlarına göre isimlendirilmesi

No	Çimento Tipi	Katkı Oranı (%)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
1	R	0	3,120
2	BBTC1	5	3,087
3	BBTC2	10	3,054
4	BBTC3	15	3,021
5	BBTC4	20	2,988
6	BBTC5	30	2,922
7	BBTC6	40	2,856
8	BYTC1	5	3,099
9	BYTC2	10	3,077
10	BYTC3	15	3,056
11	BYTC4	20	3,035
12	BYTC5	30	2,992
13	BYTC6	40	2,949
14	BSTC1	5	3,095
15	BSTC2	10	3,069
16	BSTC3	15	3,044
17	BSTC4	20	3,018
18	BSTC5	30	2,967
19	BSTC6	40	2,916

▪ **Hamur numunelerinin hazırlanması**

Hazırlanan çimentolarla öncelikle hamur deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çimentonun fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla TS EN 196-3'e göre standart kıvam tayini, priz süresi ve hacim genişleme deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda çimento hamurlarının hazırlığında öncelikle karışım suyu mikser konulduktan sonra her bir çimento hamuru için gerekli katı malzemeler ayrı bir kaptaki homojen olarak karıştırıldıktan sonra otomatik mikserin kovasına 10 saniye içerisinde konulmuş ve cihaz çalıştırılmıştır. Cihaz 90 saniye düşük hızla (140 rpm) çalıştırıldıktan sonra durdurulmuş ve dinlenmeye alınmıştır. Bu sırada mikser kovasına yapışan çimento hamuru bir spatula ile toplanmıştır. Toplanan çimento hamuru tekrar 90 saniye yüksek hızda (280 rpm) karıştırılmıştır. Böylece toplam 180 saniye karışan çimento hamuru

20±2°C sıcaklıktaki laboratuvar ortamında, daha önceden hazırlanan cam levha üzerine konulmuş Vicat kalıbına yerleştirilmiştir. Çizelge 3.7’de standart kıvam, priz süresi ve hacim genişleme deneyleri için malzeme miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.7 Hamur numunelerinin malzeme karışım miktarları

No	Çimento Tipi	BT Oranı (%)	Bağlayıcı (BT+CEMI) (g)	Çimento (g)	Katkı (g)
1	R	0	500	500	-
2	BBTC1	5	500	475	25
3	BBTC2	10	500	450	50
4	BBTC3	15	500	425	75
5	BBTC4	20	500	400	100
6	BBTC5	30	500	350	150
7	BBTC6	40	500	300	200
8	BYTC1	5	500	475	25
9	BYTC2	10	500	450	50
10	BYTC3	15	500	425	75
11	BYTC4	20	500	400	100
12	BYTC5	30	500	350	150
13	BYTC6	40	500	300	200
14	BSTC1	5	500	475	25
15	BSTC2	10	500	450	50
16	BSTC3	15	500	425	75
17	BSTC4	20	500	400	100
18	BSTC5	30	500	350	150
19	BSTC6	40	500	300	200

▪ **Kıvam tayini deneyi**

TS EN 197-1 standardının kapsadığı tüm çimentolarda standart kıvam tayini için gerekli olan su miktarı TS EN 196-3 standardına göre belirlenmektedir. Standard kıvamdaki bir çimento pastası standart bir sondanın içine girmesine karşı belirli bir direnç gösterir. Standard kıvamda bir pasta hazırlamak için gerekli olan su miktarı, farklı miktarlarda su kullanılarak hazırlanan çimento pastalarının içine sondanın deneme amaçlı olarak batırılması ile tayin edilir.

Kıvam tayini deneyi çimentonun priz süresinin başlangıcı ve sonlanması deneylerinde çimento pastası hazırlanması için gerekli olan suyun tayin edilip kullanılması amacıyla yapılmaktadır. Fakat su miktarının kesin tayin edilebilmesi için birçok tekrarlı deneme yapılması gerekmektedir. Kıvam tayini deneyinin uygulanabilmesi için vikat aleti kullanılmaktadır (EK-1c).

Çalışmada çimentoların kıvam tayini deneyleri, TS EN 196-3'e göre yapılmıştır. 3.2.1.2'de belirtildiği gibi hazırlanan hamur numuneler üzerinde Vicat sondası ile kıvam tayini yapılmıştır. Bunun için vicat sondasına 1 cm çapındaki vicat iğnesi takılmıştır. Hamur halkaya yerleştirilmeden önce Vicat halkası ve taban camı, ince yağ ile hafifçe yağlanmıştır. Hamur Vicat halkasına yerleştirildikten sonra Vicat halkası sonda altına konulmuştur. Sonda numuneye teğet olacak şekilde hamurun üstüne getirilmiştir. Çimento hamurunun hazırlanmaya başladığından itibaren 240 ± 10 saniyeyi geçmeyecek şekilde numune sonda altına yerleştirilmiştir ve sonra Vicat sondası serbest şekilde bırakılmıştır. Sonda ile numunenin tabanı arasındaki mesafe 30 saniye içinde 6 ± 2 mm mesafede olduğunda kıvam (su miktarı) belirlenmiştir (EK-1c, EK-6a).

▪ Priz süresi tayini deneyi

TS EN 196-3 standardına göre priz süresi tayini deneyi yapılmaktadır. Priz süresi, standart bir iğnenin standart kıvamdaki çimento pastası içerisinde belirlenmiş bir derinliğe kadar girmesini gözlemek suretiyle tayin edilir.

Priz süresi tayini içinde Vicat aletinin sonda olan ucu yerine uzunluğu en az 45 mm ve çapı $1,13 \pm 0,05$ mm olan iğne takılmıştır. Hazırlanan çimento hamuru numuneleri Vicat halkası içinde yüzeyi düzlenmiş bir biçimde Vicat aletinin altına konulmuştur. Numunelerin karışıma başladığı andan itibaren her 10 dakikada bir Vicat iğnesinin serbest düşmeyle (kendi ağırlığına) hamurun içine batması sağlanmıştır. İğnenin hamur içine batma miktarı 6 ± 3 mm oluncaya kadar bu işlem tekrarlanmıştır. Bu mesafe sağlandığında priz başlama süresi olarak kayıt edilmiştir. Daha sonra hamur Vicat halkası ile birlikte ters çevrilmiş ve 30 dakika arayla iğnenin hamur içine batması sağlanmış ve okumalara devam edilmiştir. Bu sırada iğne her batırılma sırasında aynı yere gelmeyecek şekilde numune çevrilerek farklı okumalar gerçekleştirilmiştir. Priz

sonu süresi iğne numunenin üstünde ilk 0,05 mm'ye kadar batabildiği an olarak belirlenmiştir (EK-1c, EK-6b).

▪ Hacim genişleme deneyi

Çimentolarda magnezyum oksit (MgO)'in belirli bir değerin üstünde olması zararlıdır. Çünkü bu madde, su ile girdiği tepkime sonunda önemli derecede hacim artmasına neden olarak yapılarda çatlamalara yol açabilir. Bu bakımdan hacim genişmesi deneyi, sertleşmiş bir çimento hamurunun katılaştıktan sonra hacminin sabit kalıp kalmayacağını belirlemek için yapılır. Hacim genişmesi deneyi, TS EN 196-3'e göre yapılmıştır. Hacim genişmesi deneyi için Le Chatelier ve kaynatma kazanı aleti kullanılmıştır. Her bir grup için 2'er kalıp olacak şekilde kontrol çimentosu ve ikameli çimento hamurları hazırlanmıştır. Hazırlanan hamurlar Le Chatelier aletine yerleştirilmiştir. Yerleştirme esnasında silindirin yarık kısımlarının açılmaması için silindir parmakla hafifçe sıkıştırılmış ve çubuklar lehim yerlerinden ip ile bağlanmıştır. Le Chatelier aleti önceden hazırlanmış cam üzerine oturtulup hamur el ile kalıbın içine doldurulmuştur. Herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmamıştır. Kalıbın üzeri spatula ile düzeltilmiştir. Yağlı kısım alta gelecek şekilde cam levhayla silindirin üzeri kapatılmıştır. Le Chatelier aletine bağlanan ipler çözülüp 24 saat 20 ± 2 C° sıcaklıkta su içinde bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda çubuk uçları arasındaki mesafe (A) ölçülmüştür. Kalıpların üzerindeki cam levhalar, dikkatlice kaldırılarak kalıp çubukları herhangi bir yere temas etmeyecek şekilde kaynatma suyuna bırakılmıştır. Kalıpların bulunduğu su dolu kaynatma kabı 30 dakika içinde kaynama ısısına gelecek şekilde ısıtılmıştır ve su banyosu kaynama sıcaklığında 3 saat bekletilmiştir. Kaynama esnasında buharlaşma sonucu suyun azalmaması için kaynama kabının ağzı kapatılmıştır. Bu sürenin sonunda çubuk uçlarının açıklığı ölçülmüştür (B). Numune, laboratuvar sıcaklığına kadar soğutulmuş ve çubuk uçları arasındaki açıklık aynı şekilde ölçülmüştür (C).

(B-A), (C-B), (C-A) milimetre cinsinden ayrı ayrı hesaplanmıştır. C-A, milimetre cinsinden toplam hacim genişlemesini verir (EK-1c, EK-6c).

3.2.1.3 Aşama 3: Taze harç deneyleri

Fiziksel özellikleri belirlenen çimentoların reolojik davranışını belirleyebilmek amacıyla TS EN 196-1'e göre harç numuneleri üretilmiştir.

▪ Harç numunelerinin hazırlanması

Çizelge 3.8 Harç numunelerinin malzeme karışım miktarları

No	Çimento Tipi	Katkı Oranı	Bağlayıcı (g)	Çimento (g)	Katkı (g)	Su (g)	Kum (g)
1	R	0	450	450	-	225	1350±5
2	BBTC1	5	450	427,5	22,5	225	1350±5
3	BBTC2	10	450	405	45	225	1350±5
4	BBTC3	15	450	382,5	67,5	225	1350±5
5	BBTC4	20	450	360	90	225	1350±5
6	BBTC5	30	450	315	135	225	1350±5
7	BBTC6	40	450	270	180	225	1350±5
8	BYTC1	5	450	427,5	22,5	225	1350±5
9	BYTC2	10	450	405	45	225	1350±5
10	BYTC3	15	450	382,5	67,5	225	1350±5
11	BYTC4	20	450	360	90	225	1350±5
12	BYTC5	30	450	315	135	225	1350±5
13	BYTC6	40	450	270	180	225	1350±5
14	BSTC1	5	450	427,5	22,5	225	1350±5
15	BSTC2	10	450	405	45	225	1350±5
16	BSTC3	15	450	382,5	67,5	225	1350±5
17	BSTC4	20	450	360	90	225	1350±5
18	BSTC5	30	450	315	135	225	1350±5
19	BSTC6	40	450	270	180	225	1350±5

Çimento harçları, TS EN 196-1'e göre hazırlanmıştır. Hazırlanacak harç numunelerinin malzeme karışım miktarları, Çizelge 3.8' de verilmiştir. Her bir grup harç numunesi için Çizelge 3.8'de belirtilen çimento ve BT miktarları 0,01 gr hassasiyetindeki tartı ile tartıldıktan sonra temiz bir kaba konulmuştur. Kaptaki

malzeme homojen bir dağılım sağlayabilmek için 1 dk süreyle karıştırılmıştır. Çimento ve BT karışımı mikserin kovasında bulunan 225 ml su içine 10 saniye içinde döküldükten sonra otomatik karıştırıcı çalıştırılmıştır. 30 saniye düşük devirde çalışan karıştırıcıya 30 saniye sonunda kum eklenmeye başlanmıştır. Karıştırma sürerken 30 saniye içinde harca kum ilave edilmiştir. Kum ilavesinden hemen sonra 30 saniye süreyle yüksek hızda karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Toplam 135 dakika sonra mikser 15 saniye süreyle dinlenmeye alınmış ve bu sırada mikser kovasının kenarlarına yapışan harçlar spatula ile temizlenmiştir. Harç bu süre içinde kovada harmanlanarak homojen bir karışım sağlanmaya çalışılmıştır. Bu işlem bittikten sonra (1 dakika 45 saniye sonra) karıştırıcı 60 saniye süreyle yüksek hızda çalıştırılmıştır.

▪ **Yayılma Tablası Deneyi**

Mineral bağlayıcı ve agrega ihtiva eden harcın karıştırıldıktan hemen sonra taze haldeki kıvamını, yayılma değerinin belirlenmesi yoluyla tayini esasına dayanır.

Bu deney ASTM C240'a göre yapılmıştır. Öncelikle yağlanmış kalıp yayılma tablasının ortasına yerleştirilmiştir. Çimento harç makinesinde hazırlanan harçtan 20 dm³'lük deney numunesi alınmıştır. Yayılma çapını belirlemek için harç, kesik koni şeklindeki kalıba iki tabaka halinde doldurulup her bir tabaka sıkıştırma çubuğu ile 16 defa çarpma işlemi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Kalıbın üstünden taşan harç bir spatula yardımıyla alınıp üst yüzey düzeltildikten sonra kalıp yavaşça ve tam düşey olacak şekilde yukarıya doğru çekilmiştir. Tablanın yan tarafında bulunan kol sayesinde numuneye 5 saniyede bir vuruş olmak üzere toplam 25 vuruş yapılarak harcın yayılması sağlanmıştır. Düşürme işlemi bittikten sonra tablaya yayılan harç tabakasının çapı cetvelle birbirine dik iki doğrultuda 1 mm hassasiyetinde ölçülüp ortalaması alınarak yayılma değeri bulunmuştur (EK-7c, EK-7d).

3.2.1.4 Aşama 4: Sertleşmiş harç deneyleri

Fiziksel özellikleri belirlenen çimentoların mekanik mukavemetlerini, birim hacim ağırlıklarını, kapiler su emme oranlarını, su emme ve porozite değerlerini belirleyebilmek amacıyla TS EN 196-1'e göre harç numuneleri üretilmiştir. Deneysel çalışmalar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

▪ Harç numunelerinin hazırlanması

Aşama 3'teki harç hazırlığı mikserde tamamlandıktan sonra çimento harcı daha önceden sarsma cihazına yerleştirilmiş olan 40x40x160 mm boyutlu çelik kalıba %75'i dolacak şekilde yerleştirilmiştir. Kalıpta bulunan harç dakikada 60 düşey darbe hareketi yapan sarsma makinesinde 60 s. süreyle sıkıştırılmıştır. Sıkışan ilk kademe harç üzerine mikserin kovaşında bulunan harç konulmuş ve tekrar 60 s süreyle sıkıştırılmıştır. İki kademe halinde sıkışan harç numuneler sarsma cihazından alınarak harcın fazlası bir master yardımıyla sıyrılmıştır ve prizmaların yüzeyi masterın yavaş yavaş hareket ettirilmesi sonucu düzleştirilmiştir. Prizmaları tanımlamak amacıyla kalıplar etiketlenmiştir ve 20 ± 2 °C sıcaklıktaki laboratuvar ortamında 24 saat süreyle dinlendirilmişlerdir. 24 saat sonunda kalıplar sökülerek, her numune deneylerde kullanılmak üzere kirece doymuş suyun bulunduğu kür havuzuna konulmuştur (EK-1b, EK-1c, EK-1d, EK-7a, EK-7b, EK-7c).

▪ Eğilme Dayanımı Tayini Deneyi

Kür kabininde belirli sürelerde bekletilip uygun zamanlarda çıkarılıp dayanım deneyi yapılacak numunelerin yaşları, deneyin başında çimento ve suyun karıştırıldığı andan itibaren hesaplanmıştır. Eğilme ve basınç deneyleri için Yüksel Kaya Ltd. Şti üretimi 20 ton kapasiteli hidrolik çimento presi kullanılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı deneyleri 2, 28 ve 90 günlük harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. Farklı tip çimento harçlarını temsili her bir gün için 2'şer numune olmak üzere bir çimento tipi için 6 numune kullanılmıştır. Çalışmada 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler öncelikli olarak eğilme dayanımına tabi tutularak 2 eşit parçaya ayrılmıştır (EK-7f). Daha sonra her bir parça için basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

Eğilmede çekme dayanımı deneyi için havuzdan çıkarılan harç numuneleri kuru bir havlu ile kurulandıktan sonra öncelikle tartılmıştır. Daha sonra TS EN 196-1 standardına göre 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik harç numuneleri tam orta noktalarından aksenal yük uygulanarak kırılmıştır. Her numune yan yüzeylerinden yüklemek suretiyle deneye tabi tutulmuştur. Kırılma kuvvetine göre numunelerin eğilmede çekme dayanımları (3.1) formülü ile belirlenmiştir.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.1)$$

R_f : Eğilme dayanımı (N/ mm²)
 b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)
 F_f : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N)
 l : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

▪ Basınç Dayanımı Tayini Deneyi

Çimentoların en önemli uygunluk özeliği olan basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı deneyinde iki ayrı parçaya ayrılan prizmatik harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyinden elde edilen en büyük kırılma kuvvetinin numune kesit alanına bölünmesiyle numunenin ilgili yaştaki basınç dayanımı belirlenmiştir.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (3.2)$$

R_c : Basınç mukavemeti (N/ mm²)
 F_c : Kırılmadaki en büyük kuvvet (N)
 b : Basınç plakasının kenar uzunluğu (40 mm)'dur.

Çimentoların dayanım sınıfları 28 günlük basınç deneyi sonucunda elde edilen basınç dayanımlarına göre değerlendirilmektedir. Harçlarda yapılan basınç dayanımı deneyi TS EN 196-1 çimento standardı dikkate alınarak yapılmıştır. Her yarım prizma yan yüzeylerinden yüklemek suretiyle deneye tabi tutulmuştur (EK-7g).

▪ Su emme deneyi (Özgül ağırlık, su emme oranı ve porozite)

Üretilen harç örneklerin birim ağırlık, görünür porozite ve su emme deneyleri 2, 28 ve 90 günlük kür sonrası 40x40x160 mm prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Harç örneklerin birim hacim ağırlık, görünür porozite ve su emme deneyleri ASTM C 642'e göre tespit edilmiştir.

Birim ağırlık bir malzemenin boşlukları dâhil olmak üzere birim hacminin ağırlığıdır ve malzemenin kuru ağırlığının görünen hacmine oranıdır.

Su emme deneyini yapmak için kür havuzundan farklı ikame oranları için ikişer numune çıkarılmıştır. Çıkarılan numuneler tartılıp ağırlıkları tespit edilmiştir (P_1). Suyu doymun halde bulunan numunelerin su dolu kovanın içerisine daldırılması sonucu

su içerisindeki ağırlığı ölçülmüştür (P_2). Su içerisinde alınan numuneler 105 ± 5 °C sıcaklığında 24 saat süreyle bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda fırından alınan malzemelerin ortam sıcaklığına kadar soğumaları sağlanmış ve numuneler ölçülmüştür (P_0) (EK-7e). Bulunan veriler 3.3 denklemine yerine yazılarak numunelerin özgül ağırlıkları bulunmuştur.

$$\Delta = \beta = \frac{P_0}{P_1 - P_2} \quad (3.3)$$

β : Özgül ağırlık

P_0 : Kuru ağırlık

$P_1 - P_2$: Görünen hacim' dir.

Su emme deneyi malzeme bünyesinde ne kadar boşluk olduğuna dair bilgi verir. Bu boşluklar dona dayanıklılığı saptama yönünden önemli olan dışa açık boşluklardır ve su emme deneyi ile ölçülebilir.

Deneyle 2,28 ve 90 günlük kür sonunda $40 \times 40 \times 160$ mm harç numuneleri üzerinde ASTM C 642 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu deney birim hacim ağırlık deneyi ile paralel bir şekilde yapılmıştır ve elde edilen veriler 3.4 verilen formüle yerine yazılarak numunelerin su emme miktarları hesaplanmıştır.

$$S_a = \frac{\text{Emilen Su Miktarı}}{\text{Cismin Kuru Ağırlığı}} = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \times 100 \quad (3.4)$$

S_a : Ağırlıkça su emme

P_0 : Kuru ağırlık

P_1 : Suyu doymuş, havadaki ağırlık 'dır.

Bir katı madde ile bunun içinde dağılmış olan boşlukların oluşturduğu hacme porozite denir. Porozite boşluk hacminin görünür hacme oranı olarak tanımlanır. Kür süresini tamamlayan numuneler, kür havuzundan çıkarılarak porozite tayini deneyine tabi tutulmuştur. Porozite deneyi birim ağırlık ve su emme deneyleri ile birlikte yapılmış olup numunelerin poroziteleri 3.6 denklemi ile belirlenmiştir.

$$P(\%) = \frac{P_1 - P_0}{P_1 - P_2} \quad (3.6)$$

P: Porozite (%),
 P₀: Numunelerin etiv kurusu ağırlığı (g),
 P₁: Numunelerin doymuş yüzey kuru ağırlığı (g),
 P₂: Numunelerin su altındaki ağırlığı (g)'dir.

▪ Kapiler su emme deneyi

Kılcal su emme, malzemenin suya değen yüzünden zamanla emilen su miktarı ile belirlenir. Çapı çok küçük olan kılcal boşluklardan su kılcallık etkisi ile yükselir.

Çalışma kapsamında harç numuneleri üzerinde kılcallık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 90 günlük kür sonunda 40x40x160 mm harç numuneleri üzerinde ASTM C1585 ve TS 4045 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu kapsamda kür havuzundan alınan numuneler 50±2 C° sıcaklığa sahip etüve 3 gün kalacak şekilde konulmuştur. Bu sürenin sonunda etüvden alınan malzemelerin ortam sıcaklığına kadar soğutulması sağlanmıştır. Suyu maruz bırakılacak kısmın yan yüzeyleri silikon ile kaplanmış böylece yan yüzeylerden su girişi engellenip sadece taban kısmından su alması sağlanmıştır. Silikonla kaplanmış numuneler tartılıp ağırlıkları tespit edilmiştir. Düzeneğe yerleştirilen numunelerin tabanından 2 mm yüksekte olacak şekilde su doldurulmuştur. Belli zaman ağırlıklarında (5 dk, 10 dk, 15 dk, 20 dk, 30 dk, 60 dk, 6 saate kadar her saat başı, 9 güne kadar günde bir defa) ölçümler yapılmış ve 3.5 denkleminde veriler yerine yazılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır (EK-7h).

$$l = \frac{m_t}{a \times d} \quad (3.5)$$

l: emilim
 m_t: Numunenin t zamanındaki değişimi (g)
 a: Numunenin suya maruz kalan alanı (mm²)
 d: Suyun yoğunluğu (g/mm³)

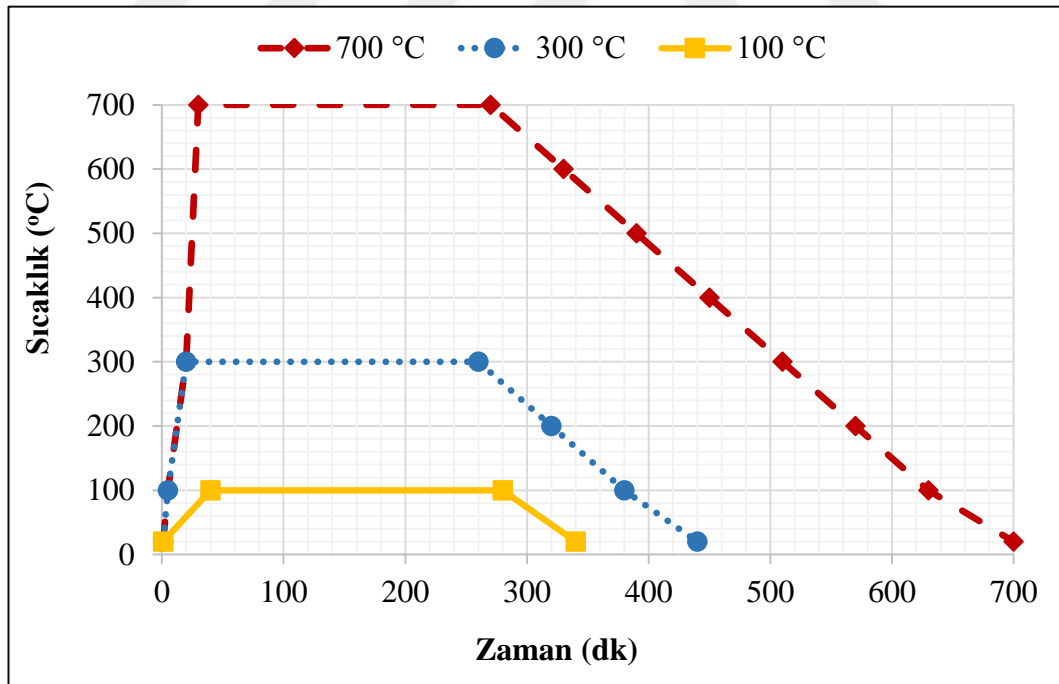
3.2.1.5 Aşama 5: Sertleşmiş harçlar üzerinde yüksek sıcaklık deneyleri

TS EN 196-1'e göre üretilen çimento harç numunelerinin yüksek sıcaklıklarda davranışlarını ve mekanik mukavemet değerlerini belirleyebilmek amacıyla 100 °C, 300 °C ve 700 °C sıcaklıklarında harç numuneler belli sürelerde bekletildikten sonra

soğumaya bırakılmış ve ardından mekanik mukavemet deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Katkılı çimentoların yüksek sıcaklık karşısında göstereceği direnç yüksek sıcaklık deneyi ile belirlenmiştir. Üretilen harç numunelerinde yüksek sıcaklık sonrası oluşan fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Harç üretiminde kullanılan agreganın sabit özellikte olmasıyla yüksek sıcaklıkla ortaya çıkan farklılıklar farklı çimento hamurlarının yüksek sıcaklık sonrası değişimlerine bağlıdır.

Standart kum kullanılarak TS EN 196-1 standardına göre farklı çimentolarla üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numuneleri 90 gün süreyle kirece doygun kür havuzunda 20 ± 2 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. Daha sonra harç numuneleri sırasıyla 100 °C, 300 °C ve 700 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle yüksek sıcaklık fırınlarında bekletilmiştir (EK-1b). Bu kapsamda numuneler üzerinde ısıl işlemlerin uygulanışı zamana bağlı diyagramları Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15 Yüksek sıcaklık etkisinin zamana bağlı değişimi

Harç numuneleri 100 °C ısınma hızı 5,6°C/dk, 300 °C ve 700 °C ısınma hızı 14 °C/dk olacak şekilde yüksek sıcaklık fırınında ısıtılmıştır. Numuneler 4 saat belirlenen sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Isıl işlem süresi sonunda numuneler 24 saat süreyle havada yavaş soğumaya bırakılmıştır. Havada soğutma işlemi, numunelerin bulunduğu arabalı rafın fırının soğumasından sonra dışarıya çıkarılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Yüksek sıcaklık uygulamasından sonra harç numunelerinin renk değişimi, kütle kaybı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı belirlenmiştir. Ayrıca 700 °C'ye maruz kalan numunelerin SEM ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece yüksek sıcaklık etkisinde kalan farklı çimentolarla üretilmiş harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinde oluşan değişimler incelenmiştir (EK-8a,EK-8b,EK-9a).

3.2.1.6 Mikroskobik ve mineralojik analizler

▪ Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları görebilme olanağı sınırlıdır. Bu nedenle görüntü iletimini sağlayan ışık yollarının merceklerle değiştirilerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Ancak bu cihazlar, gerek büyütme miktarlarının sınırlı oluşu gerekse elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma imkânının olmayışı nedeniyle araştırmacıları bu temel üzerinde yeni sistemler geliştirmeye itmiştir. Elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanımı ile yüksek büyütmelerde üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir. Elektro-optik prensipler çerçevesinde tasarlanmış taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope - SEM) bu amaca hizmet eden cihazlardan birisidir.

Taramalı Elektron Mikroskobu, birçok dalda araştırma-geliştirme çalışmalarında kullanımı yanında, mikro elektronikte yonga üretiminde, sanayinin değişik kollarında hata analizlerinde, biyolojik bilimlerde, tıp ve kriminal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk ticari taramalı elektron mikroskobu 1965'de kullanılmaya başlanmış, bundan sonra teknik gelişmeler birbirini izlemiştir. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında

elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir. Gerek ayırım gücü, gerek odak derinliği gerekse görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir.

SEM'de sıvı olmayan ve sıvı özellik taşımayan her türlü, iletken olan ve olmayan numune incelenebilir. Her çeşit metaller, tekstiller, fiberler, plastikler polimerler, parçacıklar (kum, çakıl, polen gibi) vs. incelenebilir. İletken olmayan numuneler çok ince iletken malzemeyle kaplanarak incelenebilir hale getirilir. Biyolojik numuneler sıvı ihtiva edebilir, bu tür malzemeleri inceleyebilmek için numunenin yapısı ve şekli bozulmadan kurutularak mikroskopta incelemeye elverişli hale getirilir. Hazırlık basamaklarından geçtikten sonra numune elektron mikroskobunda incelenmeye hazır hale gelir. Numunenin yapısına göre değişmekte olan vakum süresi beklenir; bu süre ortalama 30 dakikadır. Vakum süresi tamamlandıktan sonra numunenin yüzey şeklinin resmi alınabilir. Numunenin elementel analizini yapmak 3 dakika sürer. Bir numunenin incelenmesi tamamen numunenin yapısına bağlı olmasına rağmen ortalama bir saat sürmektedir.

Çimento içerisine katılan veya çimento yerine ikame edilen mineralojik katkıların çimento hidrasyonundaki davranışlarının analizi için SEM cihazlarının kullanılmasıyla ilk günlerdeki hidrasyon bileşikleri ile dayanım kazandıktan sonraki hidrasyon bileşiklerinin arasında mukayese yapmak mümkün olmaktadır.

Elde edilen çimento hamur numunelerinin 7 ve 90 günlük, 700 °C yüksek ısıya maruz kalan harç numunelerinin ise 90 günlük kür süreleri sonundaki morfolojilerini görüntülemek amacıyla Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu (FEI Nova NanoSEM 450 - 1.2 nm çözünürlüğe sahip) ile gerekli analizler yapılmıştır. Analizleri yapılacak olan numuneler seçilirken görüntü alınacak yüzeyin düz, temiz ve gözenekli olmasına dikkat edilmiştir. Numuneler üzerine Au-Pd ile 5,05 nm kalınlığında kaplama yapılmış ve daha sonra analizler gerçekleştirilmiştir (EK-8a).

▪ X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi

Kristallerin atomlarının geometrik düzeni ve aralarındaki mesafe hakkındaki çoğu bilgi bu yöntemle elde edilmektedir. Bundan dolayı x-ışınları kırınımı (XRD) kristalin bileşiklerin kalitatif olarak tanınmasında pratik ve uygun bir yöntemdir. X-ışını kırınımı, aşırı miktarlardaki X-ışını verilerini işleyebilen çok yüksek hıza sahip bilgisayarların kullanımıyla büyük ölçüde gelişmiştir.

XRD tekniği, bir kristal düzleminin birim hücre boyutlarıyla birlikte kristalin atom düzlemleri arasındaki uzaklığını belirleyebilen bir tekniktir. X-ışınının içinden geçtiği madde elektronları arasındaki etkileşme neticesinde saçılma oluşur. Eğer X-ışınları bir kristaldeki düzenli ortam tarafından saçılırsa, saçılmayı yapan merkezler arasındaki uzaklık X-ışınının dalga boyu ile aynı mertebeden olduğu için saçılan ışınlar olumlu ya da olumsuz girişim yaparlar. Bu durumda kırınım meydana gelir.

XRD çalışmalarında, dalga boyu sabit x-ışınları kullanılır. X-ışınları kaynağı olarak X-ışını tüpleri kullanılmaktadır. Dalga boyu sabit X-ışınları elde etmek için, ısıtılan bir tungsten filamandan ısı tahriki ile yayınlanan elektronlar elektromanyetik bir alan içinde hızlandırılır. Hızlandırılarak yüksek enerji kazandırılan bu elektron demeti bir anota (bakır gibi) çarptığında, elektronlar anotun elektron kabuklarına girerler. Yüksek enerjili elektron demeti çekirdeğe yakın kabuktaki bir elektrona çarparak onu yerinden çıkartırsa, elektron kaybından dolayı atom kararsız hale geçer ve boş kalan elektronun yeri daha yüksek enerjili kabuktaki bir elektron tarafından doldurulur. Bu elektron geçişinden kaynaklanan enerji farkı, karakteristik x-ışını fotonu olarak yayınlanır. X-ışınları örgüdeki atomların düzenlenişine bağlı olarak farklı numunelerde farklı bir şekilde kırınıma uğrar. Vakum altındaki kapalı tüpte bulunan filaman, akımın uygulanmasıyla ısıtılır. Akım ne kadar yüksekse filamandan yayılan elektron sayısı da o kadar yüksek olur. Daha sonra hedef ile filaman yüksek bir potansiyel (15-60 kilovolt) arasına uygulanır. Bu potansiyel sayesinde elektronların kinetik enerjileri artar ve hedefe doğru hızlanırlar. Bu elektronlar hedefe çarptıklarında X-ışınları üretilir. Bu X-ışınları hedef malzemenin bir karakteristiğidir ve bunların toplanması sağlanarak numune üzerine düşürülür. X-ışını bir atoma çarptığında, atom etrafındaki

elektronlar gelen ışınla aynı frekansta titreşmeye başlar. Hemen hemen her doğrultuda yıkıcı bir girişim söz konusudur. Yani bir araya gelen dalgalar farklı fazdadırlar.

Bununla birlikte bir kristaldeki atomlar düzenli bir şekilde yerleşmiş olduklarından çok az doğrultularda yapıcı girişim meydana gelir. Bu yüzden kırınımına uğramış bir ışın birbirini güçlendiren çok sayıda dalganın bir karışımıdır. Kırınımına uğrayan bu ışınlar sensör sayesinde dedekte edilir. Bunlar genelde dönüştürücü devreler kullanılarak sayım hızı sinyallerine dönüştürülürler. X ışını numuneye çarpıp kırınımına uğradığı zaman, Bragg kanunu uygulayarak numuneyi meydana getiren atomların yüzeyleri arasındaki mesafe ölçülebilir.

XRD analizleri ile çimento fazları tanımlanabilmekte ve faz kompozisyonları kısa sürede, düşük hata payları ile bulunabilmektedir. X-ışınları kırınımı günümüzde malzeme karakterizasyonu için endüstriyel ve bilimsel araştırmalarda; fizik, kimya, biyoloji, biyokimya, malzeme-metalürji, jeoloji, madencilik, çimento, seramik ve teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca XRD uygulamaları; malzemenin içerdiği fazların belirlenmesi, nicel faz analizi, sıcaklık ve basınç gibi fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerinin incelenmesi, tanecik boyutu ve yönelimi belirleme, kimyasal kompozisyonu (bileşimi) belirleme, kristal örgü sabitlerinin bulunması şeklinde sıralanabilir.

Elde edilen çimento hamur numunelerinin 7 ve 90 günlük, 700 °C yüksek ısıya maruz kalan harç numunelerinin ise 90 günlük kür süreleri sonunda içerdiği fazları belirlemek amacıyla Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan XRD (Bruker D8 Diskover) cihazı ile analizler yapılmıştır (EK-8b).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Deneysel çalışmalarda kullanılan farklı oranlarda ve farklı yapıda BT ikameli çimentoların özellikleri, hamur ve harç deney sonuçları olarak bu bölümde incelenmiştir.

4.1 Çimento Hamurları Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları

Çizelge 4.1 BT katkıli çimento hamurları ile kontrol çimento hamuru deney sonuçları

No	Çimento Tipi	Katkı Oranı (%)	Standart Kıvam (Su ihtiyacı %)	Priz Başlangıcı (dk)	Priz Bitişi (dk)	Hacim Genleşme (mm)
1	R (CEM I)	0	31,6	170	228	1,00
2	BBTC1	5	33,4	174	241	1,00
3	BBTC2	10	35,0	179	249	2,00
4	BBTC3	15	36,6	186	251	1,75
5	BBTC4	20	38,4	189	252	2,00
6	BBTC5	30	42,4	211	294	1,50
7	BBTC6	40	45,6	220	321	1,75
8	BYTC1	5	32,0	177	242	1,50
9	BYTC2	10	32,8	175	245	1,25
10	BYTC3	15	33,2	173	282	1,00
11	BYTC4	20	33,6	164	286	1,00
12	BYTC5	30	34,0	161	290	0,50
13	BYTC6	40	34,8	159	294	0,50
14	BSTC1	5	31,8	148	229	0,50
15	BSTC2	10	32,4	147	221	0,50
16	BSTC3	15	33,0	145	216	1,00
17	BSTC4	20	33,6	142	240	0,50
18	BSTC5	30	34,4	139	237	0,50
19	BSTC6	40	35,2	135	231	0,25

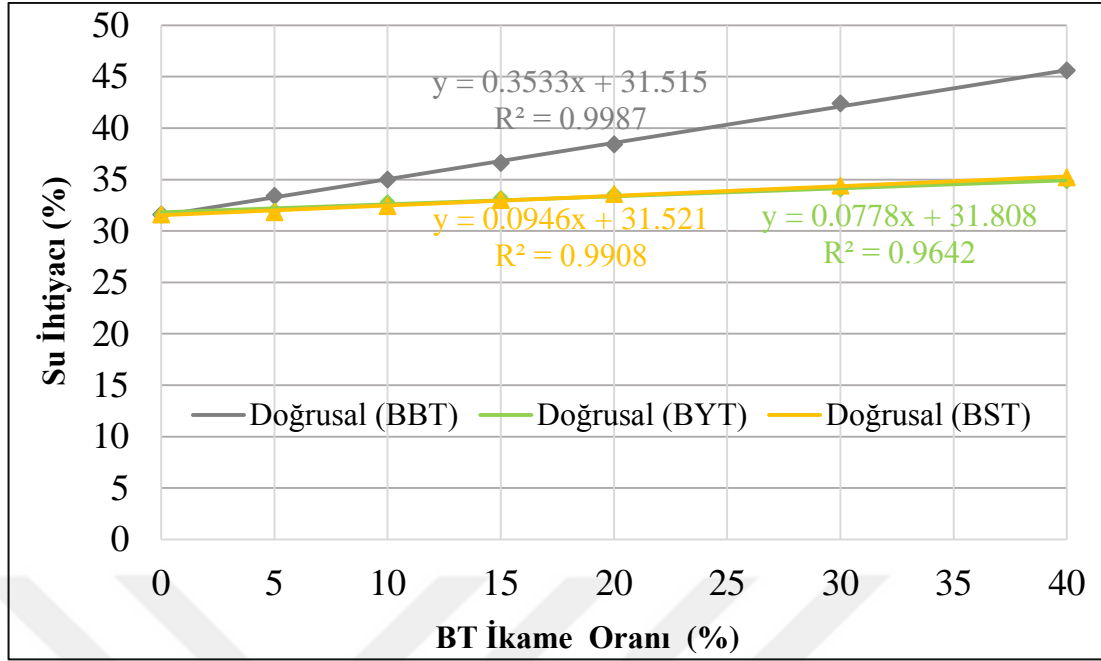
4.1.1 Standart kıvam tayini deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Referans CEM I (42.5R) ve BT ikameli çimento hamur numunelerinden elde edilen standart kıvam deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’deki kıvam deneyi sonuçları ile BT ikame oranı arasındaki korelasyonlar Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Deneylerde referans olarak alınan CEM I 42,5 çimentosunun normal kıvam suyu ihtiyacı %31,6 olurken, katkı çeşidi ve oranındaki artışa bağlı olarak normal kıvam suyu ihtiyacı %45,6’ya kadar artmıştır. Bayburt beyaz, sarı ve yeşil taş ikameli çimentolarda normal kıvam suyu ihtiyacında ikame oranına bağlı olarak sürekli bir artış olduğu Şekil 4.1’de görülmüştür. Kontrol çimento hamuruna göre; en yüksek su ihtiyacının %45,6 oranıyla BBTC6 çimento hamurunda, en düşük su ihtiyacının ise %31,8 ile BSTC1 çimento hamurunda olduğu bulunmuştur. Buna göre yeşil ve sarı Bayburt taşı ikameli çimentoların normal kıvamları için gerekli olan su ihtiyaçları beyaz Bayburt taşı ikameli çimentolara göre oldukça düşüktür.

Yapılan çalışmada bulunan sonuçlar neticesinde kontrol çimento numunesine göre,

- BBT’nin %5 ,% 10,% 15,% 20,% 30 ve % 40 ikame oranlarıyla birlikte standart kıvam için gerekli su miktarında sırasıyla; BBTC1’de %1,8, BBTC2’de %3,4, BBTC3’de %5, BBTC4’de %6,8, BBTC5’de %10,8 ve BBTC6’da %14 oranlarında artmıştır.
- BYT’nin artan ikame oranları ile birlikte standart kıvam için gerekli su miktarı sırasıyla BYTC1’de %0,4, BYTC2’de %1,2, BYTC3’te %1,6, BYTC4’te %2, BYTC5’te %2,4 ve BYTC6’da %3,2 oranlarında artmıştır.
- BST’nin ikame oranının artması ile standart kıvam için gerekli su miktarı da BSTC1’de % 0,2, BSTC2’de %0,8, BSTC3’de %1,4, BSTC4’de %2, BSTC5’de %2,8, BSTC6’da %3,6 oranlarında artmıştır.

Özgül yüzeyi en düşük olan BBT ikameli çimentoların su ihtiyacı, umulanın aksine, düşük değerde olması beklenirken en yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin kil içerikli mineral yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bilindiği gibi kilsi malzemeler levhamsı yapılarından dolayı aşırı su ihtiyacına sahip olmaktadır. Bu davranış ilerde mekanik mukavemet deney sonuçları ile de değerlendirilecektir.

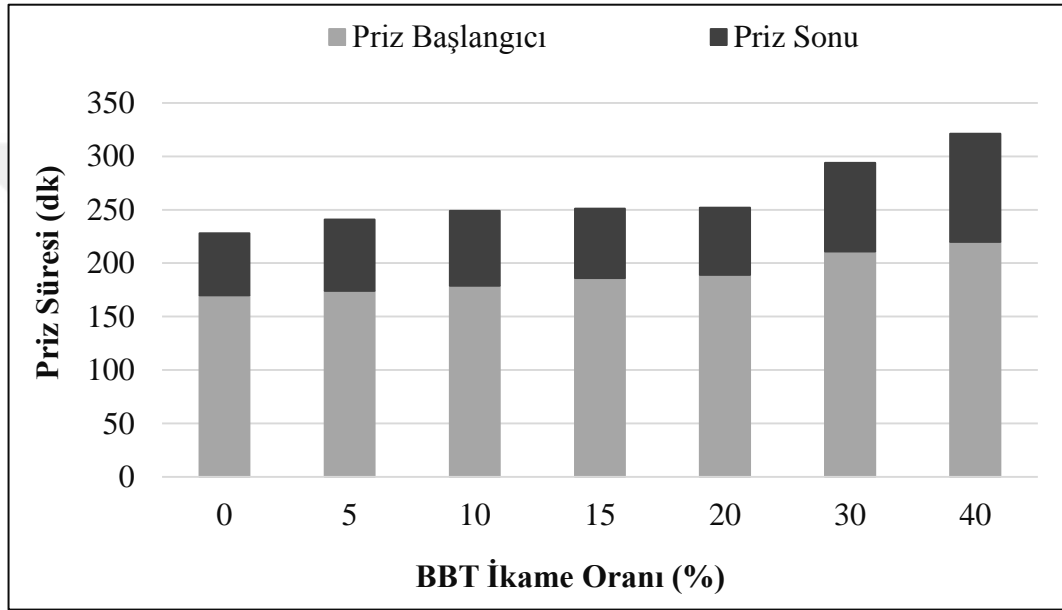


Şekil 4.1 Çimentoların standart kıvam – BT ikame oranı ilişkisi korelasyon analizi

Şekil 4.1’de verilen korelasyon eğrisine göre çimentoya katılan BT oranı artışına bağlı olarak, standart kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarlarında artış olmuştur. Çimento hamurlarında su ihtiyacının incelik, özgül yüzey, kimyasal yapı ve porozite gibi değerlere bağlı olarak değişebileceği bilinmektedir. Bu artışın en önemli sebeplerinden birisi yüksek ikame oranları sebebiyle incelikteki ve buna bağlı olarak özgül yüzeydeki artıştır. Deneysel çalışma sonuçlarına göre BBT ikameli çimentolar BST ve BYT ikameli çimentolardan daha fazla su ihtiyacına sahiptir. Aslında doğal puzolanlar, ince taneli olmaları sebebiyle ve çimentonun yerine kullanıldıklarında toplam kohezyondaki azalma sebebiyle çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı bir etki de oluşturmaktadırlar. Bu etki taze betonun kıvamını ve dolayısıyla işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Ancak doğal puzolanlar, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırabilmektedirler. Puzolanın çimentodaki ikame oranı arttıkça, normal kıvam için gerekli su miktarı da artmaktadır. Ancak % 30 düzeyindeki tras miktarlarından sonra su ihtiyacı kayda değer derecede değişim göstermemektedir (Erdoğan,1996; Erdoğan vd,2009).

4.1.2 Priz başlangıcı ve priz bitişi tayini deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Üretilen çimentoların priz başlangıcı ve bitiş sürelerinin BT ikame oranına bağlı sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. BT ikameli çimentoların priz süreleri ile BT oranı arasındaki karşılaştırma diyagramları histogram olarak Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Şekil 4.5’de ise priz süreleri ile BT oranları arasındaki korelasyonlar grafik olarak gösterilmiştir.



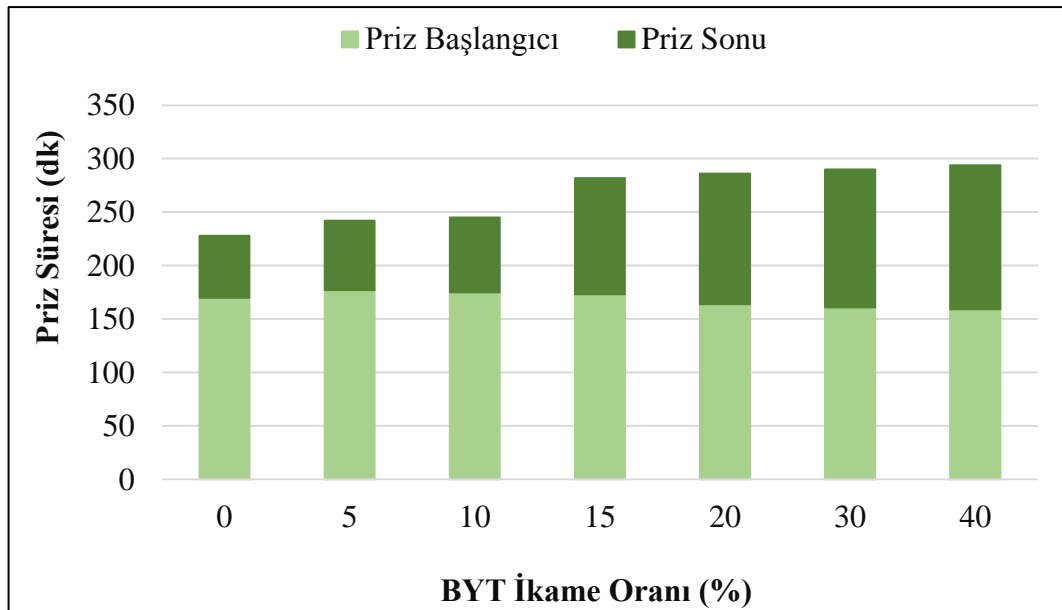
Şekil 4.2 BBT ikameli çimentoların priz başlangıcı süreleri

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2’de çimento yerine BBT kullanımının priz başlangıcı ve bitiş süreleri ile doğru orantılı bir ilişki oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.5’de çimentoya ikame edilen BBT oranının artmasıyla priz sürelerinin artışı arasındaki ilişki lineer bir fonksiyonla en az %95 doğrulukla bağdaşmaktadır. BBT ikameli çimento hamurlarında priz başlangıcı ve bitiş süreleri kontrol çimento hamuruna göre sırasıyla;

- %5 BBT ikamesinde priz başlangıcı 4 dk sonra, priz bitişi 13 dk sonra tamamlanmıştır.
- %10 BBT ikamesinde priz başlangıcı 9 dk sonra, priz bitişi 21 dk sonra tamamlanmıştır.

- %15 BBT ikamesinde priz başlangıcı 16 dk sonra, priz bitişi 23 dk sonra tamamlanmıştır.
- %20 BBT ikamesinde priz başlangıcı 19 dk sonra, priz bitişi 24 dk sonra tamamlanmıştır.
- %30 BBT ikamesinde priz başlangıcı 41 dk sonra, priz bitişi 66 dk sonra tamamlanmıştır.
- %40 BBT ikamesinde priz başlangıcı 50 dk sonra, priz bitişi 93 dk sonra tamamlanmıştır.

Kontrol çimento hamurunun priz başlangıcı 170 dk, priz bitişi 228 dk olduğuna göre, BBT ikameli çimentoların priz başlangıcı en fazla 220 dk'da, priz bitişi ise 321 dk'da olmaktadır. Böylece, elde edilen sonuçlara göre üretilen tüm BBT ikameli çimentolar TS EN 196-3'de belirtilen “çimentonun priz başlangıcı 1 saatten az olamaz, çimentonun priz bitişi 10 saatten geç olamaz.” kuralını sağlamaktadır. Ancak %20 - %30 ikame oranlarına ait priz bitiş süreleri beklenenden daha uzun sürmüştür. Böylece üretilen bu çimentolarda erken kalıp alma sürelerinin uzayabileceği düşünülebilir.

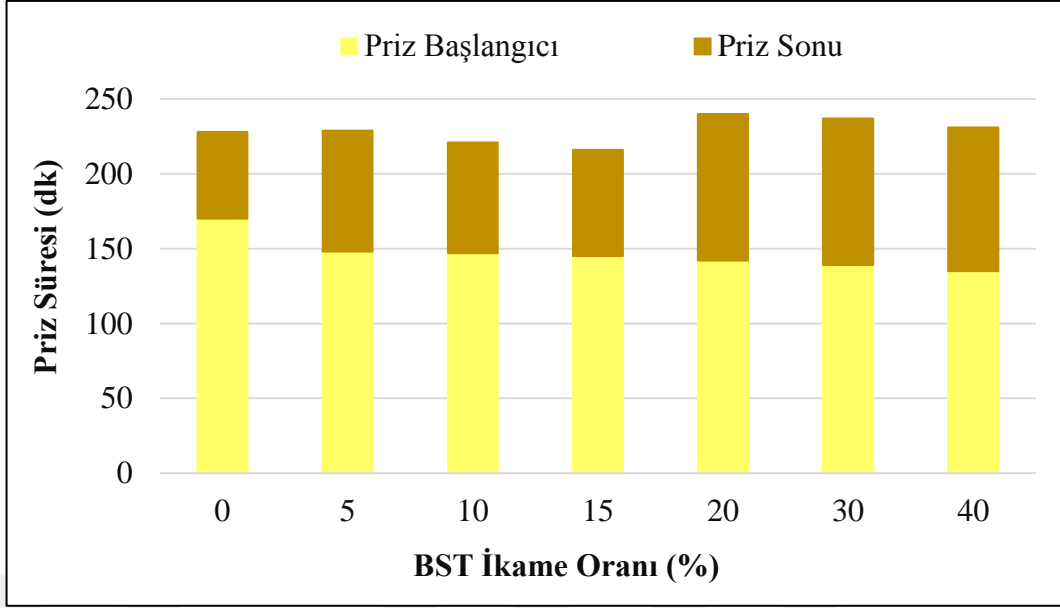


Şekil 4.3 BYT ikameli çimentoların priz başlangıcı süreleri

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, BYT ikameli çimento hamurlarında BYT ikame oranının artışıyla priz başlangıç süresi belli bir orana kadar artarken daha sonrası için azalış göstermiş, priz bitişi süresi sürekli artmıştır. BYT ikameli çimento hamurlarının priz başlangıcı ve bitişi süreleri kontrol çimento hamuruna göre sırasıyla;

- % 5 BYT ikamesinde priz başlangıcı 7 dk sonra, priz bitişi 14 dk sonra tamamlanmıştır.
- % 10 BYT ikamesinde priz başlangıcı 5 dk sonra, priz bitişi 17 dk sonra tamamlanmıştır.
- % 15 BYT ikamesinde priz başlangıcı 3 dk sonra, priz bitişi 54 dk sonra tamamlanmıştır.
- % 20 BYT ikamesinde priz başlangıcı 6 dk önce, priz bitişi 58 dk sonra tamamlanmıştır.
- % 30 BYT ikamesinde priz başlangıcı 9 dk önce, priz bitişi 62 dk sonra tamamlanmıştır.
- %40 BYT ikamesinde priz başlangıcı 11 dk önce, priz bitişi 66 dk sonra tamamlanmıştır.

BYT ikameli çimentoların priz başlangıcı en fazla 177 dk’da, priz bitişi ise 294 dk’da olmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre üretilen tüm BYT ikameli çimentolar priz süreleri bakımından TS EN 196-3’e uygun davranış göstermiştir. Tüm ikame oranlarında çimento hamurlarının priz bitiş süreleri Şekil 4.5’de görüldüğü gibi lineer bir artış göstermiştir. Böylece üretilen bu çimentolarda erken kalıp alma sürelerinin uzayabileceği düşünülebilir.

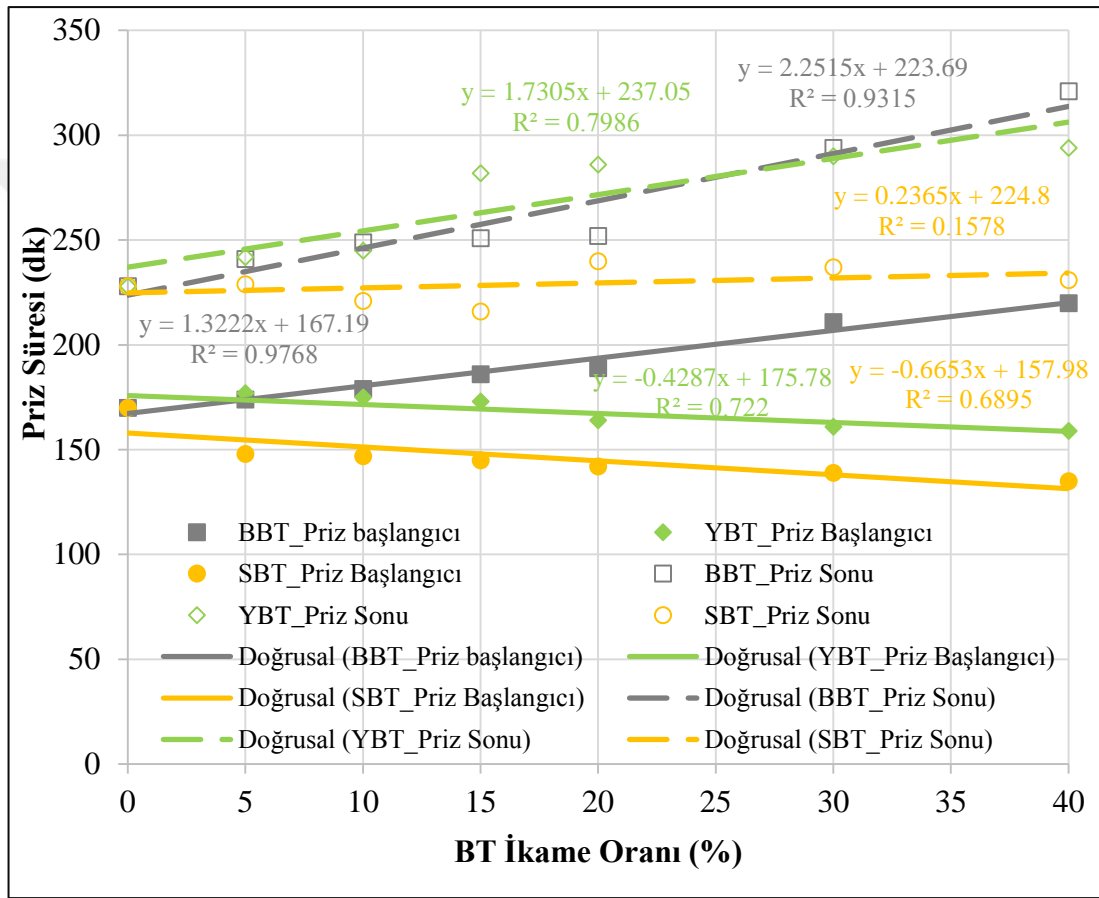


Şekil 4.4 BST ikameli çimentoların priz başlangıcı süreleri

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, BT ikameli çimento hamurlarında BST ikame oranındaki artışla priz başlangıç süreleri azalırken, priz bitişi sürelerinde artış ve azalmalar görülmüştür. BST ikameli çimento hamurlarının priz başlangıcı ve bitişi süreleri kontrol çimento hamuruna göre sırasıyla;

- %5 BST ikamesinde priz başlangıcı 22 dk önce, priz bitişi 1 dk sonra tamamlanmıştır.
- %10 BST ikamesinde priz başlangıcı 23 dk önce, priz bitişi 7 dk önce tamamlanmıştır.
- %15 BST ikamesinde priz başlangıcı 25 dk önce, priz bitişi 12 dk önce tamamlanmıştır.
- %20 BST ikamesinde priz başlangıcı 28 dk önce, priz bitişi 12 dk sonra tamamlanmıştır.
- %30 BST ikamesinde priz başlangıcı 31 dk önce, priz bitişi 9 dk sonra tamamlanmıştır.
- %40 BST ikamesinde priz başlangıcı 35 dk önce, priz bitişi 3 dk sonra tamamlanmıştır.

BST ikameli çimentoların priz başlangıcı en az 135 dk'da, priz bitişi ise en geç 240 dk'da olmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre üretilen tüm BST ikameli çimentolar priz süreleri bakımından TS EN 196-3'e uygun davranış göstermiştir. Tüm ikame oranlarında çimento hamurlarının priz bitiş süreleri Şekil 4.5'de görüldüğü gibi lineer bir artış göstermiştir. Böylece üretilen bu çimentolarda erken kalıp alma sürelerinin uzayabileceği düşünülebilir.



Şekil 4.5 BT ikame oranı ile priz süreleri arasındaki korelasyon ilişkisi

Tüfün priz yapma özelliği, puzolanik aktivitesi incelik ve kimyasal yapısına bağlı olarak değişir. Priz süreleri incelendiğinde; normal kıvam suyu ihtiyacına benzer şekilde, kullanılan katkı çeşidi ve oranına bağlı olarak priz sürelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Priz başlama süreleri 135-220 dk arasında değişirken, priz bitiş süreleri 216-321 dk arasında olmuştur. BBT ikamesi çimentonun priz başlama ve bitiş sürelerini artırmıştır. BYT ikamesi çimentonun priz başlama süresini kısaltmış, priz

bitiş sürelerini uzatmıştır. BST ikamesi çimentonun priz başlama süresini kısaltmış, priz bitiş sürelerinde referans çimentosuna göre çok anlamlı bir fark oluşturmamıştır.

Bu sonuçlara göre, BST'nin standart kıvam için gerekli su ihtiyacının daha az, inceliğın yüksek ve içeriğindeki silis miktarının diğer BT'lere oranla daha yüksek olması sebebiyle BST ikameli çimento hamurlarında priz başlangıç süreleri kısalmış priz bitiş sürelerinde ise önemli değişiklikler olmamıştır. BYT'nin standart kıvam için gerekli su ihtiyacının BBT'ye oranla daha düşük olması, malzemenin daha ince olup çimento ile tepkimeye girmesi sonucu daha erken priz alıp ve sonlanmıştır. Bir araştırmada yüksek aktifliğe sahip bir tuf kullanımıyla C₃S hidratasyonunun hızlandığı tespit edilmiştir (Massazza,1992; Erdoğan,2009). Çalışmada kullanılan CEM I tip çimentonun C₃S (alit) miktarı yaklaşık %70 oranında olup çimentoda C₂S (belit) bulunmamaktadır. Alit çimentosu olarak da adlandırılabilen bu çimentolar erken dayanımı yüksek çimento niteliğindedir. Bu sebeple C₃S'in hidratasyon ürünlerinden olan Portlandit daha fazla miktarda reaksiyon ürünü olarak açığa çıkmakta ve yüksek aktifliğe sahip BT'lerin (BST ve BYT) ikame oranları arttıkça hidratasyon ürünü olarak oluşan Portlandit ile tepkimeye girerek fazladan CSH üreterek priz başlangıç ve bitiş sürelerini kısaltmaktadır.

4.1.3 Hacim genleşmesi deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Portland çimentosunda hammadde olarak kalker ve kil kullanılır. Bazen kalker saf halde bulunmayıp magnezyum karbonatta içerir. Sıcaklık etkisiyle magnezyum karbonat (MgCO₃), MgO ve CO₂'e dönüşür. Aynı zamanda kalkerde sıcaklık etkisiyle ayrılarak kalsiyum oksit (CaO) bileşimini oluşturur. MgO ve CaO su ile karşılaştığı zaman, magnezyum hidroksit ve kalsiyum hidroksite dönüşür. Bu kimyasal reaksiyon sırasında ısı açığa çıkarak hacim genleşmesine neden olur (Erdoğan 2004). Çizelge 4.1'de BT katkı türleriyle oluşturulan ikameli çimentoların hacim genleşmesi değerleri verilmiştir.

TS EN 196-3'e göre belirlenen katkılı çimentolar ve Portland çimentosunun hacim genleşmesi sonucuna bakıldığında, katkılı çimentolarda ikame oranı artışıyla birlikte hacim genleşmelerinde genellikle düşüş olduğu görülmüştür. BBT ikamesi ile hacim genleşme değerleri 1 mm'ye kadar artarken, BST ve BYT ikameleri hacim genleşmeyi olumlu etkilemiş ve genleşme değerlerini azaltmıştır. Bunun nedeni olarak, yerine

koyma metoduna göre, azaltılan Portland çimentosu miktarı ile birlikte Mg ve CaO bileşiklerinin oranında da azalma olması gösterilebilir. Hacim genişmelerinin 0,25 – 2 mm arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerlerde TS EN 196–3’te belirtilen 10 mm sınır değerinden düşüktür. Hacim genişmesi deney sonuçlarına bakıldığında, çimentoda BT ikame oranı arttıkça hacim genişmesi değerlerinde pek değişiklik olmamıştır. Yani BT’nin hacim genişmesi sonuçlarına olumsuz bir etkisi yoktur.

4.2 Çimento Harçları Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları

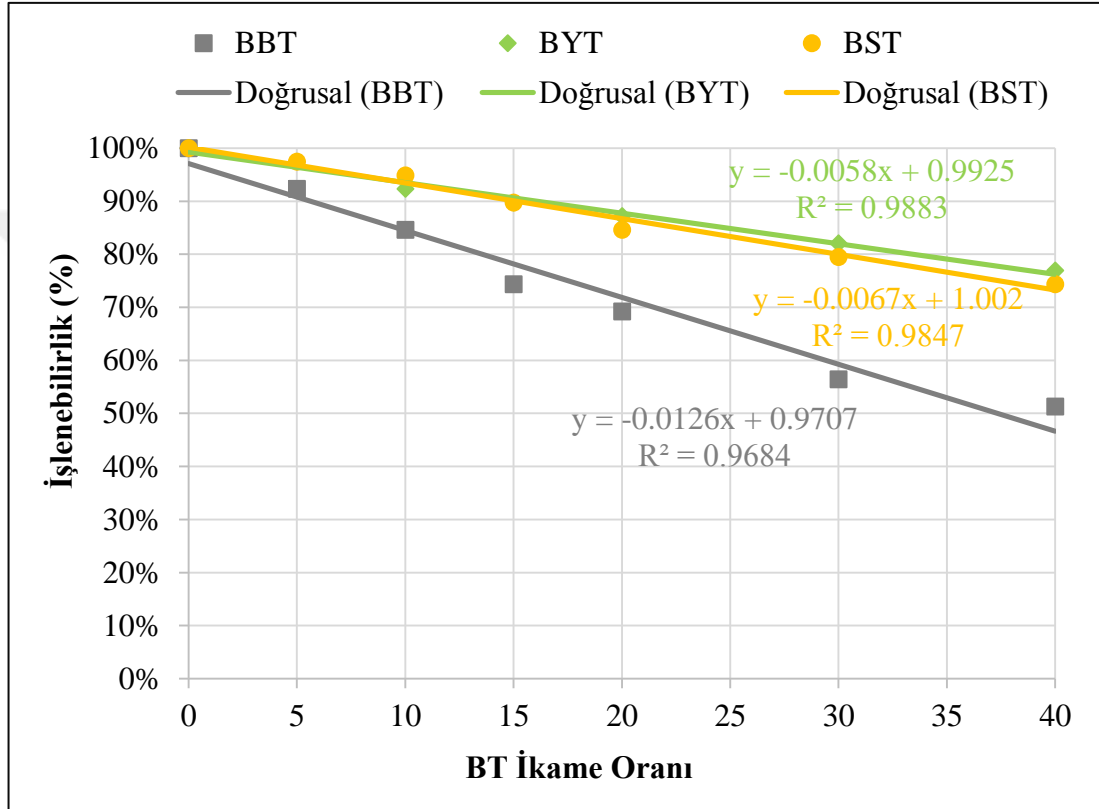
4.2.1 Yayılma tablası deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Çizelge 4.2 BT ikameli harçların yayılma tablası deney sonuçları

Çimento Tipi	Katkı Oranı (%)	Yayılma (cm)	Çimento Tipi	Katkı Oranı (%)	Yayılma (cm)	Çimento Tipi	Katkı Oranı (%)	Yayılma (cm)
R	0	19,5	R	0	19,5	R	0	19,5
BBTC1	5	18,0	BYTC1	5	19,0	BSTC1	5	19,0
BBTC2	10	16,5	BYTC2	10	18,0	BSTC2	10	18,5
BBTC3	15	14,5	BYTC3	15	17,5	BSTC3	15	17,5
BBTC4	20	13,5	BYTC4	20	17,0	BSTC4	20	16,5
BBTC5	30	11,0	BYTC5	30	16,0	BSTC5	30	15,5
BBTC6	40	10,0	BYTC6	40	15,0	BSTC6	40	14,5

BT ikameli harçlar üzerinde gerçekleştirilen yayılma tablası deneyi sonucunda elde edilen yayılma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’e göre BT ikamesiyle birlikte taze çimento harçlarının yayılma çapları azalmıştır. Böylece üretilen çimentoların BT ikameleri arttıkça işlenebilirliğe olumsuz etki oluşturacağı belirlenmiştir. Bunun sebebi ikame yapılan BT’lerin yüksek özgül yüzeye sahip olmaları ve bu sebeple aşırı adsorbe su ihtiyaçlarının olmasıdır. Aynı miktarda su ile üretilen ancak ikame oranı artan çimento harçlarında işlenebilirlik olumsuz etkilenmiştir. Çalışmada her üç BT’nin işlenebilirliğe etkisi göz önüne alındığında BYT ve BST’nin etkilerinin BBT’ye göre daha düşük seviyede olduğu belirtilebilir. Bu davranış kıvam deneylerinde elde edilen su ihtiyacı oranlarında da benzer sonuçlar

üretmiştir. BBT ikamesi ile üretilen çimento harçlarında işlenebilirlik kaybı kontrol harcına göre %50 gibi yüksek bir değer oluştururken, BST ve BYT ikamesi ile üretilen çimento harçlarında işlenebilirlik kaybı kontrol harcına göre yaklaşık %25 oranında kalmıştır. BST ve BYT'deki bu davranış su ihtiyacının BBT'ye göre daha az olduğunun bir göstergesi olarak belirtilebilir.



Şekil 4.6 BT ikameli harçların yayılma tablası değerleri arasındaki korelasyon ilişkisi

Yayılma tablası deney sonuçlarına ve Şekil 4.6'ya bakıldığında en fazla yayılmayı referans numuneye göre, %2.56 işlenebilirlik kaybıyla %5 ikameli BST ve BYT katkılı harçlar gösterirken, en düşük yayılmayı %48,72 işlenebilirlik kaybıyla %40 ikameli BBT katkılı harç göstermiştir. BT ikame oranının artmasıyla birlikte yayılma değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Bunun sebebi ise standart kıvam için gerekli suyun ikame oranı arttıkça artmasıdır. TS EN 196-1'e göre yapılan çalışmada su/çimento oranı ($s/\ç=0,5$) sabit tutulmuştur. İkame oranının artışıyla birlikte standart kıvam için gerekli olan su miktarının da artması harç numunelerinde işlenebilirliği azaltacağından en az yayılmayı BBT ikameli harçlar göstermiştir. BYT ve BST ikameli harçların

yayılma değerleri benzerlik göstermiştir. BBT'nin artan ikame oranları ile birlikte işlenebilirlik özelliğinin diğer BT'lere oranla azaldığı görülmektedir. Bu durum numuneyi kalıba yerleştirme aşamasında zorlanılacağı anlamına gelir.

Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi referans harcının yayılma değeri %100 olarak kabul edilirse; BBT'nin çimentodaki ikame oranı arttıkça yayılma (işlenebilirlik) değeri sırasıyla %7,7, %15,4, %25,6, %30,8, %43,6 ve %48,7 oranında; BYT'nin çimentodaki ikame oranı arttıkça yayılma değeri sırasıyla %2,6, %7,7, %10,3, %12,8, %17,9 ve %23,1 oranında; BST'nin çimentodaki ikame oranı arttıkça yayılma değeri sırasıyla %2,6, %5,1, %10,3, %15,4, %20,5 ve %25,6 oranında azalmıştır.

4.2.2 Eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları

%5, %10, %15, %20, %30 ve %40 ikame oranlarında BBT, BYT ve BST ile üretilen çimentolarla hazırlanan standart harç örnekler üzerinde gerçekleştirilen 2, 28, 90 ve 270 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Deneyler 2'şer numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve Çizelge 4.3'de standart sapma değerleri ile birlikte gösterilmiştir.

BT ikame oranları ile 2 gün yaşındaki sertleşmiş harç numunelerin eğilme dayanımları arasındaki korelasyon eğrileri Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'e göre erken eğilme dayanımları ile BT ikame oranları arasında ikinci dereceden fonksiyon R^2 değerleri 0,7 – 1 arasında anlamlı düzeyde üretilmiştir. Üretilen fonksiyonlar temel alınarak BT'lerin %10 ikame oranlarına kadar referans çimento harcının erken eğilme dayanımlarına etkileri %10 güven aralığı içinde olduğundan dolayı ikame etkisinin nötr olduğu söylenebilir.

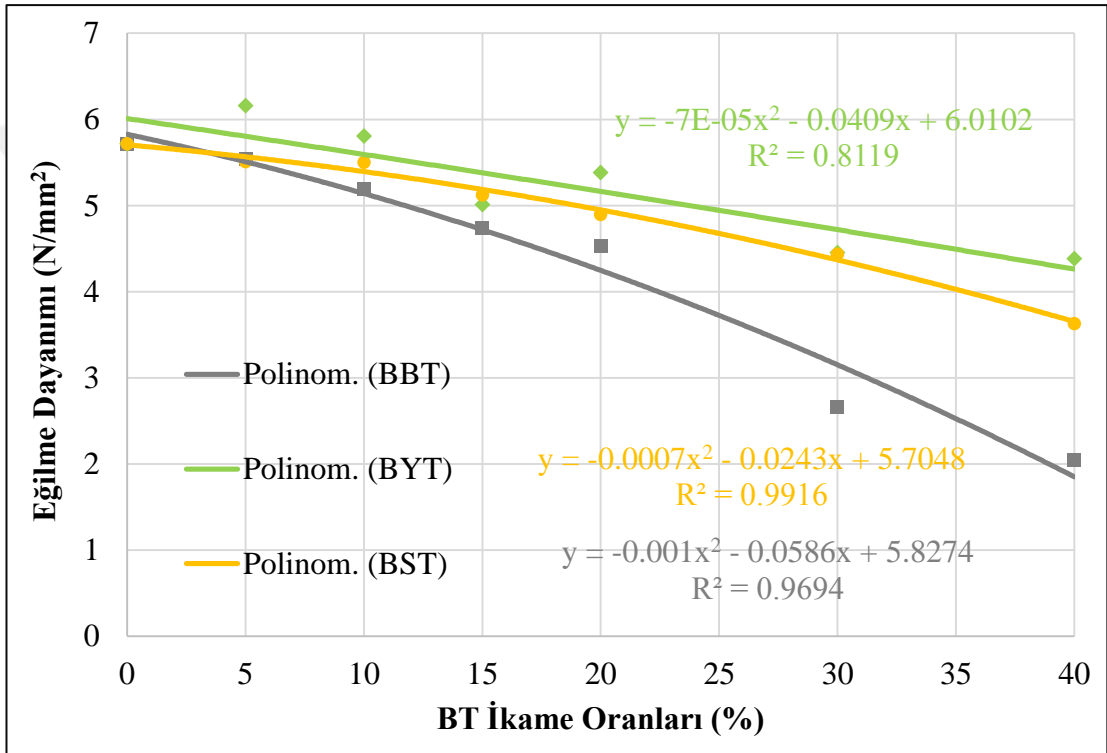
Çizelge 4.3 Eğilme dayanımı deney sonuçları

No	Çimento Tipi	Katkı (%)	n	2 gün (N/mm ²)		28 gün (N/mm ²)		90 gün (N/mm ²)		270 gün (N/mm ²)	
				\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
1	R	0	2	5,72	0,04	8,25	0,17	7,35	0,11	6,79	0,10
2	BBTC1	5	2	5,54	0,08	7,68	0,40	7,81	0,58	9,35	1,17
3	BBTC2	10	2	5,20	0,33	7,52	0,19	7,32	0,11	8,25	0,46
4	BBTC3	15	2	4,74	0,35	6,35	0,38	6,97	0,32	7,56	0,63
5	BBTC4	20	2	4,54	0,25	7,45	0,47	7,37	0,47	6,74	0,34
6	BBTC5	30	2	2,66	0,05	6,27	0,09	5,78	0,43	4,06	0,33
7	BBTC6	40	2	2,05	0,08	3,86	0,06	5,02	0,10	4,31	0,38
8	BYTC1	5	2	6,16	0,02	7,29	0,30	8,14	0,36	10,39	1,05
9	BYTC2	10	2	5,81	0,13	6,68	0,61	7,57	0,14	9,22	0,54
10	BYTC3	15	2	5,01	0,23	5,95	0,13	7,00	0,08	8,85	0,98
11	BYTC4	20	2	5,39	0,29	4,68	0,36	7,01	0,08	8,80	0,64
12	BYTC5	30	2	4,46	0,05	4,69	0,26	6,72	0,13	7,97	1,01
13	BYTC6	40	2	4,39	0,07	4,66	0,97	6,25	0,31	6,19	1,32
14	BSTC1	5	2	5,51	0,18	5,83	0,60	6,56	0,20	10,48	0,72
15	BSTC2	10	2	5,50	0,52	5,48	0,01	6,10	0,20	9,74	1,02
16	BSTC3	15	2	5,13	0,24	4,72	0,08	6,29	0,27	8,77	0,53
17	BSTC4	20	2	4,90	0,05	5,47	0,43	6,26	0,33	9,37	0,03
18	BSTC5	30	2	4,44	0,04	4,00	0,11	5,44	0,19	8,87	0,99
19	BSTC6	40	2	3,63	0,08	4,68	0,37	5,29	0,20	5,77	0,89

BT ikameli çimento harçlarının 2 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları kontrol çimentosu numunelerine göre değerlendirildiğinde;

- BBT'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 artan ikame oranı ile birlikte eğilme dayanımında sırasıyla %3,1,%9,1,%17,1,%20,6,%53,5 ve %64,2 oranında kayıplar yaşanmıştır.

- BYT'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 oranında çimentodaki ikamesi arttıkça eğilme dayanımında sırasıyla %7,7,%1,6 dayanım artışları görülürken, %12,4,%5,8,%22,0 ve %23,3 oranında dayanım kayıpları görülmüştür.
- BST'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 kullanımı ile eğilme dayanımında sırasıyla %3,7,%3,8,%10,3,%14,3,%22,4 ve %36,5 dayanım kayıpları görülmüştür.



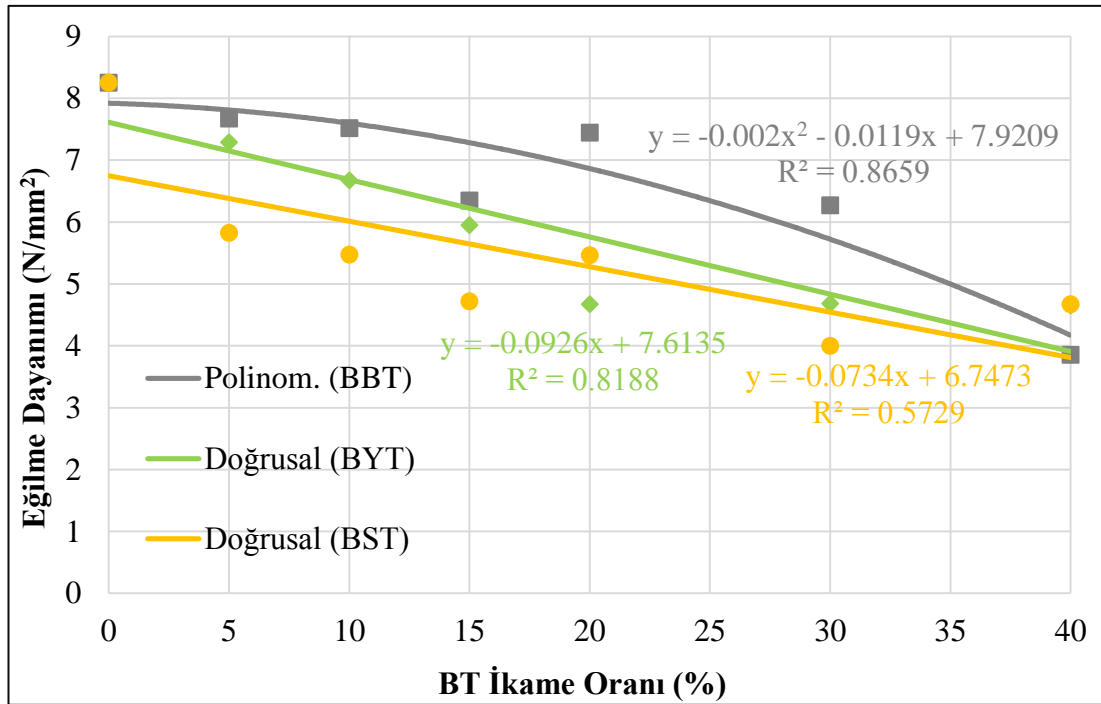
Şekil 4.7 2 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon eğrileri

Tüm BT'lerin erken eğilme dayanımlarına göre %5 BYT ikamesi referans harcının eğilme dayanımını yaklaşık %8 artırmıştır. Doğal puzolanlar klinkerin hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girer bu nedenle su ilavesinden sonra ortamda $Ca(OH)_2$ birikene kadar Portland çimentosuna seyreltici bir etki yapar. Ama zamanla $Ca(OH)_2$ birikmesi sonucunda ve puzolanların bu bileşenlerle reaksiyonu neticesinde harcın dayanımı artar. CEM I tipi çimentoya mineral katkı ikamesi sonucunda çimentonun oluşturduğu bağlayıcı C-S-H oluşumlarının miktarı erken süreçlerde azalır ve bundan dolayı erken eğilme dayanımları daha düşük elde edilir (Çavdar,

2004). Ancak nitelikli kür ile nihai dayanımın referans numunesi ile karşılaştırılması sonucu ya eşdeğer sonuçlar verir ya da daha yüksek değerlere ulaşılır.

BT ikame oranları ile 28 gün yaşındaki sertleşmiş harç numunelerin eğilme dayanımları arasındaki korelasyon Şekil 4.8’de fonksiyon eğrileri olarak verilmiştir. Çizelge 4.3’de verilen BT ikameli çimento harçlarının 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları kontrol çimentosu numunelerine göre değerlendirildiğinde;

- BBT’nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 kullanımı ile eğilme dayanımında sırasıyla %6,9,%8,8,%23,0, %9,7,%24,0 ve %53,2 oranında kayıplar yaşanmıştır.
- BYT’nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 ikamesi sonucu eğilme dayanımında sırasıyla %11,6,%19,0, %27,9,%43,3,%43,2 ve %43,5 oranında dayanım kayıpları görülmüştür.
- BST’nin çimentoya %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 oranlarında ikamesi sonucu eğilme dayanımında sırasıyla %29,3,%33,6,%42,8,%33,7,%51,5 ve %43,3 dayanım kayıpları görülmüştür.



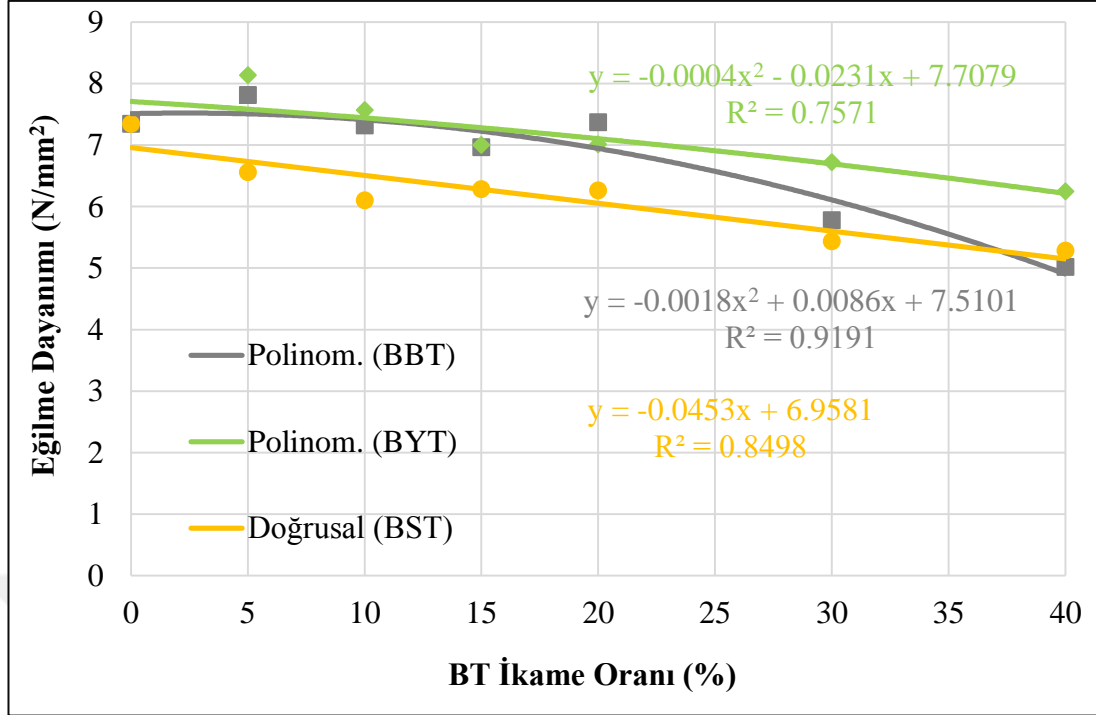
Şekil 4.8 28 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon eğrileri

BT ikame oranları ile 90 gün yaşındaki sertleşmiş harç numunelerin eğilme dayanımları arasındaki ilişki korelasyon eğrileri ile Şekil 4.9'de verilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen BT ikameli çimento harçlarının 90 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları kontrol çimentosu numunelerine göre değerlendirildiğinde;

- BBT'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 oranlarında çimentoya ikamesi sonucu eğilme dayanımında sırasıyla %6,3 dayanım artışı, %0,4 ve %5,2 dayanım kayıpları, %0,3 dayanım artışı, %21,4 ve %31,7 oranında kayıplar yaşanmıştır.
- BYT'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 kullanımı ile eğilme dayanımında sırasıyla %10,7 ve %3,0 dayanım artışları görülürken, %4,8,%4,6,%8,6 ve %15,0 oranında dayanım kayıpları görülmüştür.
- BST'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 ikamesiyle birlikte eğilme dayanımında sırasıyla %10,7,%17,0,%14,4,%14,8,%26,0 ve %28,0 oranında dayanım kayıpları görülmüştür.

Yaklaşık %20 ikame oranına kadar Bayburt Taşı ile üretilen çimentoların 90 gün yaşındaki eğilme dayanımları referans çimentonun eğilme dayanımının %10 güven aralığında elde edilmiştir. Böylece erken dayanımları düşük olan BT ikameli çimentolar 90 gün yaşında referans harcını yakalamıştır. Eğilme dayanımı harcın içindeki bileşenlerin moleküler çekim kuvvetleri (bağ kuvvetleri) ile açıklanan bir özelliktir. BBT ve BYT %20'ye kadar ikame edildiğinde referans çimentosuna yakın değerler (~%5 az) elde edilirken, %40'a kadar BYT ikamesinde referans çimento harcı ile yakın eğilme dayanımları (~%15 az) elde edilmiştir.

BT ikamelerinde en yüksek eğilme dayanımını %5 ikameli çimento harçları verirken en düşük dayanım %40 ikameli harçlarda görülmüştür. Ayrıca traslı çimentoların eğilme dayanımı eğrilerinden görüldüğü gibi nihai anlamda kür ile birlikte eğilme dayanımlarında yükselişler görülmektedir. Nihai eğilme dayanımlarında kontrol harcına göre en düşük dayanım %30 daha azdır. Yani BT'lerin tüm ikame oranlarında üretilen harçların nihai eğilme dayanımları, kontrol harcının nihai eğilme dayanımının %70'inden daha fazladır. Böylece 90 günlük dayanım sonuçlarına göre tüm BT'ler ve belirlenen tüm ikame oranları çimento yerine kullanılabileceği göstermiştir.

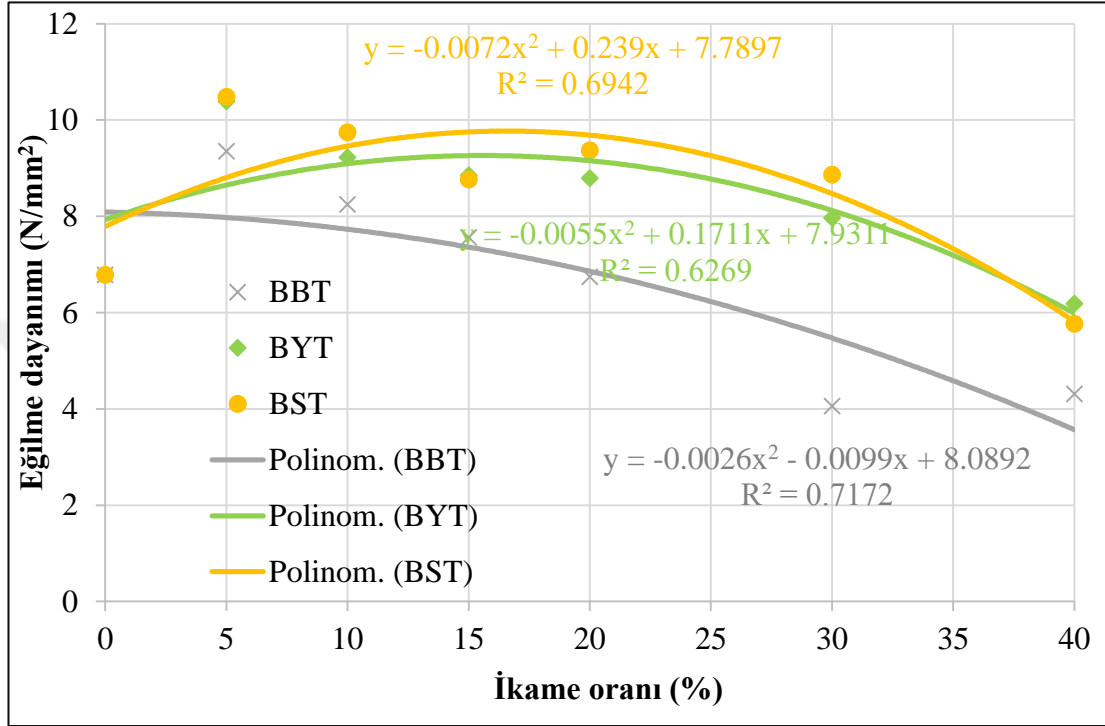


Şekil 4.9 90 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon eğrileri

BT ikame oranları ile 270 gün yaşındaki sertleşmiş harç numunelerin eğilme dayanımları arasındaki ilişki korelasyon eğrileri ile Şekil 4.10'de verilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen BT ikameli çimento harçlarının 270 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları kontrol çimentosu numunelerine göre değerlendirildiğinde;

- BBT'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 kullanımı ile eğilme dayanımında sırasıyla %37,7,%21,5,%11,3 dayanım artışı, %0,7,%40,2 ve %36,5 oranında dayanım kayıpları yaşanmıştır.
- BYT'nin çimentoya %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 oranında ikamesi sonucu eğilme dayanımında sırasıyla %53,0,%35,8,%30,3,%29,6,%17,4 oranında dayanım artışları görülürken,%8,8 oranında dayanım kaybı görülmüştür.
- BST'nin çimentodaki ikame oranı %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 düzeyinde arttıkça eğilme dayanımında sırasıyla %54,3,%43,4,%29,2,%38,0,%30,6 oranında artış görülürken %15,0 oranında dayanım kaybı görülmüştür.

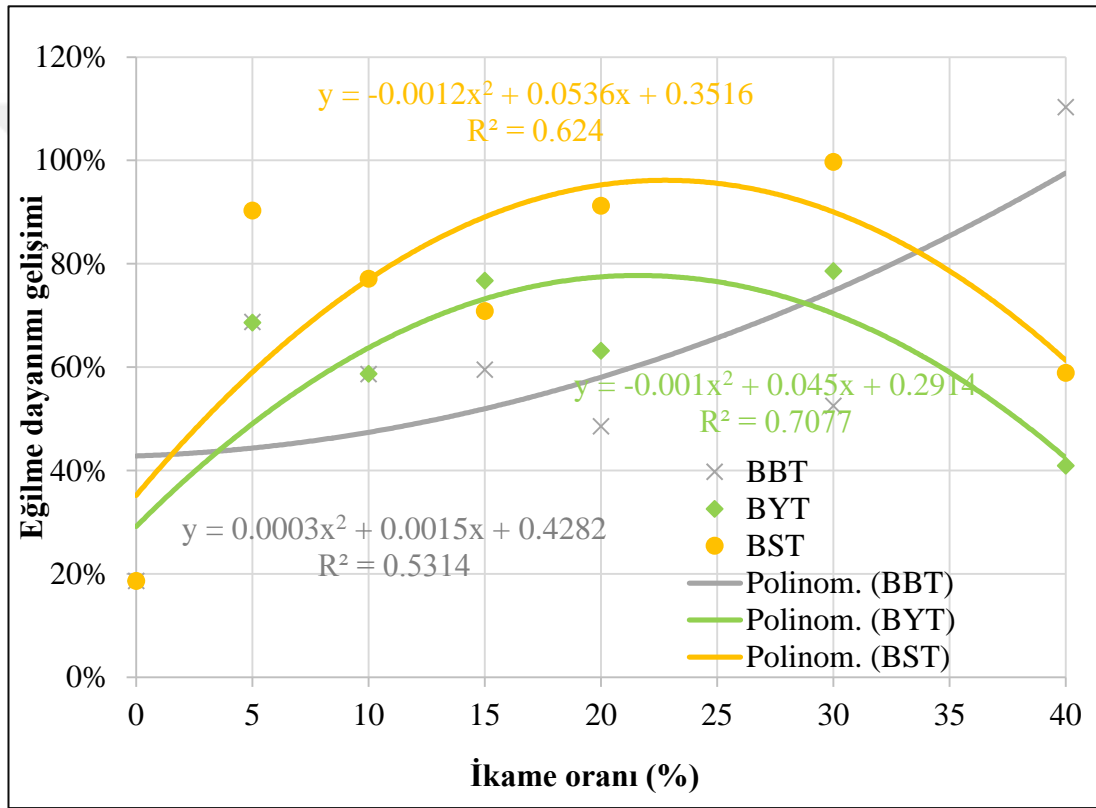
Şekil 4.10'da görülebileceği gibi referans çimento harcı temel alındığında yeşil ve sarı Bayburt taşlarının %30'a kadar, beyaz Bayburt taşının ise %20'ye kadar CEM I yerine ikame edilebileceği görülmektedir. Bu ilişki Şekil 4.10'da daha net görülebilmektedir.



Şekil 4.10 270 günlük eğilme dayanımı ile BT ikame oranı arasındaki korelasyon ilişkisi

Şekil 4.11'de tüm BT ikameli çimentoların 2 gün ile 270 gün yaşları arasında yaklaşık 268 günlük eğilme dayanımı gelişimleri yüzde olarak verilmiş ve ikame oranları ile dayanım gelişimleri arasında korelasyonlar oluşturulmuştur. Şekil 4.11'de verilen eğrilerin başlangıç noktası olan %20 noktası referans harç numunesinin eğilme dayanımına göre 2-270 günlük gelişimidir. Normal koşullarda C₃S oranı %60 ve C₂S oranı %13 olan çimento harçlarının eğilme dayanımı gelişimi yaklaşık %140 olmaktadır (Girginkardeşler,2008). Referans harcının 28 günden sonra kür suyu içinde (pH:11,5) dayanım gelişimi negatif yönlü olmuştur. Bunun sebebinin kür suyunun pH'ının dalgalanmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Kür suyunun negatif etkilerinin BT ikameli çimentolarda da etkili olduğu düşünülmüştür. Bu sebeple karşılaştırma eğrisi korelasyon olarak verilmiştir. Grafikler BT ikamelerinin zamana bağlı olarak çimento harçlarının eğilme dayanımlarını olumlu ya da olumsuz etkilerini

daha açık bir şekilde ortaya koymaktır. Grafikte görüldüğü gibi eğilme dayanımı gelişimi 268 günlük süreçte BBT ikamesi arttıkça %110 oranı kadar artmaktadır. BYT ve BST ikamesi %30 oranına kadar arttıkça sırasıyla %80 ve %100 oranında eğilme dayanımı artmakta, ancak %30'un üstündeki ikame oranlarında BYT ve BST için yaklaşık %40 oranında eğilme dayanımı azalmaktadır. Böylece BBT'nin puzolanik davranışının ikame oranı arttıkça sürdüğü, ancak BYT ve BST'nin %30'un üstünde ikame edilen malzemenin dolgu gibi davrandığı söylenebilir.



Şekil 4.11 BT ikame oranına bağlı olarak çimentoların 2 – 270 gün arasında eğilme dayanımı gelişimi

4.2.3 Basınç dayanımı deney sonuçları

CEM I tipi çimentonun yerine %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında BBT, BST ve BYT'lerin kullanılması ile üretilen yeni kompoze çimentolarla hazırlanan harç örneklerde 2, 28, 90 ve 270 gün yaşlarda gerçekleştirilen basınç dayanım deneylerinin sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'de harç numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen bulgular aritmetik ortalama (\bar{x})

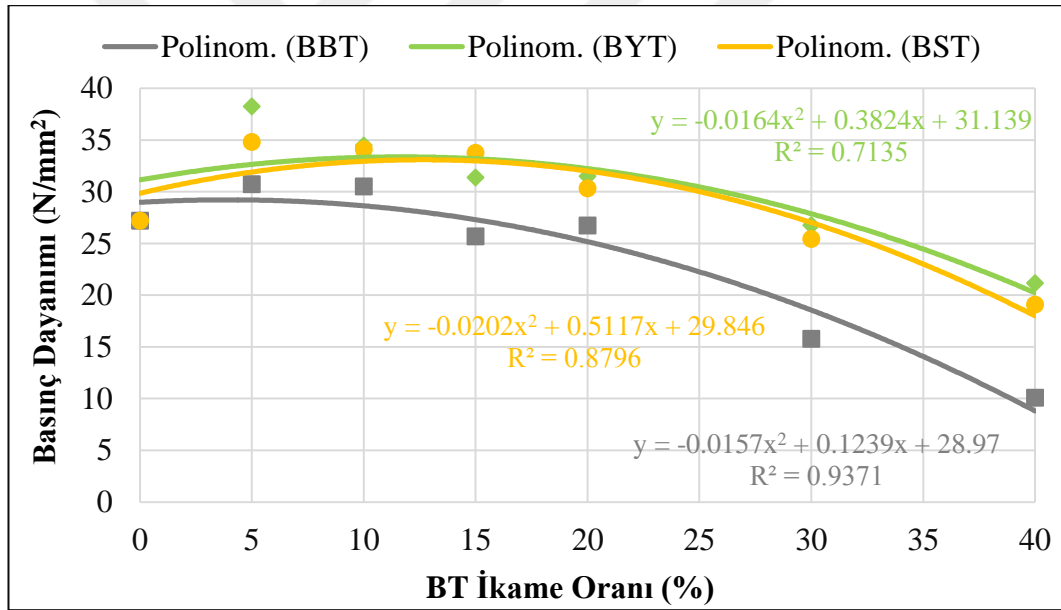
ve standart sapma (σ) olacak şekilde gösterilmiştir. Çizelgedeki değerler her bir ikame malzemesinin dayanımlarını karşılaştırılabilmek için ikame oranlarının dayanımlara etkileri korelasyon eğrilerinde Şekil 4.12 - 4.14'de gösterilmiştir. Üretilen çimentoların basınç dayanımlarındaki zamana dayalı gelişimler ise Şekil 4.15'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 2, 28, 90 ve 270 günlük basınç dayanımı deney sonuçları

No	Çimento Tipi	Katkı (%)	BHA	n	2 gün (N/mm ²)		28 gün (N/mm ²)		90 gün (N/mm ²)		270 gün (N/mm ²)	
					\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
1	R	0	2,24	4	27,2	0,2	59,4	0,2	52,9	0,1	65,1	3,4
2	BBTC1	5	2,26	4	30,7	0,3	64,0	0,5	60,2	1,1	70,4	3,2
3	BBTC2	10	2,22	4	30,5	0,1	63,9	1,4	55,6	0,3	65,2	2,7
4	BBTC3	15	2,17	4	25,7	1,0	62,8	0,6	54,9	0,1	63,3	2,1
5	BBTC4	20	2,14	4	26,7	0,6	56,1	0,1	54,9	0,6	53,9	2,2
6	BBTC5	30	2,11	4	15,8	0,1	49,5	0,2	51,8	0,1	41,6	3,3
7	BBTC6	40	2,11	4	10,1	0,3	29,5	1,9	26,0	1,0	39,4	1,0
8	BYTC1	5	2,36	4	38,2	0,1	58,2	0,2	65,6	0,1	68,4	4,0
9	BYTC2	10	2,30	4	34,5	0,5	51,0	0,1	56,5	0,1	62,7	2,0
10	BYTC3	15	2,26	4	31,4	0,1	50,6	0,2	53,2	0,1	63,6	3,1
11	BYTC4	20	2,27	4	31,5	0,3	47,6	0,1	55,9	0,9	61,6	0,4
12	BYTC5	30	2,22	4	26,7	0,1	46,2	0,1	46,0	0,3	56,4	1,8
13	BYTC6	40	2,28	4	21,1	0,1	38,5	0,3	39,5	0,1	49,1	1,0
14	BSTC1	5	2,31	4	34,8	0,2	59,2	0,5	60,1	0,2	65,0	1,2
15	BSTC2	10	2,28	4	34,1	0,1	53,8	0,2	58,8	0,6	64,6	2,5
16	BSTC3	15	2,27	4	33,8	0,1	56,8	0,4	60,6	0,3	58,2	1,3
17	BSTC4	20	2,26	4	30,3	0,5	52,3	0,1	53,7	0,6	60,1	1,7
18	BSTC5	30	2,23	4	25,4	0,1	57,3	0,3	57,9	0,3	57,8	3,3
19	BSTC6	40	2,20	4	19,1	0,1	45,8	0,8	48,8	0,6	48,0	2,4

Deney sonuçlarına göre kontrol harcının erken basınç dayanımı ortalama 27 MPa, 28 gün basınç dayanımı ortalama 59 MPa olarak bulunmuştur. Kontrol harcı 270 gün yaşında 2 gün yaşına göre yaklaşık olarak %140, 28 gün yaşından sonra 28 – 270 gün yaşları arasında yaklaşık %10 oranında dayanım kazanmıştır. Normal koşullarda alit çimentolarında ilk 28 günlük süreçte C_3S 'in büyük çoğunluğu nitelikli kür ile çözünür

ve hidrate olur. Bundan dolayı erken dayanımlar yüksek çıkarken geç dayanımlar beklenenden az olur. BT ikamelerinde elde edilen genel sonuçlara göre CEM II 42.5R tip çimentoda tüm BT ikamelerinin yaklaşık %30 katkı oranına kadar kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. 2 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre, BBT'nin %30 ikamesi hariç diğer BST ve BYT'nin %30 ikame oranında 20 MPa dayanımın üstünde basınç dayanımı elde edilmiştir. Bunun sebebinin Bayburt Taşlarının yüksek özgül yüzeye sahip olmaları ve bundan dolayı reaktif davranışlarının yüksek olduğu ve ayrıca incelikleri sebebiyle dolgu davranışlarından dolayı olduğu düşünülmektedir. Bu dayanım CEM I 42.5R tip çimentoların 2 gün yaşındaki tipik basınç dayanımıdır. Ancak geç yaşlarda pH değeri 11,5 olan kür etkisiyle dayanım kayıpları gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 4.12 2 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi

BT ile hazırlanan harç örneklerin 2 günlük basınç dayanımları değerlendirildiğinde;

- Referans örneklerinin 2 günlük basınç dayanımının 27,19 MPa olduğu ve bu dayanım değerinin 28 günlük dayanıma göre %54 mertebelerinde olduğu,

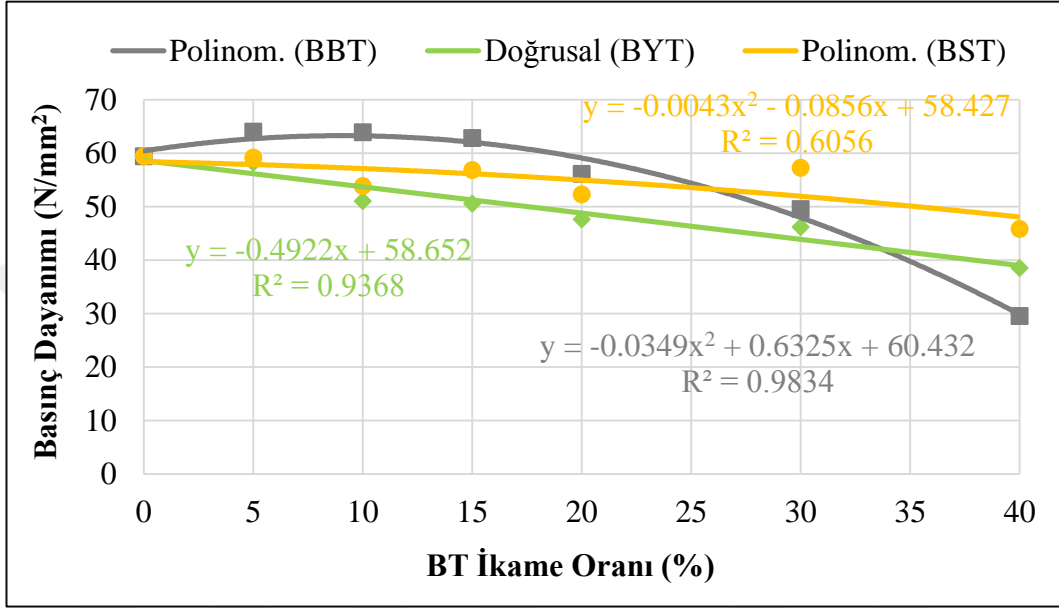
- BBT'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 kullanımı ile 2 günlük basınç dayanımlarının 30,7;30,5;25,7;26,7;15,8;10,1 MPa olduğu ve bu dayanım değerlerinin 28 günlük dayanım değerlerine göre sırasıyla %52,%52,%59,%52,%68,%66 mertebelerinde olduğu,
- BYT'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 kullanımı ile 2 günlük basınç dayanımlarının 38,2;34,5;31,4;31,5;26,7;21,1 MPa olduğu ve bu dayanım değerlerinin 28 günlük dayanım değerlerine göre sırasıyla %34,%32,%38,%34,%42,%45 mertebelerinde olduğu,
- BST'nin %5,%10,%15,%20,%30 ve %40 kullanımı ile 2 günlük basınç dayanımlarının 34,8;34,1;33,8;30,3;25,4;19,1 MPa olduğu ve bu dayanım değerlerinin 28 günlük dayanım değerlerine göre sırasıyla %41,%37,%40,%42,%56,%58 mertebelerinde olduğu bulunmuştur.

Bu bilgiler Bayburt yeşil taşının %5 ikame oranı ile en yüksek dayanım değeri 38,23 MPa, Bayburt beyaz taşının %40 ikame oranı ile en düşük dayanım değeri 10,07 MPa olduğunu göstermiştir. Kullanılan BT'lerin içerisinde en yüksek 2 günlük basınç dayanımına %5 ikameli örneklerin sahip olduğu görülmüştür. BT'lerin %40 oranında ikamesi ile basınç dayanımlarında dayanım kayıpları görülmüştür.

Referans örneklerin 28 günlük basınç dayanımının 59,39 MPa ulaştığı görülmüştür. BT ikameli çimento harçlarının 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları referans numunesine göre değerlendirildiğinde;

- BBT'nin artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında, %5 ve %10 kullanımında %8 artış,%15 ikame oranında %6 artış,%20 kullanımında %6 azalış,%30 ikamesinde %17 azalış ve %40 kullanımında %50 azalış meydana gelmiştir.
- BYT'nin artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında,%5 kullanımında %2 azalış,%10 ikamesiyle birlikte %14 azalış, %15 kullanımında %15 azalış,%20 ikame oranında %20 azalış,%30 kullanımında %22 azalış,%40 ikamesinde %35 azalış olduğu görülmüştür.

- BST'nin artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında,%5 kullanımında herhangi bir kayıp yaşanmamış,%10 ikamesiyle birlikte %9 azalış, %15 kullanımında %4 azalış,%20 ikame oranında %12 azalış,%30 kullanımında %4 azalış,%40 ikamesinde %23 azalış olduğu görülmüştür.

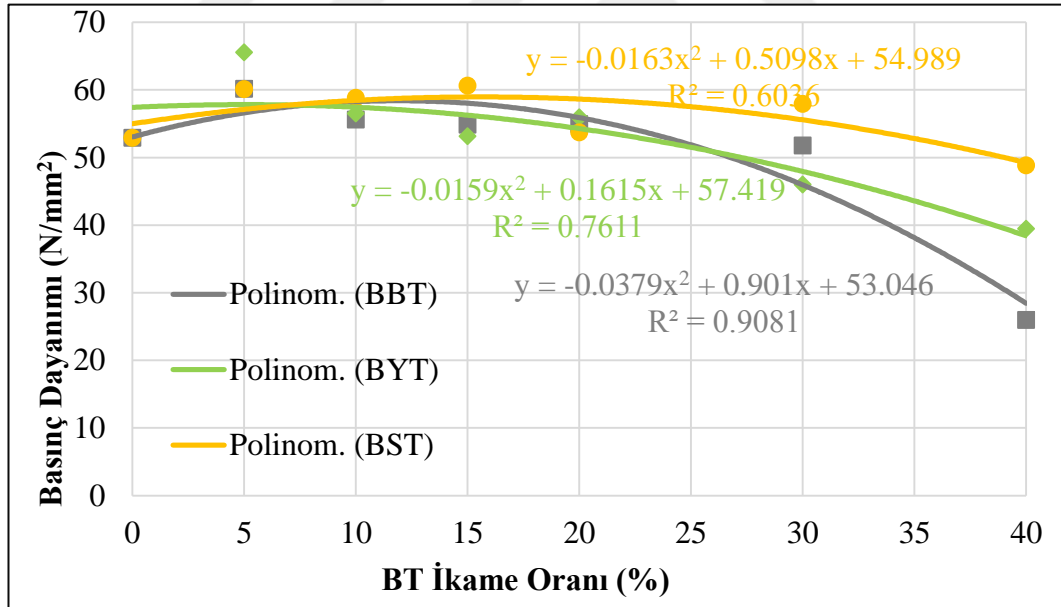


Şekil 4.13 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi

Yapılan bu değerlendirmeler Bayburt beyaz taşının %5 ikame ile en yüksek dayanım değerine,%40 ikame ile ise en düşük dayanım değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bütün çimento harçlarının 28 günlük en yüksek basınç dayanım değeri %5 ikameli çimentolarda görülmüştür. Artan ikame oranlarıyla birlikte basınç dayanımlarında da düşüşler yaşanmıştır.

Çimento hamurunun dayanım kazanmasında hidrasyon ürünlerinin tümünün az ya da çok katkısı olmakla birlikte, dayanımın oluşmasındaki en büyük pay C-S-H jellerine aittir. C-S-H jellerinin çimento hamuruna sağladığı dayanımın nasıl kaynaklandığı kesin olarak bilinmemekle beraber, ortaya çıkan dayanımın muhtemel nedeni iki tür bağ kuvvetinin varlığıdır (Erdoğan, 2013). Şekil 4.13'e bakıldığında elde edilen veriler BT ikame oranı ile birlikte basınç dayanımlarında düşüşler yaşandığını göstermiştir.

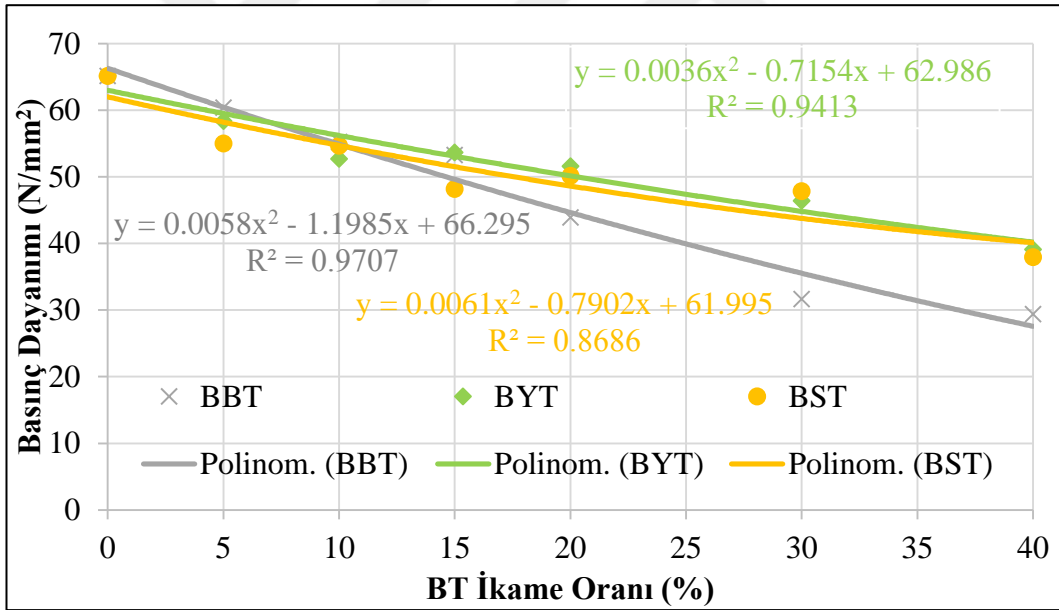
Lakin basınç dayanım değerleri bazı BT ikamelerinde referans numune değerinin üstünde değerler alırken bazı ikame oranlarında yakın dayanım değerlerine ulaşmıştır. Bu durum C-S-H jellerinin varlığının bir göstergesi, ortamdaki C₃S varlığının ispatıdır. Çünkü C₃S mukavemet üzerinde en etkili olan yapıdır. Çimentonun kalıcı bağlayıcılık özelliğini tayin eden bileşendir. Çimentonun bağlayıcılık özelliği üzerinde her zaman etkilidir. Çimentonun erken dayanımını sağlar. Bu nedenle BT ikamesi ile çimento harçlarının dayanım kazanması farklılık göstermiştir. 28 günlük basınç dayanım değerleri; BBT'nin %30 ikamesi ile 49,53 MPa, BYT'nin %30 ikamesi ile 46,19 MPa ve BST'nin %40 ikamesi ile 45,84 MPa değerine ulaşmıştır. TS EN 197-1 no'lu standartta belirtilen dayanım değerlerine göre CEM I 42,5 R çimentosunun 28 günlük dayanımı en az 42,5 MPa, en fazla 62,2 olmalıdır. Bu durum katkılı çimento üretiminde sırasıyla BBT (%20), BYT (%30) ve BST (%40) ikame oranlarında kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 4.14 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi

BT ile hazırlanan harç örneklerin 90 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesinin dayanım değerleriyle kıyaslandığında; Referans örneklerin 90 günlük basınç dayanımının 52,93 MPa olduğu ve buna göre

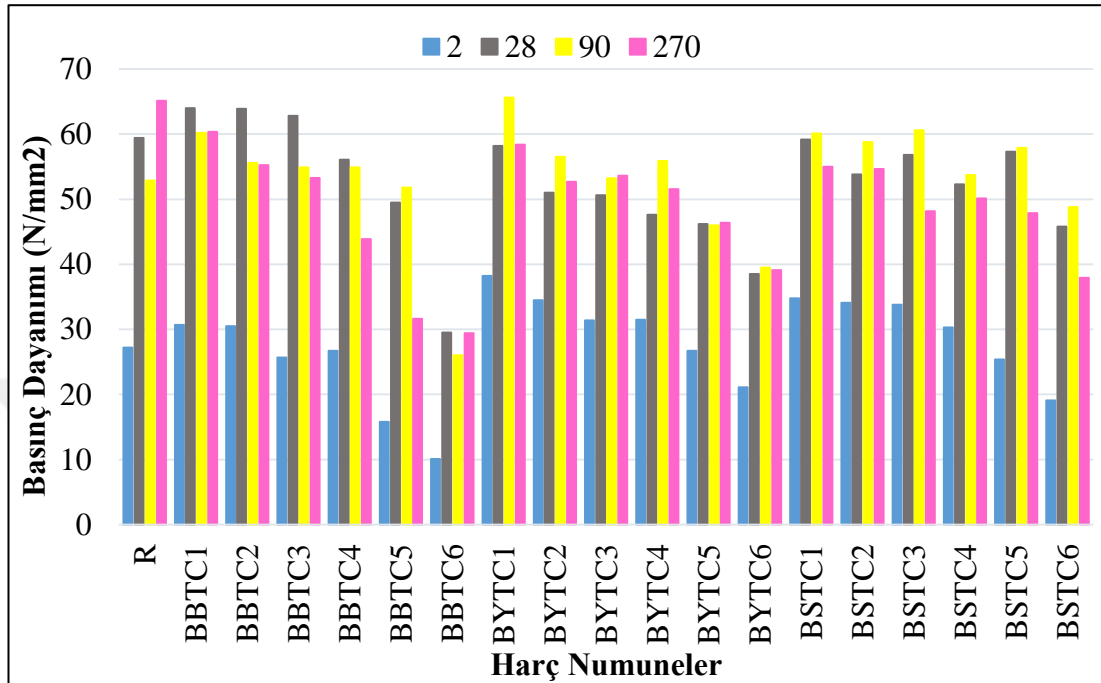
- BBT'nin artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında, %5 kullanımında %14 artış,%10 kullanımında %5 artış,%15 ve %20 ikame oranlarında %4 artış,%30 ikamesinde %2 azalış ve %40 kullanımında %51 azalış meydana gelmiştir.
- BYT'nin artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında,%5 kullanımında %24 artış,%10 ikamesiyle birlikte %7 artış, %15 kullanımında %1 artış,%20 ikame oranında %6 artış,%30 kullanımında %13 azalış,%40 ikamesinde %25 azalış olduğu görülmüştür.
- BST'nin artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında,%5 kullanımında %14 artış,%10 ikamesiyle birlikte %11 artış, %15 kullanımında %14 artış,%20 ikame oranında %1 artış,%30 kullanımında %9 artış,%40 ikamesinde %8 azalış olduğu görülmüştür.



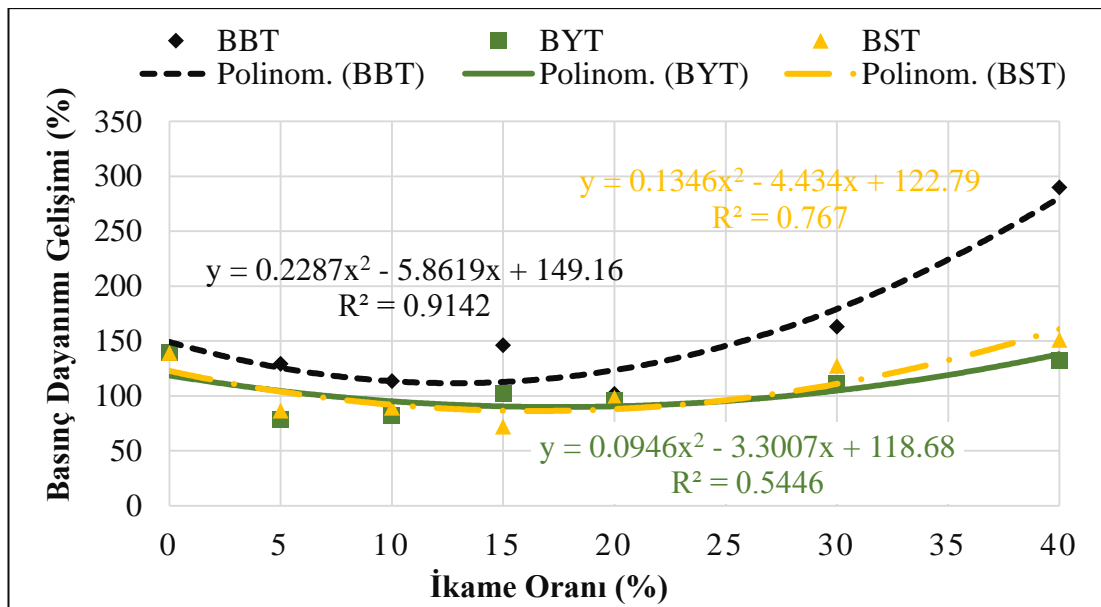
Şekil 4.15 270 günlük basınç dayanımı deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi

Bütün çimento harçlarının 90 günlük en yüksek basınç dayanım değeri %5 ikameli çimentolarda görülmüştür. BT'lerin %40 oranında kullanımı ile basınç dayanımında dayanım kayıpları yaşanmıştır. Bayburt beyaz taşının %5 ikamesi en yüksek dayanım değerini,%40 ikamesi en düşük dayanım değerini vermiştir. 90 gün yaşında %30

ikame oranına kadar dayanım referans harcına göre benzer oranlarda kalmış ancak %40 ikame oranında dayanımlar azalmıştır.

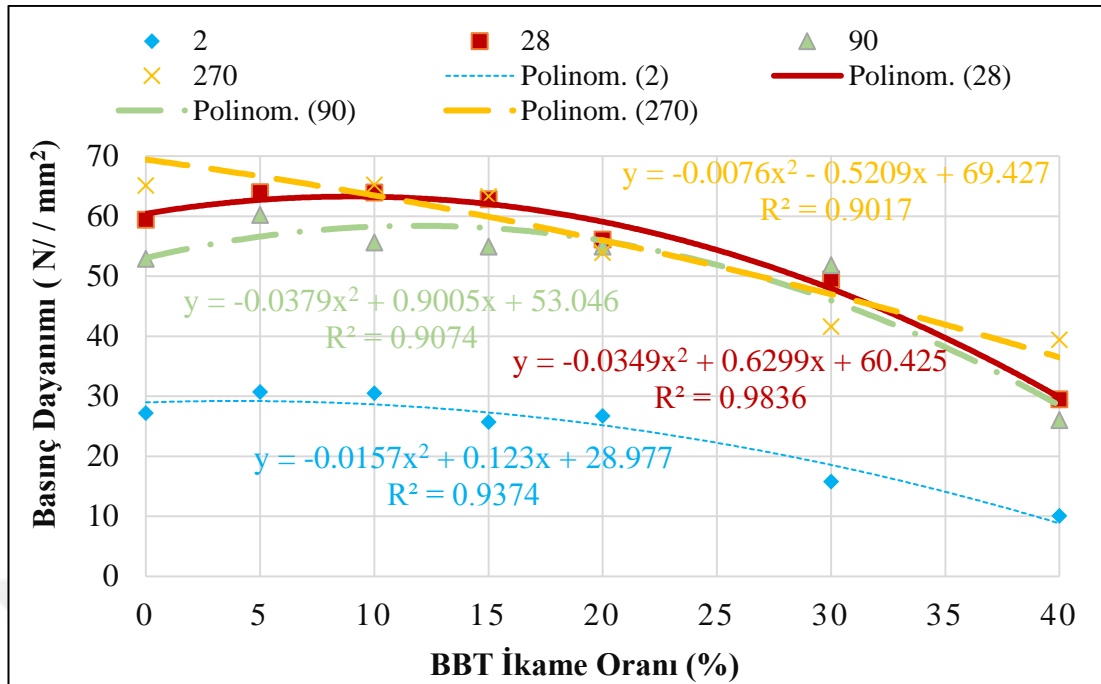


Şekil 4.16 BT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımı gelişimleri

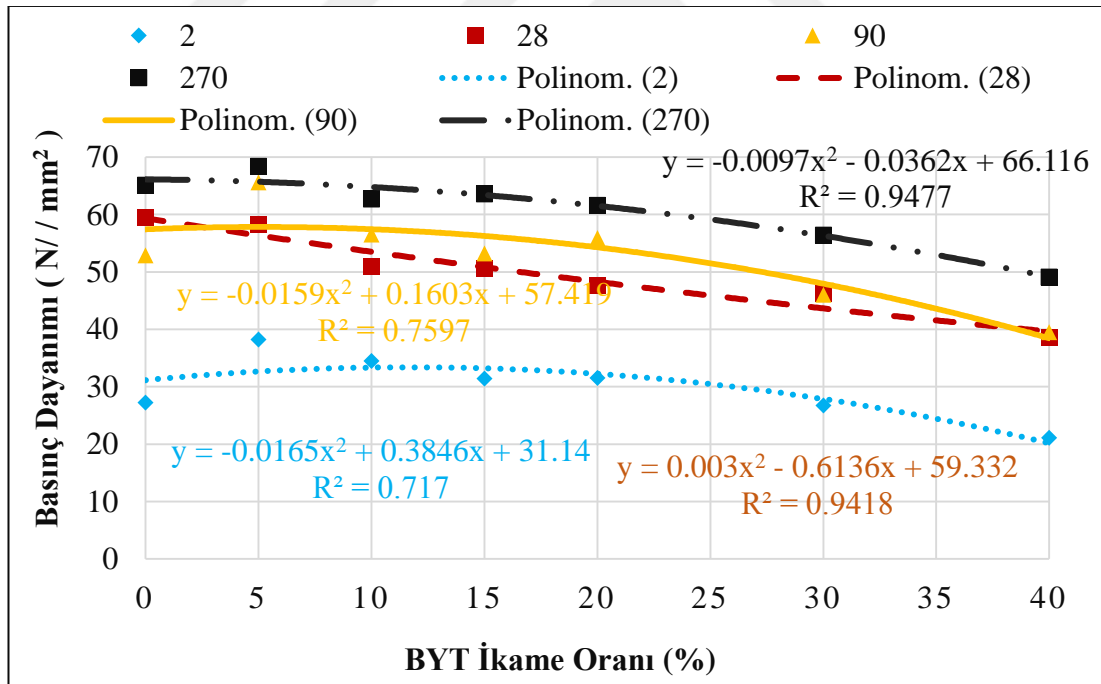


Şekil 4.17 BT ikame oranına bağlı olarak çimentoların 2-270 gün arasındaki basınç dayanımı gelişimleri

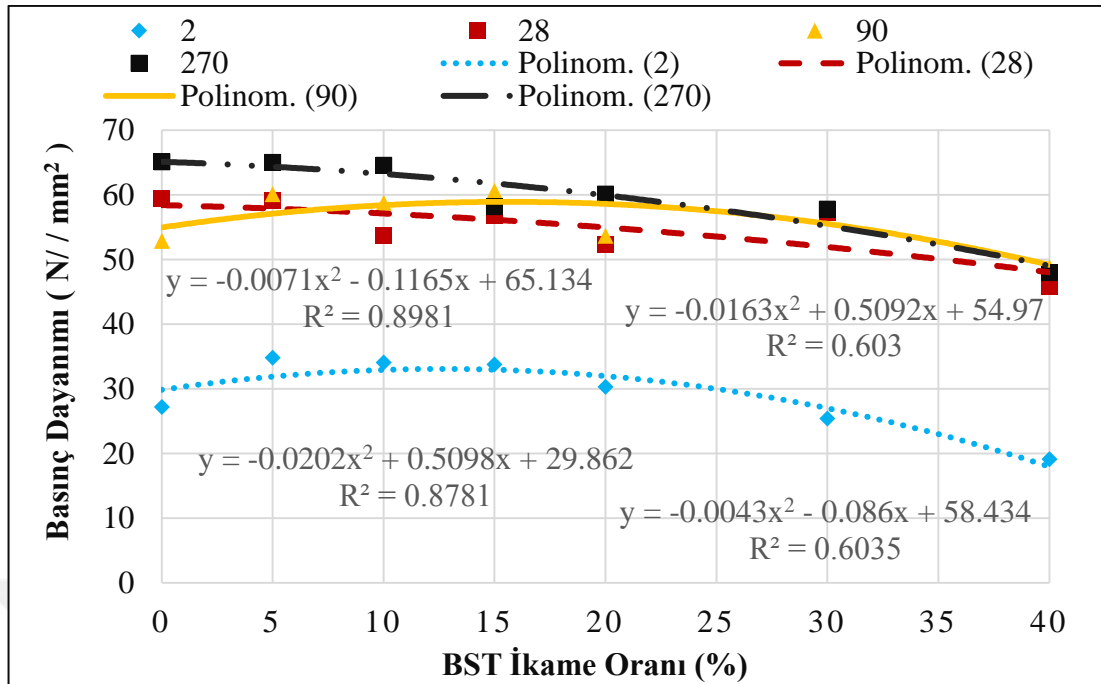
270 gün yaşındaki harç numuneleri dayanım testi yapılmadan 10 gün önce sudan çıkarılmış ve laboratuvar ortamında 20 ± 2 C° sıcaklık ve $\%40 \pm 5$ bağıl nemde bekletilmiştir. Ardından harç numuneler önce tartılmış ve eğilme deneyine tabi tutulmuştur. İki parçaya ayrılan numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.15’de verilmiştir. Tüm zamanlara ait basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 4.16’da karşılaştırma amaçlı histogram eğrileri olarak verilmiştir. Şekil 4.17 ‘de tüm BT ikameli çimentoların 2 gün ve 270 gün yaşları arasındaki yaklaşık 268 günlük basınç dayanımı gelişimleri yüzde olarak verilmiş ve ikame oranları ile dayanım gelişimleri arasında korelasyon eğrileri oluşturulmuştur. Dayanım gelişimleri incelendiğinde BT ikameli harçların 28 gün yaşından sonra belli oranlarda dayanım kaybettikleri belirlenmiştir. Bunun sebebinin yıkanma etkisi olduğu düşünülmüştür. Yıkanma etkisi (Leaching) düşük pH değerlikli su küründe gerçekleşen bir durumdur. Deney çalışmalarına başlayıp numuneleri kür havuzuna bıraktıktan 28 gün sonra kür tankındaki su buharlaşma nedeniyle azalmıştır. Bu nedenle birkaç kez yenilenen su en son ölçümde pH:11’e kadar düşmüştür. Bilindiği gibi çimentolu kompozitlerin hidrasyon ürünleri etrenjit, Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), CSH ve CAH olarak tanımlanır. Bu ürünlerden Portlandit çimento harcı üretildiğinde boşluklara çökelir ve belli oranda geçirimsizlik sağlar ve pH’ı 13,5 değerlerine kadar yükseltir. Böylece CSH jelinin kararlı molekül yapısı korunur. Ancak pH seviyesi düştükçe öncelikle Portlandit boşluk çözeltisinde çözünür ve kapiler gözeneklerden kür suyuna taşınır. Böylece boşluklarda bulunan kristalize Portlandit taşındığı için porozite ve buna bağlı kusur oranı artar. Bunun yanı sıra CSH jeli de yine pH’ın daha düşük seviyelerinde parçalanmaya başlar. Ortamda Mg^{+2} iyonlarının miktarına bağlı olarak CSH çözünmesi daha da artar. Bu durum numuneler üzerinde olumsuz bir etki bırakmış ve dayanım kayıplarına sebebiyet vermiştir. CEM I tipi çimentonun yerine %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında BBT, BST ve BYT’lerin kullanılması ile üretilen harç örneklerin 2, 28, 90 ve 270 gün yaşlarda gerçekleştirilen basınç dayanım deneylerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.18 BBT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımı değişimleri



Şekil 4.19 BYT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımı değişimleri



Şekil 4.20 BST ikameli çimento harçlarının zamana bağı basınç dayanımı değışimleri

4.2.4 Su emme deney sonuçları

2, 28 ve 90 gün için yapılan su emme deneyinden elde edilen ağırlıkça su emme ve görünür boşluk oranı (porozite) sonuçları Çizelge 4.5’de verilmiştir. Çizelge 4.5’de verilen sonuçlara göre ikame oranı %40 olan BBT ikameli çimento harçları hariç, diğеr harç numunelerdeki porozitenin zamana bağı olarak azaldığı görölmektedir. %40 BBT harcının yüksek miktarda su ihtiyacından dolayı işlenebilirlik oldukça zor olmuş ve bu sebeple porozite yüksek oranda gerçekleşmiştir. Diğеr numunelerdeki zamana bağı porozite düşüşlerinin sebebi çimentonun hidrasyon ürünlerinin harç boşluklarını kapatması ile harç içindeki katı hacmin artmasından kaynaklanmaktadır (Mehta vd,2016).

Çizelge 4.5 2,28 ve 90 günlük su emme deneyi sonuçları

No	Çimento Tipi	Katki Oranı (%)	2 gün		28 gün		90 gün	
			Su Emme (%)	Porozite (%)	Su Emme (%)	Porozite (%)	Su Emme (%)	Porozite (%)
1	R	0	8,75	17,24	7,60	15,29	5,80	11,76
2	BBTC1	5	8,32	16,35	6,64	13,13	5,61	11,05
3	BBTC2	10	9,06	17,71	7,37	14,62	5,53	11,10
4	BBTC3	15	9,57	18,44	7,95	15,51	6,29	12,44
5	BBTC4	20	12,20	22,41	7,05	13,82	7,39	14,74
6	BBTC5	30	13,10	22,91	5,40	10,47	9,03	17,07
7	BBTC6	40	14,04	24,69	5,33	10,34	14,28	25,75
8	BYTC1	5	6,08	12,77	7,00	14,37	5,31	10,88
9	BYTC2	10	6,36	13,17	7,67	15,52	4,73	9,74
10	BYTC3	15	6,65	13,72	8,05	15,96	3,33	6,93
11	BYTC4	20	8,84	17,39	7,43	14,83	3,91	8,02
12	BYTC5	30	9,23	18,10	7,18	14,55	4,44	9,07
13	BYTC6	40	9,76	18,91	7,75	16,03	5,58	11,26
14	BSTC1	5	8,24	16,51	6,66	13,60	3,26	6,81
15	BSTC2	10	8,50	16,74	7,26	14,58	4,84	9,90
16	BSTC3	15	9,12	17,76	7,17	14,40	5,62	11,36
17	BSTC4	20	9,28	18,07	7,42	14,76	5,20	10,51
18	BSTC5	30	9,50	18,56	6,94	13,81	4,98	9,95
19	BSTC6	40	10,0	19,25	7,51	14,83	4,72	9,50

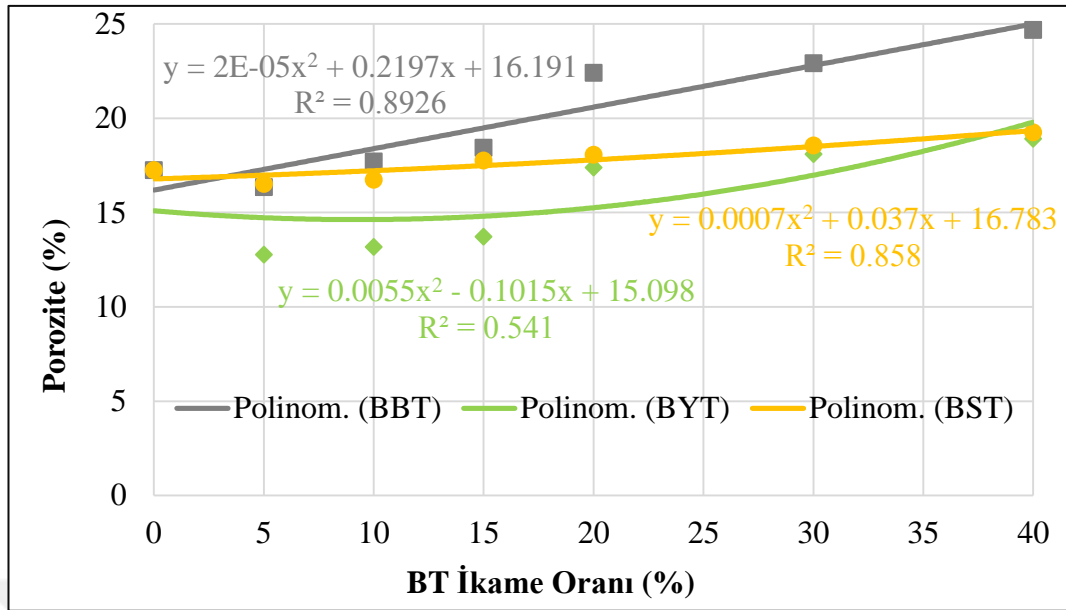
Çizelge 4.5’de verilen bulgularda kür havuzunda bekletilen harç numunelerinin 2 günlük süreçte su emme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde:

- BBT ikamesi sonucu artan ikame oranıyla su emme ve porozite değerleri de genel olarak artmıştır. Referans numunesine göre ağırlıkça su emme oranı; % 5 BBT ikamesiyle % 0,43 azalış, %10 BBT ikamesiyle % 0,31 artış, %15 BBT ikamesiyle % 0,82 artış, %20 BBT ikamesiyle % 3,45 artış, %30 BBT ikamesiyle % 4,35 artış, %40 BBT ikamesiyle % 5,29 artış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise % 5

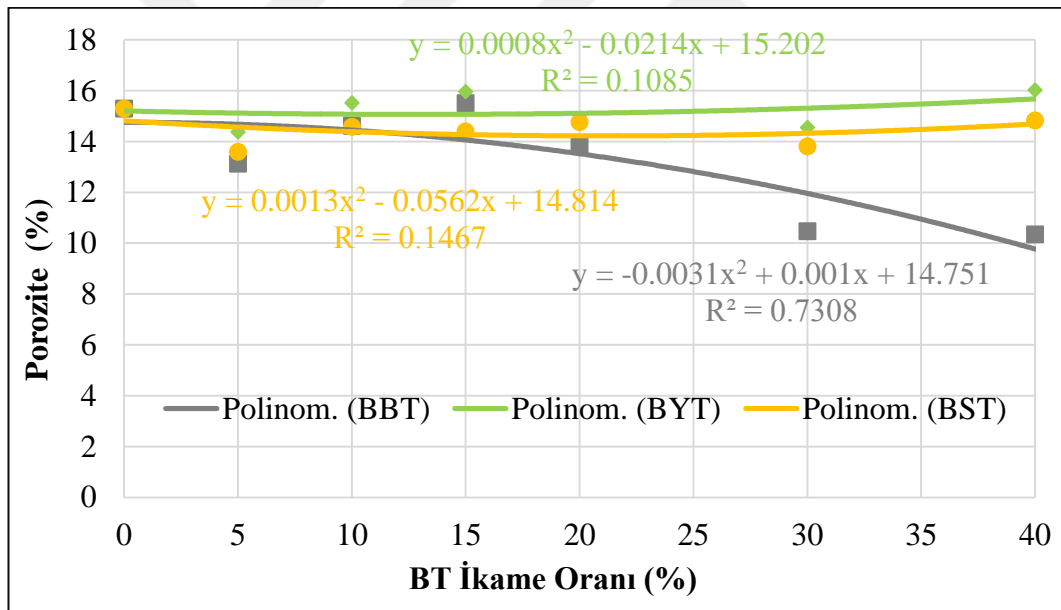
BBT ikamesiyle % 0,89 azalış, %10 BBT ikamesiyle % 0,47 artış, %15 BBT ikamesiyle % 1,20 artış, %20 BBT ikamesiyle % 5,17 artış, %30 BBT ikamesiyle % 5,67 artış, %40 BBT ikamesiyle % 7,45 artış olmuştur.

- BYT ikamesi sonucu artan ikame oranıyla su emme ve porozite değerleri farklılık göstermiştir. Referans numunesine göre ağırlıkça su emme oranı; % 5 BYT ikamesiyle % 2,67 azalış, %10 BYT ikamesiyle % 2,39 azalış, %15 BYT ikamesiyle % 2,1 azalış, %20 BYT ikamesiyle % 0,09 artış, %30 BYT ikamesiyle % 0,48 artış, %40 BYT ikamesiyle %1,01 artış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise % 5 BYT ikamesiyle % 4,47 azalış, %10 BYT ikamesiyle % 4,07 azalış, %15 BYT ikamesiyle % 3,52 azalış, %20 BYT ikamesiyle % 0,15 artış, %30 BYT ikamesiyle % 0,86 artış, %40 BYT ikamesiyle % 1,67 artış olmuştur.
- BST ikamesi birlikte su emme ve porozite değerlerinde artış-azalış görülmüştür. Referans numunesine göre ağırlıkça su emme oranı; % 5 BST ikamesiyle % 0,51 azalış, %10 BST ikamesiyle % 0,25 azalış, %15 BST ikamesiyle % 0,37 artış, %20 BST ikamesiyle %0,53 artış, %30 BST ikamesiyle % 0,75 artış, %40 BST ikamesiyle % 1,25 artış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise % 5 BST ikamesiyle % 0,73 azalış, %10 BST ikamesiyle % 0,5 azalış, % 15 BST ikamesiyle % 0,52 artış, %20 BST ikamesiyle % 0,83 artış, %30 BST ikamesiyle % 1,32 artış, %40 BST ikamesiyle %2,01 artış olmuştur.

Bir kısım portland çimentosuna belirli bir miktarda puzolan ikame edildiği çimento pastalarında toplam gözeneklilik portland çimentosu içeren kontrol numunelerinden daha fazladır. Puzolanın tipi ne olursa olsun toplam gözeneklilik zamanla azalır fakat yine de portland çimentosu içeren pastanınkinden yüksektir. Elde edilen sonuçlara göre suda kür yapılan her bir çimento grubunda da su emme ve görünür porozite değeri ikame oranı artışıyla artmıştır. Değerlendirmeler sonucu su emme miktarı ve görünür porozite artışı en fazla BBT ikameli harçlarda görülürken minimum azalış BYT ikameli harçlara ait olmuştur.



Şekil 4.21 2 günlük porozite deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi



Şekil 4.22 28 günlük porozite deney sonuçları regresyon analizi- BT ikame oranı ilişkisi

Çizelge 4.5’de verilen bulgularda kür havuzunda bekletilen harç numunelerinin 28 günlük su emme deney sonuçları değerlendirildiğinde;

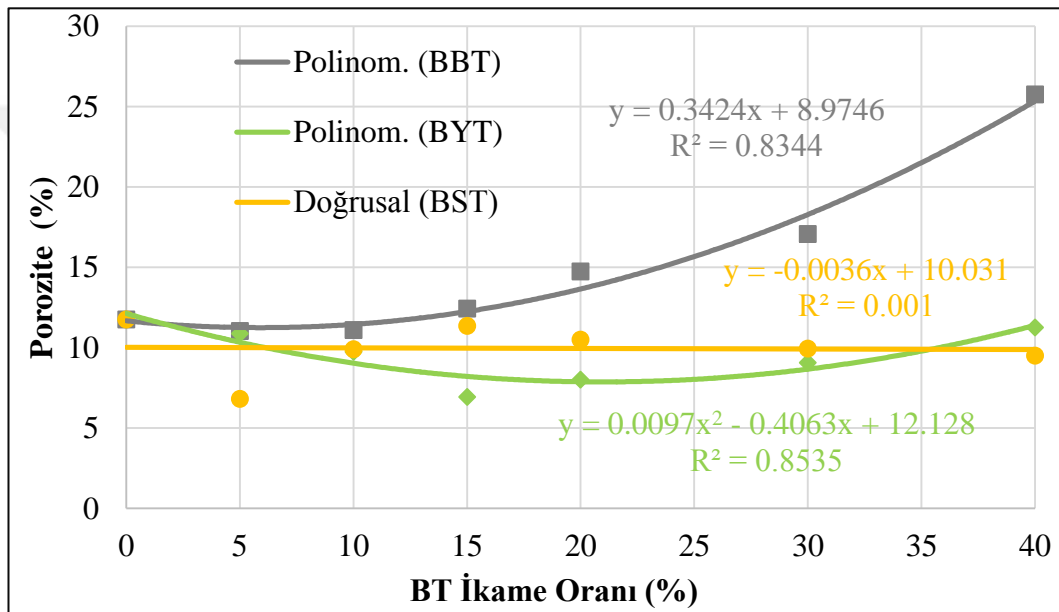
- BBT’nin kullanılması sonucu artan ikame oranıyla su emme ve porozite değerleri de genel olarak azalmıştır. Referans numunesine göre ağırlıkça su emme oranı; %

5 BBT ikamesiyle %0,96 azalış, %10 BBT ikamesiyle %0,23 azalış, %15 BBT ikamesiyle % 0,35 artış, %20 BBT ikamesiyle % 0,55 azalış, %30 BBT ikamesiyle %2,2 azalış, %40 BBT ikamesiyle %2,27 azalış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise %5 BBT ikamesiyle %2,26 azalış, %10 BBT ikamesiyle %0,67 azalış, %15 BBT ikamesiyle %0,29 artış, %20 BBT ikamesiyle %1,47 azalış, %30 BBT ikamesiyle %4,82 azalış, %40 BBT ikamesiyle %4,95 azalış olmuştur.

- BYT ilavesi sonucu artan ikame oranıyla su emme ve porozite değerleri farklılık göstermiştir. Referans numunesine göre ağırlıkça su emme oranı; %5 BYT ikamesiyle %0,60 azalış, %10 BYT ikamesiyle %0,07 artış, %15 BYT ikamesiyle %0,45 artış, %20 BYT ikamesiyle %0,17 azalış, %30 BYT ikamesiyle %0,42 azalış, %40 BYT ikamesiyle %0,15 artış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise %5 BYT ikamesiyle %0,92 azalış, %10 BYT ikamesiyle %0,23 artış, %15 BYT ikamesiyle %0,67 artış, %20 BYT ikamesiyle %0,46 azalış, %30 BYT ikamesiyle %0,74 azalış, %40 BYT ikamesiyle %0,74 artış olmuştur.
- BST ikamesiyle birlikte su emme ve porozite değerlerinde artış ve azalışlar görülmüştür. Referans numunesine göre ağırlıkça su emme oranı; %5 BST ikamesiyle %0,94 azalış, %10 BST ikamesiyle % 0,34 azalış, %15 BST ikamesiyle %0,43 azalış, %20 BST ikamesiyle %0,18 azalış, %30 BST ikamesiyle %0,66 azalış, %40 BST ikamesiyle %0,09 azalış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise %5 BST ikamesiyle %1,69 azalış, %10 BST ikamesiyle %0,71 azalış, %15 BST ikamesiyle %0,89 azalış, %20 BST ikamesiyle %0,53 azalış, %30 BST ikamesiyle %1,48 azalış, %40 BST ikamesiyle %0,46 azalış olmuştur.

Veriler değerlendirildiğinde suda kür yapılan her bir çimento grubunda da su emme ve görünür porozite değeri ikame oranı artışıyla değişmiştir. Su emme ve porozite değerleri 2 günlük su emme ve görünür porozite değerlerine oranla daha düşük değerler almıştır. Bunun sebebinin kapiler boşlukların bir kısmının zamanla kapanarak numunenin içine su sızmasının engellenmesi olduğu düşünülmektedir. Bu durum malzemenin içeriğindeki boşluklar hakkında bize bilgi verip çimento hidrasyonunun başlayıp başlamadığını gösterir. Değerlendirmeler sonucu 28 günlük su emme miktarı ve görünür porozite değerleri en fazla BYTC3 'e aitken en düşük oran ise BBTC6'a aittir. Doğal puzolan kullanımıyla gözenekliliğin bir miktar arttığı fakat bu

gözeneklerin puzolanik tepkimeler neticesinde zamanla birbirinden kopması nedeniyle geçirgenliği azalabileceği söylenebilir. Geçirgenlik portland çimentosu içeren harçlarda olduğu gibi doğal puzolan içeren harçlarda da kütlemeyle azaltılabilir. Hatta uzun süreli kütleme doğal puzolanlı harçların yalnızca portland çimentosu içeren harçlara oranla etkili bir şekilde geçirgenliğini azaltır. Bu duruma bağlı olarak BT'nin kullanımında ilk günlerde su emme ve porozite değerlerinde artış görülürken sonra ki zamanlarda azalışlar meydana gelmiştir.



Şekil 4.23 90 günlük porozite deney sonuçları regresyon analizi-BT ikame oranı ilişkisi

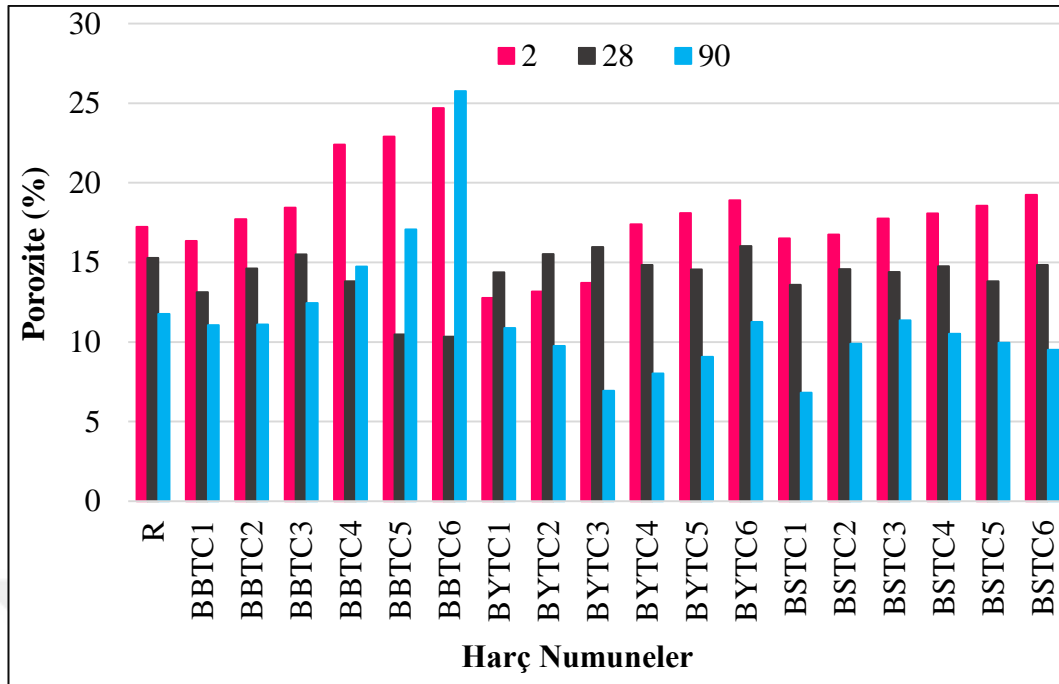
Çizelge 4.5'de verilen bulgularda kür havuzunda bekletilen harç numunelerinin 90 günlük su emme deneyi sonuçları referans numunesine göre değerlendirildiğinde;

- BBT ikamesi su emme ve porozite değerlerini belli ikame oranına kadar azaltırken daha sonra artış göstermiştir. %5 BBT ikamesiyle %0,19 azalış, %10 BBT ikamesiyle %0,27 azalış, %15 BBT ikamesiyle % 0,49 artış, %20 BBT ikamesiyle %1,59 artış, %30 BBT ikamesiyle %3,23 artış, %40 BBT ikamesiyle %8,48 artış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise %5 BBT ikamesiyle %0,71 azalış, %10 BBT ikamesiyle %0,66 azalış, %15 BBT ikamesiyle %0,68 artış, %20 BBT

ikamesiyle %2,98 artış, %30 BBT ikamesiyle %5,31 artış, %40 BBT ikamesiyle % 13,99 artış olmuştur.

- BYT ikamesi sonucu artan ikame oranıyla su emme ve porozite değerleri farklılık göstermiştir. Referans numunesine göre ağırlıkça su emme oranı; %5 BYT ikamesiyle %0,49 azalış, %10 BYT ikamesiyle %1,07 azalış, %15 BYT ikamesiyle %2,47 azalış, %20 BYT ikamesiyle %1,89 azalış, %30 BYT ikamesiyle %1,36 azalış, %40 BYT ikamesiyle %0,22 azalış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise %5 BYT ikamesiyle %0,88 azalış, %10 BYT ikamesiyle %2,02 azalış, %15 BYT ikamesiyle %4,83 azalış, %20 BYT ikamesiyle %3,74 azalış, %30 BYT ikamesiyle %2,69 azalış, %40 BYT ikamesiyle %0,50 azalış olmuştur.
- BST ikamesi birlikte su emme ve porozite değerlerinde artış ve azalışlar görülmüştür. %5 BST ikamesiyle %2,54 azalış, %10 BST ikamesiyle %0,96 azalış, %15 BST ikamesiyle %0,18 azalış, %20 BST ikamesiyle %0,60 azalış, %30 BST ikamesiyle %0,82 azalış, %40 BST ikamesiyle %1,08 azalış göstermiştir. Görünür boşluk oranında ise % 5 BST ikamesiyle % 4,95 azalış, %10 BST ikamesiyle %1,86 azalış, %15 BST ikamesiyle %0,40 azalış, %20 BST ikamesiyle %1,25 azalış, %30 BST ikamesiyle %1,81 azalış, %40 BST ikamesiyle %2,26 azalış olmuştur.

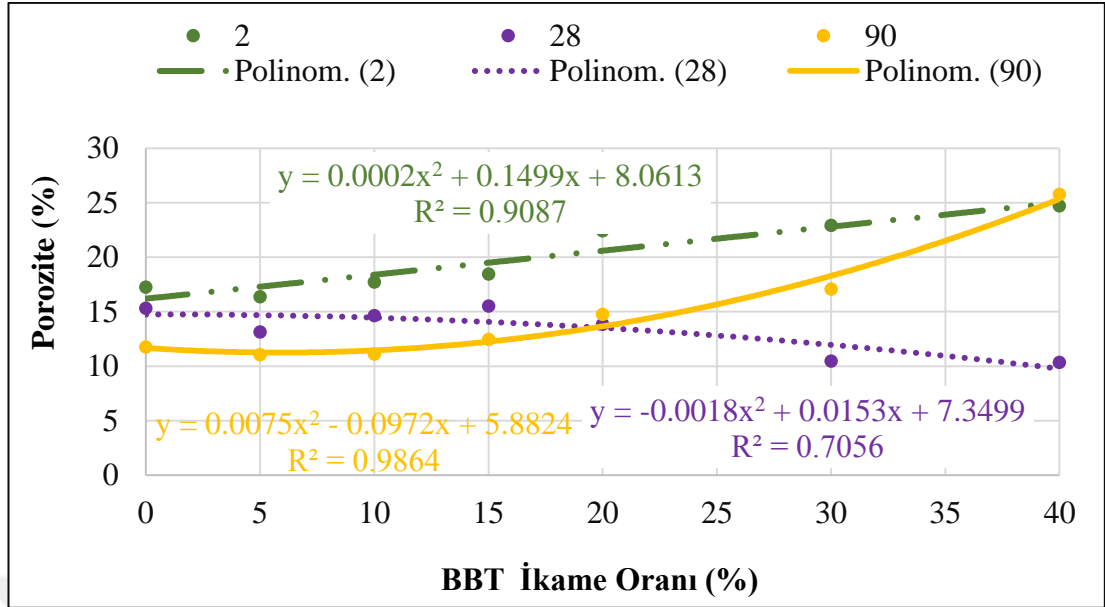
Veriler değerlendirildiğinde suda kür yapılan her bir çimento grubunda da su emme ve görünür porozite değeri ikame oranı artışıyla değişmiştir. Genel olarak, su emme ve porozite değerleri 2 ve 28 günlük su emme ve görünür porozite değerlerine oranla daha düşük değerler almıştır. Bunun sebebinin kapiler boşlukların bir kısmının zamanla kapanarak numunenin içine su sızmasının engellenmesi olduğu düşünülmektedir.



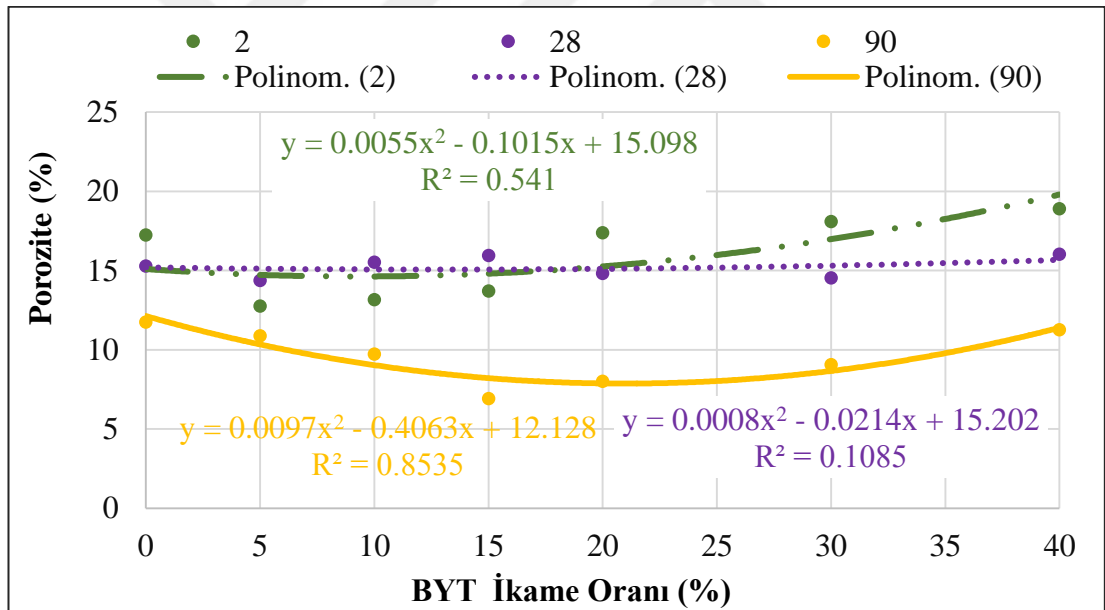
Şekil 4.24 BT ikameli çimentoların zamana bağlı porozite gelişimlerinin karşılaştırmalı grafiği

90 günlük süreçte BBT ikameli çimento harçlarında %20 ikame oranına kadar porozite azalmış ve %20'den sonra porozite artmıştır. Diğer BST ve BYT ikamelerinde porozite 90 günlük süreçte azalma eğilimini sürmüştür.

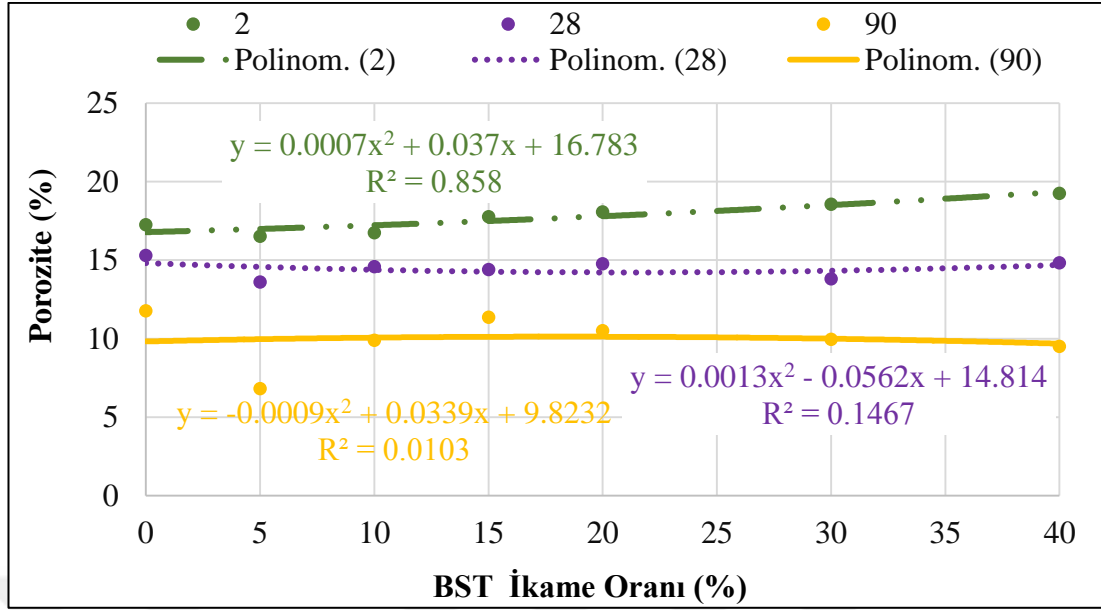
Su emme oranlarının süreç ilerledikçe azalma eğilimi göstermelerinin nedeninin malzeme içindeki katı madde oranının zamanla artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Su içinde bekletilen harç numunelerde su emme oranı azalırken boşluk oranının artmasının ise hidrasyon ürünlerinin yıkanması sonucunda agrega-çimento ara yüzlerinde oluşan boşluklardan dolayı olduğu düşünülmektedir. CEM I tipi çimentonun yerine %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında BBT, BST ve BYT'lerin kullanılması ile üretilen harç örneklerin 2, 28 ve 90 gün yaşlarda gerçekleştirilen porozite deneylerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.25 BBT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı porozite değişimleri



Şekil 4.26 BYT ikameli çimento harçlarının zamana bağlı porozite değişimleri



Şekil 4.27 BST ikameli çimento harçlarının zamana bağlı porozite değişimleri

4.2.5 Kapiler su emme deney sonuçları

Her bir karışım için 100 mm boyunda hazırlanan numuneler, sabit ağırlığa gelinceye kadar $50 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde bekletilmiştir. Deney esnasında suyun buharlaşarak uzaklaşmasını engellemek amacıyla numunelerin çevresi silikon ile kaplanmıştır. Numuneler daha sonra su içerisine 2 mm batacak şekilde yerleştirilmiş ve 5, 10, 20, 30, 60, 120 dakika ile 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 gün sürelerinde, numunelerin yüzeylerindeki serbest su, nemli bir bez ile silinerek, 0.01 g hassasiyetli bir tartı ile kütle artışları belirlenmiştir. Numunelerin başlangıçtaki ağırlıklarına göre, ağırlık farkları hesaplanarak kapiler su emme değerleri bulunmuştur.

Kapiler su emme deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir. Kapiler su emme deney sonuçlarına göre 90 günlük süreçte bütün harç numunelerin kapiler su emme değerleri değişik oranlarda artış ve azalışlar göstermiştir. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde;

- BBT'nin artan ikame oranlarıyla birlikte kapilerite katsayısı ilk olarak azalış gösterirken daha sonraki ikamelerde artış göstermiştir.
- BYT ikamesi ile birlikte kapilerite katsayısında artış ve azalışlar meydana gelmiştir.

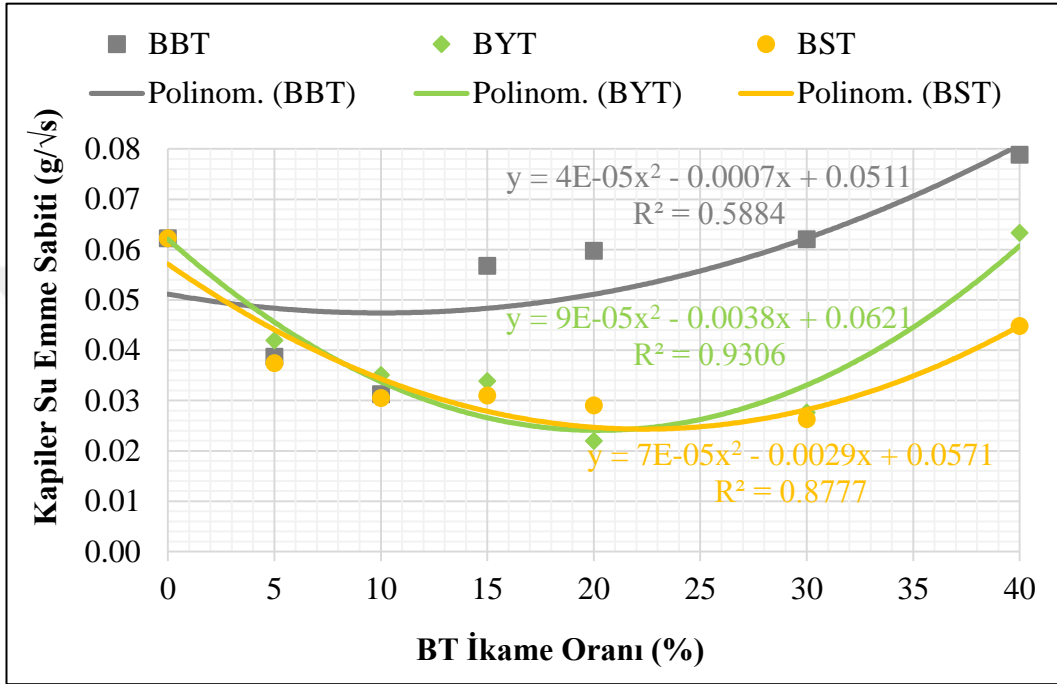
- Artan BST ikamesi kapilerite katsayısını başlangıçta artırırken daha sonraki değerlerde azaltmıştır.

Çizelge 4.6 90 günlük kapiler su emme deneyi sonuçları

No	Çimento Tipi	Katkı Oranı	Kapiler Su Emme Katsayısı (cm/ s ^{1/2} x10 ⁻⁴)
1	R	0	0,0622
2	BBTC1	5	0,0387
3	BBTC2	10	0,0313
4	BBTC3	15	0,0568
5	BBTC4	20	0,0597
6	BBTC5	30	0,0620
7	BBTC6	40	0,0788
8	BYTC1	5	0,0419
9	BYTC2	10	0,0351
10	BYTC3	15	0,0339
11	BYTC4	20	0,0220
12	BYTC5	30	0,0276
13	BYTC6	40	0,0633
14	BSTC1	5	0,0374
15	BSTC2	10	0,0305
16	BSTC3	15	0,0310
17	BSTC4	20	0,0779
18	BSTC5	30	0,0263
19	BSTC6	40	0,0448

Kapiler su emme deneyine tabi tutulan numunelerde en fazla artış gösterenin BBT ikameli çimento harçlarının olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin basınç dayanımlarıyla bağlantılı olduğu, harç numunelerin içyapılarında gelişen çatlakların olduğu düşünülmektedir. Ayrıca BYT ikamesiyle birlikte kapiler su emme katsayısı BST ikamesine göre daha büyük değerler almıştır. Bu durum makro boşluk yapısının BST ikameli numunelerde daha az olduğunu göstermektedir. Yapılan deneyler sonucu alınan verilere göre;

- Su emme katsayılarının azalma nedeninin çimento hamurunda oluşan reaksiyon ürünlerinin kılcal boşlukları doldurmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kapiler su emme katsayısının artış sebebinin ise 90 gün kür havuzunda bekleyen numunelere suyun yıkanma etkisi yapmasıdır.



Şekil 4.28 BT ikame oranlarına göre hesaplanan kapiler su emme sabitlerinin korelasyon eğrileri

Yapılan deney sonucunda sadece taban kısmından numune içerisine su girişi sağlanmış ve bu durum her bir harç numunesinin nem içeriği ile ısısında değişimler oluşturmuştur. Meydana gelen bu farklılıklar numunelerin özellikleri hakkında fikir yürütmemize yardımcı olmuştur. Yapılan deneysel çalışmayla harç numunelerinde, kullanıldığı yere bağlı olarak zamanla oluşabilecek hacimsel deformasyonlara (büzülme, şişme gibi) önlem alınması sağlamıştır. Çünkü oluşan hacimsel deformasyonlara bağlı olarak malzemede zamanla mikro çatlaklar oluşmaktadır. Oluşan mikro çatlaklardan, yapı malzemesi içerisine suyun girişi ve onun içerisindeki hareketi çok daha kolaylaşmaktadır. Bunun sonucunda doğrudan veya dolaylı yollarla giren su, yapılarda hasarlara, küflenmeyle de sonuçlanmaktadır. Yine kapiler su emmeyle iç mekânlardaki havanın nem oranı sürekli değişmekte ve

bunun sonucu olarak da yapı malzemeleri ile burada yaşayan canlılar genelde olumsuz yönde etkilenmektedir (Özdemir,2002). Bu bilgiler kapiler su emme katsayısı değerinin bilinmesinin önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan deneysel çalışmayla Şekil 4.28’de verilenlere göre BT’nin artan ikame oranlarıyla birlikte kapiler su emme katsayısında azalış ve artışlar olmuştur. Bu durum kullanılan her üç BT’nin numune içerisinde oluşturduğu gözeneklilik ve mikro çatlak oluşumunu hakkında bilgi vermektedir. Artan kapiler su emme katsayıları o numuneler içerisinde çok fazla sayıda çatlak olduğunu göstermektedir. Ayrıca hidrasyonun beklenen düzeyde gerçekleşmeyip geri düzeyde kaldığını bu nedenle numunelerin gözeneklilik seviyesinin diğerlerine oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum numunelerin su emme, porozite, dayanım değerlerini de etkilemektedir. Düşük kapiler su emme katsayılarına sahip numunelerin daha yoğun, mikro çatlak miktarı az ve gözeneklilik seviyesi diğerlerine oranla daha düşük olduğu söylenebilir.

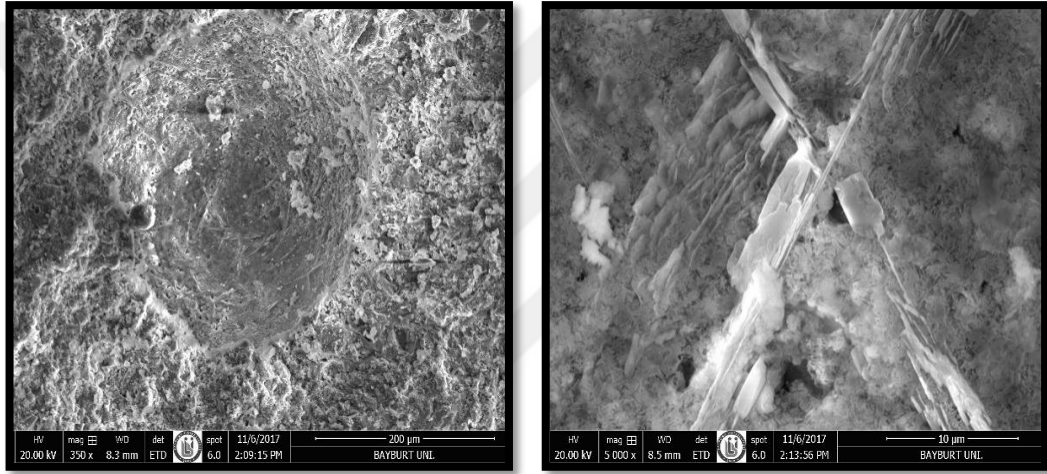
4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi ve X-Işını Difraksiyonu (XRD) Analizi

Çimento yerine ikame edilen veya çimentoya katılan uygun mineralojik katkı malzemeleri çimento özelliklerini iki yönde geliştirmektedir. Bunlar, çimento hidrasyonuna katılmak ve hidrate olmuş çimentonun fiziksel özelliklerini geliştirmek olarak özetlenebilir. Gelişen çimento fiziksel özelliklerinden en iyi bilinenler, basınç dayanımı, dayanıklılık ve hidrasyon ısıdır. Çimento hidrasyonu henüz tam olarak anlaşılmamıştır. Mineralojik ikameli veya katkılı çimento hidrasyonu alanındaki bilgiyi artırmak için SEM ve XRD gibi teknolojik cihazlarla çimento pastasının mikro yapısını araştırmak gerekir (Garcia vd, 2001).

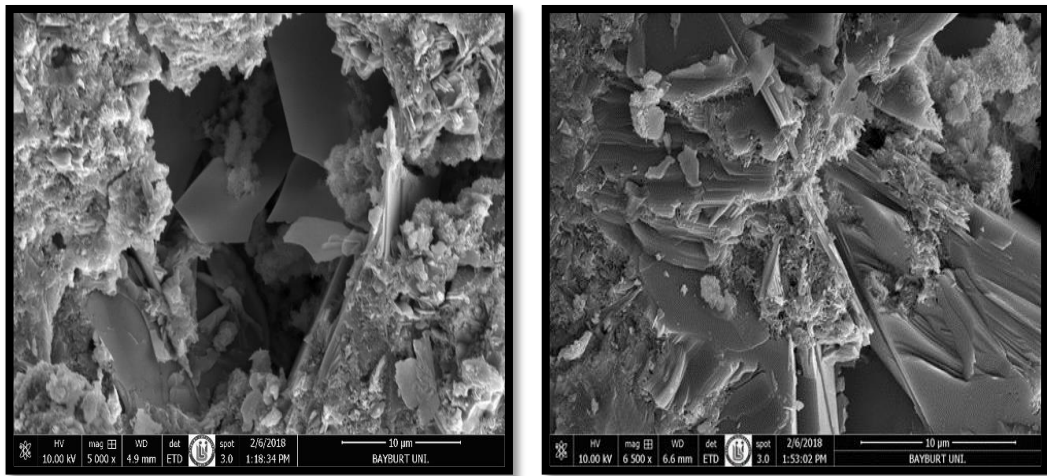
Çimento pastasının özellikleri, kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan değişik hidrasyon bileşiklerinin çimento pastasının içerisinde ne oranda yer almış olduğuyla belirlenmektedir. Bu nedenle BT’nin öğütülüp istenilen inceliğe getirildikten sonraki SEM ve XRD analizleri, BT ikameli çimento hamurlarının 7 ve 90 günlük kür sonundaki SEM ve XRD analizleri ve 700 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan harçların SEM ve XRD analizleri yapılmıştır.

4.3.1 Referans çimentosunun SEM ve XRD analizleri

Çimento hamurunun 7 gün yaşındaki SEM ve XRD analizlerinde Şekil 4.29 ve 4.30'de görüldüğü gibi yoğun miktarlarda Portlandit ve CSH yapıları gözlenmiştir. Şekil 4.29'da bir gözenek ve bu gözenek içindeki Portlandit oluşumları gösterilmiştir. Yüzeye de dağılmış olan Portlandit kristalleri CSH yapılarının içinde gizlenmiş şekilde bir görüntü oluşturmuş olup, yüzey taramalarında da oldukça yoğun bir şekilde görüntülenmiştir. Gözenek sayısının (50 – 500 mikron) fazla olmasının yanı sıra yer yer çatlaklara da rastlanmıştır.

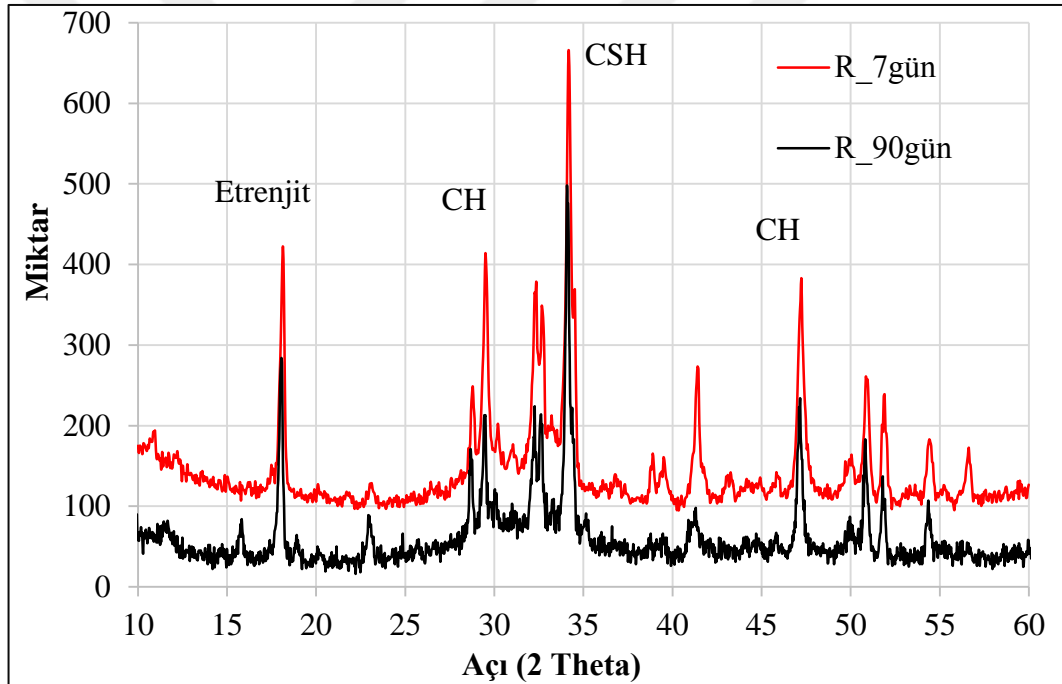


Şekil 4.29 Referans çimentosunun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.30 Referans çimentosunun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

Hidratasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerin CH oranı daha fazlayken, 90 günlük örneklerin CSH jelleri daha fazla yer kapladığı gözlemlenmiştir. Bu yapı XRD analizinde de açıkça görülmektedir. Ancak 90 gün yaşındaki numunelerde ayrıca mikro ve makro gözeneklerde yoğun Portlandit levhaları da gözlenmiştir. Bu yoğun Portlandit yapıları Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Bilindiği gibi C_3S bileşiğinin hidratasyonunda 3 mol CSH ve 3 mol Portlandit üretilmektedir. Çalışmada kullanılan çimentonun C_3S yoğunluklu (alit) çimentosu olması sebebiyle $Ca(OH)_2$ yapıları yoğunlukta rastlanılmıştır. Çimentoda C-S-H jeli bağlayıcı son ürün olduğu için önemli bir bileşendir ve bunun sonucu olarak dayanıma en büyük katkıyı sağlamaktadır.

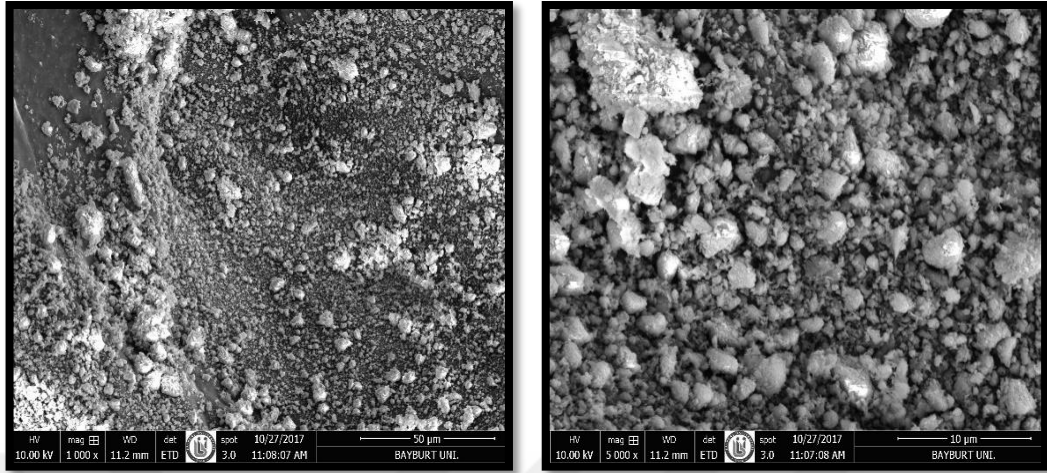


Şekil 4.31 Referans çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşındaki XRD analizi

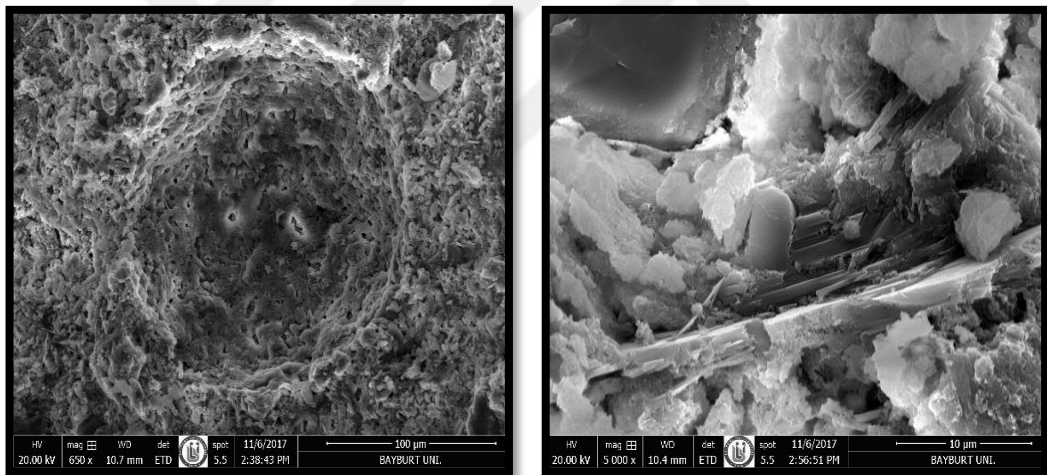
4.3.2 BBT ikameli çimentoların SEM ve XRD analizleri

Şekil 4.32’de öğütülmüş toz haldeki BBT’nin elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir. Mikroskop görüntülerinde görülebileceği gibi öğütülmüş toz haldeki BBT şekil ve geometri olarak belli bir yapıya sahip değildir. Keskin yüzeyli bir geometriye sahip olan BBT’nin mikroskop fotoğraflarında gözenek sayısının fazla olmasının yanında tanecik boyutlarının farklı ebatlarda olduğu da görülmüştür. Bu durumun

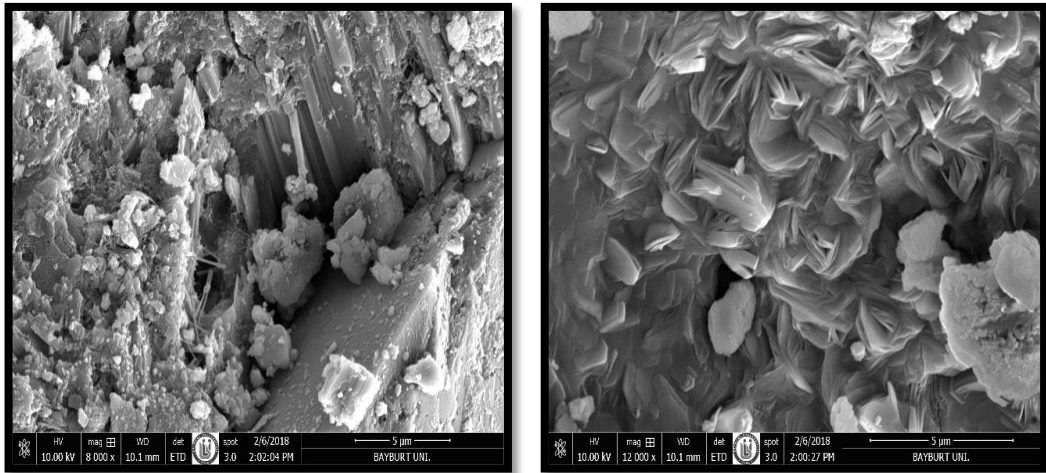
standart kıvam için gerekli su miktarının belirlenmesinde etkisi olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.32 Toz BBT'nin SEM analizleri

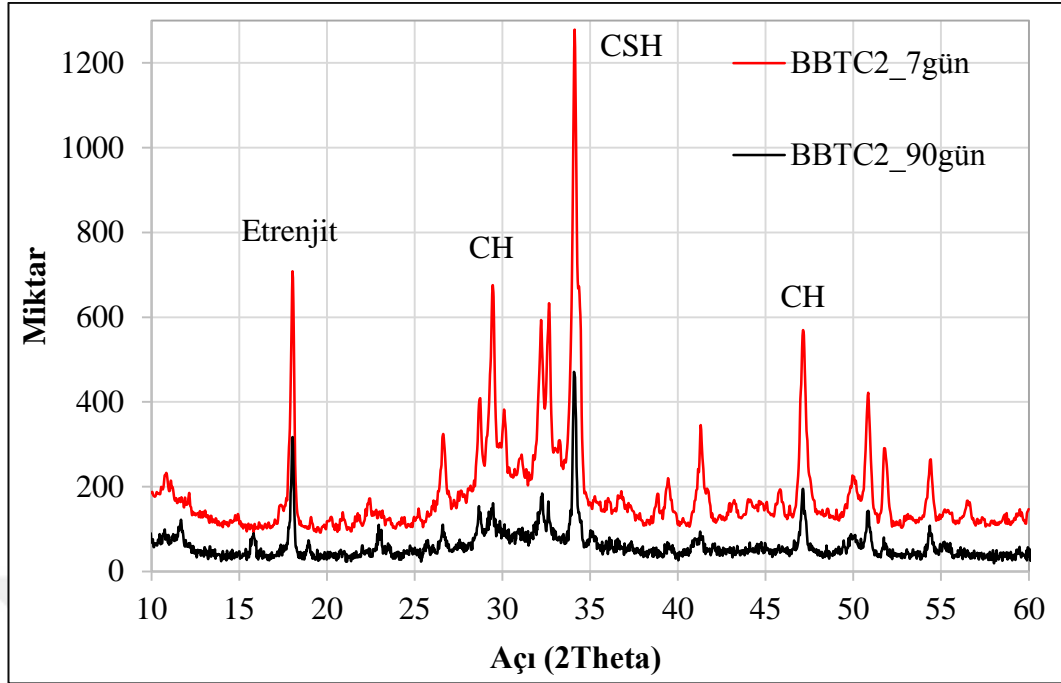


Şekil 4.33 %10 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



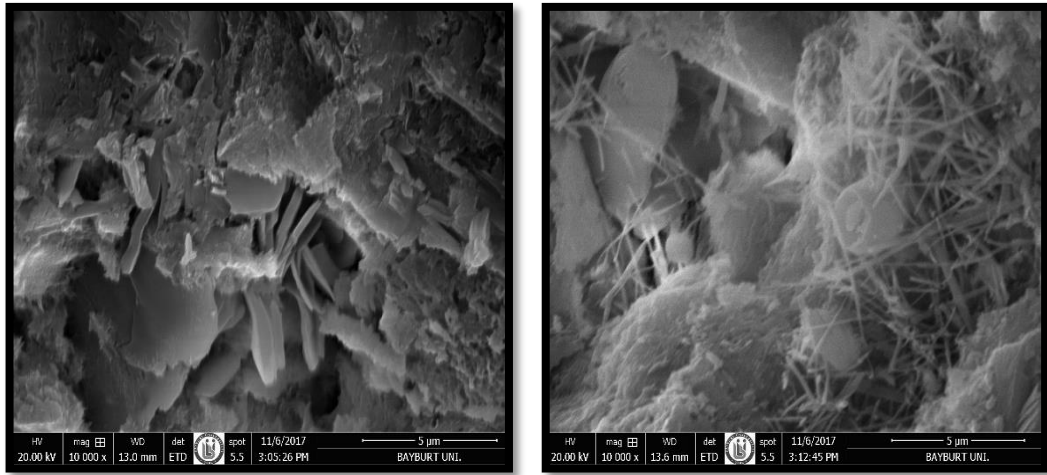
Şekil 4.34 %10 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de sırasıyla 7 gün ve 90 gün yaşlarında çekilen BBTC2 çimento hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. BBT’nin %10 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin kalsiyum hidroksit, CSH jelleri, etrenjit ve monosülfat olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara da rastlanılmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde CH oranı daha fazlayken, 90 günlük örneklerde CSH jelleri, etrenjit ve monosülfat daha fazla yer kaplamaktadır. CSH jeli başlangıçta iğnemsî biçimdeyken zamanla görüldüğü gibi düzensiz taneli ağ biçimine dönüşmüştür. Kalsiyum hidroksit kristalleri altıgen yapılı yassı prizma şekilli veya büyük zayıf uzun levhalar şeklinde görülmektedir. Çimento harcı içinde kalsiyum hidroksit (CH) kristalleri çimento ile agrega ara yüzeyinin bağlayıcılığını geliştirme eğilimindedir (Arslan vd,2006). 7 gün yaşındaki %10 BBT ikameli çimento hamurunun XRD analizine göre yoğun miktarda Portlandit ve az miktarda CSH jeli gözlenmiştir. Bu yapılar 90 gün yaşında puzolanik aktivite ile Portlandit yapıların CSH jeline dönüşmesi sebebiyle Şekil 4.35’de CSH yoğunluklu bir XRD verisi elde edilmiştir.

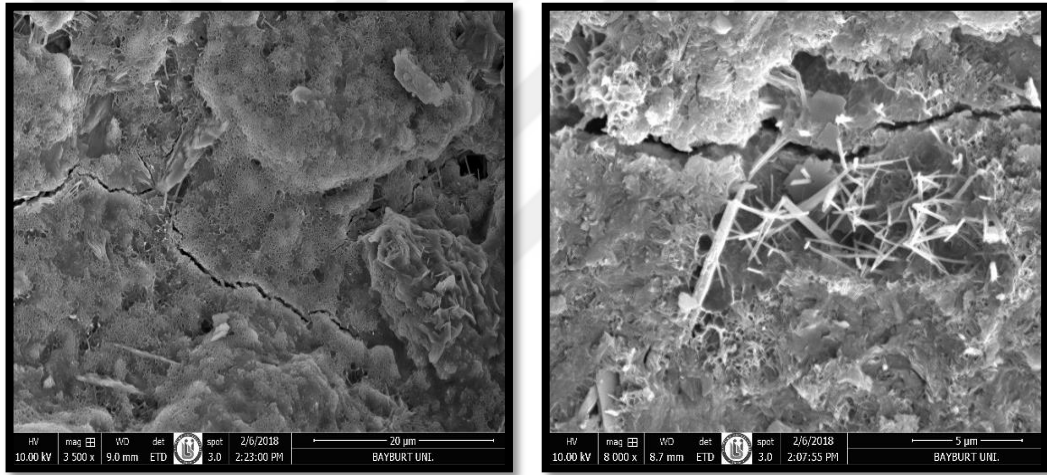


Şekil 4.35 %10 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşındaki XRD analizi

Şekil 4.35'e göre frekans eğrisinde %10 BBT ikamesi ile 90 gün yaşında CH ve etrenjit yapılarının miktar olarak azaldığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda SEM görüntülerinde de 7 gün yaşında CSH ve portlandit oluşumları, 90 gün yaşında portlandit yapıları ile az miktarda etrenjit ve yoğun CSH yapıları göze çarpmaktadır. XRD analizinde CSH yapılarının azaldığı gözlenmiştir. Böylece dayanımlarda oluşan azalmanın sebebi CSH formasyonundaki azalmalar olduğu söylenebilir.



Şekil 4.36 %20 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri

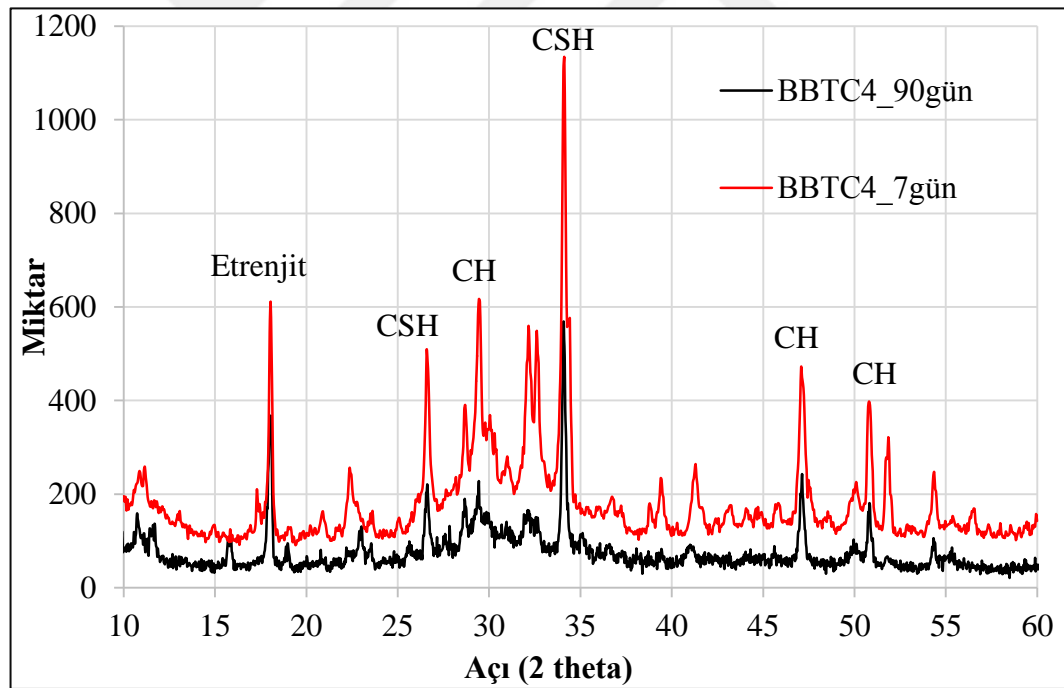


Şekil 4.37 %20 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

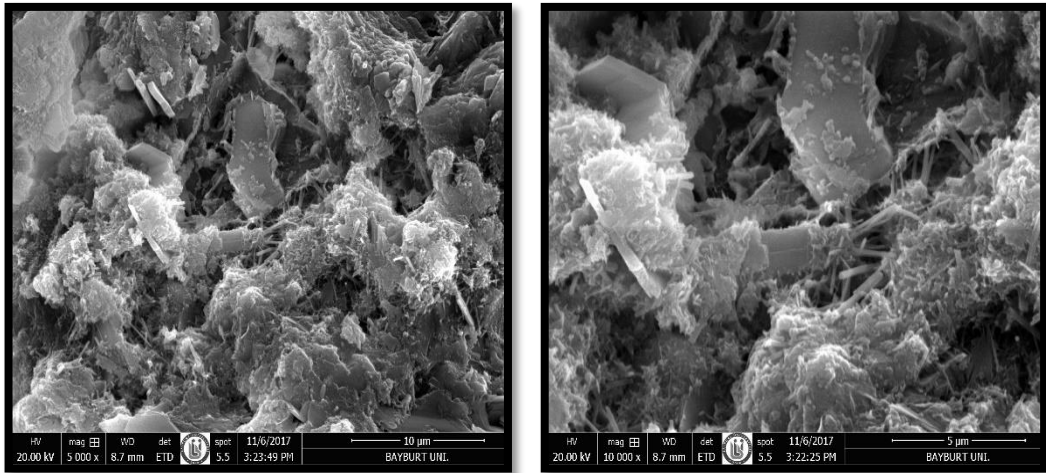
BBT'nin %20 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de gösterilmiştir. Bu SEM mikrograflarında görülen ve yine gözeneklere çökelmiş olarak yapılanmış öncelikle kalsiyum hidroksit ve diğer hidratasyon ürünleri CSH jelleri ve etrenjit olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara rastlanmıştır. Hidratasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde yoğun CH, CSH ve bir miktar etrenjit gözlenirken, 90 günlük örneklerden pek net görüntü alınamamış ancak yoğun CSH jelleri ve az miktarda etrenjit oluşumları görülmüştür. Genellikle etrenjit erken hidratasyon sırasında

boşluklarda iğne biçiminde görülmüştür. Bu biçim ilerleyen zamanda parçalanma nedeni olarak bilinen boşluklarda su emen ve genişleyen kristallere dönüşmüştür.

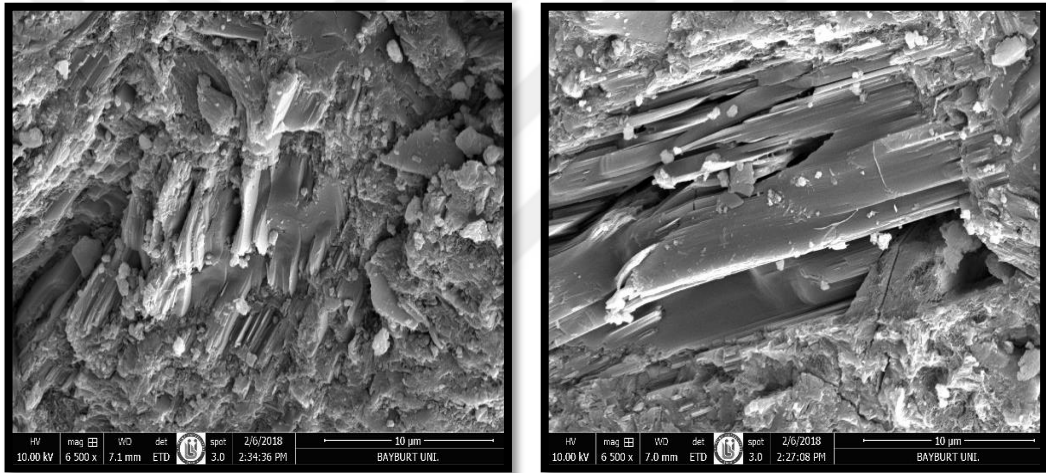
Şekil 4.36'da 7 gün yaşındaki %20 BBT ikamesi yapılmış çimentonun mikroskobik yapısı görüntülenmiştir. Buna göre her iki resimde CSH, CH ve etrenjit yapıları görüntülenmiştir. Şekil 4.37'da 90 gün yaşındaki çimento hamurunda yoğun miktarda düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu CSH yapıları ile CH ve etrenjit görüntülenmiştir. Kristal yapılarıdaki azalma Şekil 4.38'deki XRD analizinde de verilmiştir. SEM görüntüleri etrenjit oluşumunun boşluklarda ve çatlaklarda olduğunu göstermiştir. Bütün nem alan Portland çimentolarında etrenjit bulunmaktadır. Bu yüzden boşluklardaki etrenjit varlığı iç sülfat etkisinin bir işareti değildir. Etrenjit mineralinin büyümesi çimento harcının iç yapısında boşluk olduğunu göstermektedir (Arslan vd,2006).



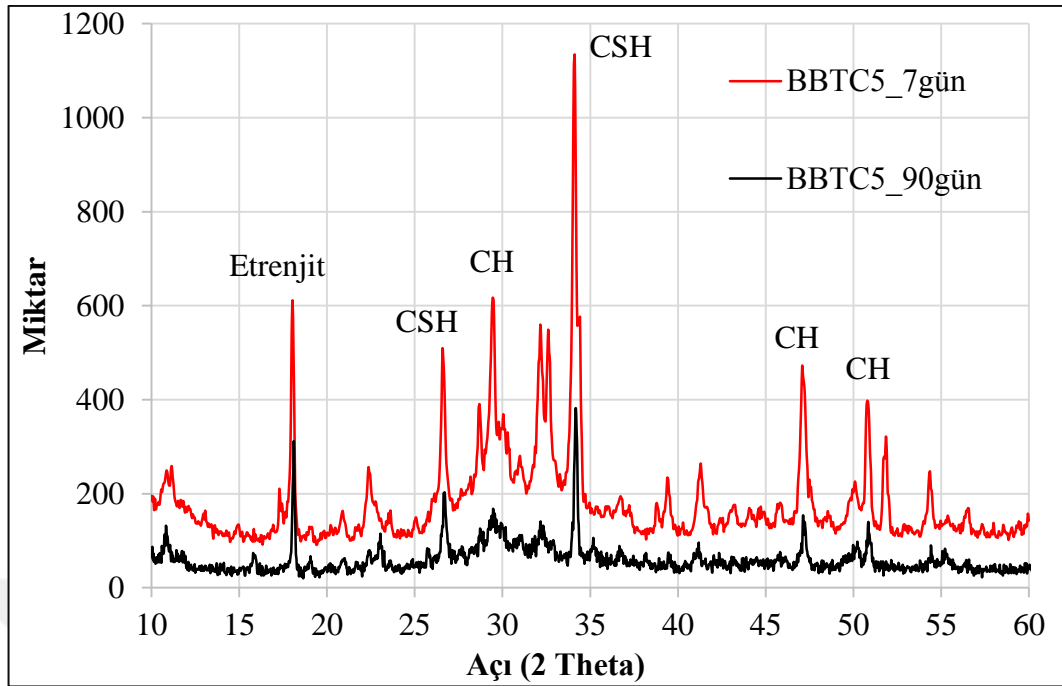
Şekil 4.38 %20 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşlarında yapılan XRD analizleri



Şekil 4.39 %30 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri

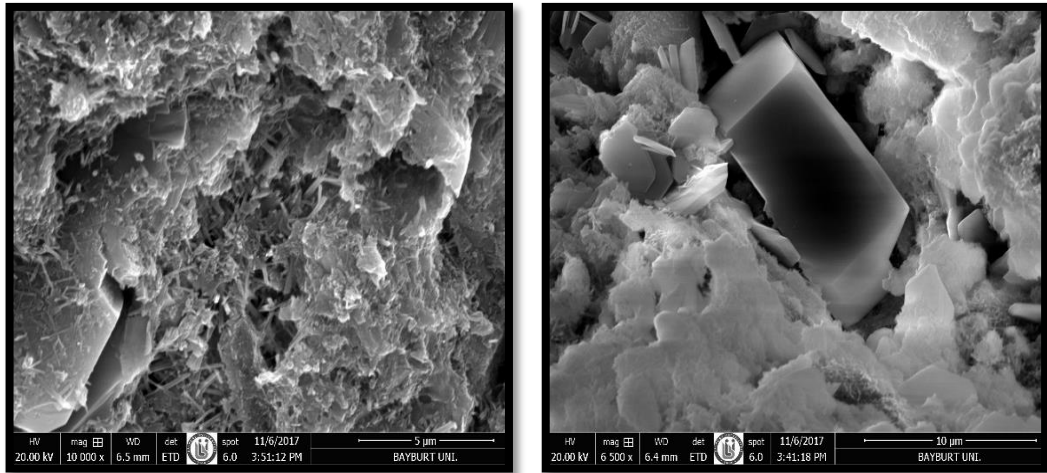


Şekil 4.40 %30 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

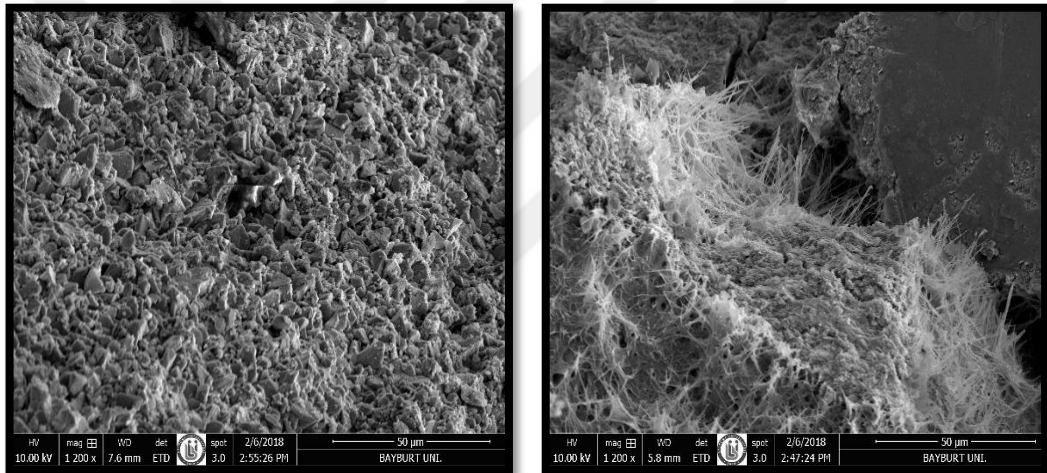


Şekil 4.41 %30 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşlarında yapılan XRD analizleri

BBT'nin %30 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'de verilmiştir. Şekil 4.41'de ise 7 ve 90 gün yaşındaki hamurların XRD analizleri verilmiştir. SEM görüntülerinde yoğun miktarda kalsiyum hidroksit ve CSH jelleri ve az miktarda etrenjit gözlemlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara rastlanmıştır. Hidratasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde CH, CSH ve etrenjit gözlenirken, 90 günlük örneklerden pek görüntü alınamamış yer yer CH oluşumları görülmüştür. Genellikle etrenjit erken hidratasyon sırasında boşluklarda iğne biçiminde, kalsiyum hidroksit kristalleri büyük zayıf uzun kristaller şeklinde çok farklı biçim ve boyutta görülmüştür. C-S-H jeli başlangıçta iğnemsî biçimdeyken zamanla düzensiz taneli ağ biçimine dönüşmüştür. C-S-H jeli mikro analiziyle belirlenen kalsiyum-silisyum (Ca-Si) oranı, mineralojik katkının yapısı veya su-bağlayıcı oranına bağlı olarak değişebilmektedir (Arslan vd, 2006).



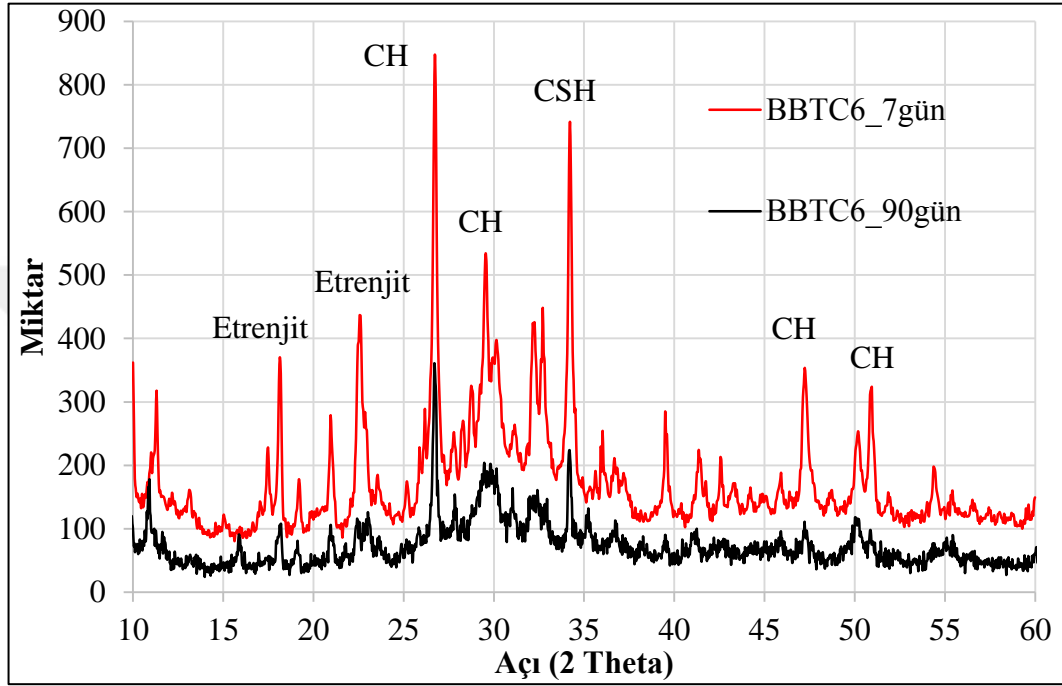
Şekil 4.42 %40 BBT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.43 %40 BBT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

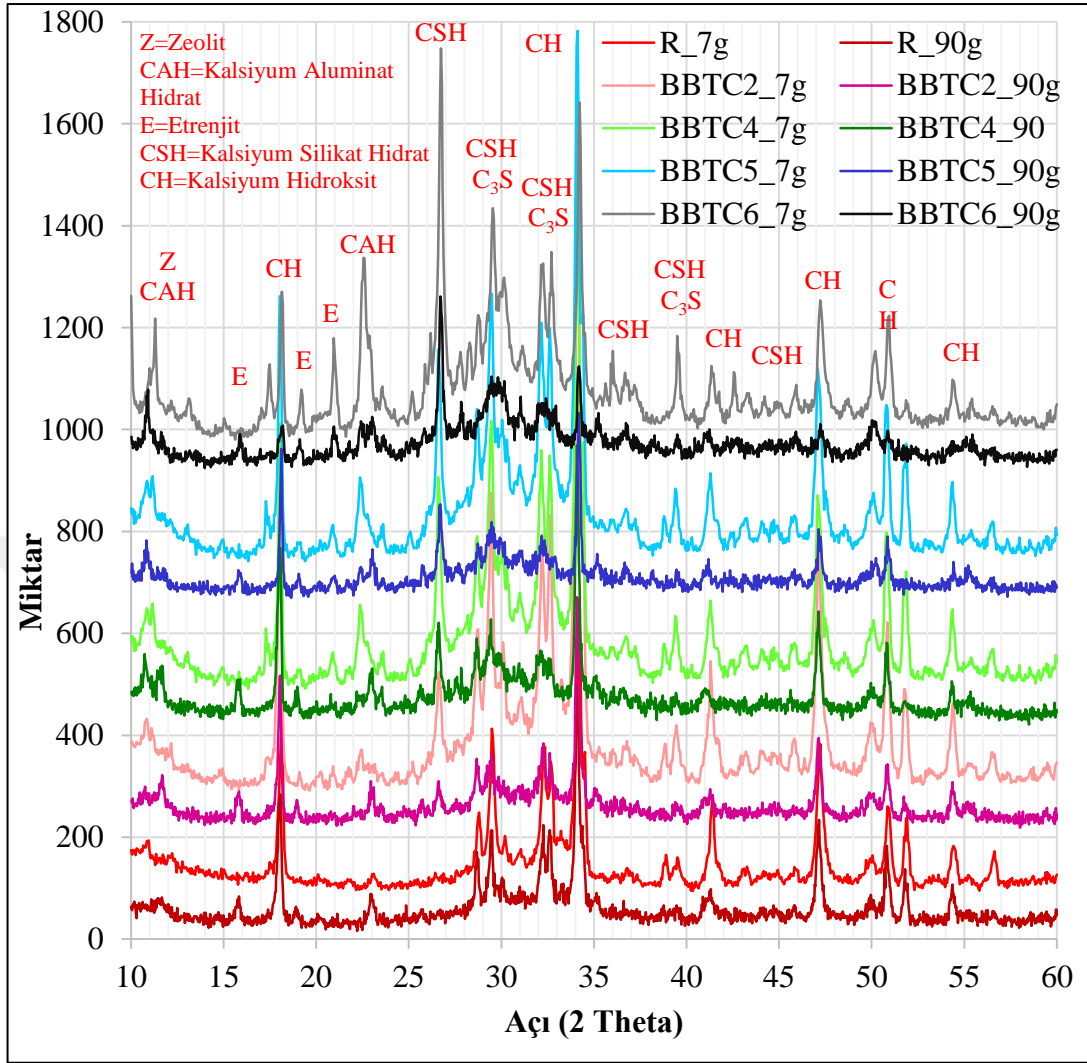
BBT'nin %40 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'de verilmiştir. Ayrıca aynı numunelerin XRD analizleri Şekil 4.44'de verilmiştir. Bu analizlerde hidrasyon ürünlerinin kalsiyum hidroksit, CSH jelleri, etrenjit ve hidrate olmamış çimento tanecikleri olduğu görülmüştür. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara rastlanmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde heksagonal prizma şekilli veya büyük zayıf uzun kristaller şeklinde CH, ağ örgüsü gibi CSH ve iğne şeklinde etrenjit gözlenirken, 90 günlük örneklerde genel olarak iğne biçiminde boşluklarda yoğun olarak görülen

etrenjit ve hidrate olmayıp zeolitleşmiş çimento tanecikleri görülmüştür. Bu tanecikler karışım suyunun büyük bölümünü yutma eğilimine sahiptirler. Bölgesel su-bağlayıcı oranı nedeniyle heterojen bir boşluk yapısı meydana gelmiştir (Arslan vd, 2006). Çimentoda oluşan bu durum basınç dayanımının düşmesine de sebep olmuştur.



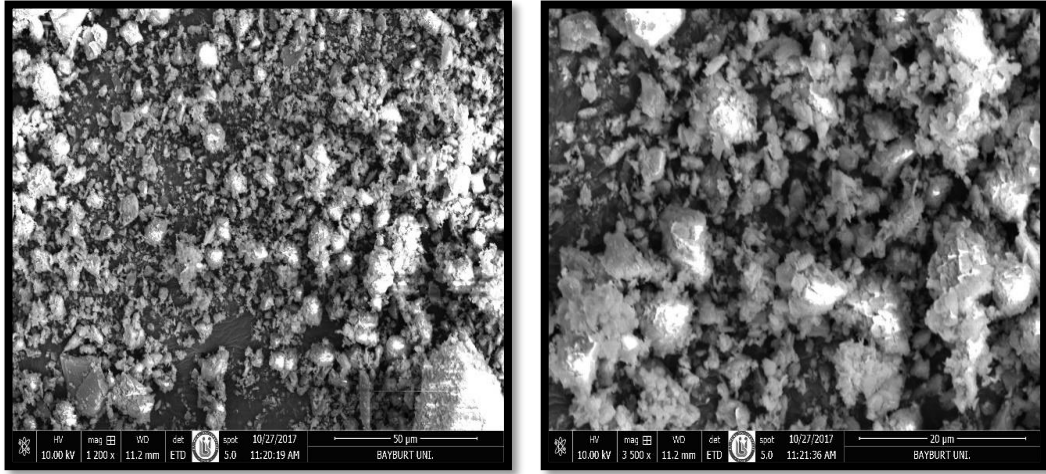
Şekil 4.44 %40 BBT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri

Şekil 4.45’de görüldüğü gibi BBT ikamesi arttıkça CSH yapılarında artış gözlemlenirken aynı zamanda etrenjit ve CAH oluşumlarında da artış olmuştur. Dayanım kayıplarının sebeplerinden birinin bu durum olduğu düşünülmektedir. BBT’de bulunan alüminyum ve kükürt içeriği dayanım kayıplarına neden olmuş olabilir. Aynı zamanda %40 BBT ikameli çimento hamurunun SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi zeolitleşme davranışı (alüminyumlu bileşiklerin kendi içinde birleşerek zayıf bölge) oluşturması da yine BBT ikamesiyle birlikte artmaktadır. Bu durum yine dayanım kayıplarına sebep olarak gösterilebilir.



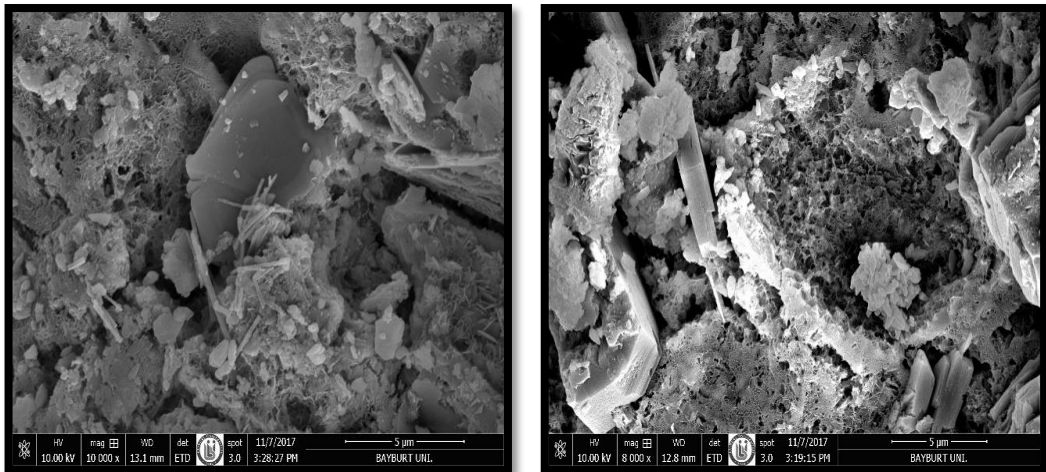
Şekil 4.45 Tüm BBT ikameli çimentoların mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı

4.3.3 BYT ikameli çimentoların SEM ve XRD analizleri

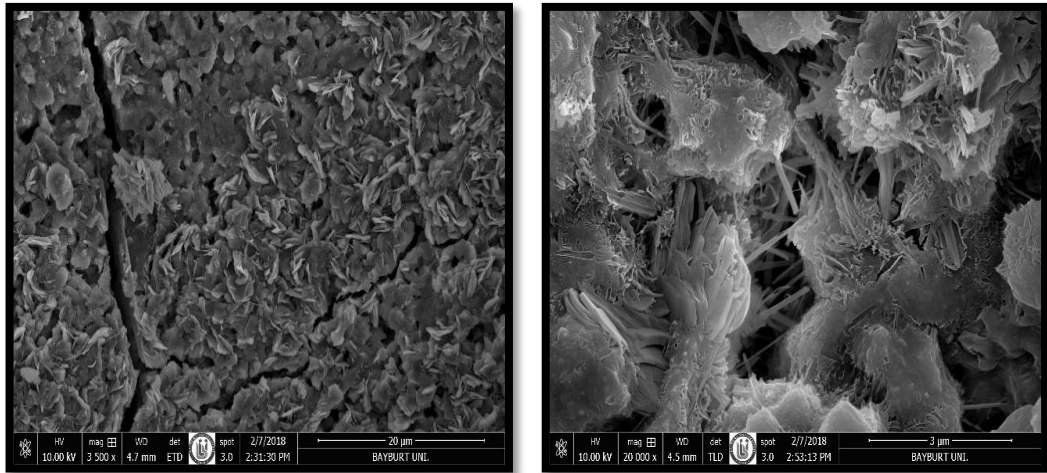


Şekil 4.46 Toz BYT'nin SEM analizleri

Şekil 4.46'da BYT'nin öğütülmesi sonucu farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları görüntülenmiştir. Bu fotoğraflarda tanecik boyutlarının aynı boyutlarda olduğu görülmüştür. BYT'nin mikroskobik görüntülerinde görüldüğü gibi tanelerin büyük çoğunluğu 20 mikrondan daha küçük olup kristal geometrileri şekilsiz, kesik ve keskin geometrili bir yapıya sahiptir.

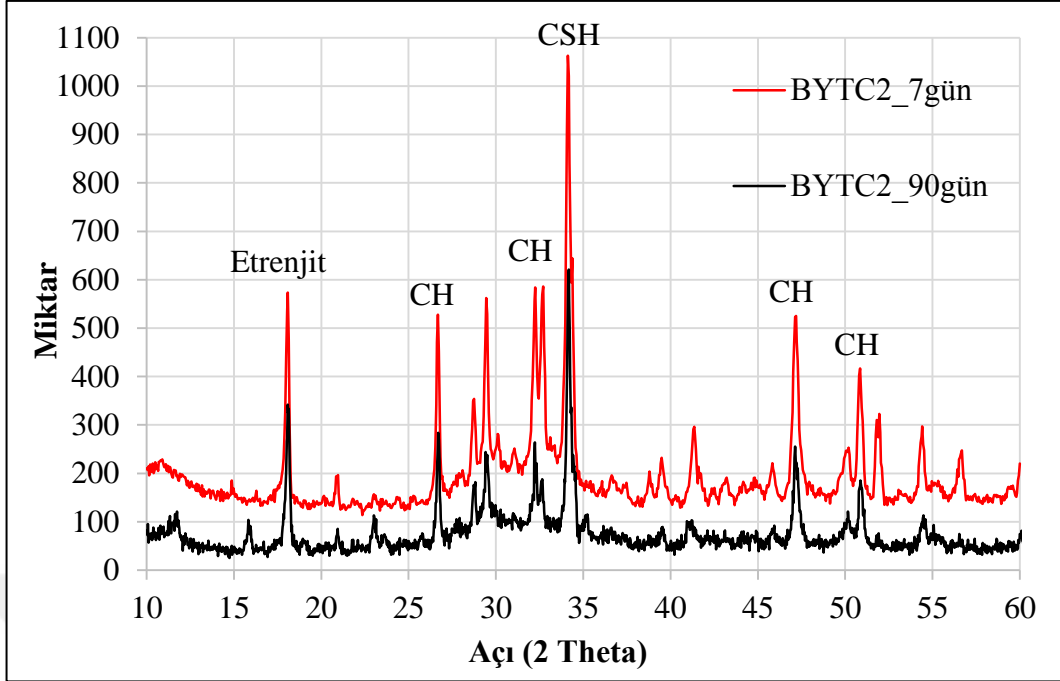


Şekil 4.47 %10 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



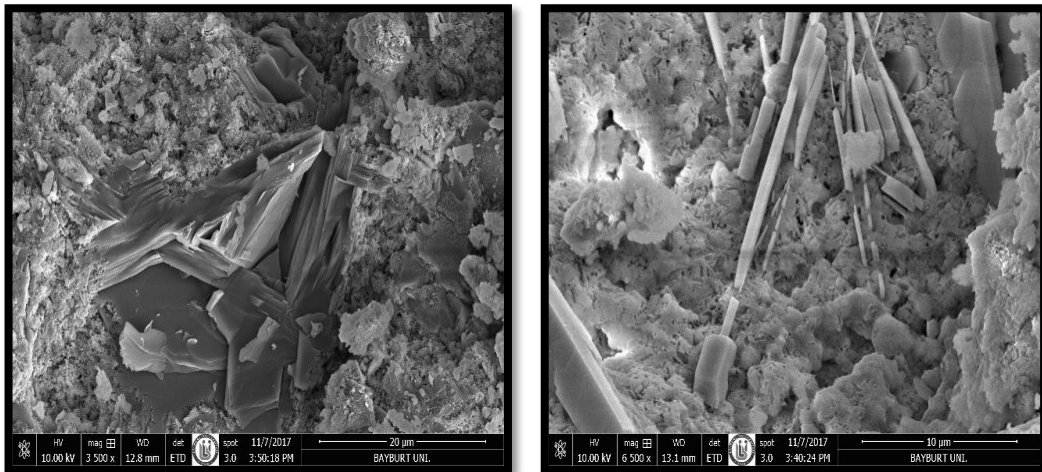
Şekil 4.48 %10 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.47 ve Şekil 4.48’de sırasıyla 7 gün ve 90 gün yaşlarında çekilen BYTC2 çimento hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. BYT’ nin %10 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin CH, CSH jelleri, etrenjit ve monosülfat olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara da rastlanılmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde CH oranı daha fazlayken, 90 günlük örneklerde CSH jelleri ve etrenjit daha fazla yer kaplamaktadır. CSH jeli başlangıçta iğnemsî biçimdeyken zamanla görüldüğü gibi düzensiz taneli ağ biçimine dönüşmüştür. Kalsiyum hidroksit kristalleri altıgen yapılı yassı prizma şekilli veya büyük zayıf uzun levhalar şeklinde görülmektedir. 7 gün yaşındaki %10 BYT ikameli çimento hamurunun XRD analizine göre yoğun miktarda portlandit ve az miktarda CSH jeli gözlenmiştir. Bu yapılar 90 gün yaşında puzolanik aktivite ile portlandit yapıların CSH jeline dönüşmesi sebebiyle Şekil 4.49’de CSH yoğunluklu bir XRD verisi elde edilmiştir.

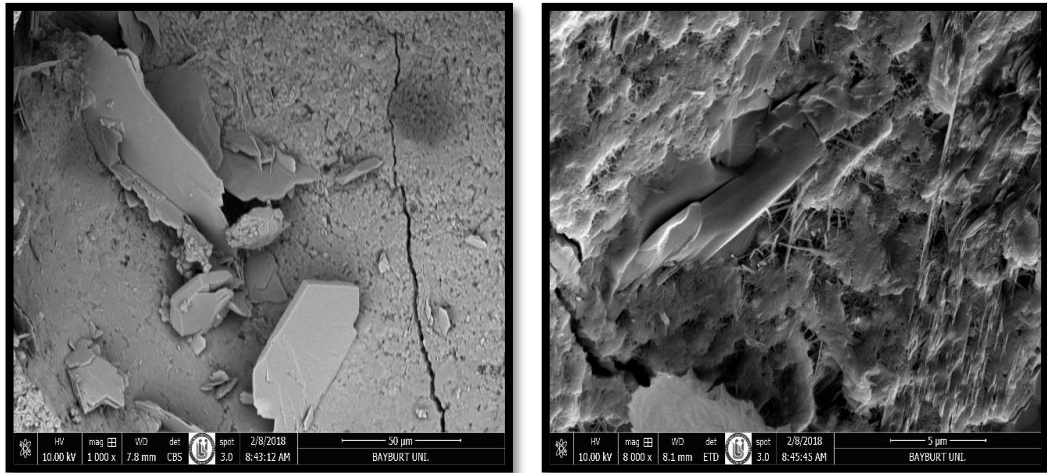


Şekil 4.49 %10 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşındaki XRD analizi

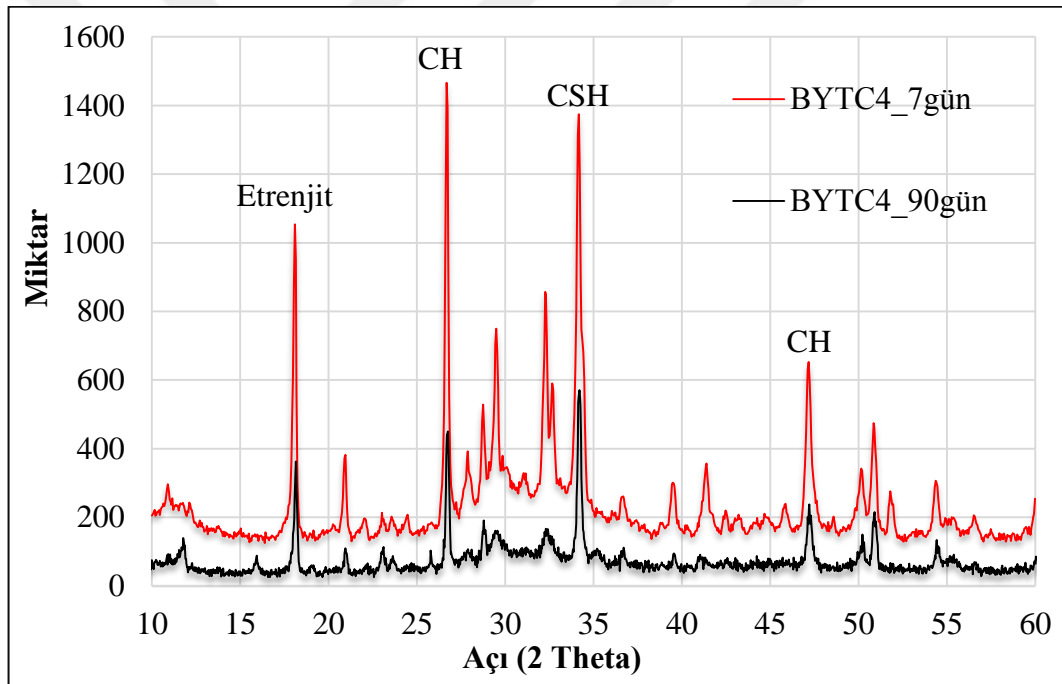
Şekil 4.49'e göre %10 BYT ikamesi ile 90 gün yaşında CH yapılarının miktar olarak azaldığı anlaşılmaktadır. CSH jellerinin 90 günlük çimento pastasındaki fazlalığı çimentonun 90 gün sonundaki dayanımın 7 günlük dayanımdan daha fazla olacağını göstermektedir.



Şekil 4.50 %20 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.51 %20 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

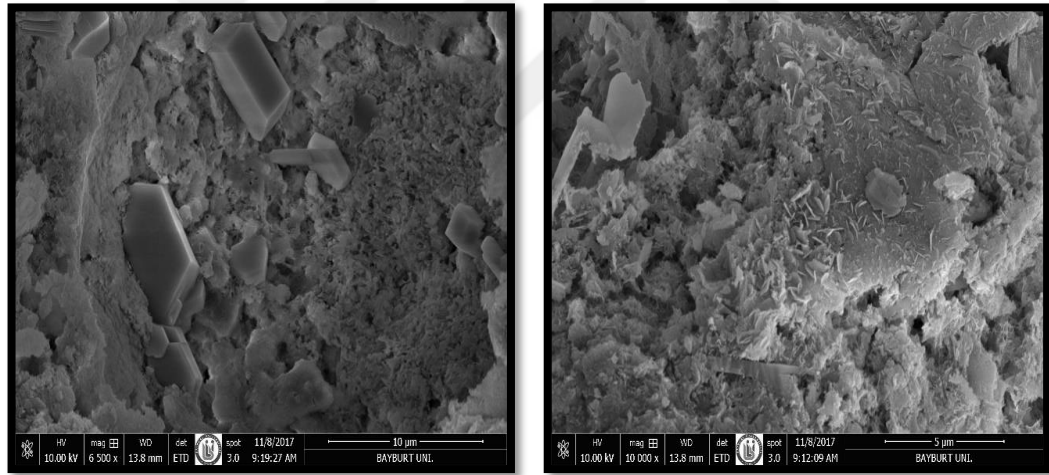


Şekil 4.52 %20 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri

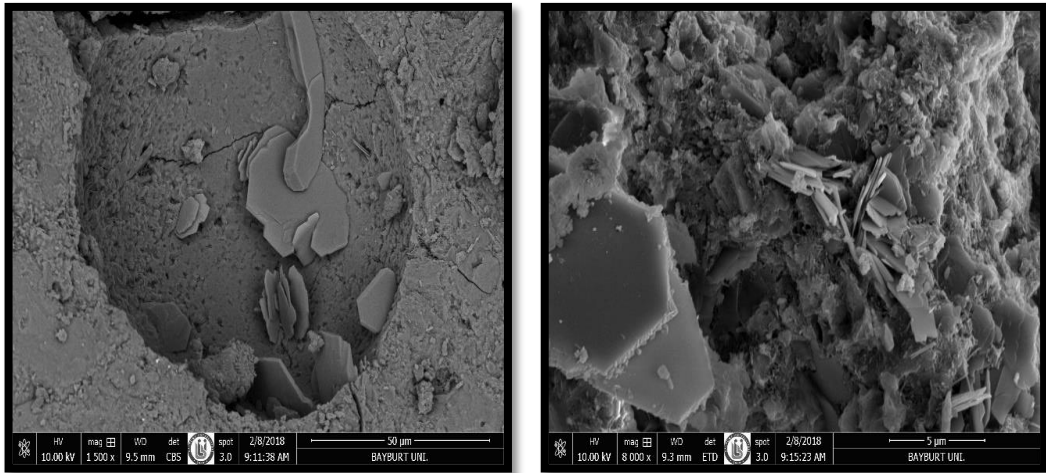
BYT'nin %20 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de gösterilmiştir. Çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin CH, CSH jelleri ve etrenjit olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer

çatlaklara rastlanmıştır. Hidratasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde yoğun CH, CSH ve bir miktar etrenjit gözlenirken, 90 günlük örneklerden CSH jelleri ve etrenjit oluşumları görülmüş, bazı bölgelerde kalsiyum hidroksite rastlanmıştır. 7 günlük çimento pastasında yassı prizma şekilli veya büyük zayıf uzun kristaller şeklinde görülen CH fazlayken, 90 günlük çimento pastasında düzensiz taneli ağ biçiminde görülen CSH oranı daha fazladır.

Şekil 4.50'de 7 gün yaşındaki %20 BYT ikamesi yapılmış çimentonun mikroskopik yapısı görüntülenmiştir. Buna göre her iki resimde CSH, CH ve etrenjit yapıları görüntülenmiştir. Şekil 4.51'de 90 gün yaşındaki çimento hamurunda yoğun miktarda düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu CSH yapıları ile CH ve etrenjit görüntülenmiştir. Kristal yapılarıdaki azalma Şekil 4.52'deki XRD analizinde de verilmiştir.



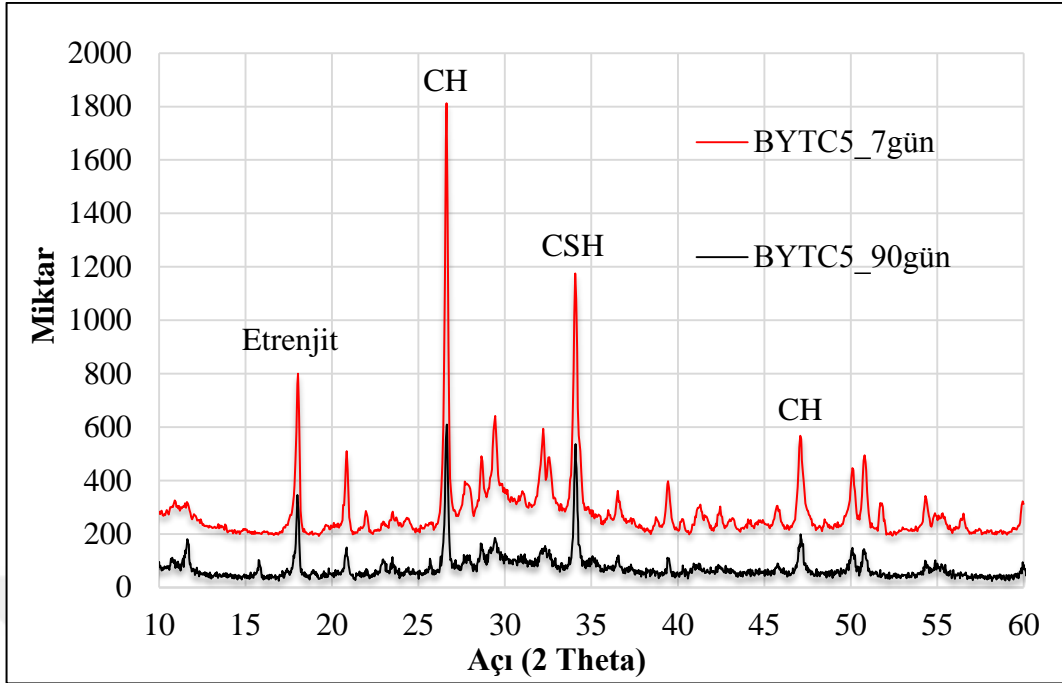
Şekil 4.53 %30 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



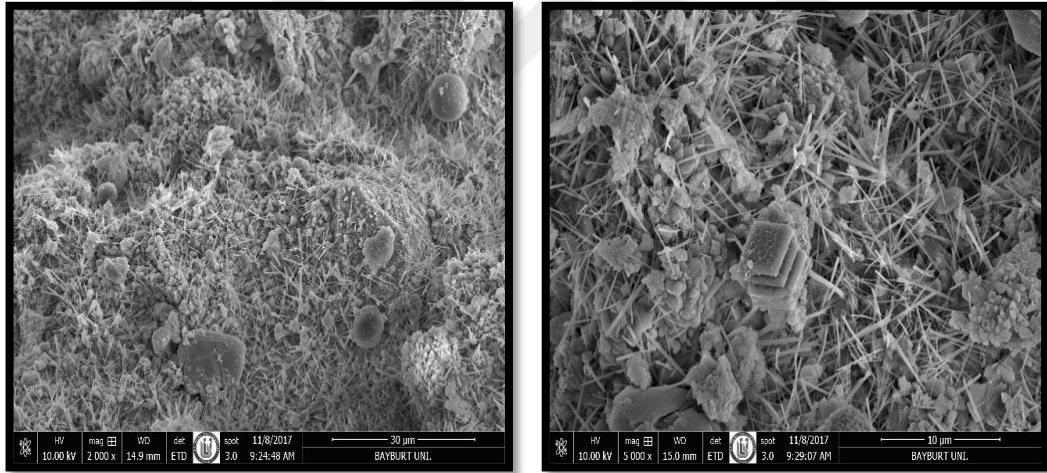
Şekil 4.54 %30 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

BYT'nin %30 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'de gösterilmiştir. Çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin kalsiyum hidroksit, CSH jelleri ve nadiren etrenjit olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara rastlanmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde yoğun CH, CSH ve oluşum aşamasında olan etrenjit yapıları gözlenirken, 90 günlük örneklerden CSH jelleri ve etrenjit oluşumları görülmüş, bazı bölgelerde kalsiyum hidroksite rastlanmıştır.

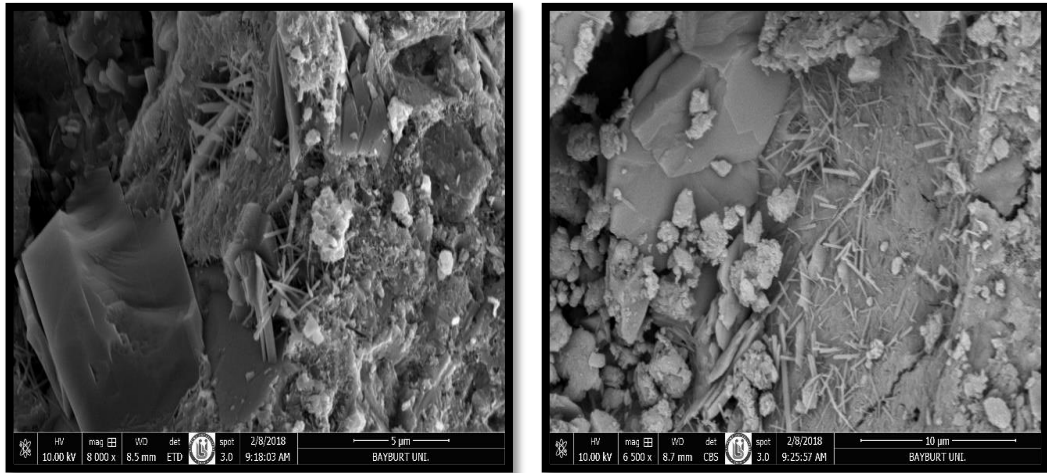
Şekil 4.55'de verilen XRD analiz sonuçlarına bağlı olarak 7 gün yaşındaki %30 BYT ikamesi yapılmış çimento hamurunda yoğun CH, CSH ve etrenjit yapıları saptanmıştır. 90 gün yaşındaki çimento hamurunda yoğun miktarda düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu CSH yapıları ile CH ve etrenjit görülmüştür. Kristal yapılarıdaki azalma Şekil 4.55'de görülmektedir.



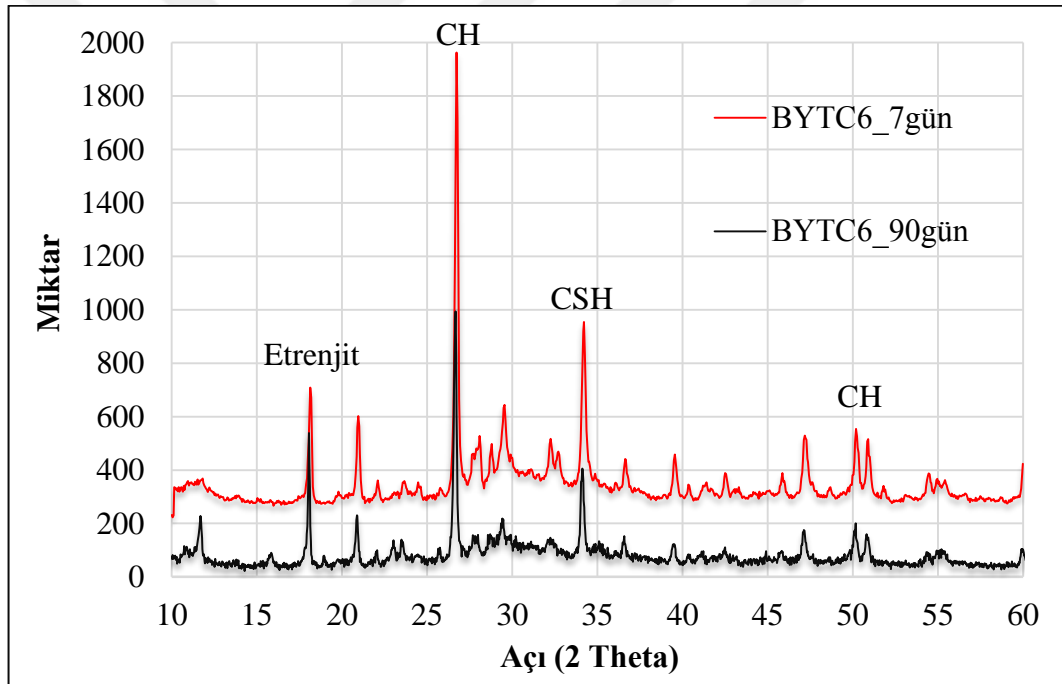
Şekil 4.55 %30 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri



Şekil 4.56 %40 BYT ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.57 %40 BYT ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri



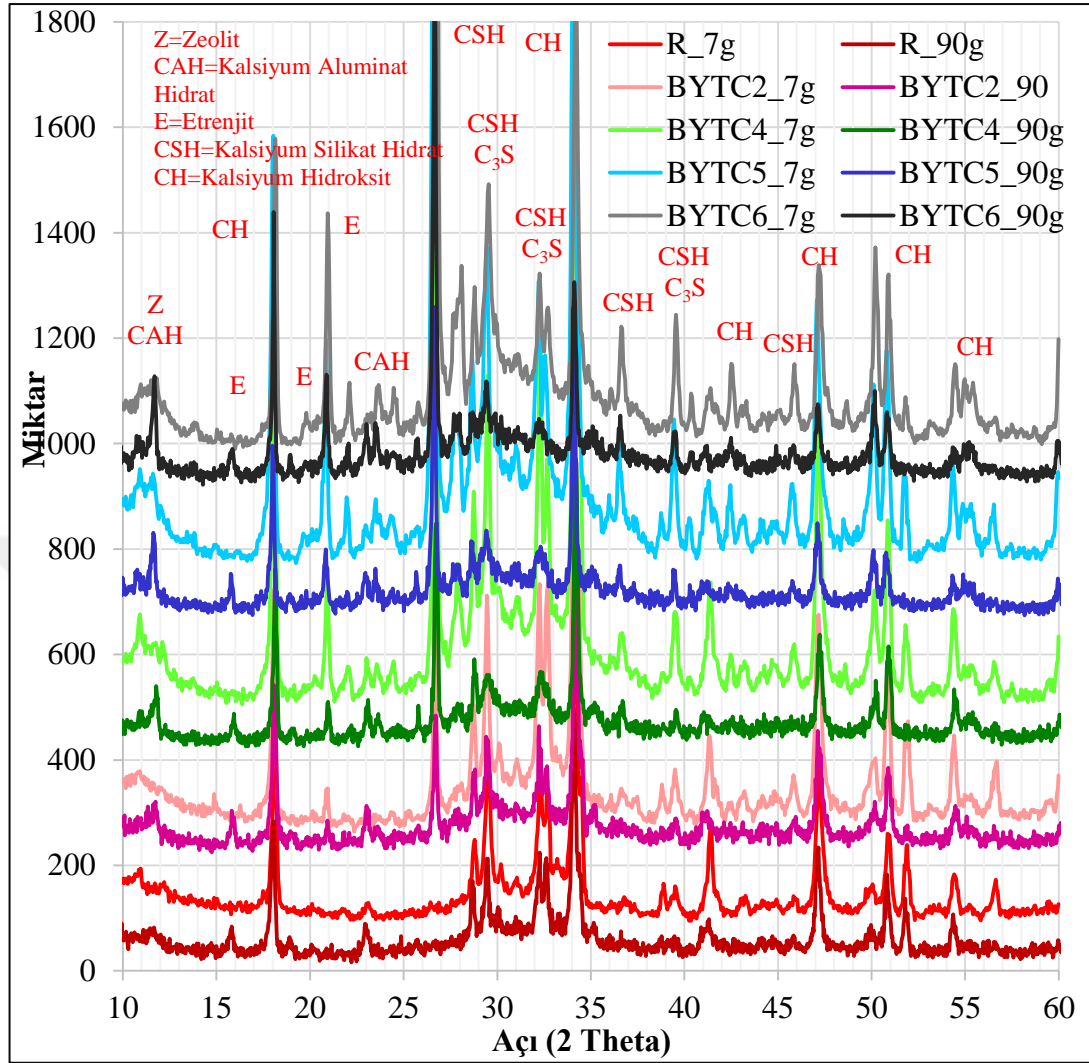
Şekil 4.58 %40 BYT ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri

BYT'nin %40 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de verilmiştir. Ayrıca aynı numunelerin XRD analizleri Şekil 4.58'de verilmiştir. Bu analizlerde hidrasyon ürünlerinin kalsiyum hidroksit, CSH jelleri ve etrenjit olduğu görülmüştür. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer

çatlaklara rastlanmıştır. Hidratasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde hegzagonal prizma şekilli veya büyük zayıf uzun kristaller şeklinde CH, ağ örgüsü gibi CSH ve iğne şeklinde etrenjit gözlenirken, 90 günlük örneklerde genel olarak iğne biçiminde boşluklarda yoğun olarak görülen etrenjit ve hidrate olmayıp zeolitleşmiş çimento tanecikleri görülmüştür. Çimentoda görülen bu tanecikler karışım suyunun büyük bir bölümünü yutarak heterojen bir boşluk oluşturmuştur (Arslan vd, 2006). Bu durumda basınç dayanımının düşmesine sebep olmuştur.

Şekil 4.58’de verilen XRD analiz sonuçlarına göre 7 gün yaşındaki %40 BYT ikamesi yapılmış çimento hamurunda yoğun CH, CSH ve etrenjit yapıları saptanmıştır. 90 gün yaşındaki çimento hamurunda yoğun miktarda düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu CH yapıları ile CSH ve etrenjit görülmüştür.

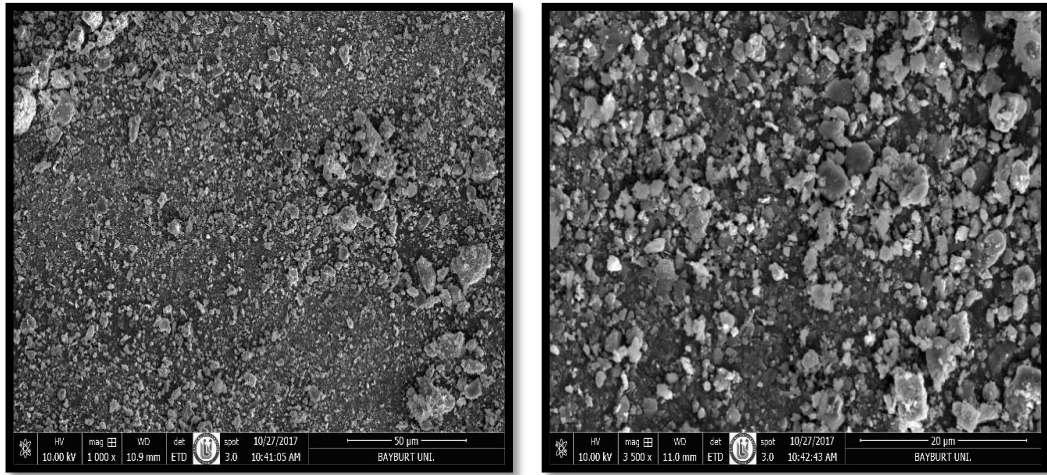
Şekil 4.59’de görüldüğü gibi BYT ikamesi arttıkça CH ve CSH yapılarında artış gözlemlenirken aynı zamanda etrenjit oluşumlarında da artış olmuştur. C-S-H jeli (kalsiyum silikat hidrat) çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandırıp dayanım kazanmasını sağlar. C-S-H hidrate olan ürünlerin yaklaşık %60’ını oluşturmaktadır. CH (kalsiyum hidroksit) dayanıma etkisi olmayıp, ancak çimento içindeki bazik yapıyı sağlar. Zayıf yapısı ve aderansı zayıflatıcı etkisi nedeniyle gerekenden fazlası istenmez. Hidrate olan ürünlerin yaklaşık %20’sini oluşturur. Bu nedenle oluşan ürünler dayanımlar üzerinde etkili olmaktadır.



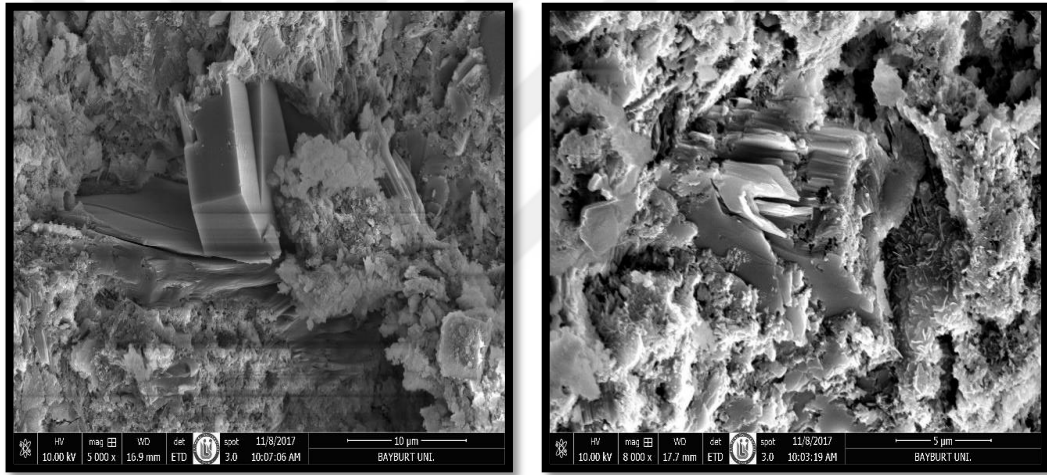
Şekil 4.59 Tüm BYT ikameli çimentoların mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı

4.3.4 BST ikameli çimentoların SEM analizleri

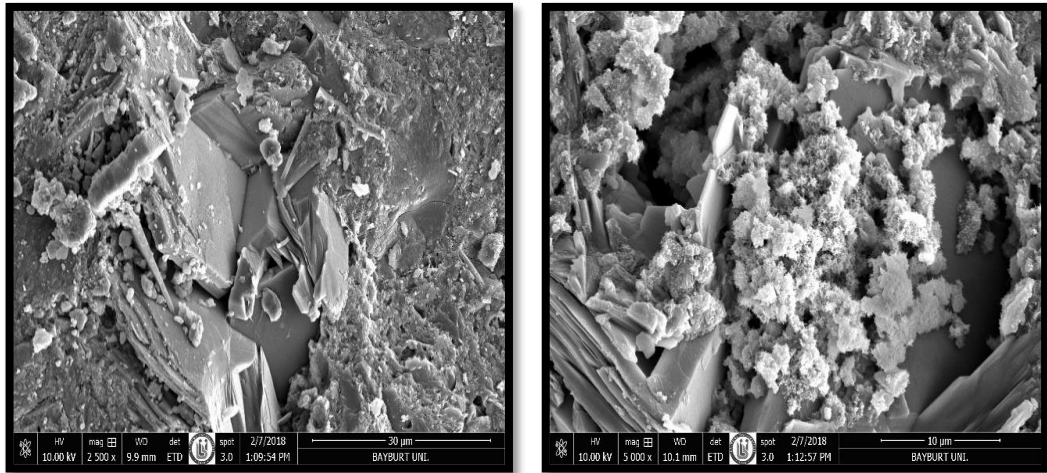
Şekil 4.60'de öğütülmüş toz haldeki BST'nin elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir. Genel olarak tanecik boyutlarının aynı olduğu görülmüştür. BST'nin mikroskopik görüntülerinde görüldüğü gibi tanelerin büyük çoğunluğu 20 mikrondan daha küçük olduğu ve kristal geometrilerinin şekilsiz, kesik ve keskin geometri bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.



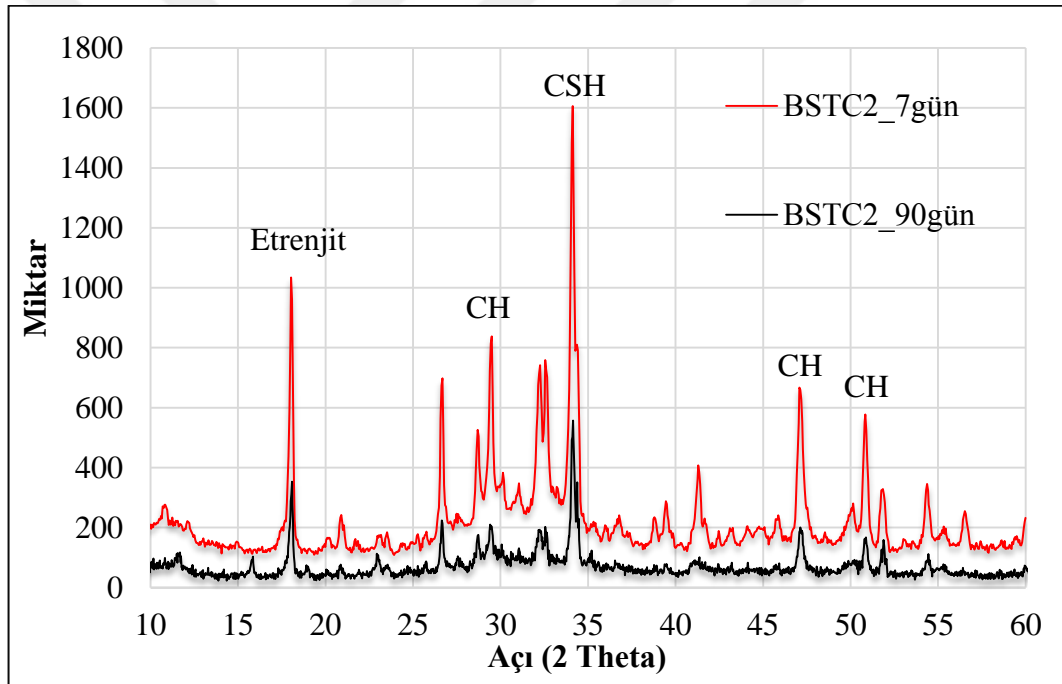
Şekil 4.60 Toz BST'nin SEM analizleri



Şekil 4.61 %10 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



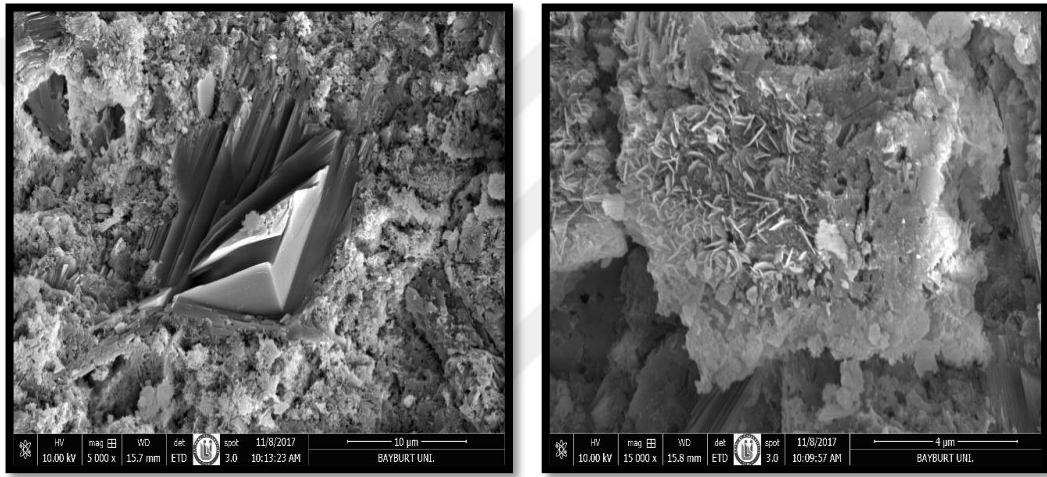
Şekil 4.62 %10 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri



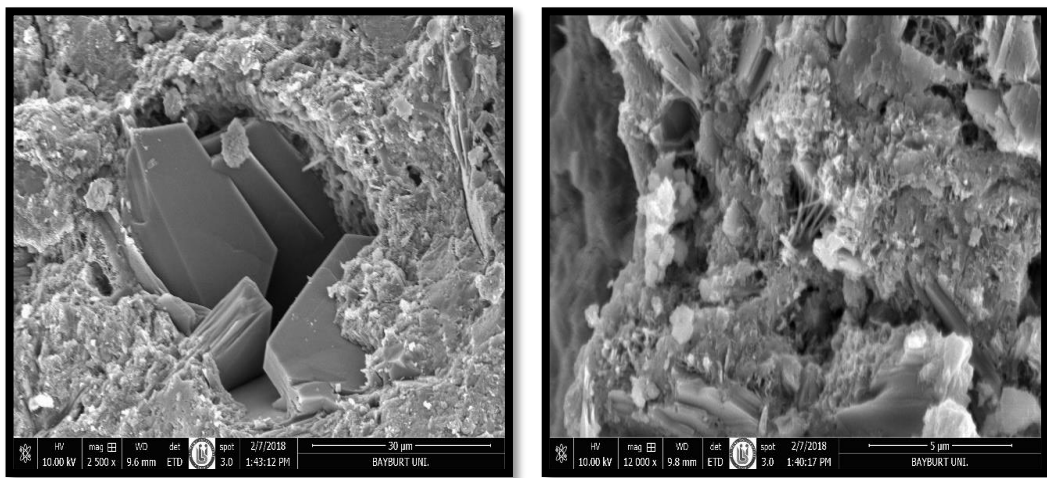
Şekil 4.63 %10 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri

Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de sırasıyla 7 gün ve 90 gün yaşlarında çekilen BSTC2 çimento hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. BST’nin %10 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin CH, CSH jelleri ve etrenjit olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara da rastlanılmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük

örneklerde CH oranı daha fazlayken, 90 günlük örneklerde CSH jelleri daha fazla yer kaplamaktadır. CSH jeli başlangıçta iğnemi biçimdeyken zamanla görüldüğü gibi düzensiz taneli ağ biçimine dönüşmüştür. Kalsiyum hidroksit kristalleri altıgen yapılı yassı prizma şekilli veya büyük zayıf uzun levhalar şeklinde görülmektedir. 7 gün yaşındaki %10 BST ikameli çimento hamurunun XRD analizine göre yoğun miktarda portlandit ve az miktarda CSH jeli gözlenmiştir. Bu yapılar 90 gün yaşında puzolanik aktivite ile portlandit yapıların CSH jeline dönüşmesi sebebiyle Şekil 4.63'de CSH yoğunluklu bir XRD verisi elde edilmiştir.

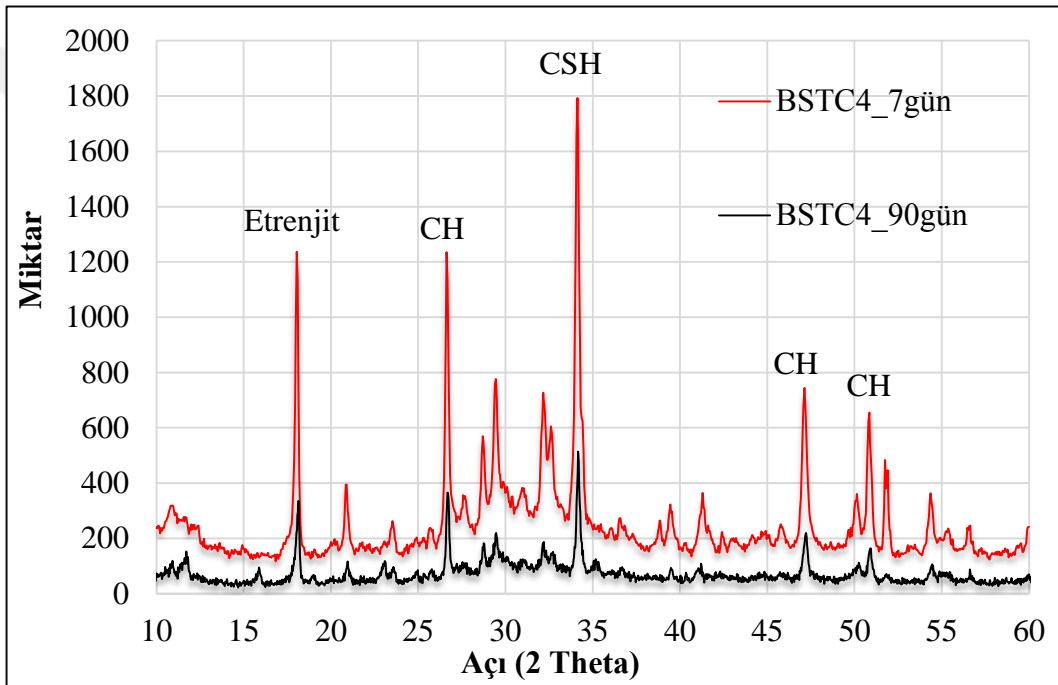


Şekil 4.64 %20 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



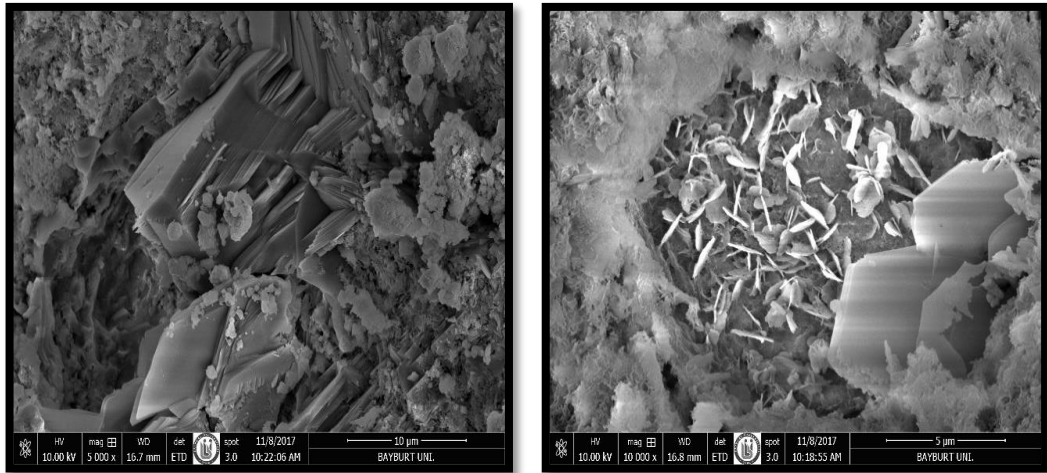
Şekil 4.65 %20 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.64 ve Şekil 4.65’de sırasıyla 7 gün ve 90 gün yaşlarında çekilen BSTC4 çimento hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. BST’nin %20 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin kalsiyum hidroksit, CSH jelleri ve etrenjit olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara rastlanmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde CH ve CSH gözlenirken, 90 günlük örneklerde CH, CSH jelleri ve etrenjit oluşumları görülmüştür.

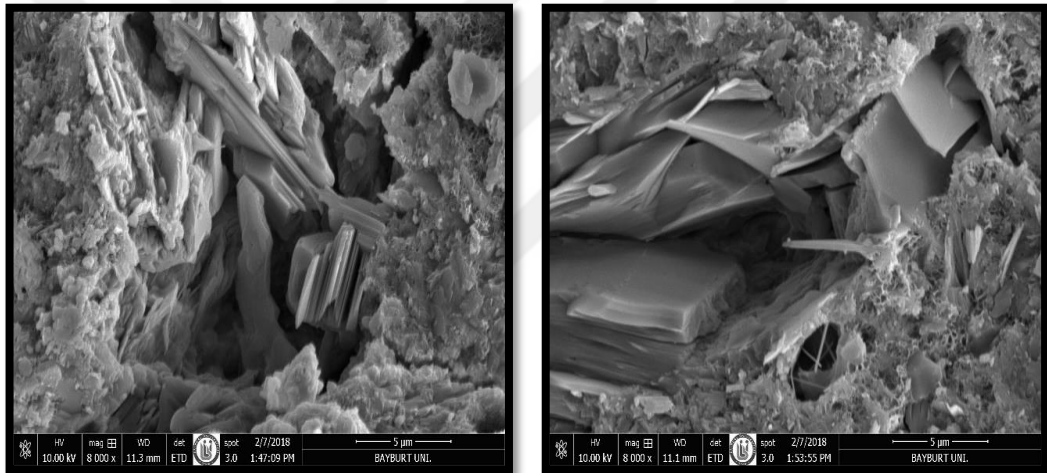


Şekil 4.66 %20 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri

Şekil 4.66’e göre XRD eğrisinde %20 BST ikamesi ile 90 gün yaşında CH ve etrenjit yapılarının miktar olarak azaldığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda SEM görüntülerinde de 7 gün yaşında CSH ve portlandit oluşumları, 90 gün yaşında portlandit yapıları ile az miktarda etrenjit ve yoğun CSH yapıları göze çarpmaktadır.



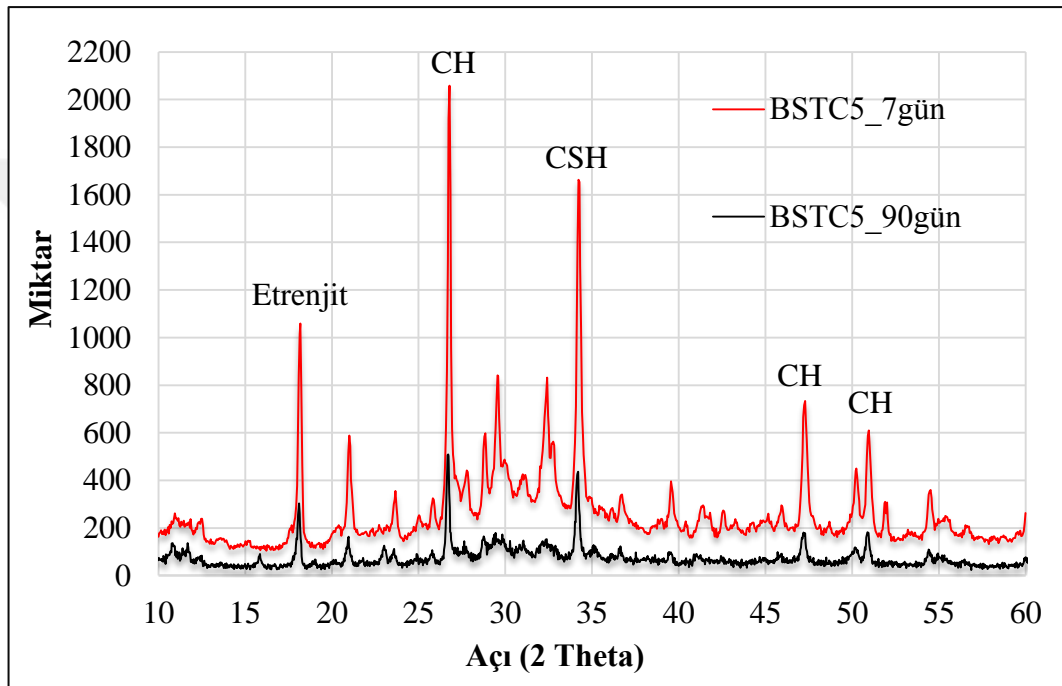
Şekil 4.67 %30 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



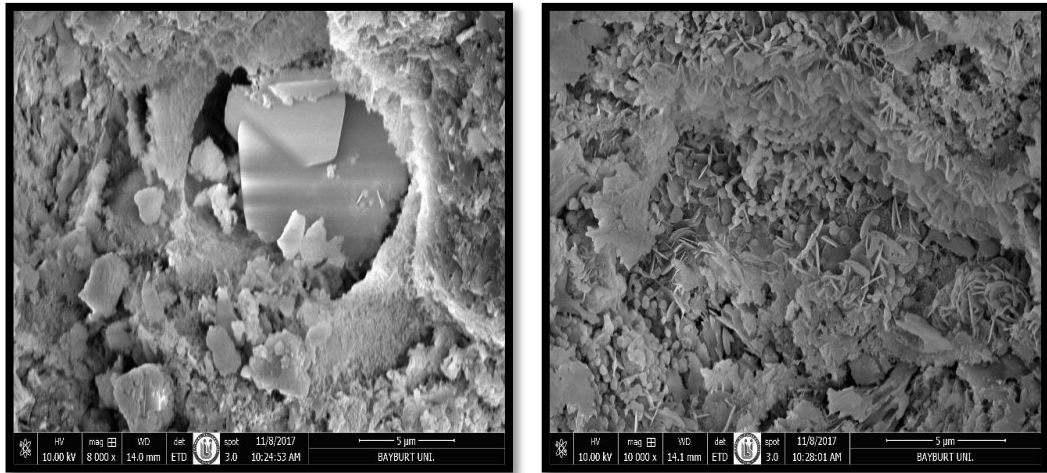
Şekil 4.68 %30 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de sırasıyla 7 gün ve 90 gün yaşlarında çekilen BSTC5 çimento hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. BST’nin %30 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin kalsiyum hidroksit, CSH jelleri ve etrenjit olduğu belirlenmiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara rastlanmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde CH, CSH ve oluşum aşamasında etrenjit gözlenirken, 90 günlük örneklerde CH, CSH ve etrenjit oluşumları görülmüştür. Genellikle etrenjit erken hidrasyon sırasında boşluklarda iğne biçiminde, kalsiyum

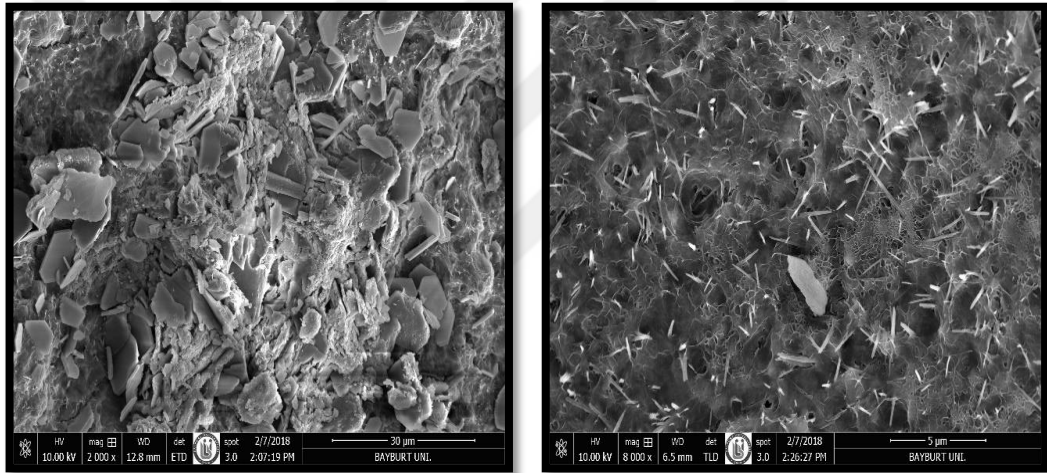
hidroksit kristalleri büyük zayıf uzun kristaller şeklinde çok farklı biçim ve boyutta görülmüştür. C-S-H jeli başlangıçta iğnemi biçimdeyken zamanla düzensiz taneli ağ biçimine dönüşmüştür. Şekil 4.69'da verilen XRD analiz sonuçlarına bağlı olarak 7 gün yaşındaki %30 BST ikamesi yapılmış çimento hamurunda yoğun CH, CSH ve etrenjit yapıları saptanmıştır. 90 gün yaşındaki çimento hamurunda yoğun miktarda düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu CH yapıları ile CSH ve etrenjit görülmüştür.



Şekil 4.69 %30 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri



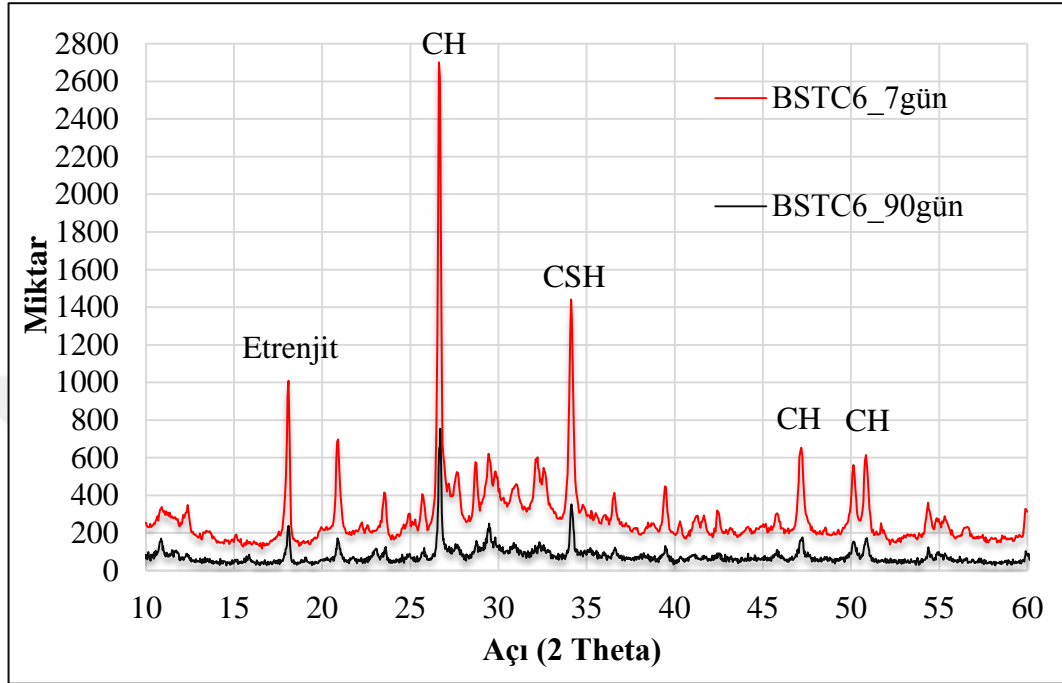
Şekil 4.70 %40 BST ikameli çimentonun 7 gün yaşındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.71 %40 BST ikameli çimentonun 90 gün yaşındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.70 ve Şekil 4.71’de sırasıyla 7 gün ve 90 gün yaşlarında çekilen BSTC6 çimento hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. BST’nin %40 ikamesi ile elde edilen çimentonun hidrate olmuş 7 ve 90 günlük çimento pastası örneklerinin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünlerinin kalsiyum hidroksit, CSH jelleri ve etrenjit olduğu görülmüştür. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında ayrıca yer yer çatlaklara rastlanmıştır. Hidrasyon ürünleri incelendiğinde, 7 günlük örneklerde hegzagonal prizma şekilli veya büyük zayıf uzun kristaller şeklinde CH ve ağ örgüsü gibi CSH gözlenmiştir. 90 günlük örneklerde yassı

hekzagonal prizma şekilli kristaller şeklinde çok farklı biçim ve boyutta CH, ağ örgüsü gibi CSH ve CSH üzerinde iğne biçiminde oluşum aşamasında etrenjit görülmüştür.

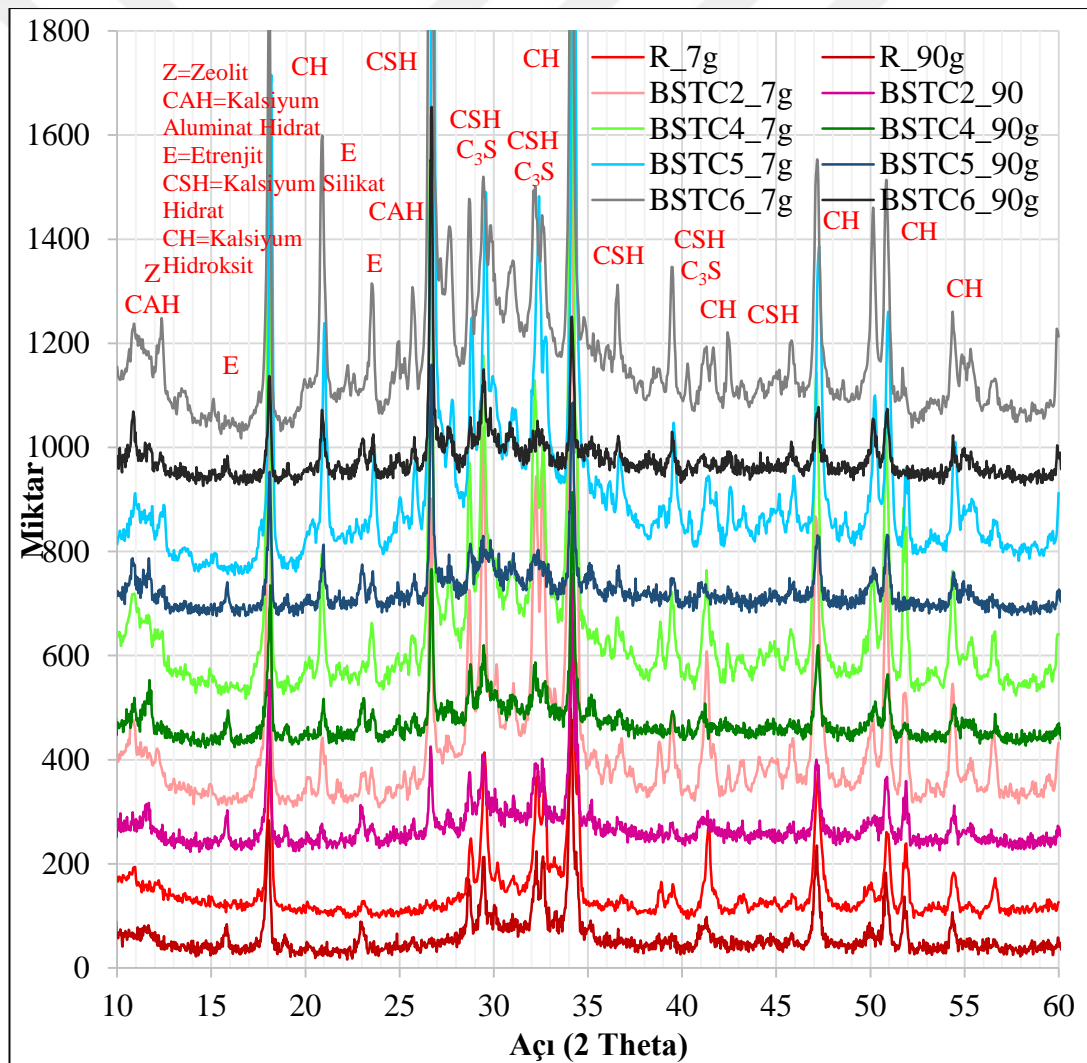


Şekil 4.72 %40 BST ikameli çimento hamurunun 7 ve 90 gün yaşında XRD analizleri

Şekil 4.72'e göre frekans eğrisinde %40 BST ikamesi ile 90 gün yaşında CH ve etrenjit yapılarının miktar olarak azaldığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda 7 gün yaşındaki çimento hamurunda yoğun miktarda düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu CH yapıları ile CSH görülmüştür. 90 gün sonunda ürün oluşumları azalmış CH, CSH ve etrenjit oluşumu görülmüştür.

Şekil 4.73'da görüldüğü gibi BST ikamesi arttıkça CSH yapılarında artış gözlemlenirken aynı zamanda CH, etrenjit ve CAH oluşumlarında da artış olmuştur. Su-bağlayıcı oranı % 50-55 arasında olan bir Portland çimentosu pastasının hidrasyonunun yapısında, % 50-60 kalsiyum silikat, % 20-25 kalsiyum hidroksit, % 15-30 etrenjit, mono sülfat, hidrate olmamış çimento tanecikleri ve boşluk bulunur (Arslan vd, 2006). Genel olarak SEM görüntüleri ve XRD analizleri incelendiğinde yapıların çoğunun görüldüğü söylenebilir. Çimento pastasında hidrasyonun tamamlanması, çimento inceliğine ve su-bağlayıcı oranına bağlıdır. Bu nedenle ikame

edilen çimento pastalarının hidrasyon sürecini tamamlamadıkları görülmektedir. Etreanjit mineralinin büyümesi için çimento pastasının içyapısında boşluk olması gerekir (Arslan vd, 2006). Bu durum etreanjit oluşumu gözlenen çimento pastalarının diğerlerine oranla daha boşluklu yapıda olduğunu gösterir. Hidrate çimento pastasında iki tür boşluk vardır. Bunlar hidrate olmamış çimento tanecikleri ve su arasında oluşan hidrate C-S-H jelleriyle sahipsiz boşluklar arasında oluşmuş gibi gözükken büyük kılcal boşluklar ve C-S-H jellerinde meydana gelen küçük jel boşluklarıdır (Arslan, 2006). Analiz verileri incelendiğinde artan ikame oranlarıyla birlikte çimento pastasındaki boşluk oranlarında değişimler yaşanmıştır.



Şekil 4.73 Tüm BST ikameli çimentoların mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı

4.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Üretilen katkılı çimentoların yüksek sıcaklık karşısında bağlayıcı olarak nasıl bir davranış gösterdikleri harç numuneleri üzerinde yüksek sıcaklık deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Bu amaca uygun olarak standart kum ve sabit s/ç oranında üretilen harç numunelerinde değişken olarak sadece farklı tip ve oranlarda mineral katkı kullanılması, çimentonun yüksek sıcaklık karşısındaki karakteristik özeliğini ortaya çıkarmıştır. Standart kür koşullarında 90 gün süreyle kür edilen harç numunelerin deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.4.1 Renk değişimi

% 5, % 10, % 15, % 20, % 30 ve %40 ikame oranlarında BBT, BYT ve BST ile üretilen çimentolarla hazırlanan standart harç örnekler üzerinde gerçekleştirilen 90 gün yaşındaki yüksek sıcaklık deneyi sonrası numuneler üzerinde oluşan değişim görüntüleri EK-10'da verilmiştir. Her bir sıcaklık değeri için deneyler 2'şer numune üzerinden gerçekleştirilmiştir.

EK-10'da verilen görüntülerden sıcaklığın etkisi ile harcın renginde değişikliklerin meydana geldiği görülmüştür. Sıcaklık artışıyla birlikte renk her bir numune grubu için gri, pembemsi ve kül rengine doğru değişim göstermiştir. Yapılan çalışmalar yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan beton ve çimentonun renginde önemli değişiklikler oluşabileceğini göstermiştir. Bu değişikliklere bakılarak kalker ve silis esaslı malzemelerin maruz kaldığı maksimum sıcaklığın tahmin edilebildiği, özellikle silis miktarı fazla olanların renk değişiminin belirgin olarak görüldüğü, örneğin renk pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600°C'ye, gri ise 600-900°C'ye yükseldiği önceki çalışmalarda söylenmiştir (Neville, 2000). Yüzer vd (2001) tarafından yüksek sıcaklık etkisi altında kalan harçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırıldığı deneysel çalışmada, harçların maruz bırakıldığı her sıcaklık için yüzey rengi ve basınç dayanımları belirlenmiş, rengin tür bileşeni ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle renkteki değişimin çimentonun yapısında ve bileşimindeki değişikliklerin bir sonucu olduğu ve basınç dayanımındaki azalmaya bir referans olabileceği söylenebilir.

EK-10'da verilen çimento harç numunelerinin yüzeylerinde yüksek sıcaklık deneyi sonrası beyaz lekeler görülmüştür. Bu durum Ca(OH)_2 'in mevcut boşluk ve çatlaklardan süzülerek yüzeye ulaştığının kanıtıdır. Çimento hamuru %50-60 tabakalı C-S-H jeli, %20 Ca(OH)_2 ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur. Ca(OH)_2 , 530 °C civarında sönmemiş kirece dönüşür. Bu dönüşümde büzölmeler meydana gelir ve zamanla CaO tekrar Ca(OH)_2 'ye dönüşür. Bunun sonucunda hacim artışı olur. Bu hacim değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur; harç ufalanır ve boşluklu bir yapıya dönüşür. Ca(OH)_2 'nin boşluklardan süzülmesiyle birlikte yüksek sıcaklık sonrası yüzeyde beyaz lekeler oluşur. Bu durum sıcaklığın 530°C'nin üzerine çıktığının kanıtıdır.

4.4.2 Kütle Kaybı

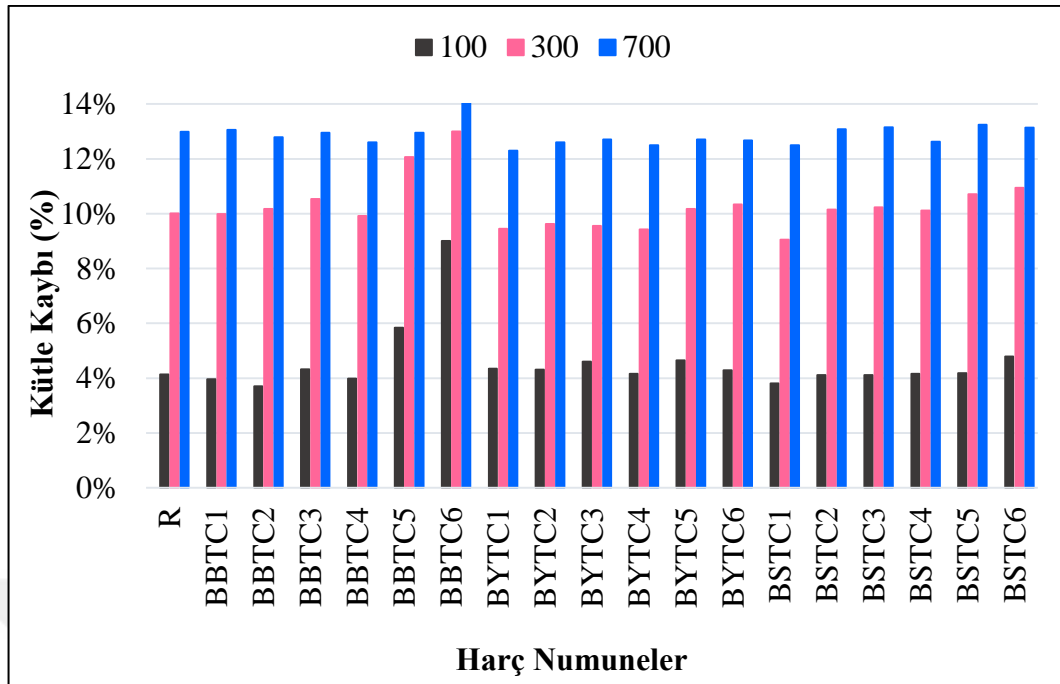
CEM I tipi çimentonun yerine %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında BBT, BST ve BYT'lerin kullanılması ile üretilen yeni kompoze çimentolarla hazırlanan harç örneklerde 90 gün yaşında gerçekleştirilen yüksek sıcaklık deneyi öncesi ve sonrası ağırlıkları ölçülmüş meydana gelen kütle kayıpları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelge 4.7'de harç numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen bulgular aritmetik ortalama (\bar{x}) ve standart sapma (σ) olacak şekilde gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.74'de çimento yerine BT kullanımının artan sıcaklıkla birlikte kütle kayıplarında doğru orantılı bir ilişki oluşturduğu görülmüştür. Referans örneğinin 100 °C sıcaklık sonrası kütle kaybının % 4,14, 300 °C sıcaklık sonrası kütle kaybının % 10,01, 700 °C sıcaklık sonrası kütle kaybının % 12,99 olduğu görülmüştür. Aynı sıcaklıklarda artan BT ikame oranıyla birlikte diğer harç numunelerinde de referans numunesiyle genel olarak aynı düzeyde kütle kayıpları yaşanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası oluşan kütle kayıplarının büyük bir kısmının harç numuneleri içerisinde bulunan su miktarlarından kaynaklandığı söylenebilir. Beton bünyesinde su; hidrate çimento jelinin bünyesinde bulunan hidrat suyu, jel boşluklarında absorplanmış jel suyu ve büyük kapiler boşluklardaki ve agregaların boşluklarında bulunan serbest su olmak üzere üç farklı şekilde bulunur. 100 °C kılcal boşluklardaki serbest su buharlaşmış, buharlaşan su miktarıyla birlikte numunedeki kütle kayıpları numunenin porozitesi buna bağlı olarak da dayanımını etkilemiştir. 300 °C'yi aşan sıcaklıkla birlikte kolay buharlaşmayan hidrat suyu ve jel absorbe suyu buharlaşmış.

400 °C ‘yi aşan sıcaklıklarda C-S-H tahrip olmaya başlayıp ve 900 °C civarında ise C-S-H yapısı tamamen dağılmıştır (Sağsöz, 2013). Bu nedenle artan sıcaklıkla birlikte harç numunelerindeki kütle kayıpları da lineer bir artış göstermiş bu durum harç numunelerinin dayanımlarını da etkilemiştir.

Çizelge 4.7 90 günlük BT ikameli çimento harçlarının yüksek sıcaklık sonrası kütle kayıpları

No	Çimento Tipi	Katki Oranı	Kütle Kayıpları (%)						
			n	100 °C		300 °C		700 °C	
				\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
1	R	0	2	4,14	0,02	10,01	0,10	12,99	0,02
2	BBTC1	5	2	3,97	0,07	9,99	0,07	13,05	0,04
3	BBTC2	10	2	3,71	0,08	10,18	0,08	12,79	0,13
4	BBTC3	15	2	4,32	0,24	10,53	0,16	12,95	0,02
5	BBTC4	20	2	3,99	0,21	9,92	0,09	12,60	0,09
6	BBTC5	30	2	5,84	0,84	12,06	0,23	12,95	0,23
7	BBTC6	40	2	9,01	0,26	13,00	0,33	14,04	0,00
8	BYTC1	5	2	4,35	0,08	9,45	0,08	12,30	0,10
9	BYTC2	10	2	4,31	0,07	9,63	0,09	12,60	0,10
10	BYTC3	15	2	4,60	0,08	9,56	0,09	12,71	0,06
11	BYTC4	20	2	4,16	0,16	9,43	0,11	12,49	0,15
12	BYTC5	30	2	4,65	0,03	10,17	0,07	12,71	0,00
13	BYTC6	40	2	4,29	0,02	10,33	0,03	12,68	0,00
14	BSTC1	5	2	3,82	0,35	9,05	0,47	12,50	0,08
15	BSTC2	10	2	4,12	0,34	10,15	0,01	13,08	0,18
16	BSTC3	15	2	4,12	0,24	10,23	0,12	13,15	0,14
17	BSTC4	20	2	4,16	0,65	10,11	0,03	12,63	0,36
18	BSTC5	30	2	4,19	0,33	10,71	0,81	13,25	0,10
19	BSTC6	40	2	4,79	0,50	10,94	0,15	13,14	0,00



Şekil 4.74 BT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kaybı karşılaştırma grafiği

Şekil 4.74' de verilen grafikten görüldüğü üzere kendi haline bırakılıp fırın içerisinde soğutulan tüm numunelerde sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı gözlenmiştir. Bunun sebebinin kılcal boşluklardaki ve jel boşluklarındaki suyun yüksek sıcaklık etkisinde çimento harcı bünyesinden uzaklaşması olduğu düşünülmektedir.

4.4.3 Eğilme dayanımı deney sonuçları

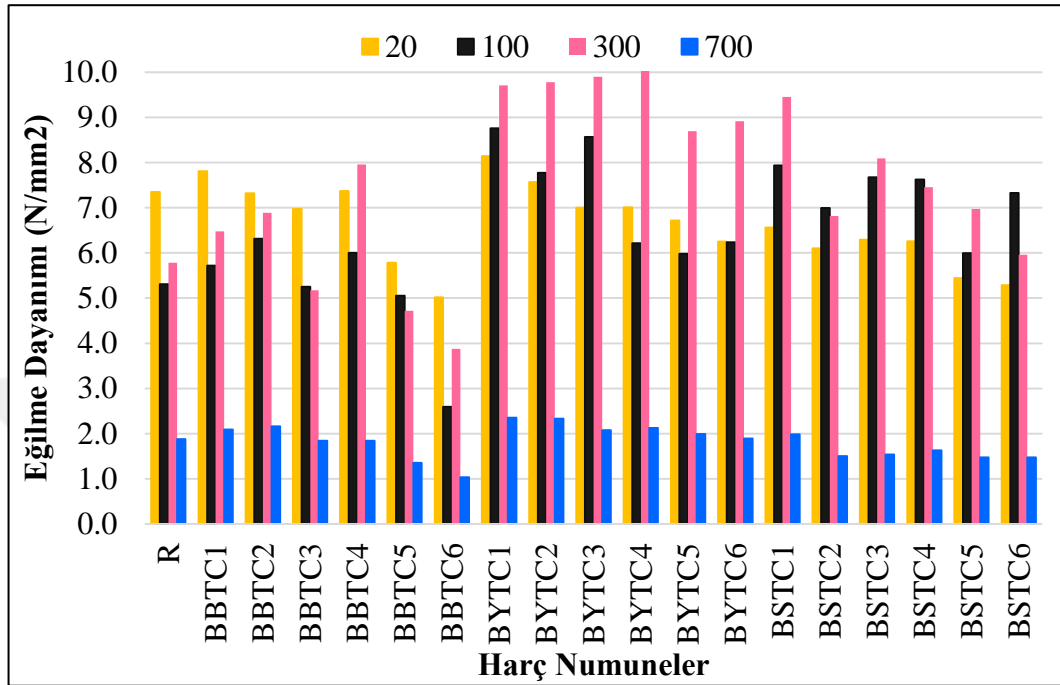
%5, %10, %15, %20, %30 ve %40 ikame oranlarında BBT, BYT ve BST ile üretilen çimentolarla hazırlanan standart harç örnekler üzerinde gerçekleştirilen yüksek sıcaklık deneyi sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Deney sonuçları iki adet 4x4x16 cm boyutlu prizmatik numunenin eğilme dayanımının aritmetik ortalaması (\bar{x}) olarak ve deney verileri arasındaki standart sapma (σ) olarak verilmiştir.

Çizelge 4.8 Yüksek sıcaklık deney sonrası eğilme dayanımları

No	Çimento Tipi	Katki Oranı (%)	n	20 ° C		100 ° C		300 ° C		700 ° C	
				\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
1	R	0	2	7,35	0,11	5,31	0,22	5,78	0,39	1,88	0,25
2	BBTC1	5	2	7,81	0,58	5,72	0,14	6,48	0,24	2,09	0,12
3	BBTC2	10	2	7,32	0,11	6,32	0,23	6,89	0,48	2,16	0,06
4	BBTC3	15	2	6,97	0,32	5,25	0,15	5,17	0,77	1,84	0,26
5	BBTC4	20	2	7,37	0,47	6,00	0,95	7,96	0,56	1,84	0,25
6	BBTC5	30	2	5,78	0,43	5,05	0,02	4,72	0,07	1,36	0,08
7	BBTC6	40	2	5,02	0,10	2,60	0,00	3,88	0,31	1,04	0,13
8	BYTC1	5	2	8,14	0,36	8,76	0,61	9,71	0,10	2,36	0,24
9	BYTC2	10	2	7,57	0,14	7,78	0,28	9,78	0,28	2,34	0,16
10	BYTC3	15	2	7,00	0,08	8,57	0,05	9,90	0,22	2,08	0,03
11	BYTC4	20	2	7,01	0,08	6,22	0,31	10,04	0,33	2,13	0,10
12	BYTC5	30	2	6,72	0,13	5,98	0,26	8,70	0,97	1,99	0,02
13	BYTC6	40	2	6,25	0,31	6,24	0,39	8,91	0,21	1,89	0,13
14	BSTC1	5	2	6,56	0,20	7,93	0,75	9,45	0,09	1,99	0,18
15	BSTC2	10	2	6,10	0,20	6,99	1,46	6,81	0,24	1,50	0,11
16	BSTC3	15	2	6,29	0,27	7,67	0,33	8,09	0,73	1,54	0,30
17	BSTC4	20	2	6,26	0,33	7,63	1,45	7,45	0,56	1,63	0,10
18	BSTC5	30	2	5,44	0,19	5,99	0,08	6,98	0,10	1,48	0,16
19	BSTC6	40	2	5,29	0,20	7,32	0,11	5,96	0,14	1,48	0,32

Standart kür koşullarında 90 gün süreyle kür edilen harç numunelerinden 100 °C'e sıcaklığa maruz kalan harç numuneleri üzerinde yapılan eğilme deneyi sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Elde edilen eğilme dayanımları Şekil 4.75'de görüldüğü gibi artan ikame oranıyla birlikte farklılık göstermiştir. 100 °C'ye maruz bırakılan harç numunelerinin bazılarının eğilme dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımlarına BYT ikameli çimento harçları sahipken en düşük eğilme dayanımı BBT ikameli çimento harçlarında görülmüştür. 300 °C sıcaklıkta kalan farklı çimentolu harç numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde BT ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarında artışlar olmuştur. 700 °C sıcaklıkta kalan harç numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçlarının da ise düşüşler

yaşanmıştır. Bu sonuçlardan 700 °C ve üzeri sıcaklıklarda bağlayıcı fazın bozulmasıyla eğilme dayanımının önemli ölçüde azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.75 BT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları

Yüksek sıcaklık fırınında 4 saat süreyle 100 °C, 300 °C ve 700 °C sıcaklıklarda kalan kontrol çimentosu ile BT ikameli çimentoların harç numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçları grafiği Şekil 4.75’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde harç numunelerinin eğilme dayanımlarında farklılıklar görülmüştür. Genel olarak bakıldığında (20 °C – 100 °C arasında) artış-azalışlar, (100 °C – 300 °C arasında) artış, (300 °C – 700 °C) arası azalışlar yaşanmıştır. Bu farklılıkların sebebinin çimentonun içeriği olduğu düşünülmektedir. Çünkü çimento hamuru ilk ısıtma esnasında çok kararsız olan bir bileşendir. Isıtma işlemiyle birlikte fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar geçirir. 100-200 °C civarında serbest su buharlaşır. Dayanımda 50-120 °C aralığında düşüşler yaşanmasının sebebi bünyesindeki suyun buharlaşma eğilimi ile hamurun şişerek aderans kaybına uğramasıdır. Çimento hamurunun 300 °C’ye kadar olan sıcaklığa kadar dayanımın iyileştiği görülmüştür. 300 °C ve üzerinde yapısındaki bağlı su kaybı ve kimyasal çözülme olayı önemlidir ve bu durum dayanım düşüşlerine sebebiyet vermiştir.

4.4.4 Basınç dayanımı deney sonuçları

%5, %10, %15, %20, %30 ve %40 ikame oranlarında BBT, BYT ve BST ile üretilen çimentolarla hazırlanan standart harç örnekler üzerinde gerçekleştirilen yüksek sıcaklık deneyi sonrası basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Yüksek sıcaklık etkisinde BT ikameli harçların basınç dayanımı deney sonuçları

No	Çimento Tipi	Katkı Oranı (%)	n	20 °C (N/mm ²)		100 °C (N/mm ²)		300 °C (N/mm ²)		700 °C (N/mm ²)	
				\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
1	R	0	4	52,9	0,1	53,73	0,31	51,81	0,27	30,60	0,39
2	BBTC1	5	4	60,2	1,1	57,21	0,05	59,97	0,04	28,40	0,53
3	BBTC2	10	4	55,6	0,3	58,83	0,01	65,28	0,13	28,59	0,65
4	BBTC3	15	4	54,9	0,1	50,17	2,04	49,99	0,05	23,95	0,16
5	BBTC4	20	4	54,9	0,6	56,74	1,03	63,16	0,40	28,16	0,20
6	BBTC5	30	4	51,8	0,1	37,51	0,12	36,05	0,93	24,62	0,42
7	BBTC6	40	4	26,0	1,0	24,55	0,04	28,84	0,56	13,51	0,97
8	BYTC1	5	4	65,6	0,1	59,11	0,58	74,42	0,38	36,87	0,52
9	BYTC2	10	4	56,5	0,1	58,85	0,35	64,96	0,63	29,68	0,00
10	BYTC3	15	4	53,2	0,1	55,33	0,02	65,64	0,84	28,75	0,37
11	BYTC4	20	4	55,9	0,9	51,81	0,07	74,36	0,24	33,56	0,32
12	BYTC5	30	4	46,0	0,3	47,68	0,18	64,23	1,66	29,07	0,35
13	BYTC6	40	4	39,5	0,1	39,22	0,19	58,66	0,27	28,33	1,13
14	BSTC1	5	4	60,1	0,2	60,19	1,53	74,78	0,92	29,37	0,32
15	BSTC2	10	4	58,8	0,6	55,31	0,11	57,03	0,67	26,54	0,19
16	BSTC3	15	4	60,6	0,3	63,03	0,39	62,90	0,80	26,25	0,07
17	BSTC4	20	4	53,7	0,6	56,05	0,05	62,69	0,24	33,28	0,44
18	BSTC5	30	4	57,9	0,3	53,50	0,43	61,21	0,17	27,80	0,99
19	BSTC6	40	4	48,8	0,6	45,18	0,30	54,57	0,06	24,48	0,38

Yüksek sıcaklığa maruz kalan harçların basınç dayanımına, çimento tipi, su/çimento oranı ve agrega gibi kullanılan malzeme özellikleri ve sıcaklığa maruz kalınan süre,

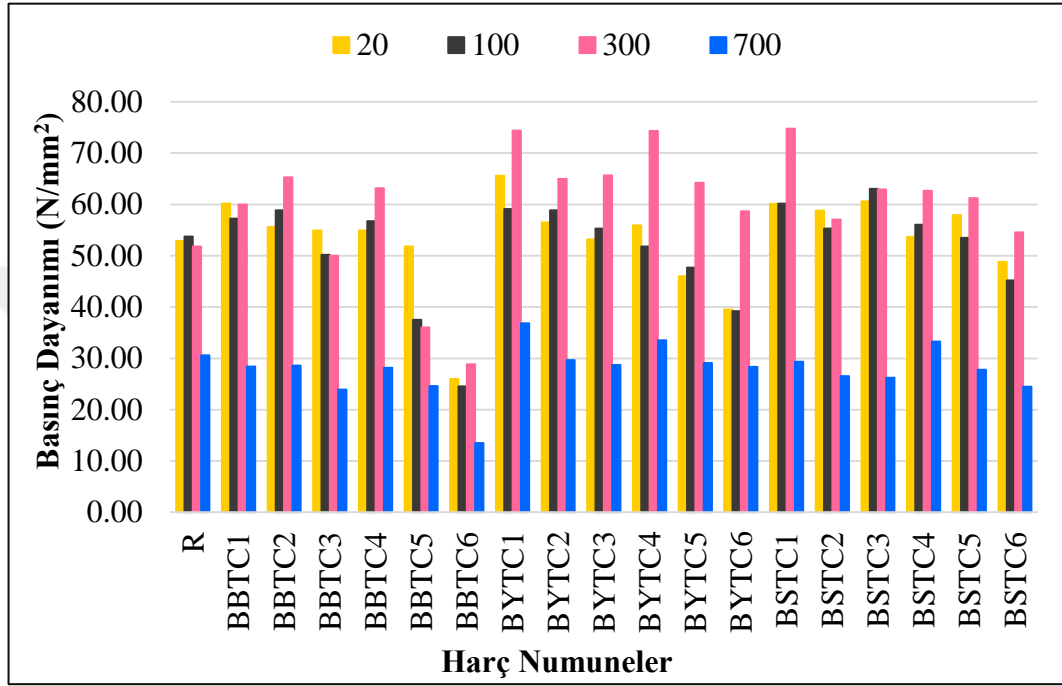
nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Neville, 2000). Yüksek sıcaklığın harçların basınç dayanımına etkisi şu şekilde özetlenebilir; basınç dayanımı 90°C’de azalır, bu azalma %10-35 oranındadır. Bu sıcaklıktan sonra 200°C’ye kadar dayanımda artış gözlenirken bu sıcaklıktan sonra harç dayanımı sürekli olarak azalır. 800°C’de dayanım kaybı %20-50 arasındadır. Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı bu çalışmada Bayburt taşı katkılı ve katkısız harçlar üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyleri sonucunda 20 °C’den itibaren bütün gruplarda azalma ve artışlar meydana gelmiştir.

Basınç deneyi eğilme deneyinde ikiye ayrılan numuneler üzerinde yapılmıştır. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.76’da 20 °C sıcaklık sonrası elde edilen basınç dayanım değerleri verilmiştir.

- 100 °C sıcaklık sonrası elde edilen basınç dayanım değerleri tüm gruplar göz önüne alındığında 63,03 MPa ile 24,55 MPa arasında değişmektedir. Basınç dayanımları kontrol gruplarıyla karşılaştırıldığında 100 °C’de maksimum meydana gelen kayıp % 46 oranındadır. Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiş, sıcaklık arttıkça artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında genel olarak azalma görülmüştür.
- 90 günlük numuneler 300 °C sıcaklığa maruz kaldığında harç numunelerine ait basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Numunelerin en yüksek dayanımı BYT ve BST ikameli harçlar verirken en düşük dayanımlar BBT katkılı harçlarda görülmüştür.
- 300 °C’den 700 °C’ye ulaşıldığında bir anda dayanım kaybı yaşanmıştır. Sıcaklık etkisinden dolayı çimento pastasında ve agregada, termal uyumsuzluk nedeni ile harcın bu iki bileşenin ara yüzünde meydana gelen çatlaklar, boşluk oranının artması harçların basınç dayanımlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Basınç dayanımlarının 700 °C sıcaklık sonrası yarıya düştüğü hatta bazı harç numunelerin geriye başlangıçtaki dayanımlarının %20-30’unun kaldığı söylenebilir.

İlk etapta artan sıcaklıkla beraber meydana gelen düşüşlerden sonra harçların basınç dayanımları artmıştır. Kullanılan puzolanların silis miktarının fazla olmasından dolayı BT katkılı çimento ile agrega arasındaki aderans kuvvetlenip dayanım artışı olmuş

olabilir. Dayanım 300 °C ve üstü sıcaklıklarda tekrar düşmeye başlamış. Basınç dayanımı 700 °C'de başlangıç değerine göre % 80 değer kaybetmiştir. Azalış nedeni olarak aderans bozulması ve çimento hamurunda kalsiyum silika hidrat jellerinin yapısının bozulması gösterilebilir.



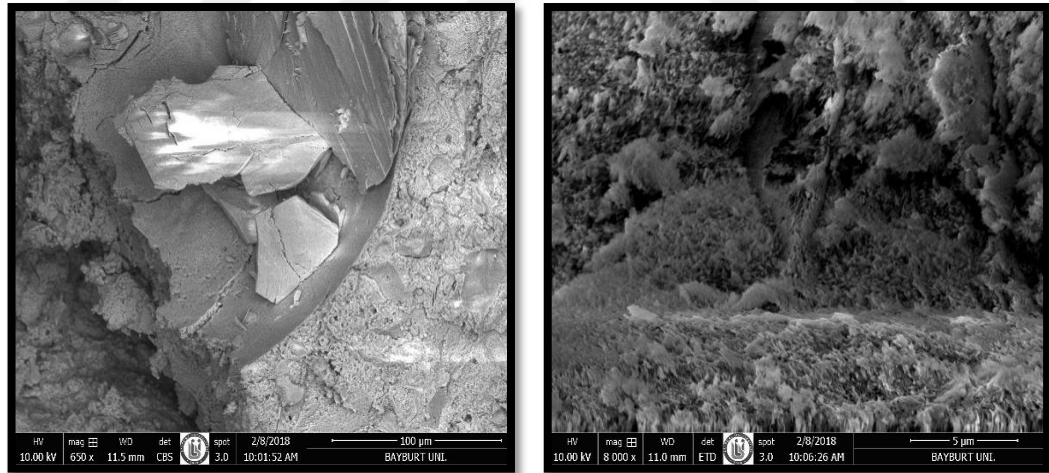
Şekil 4.76 BT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları

Yüksek sıcaklık etkilerinden sonra harçların mekanik özelliklerinde çok önemli değişiklikler olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık etkileriyle harçların basınç ve eğilme mukavemetlerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında 300 °C sıcaklıklara kadar harç özelliklerinde bozulma olmayabileceği hatta bir miktar mukavemet artışı olabileceği görülmüştür. Bu mukavemet artışları sıcaklık etkisiyle oluşan enerjinin hidrate olmamış çimento tanelerinin hidratasyonunu tamamlamasına sebep olması ile açıklanabilir. Mukavemet kayıpları ise harçlarda oluşan mikro ve makro düzeydeki çatlaklar, hacim genişmesi ve çimento hamurundaki hidrate kalsiyum silikat (C-S-H) bağlarının bozulması gibi farklı sebeplerden kaynaklanabilir. Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan harçların renginde önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliğin özellikle yüksek oranda silis içermelerinden dolayı olduğu

düşünülmektedir. Renk pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300'ye, gri ise 700 °C'ye yükseldiği görülmüştür. Sıcaklık 700 °C'ye ulaştığında harçların dayanımının yaklaşık %80'ni kaybettiği göz önüne alınırsa, renk incelemesi ile harçların hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir. Bu durumda yüksek sıcaklık etkisinde kalan harçlarda renk değişiminin önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

4.4.5 Yüksek sıcaklık etkisi sonrası Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ve X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizi

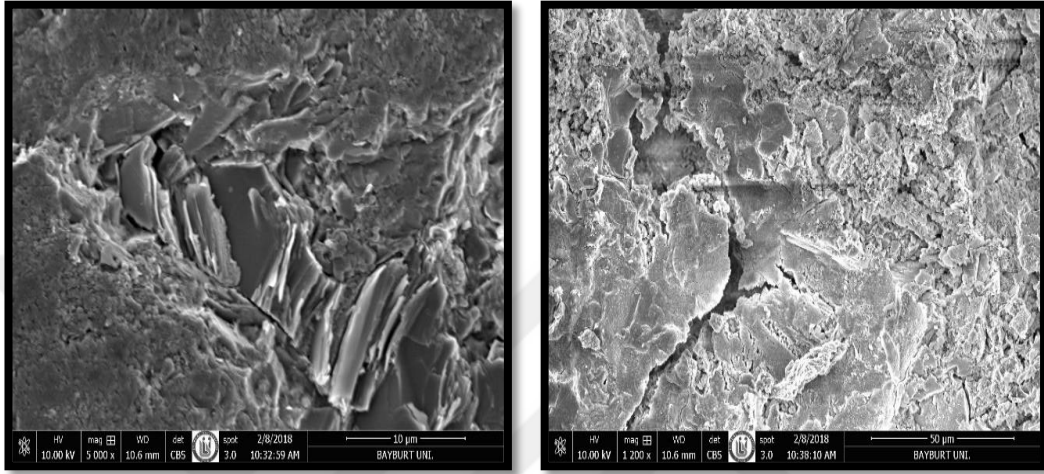
Laboratuvarda katkılı ve katkısız çimentolarla üretilen harç numuneleri yüksek sıcaklık fırınında sırasıyla 100 °C, 300 °C ve 700 °C sıcaklıklara tabi tutulmuş ve deney sonunda numunelerin mikro yapısında ortaya çıkan değişimler SEM ve XRD analizleri ile belirlenmek istenmiştir. Bu amaçla mekanik özelliklerinde en fazla düşüşün yaşandığı 700 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numuneler üzerinde SEM ve XRD analizleri yapılmıştır.



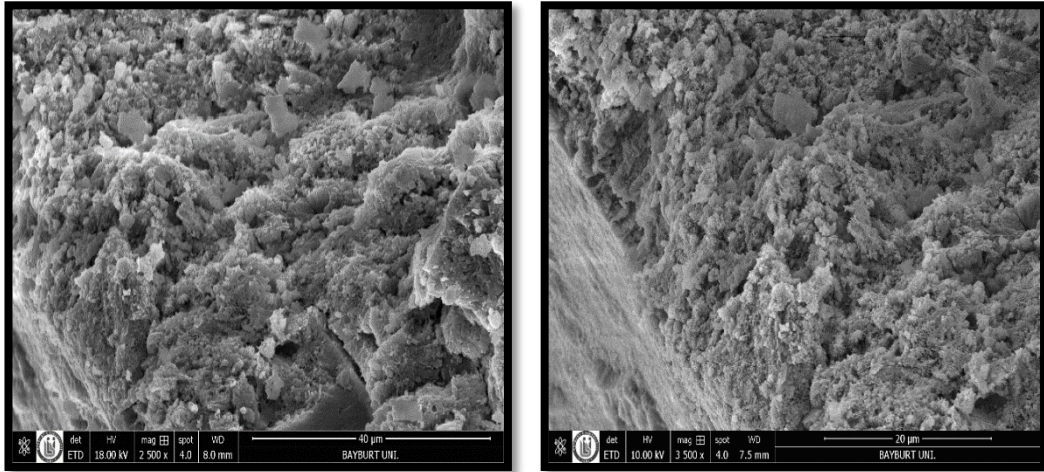
Şekil 4.77 Referans çimentosunun 90 gün yaşındaki yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri

Referans çimento harcının 700 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.77'de verilmiştir. Referans çimentosu ile hazırlanan harçlar üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidratasyon ürünlerinden görüntü alınamamıştır. Gözenek sayısının fazla olmasının

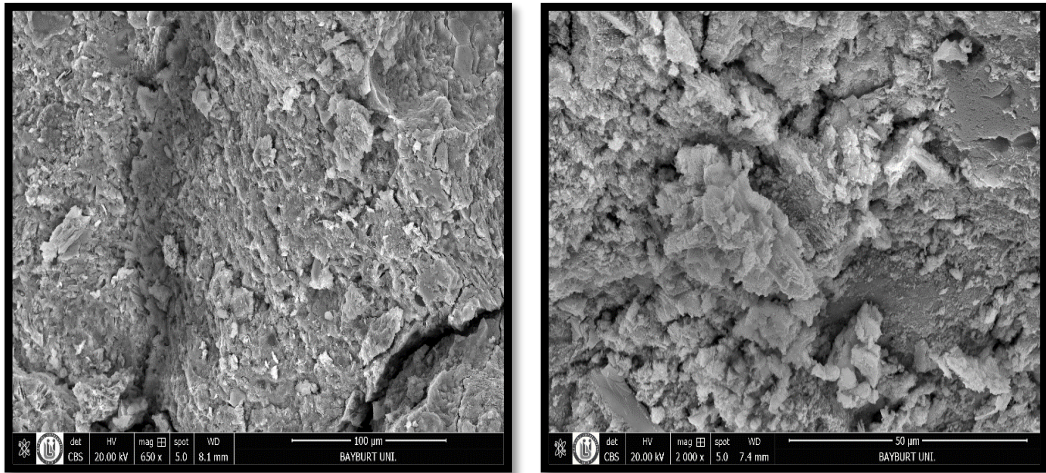
yanında çatlaklara rastlanılmıştır. Mikro yapı incelendiğinde yüksek sıcaklık sonucu kompozit içindeki bağlayıcı fazda büyük çatlakların oluştuğu görülmüştür. Ağ şeklinde birbirini tamamlayan bu çatlakların harcın mekanik özelliklerini azalttığı düşünülmektedir.



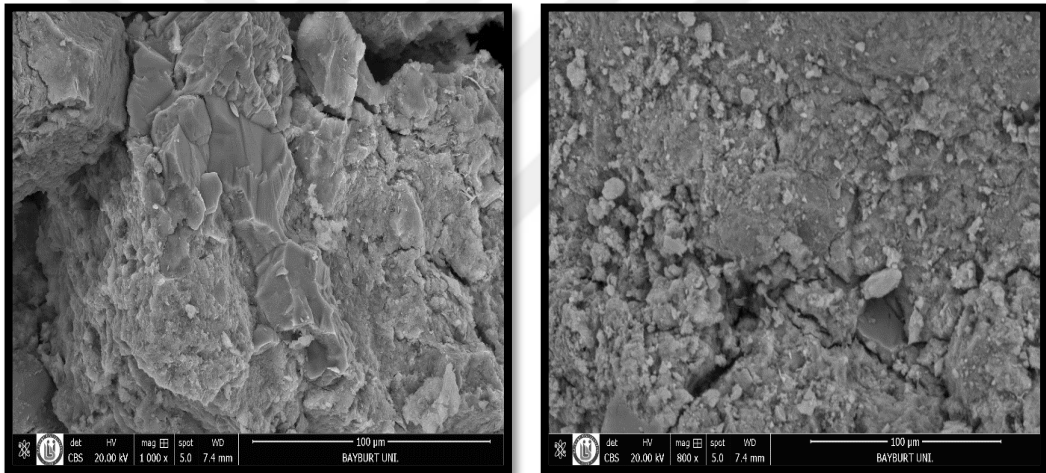
Şekil 4.78 %10 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



Şekil 4.79 %20 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



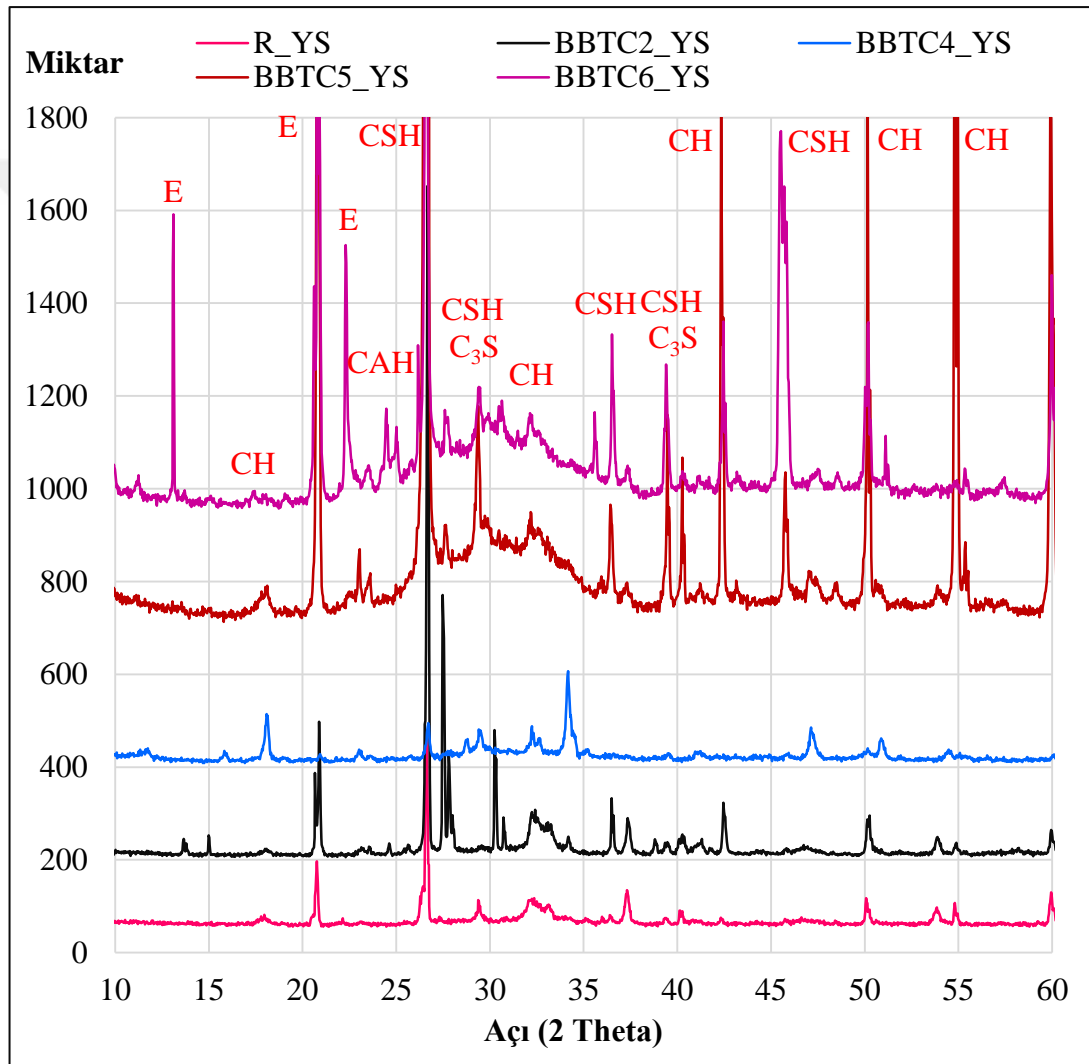
Şekil 4.80 %30 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



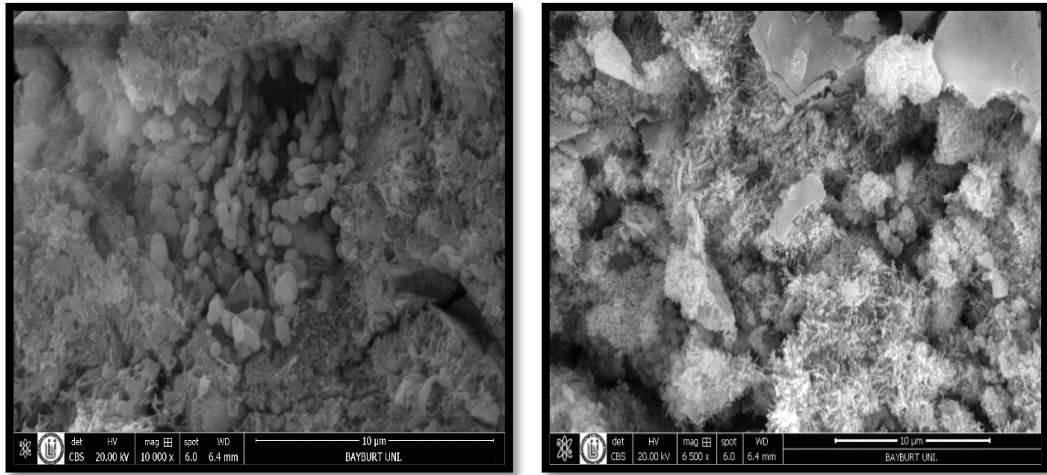
Şekil 4.81 %40 BBT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.78, Şekil 4.79, Şekil 4.80, Şekil 4.81 ve Şekil 4.82’de sırasıyla BBT’nin %10,%20,%30 ve %40 ikamesi ile hazırlanan harç numuneleri üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası çekilen SEM görüntüleri ve XRD analizleri verilmiştir. Harçlar üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflarında hidrasyon ürünleri görüntülenememiştir. Gözenek sayısının fazla olmasının yanında çatlaklara rastlanmıştır. Mikro yapı incelendiğinde yüksek sıcaklık sonucu kompozit içindeki bağlayıcı fazda büyük çatlakların olduğu görülmüştür. Ağ şeklinde birbirini

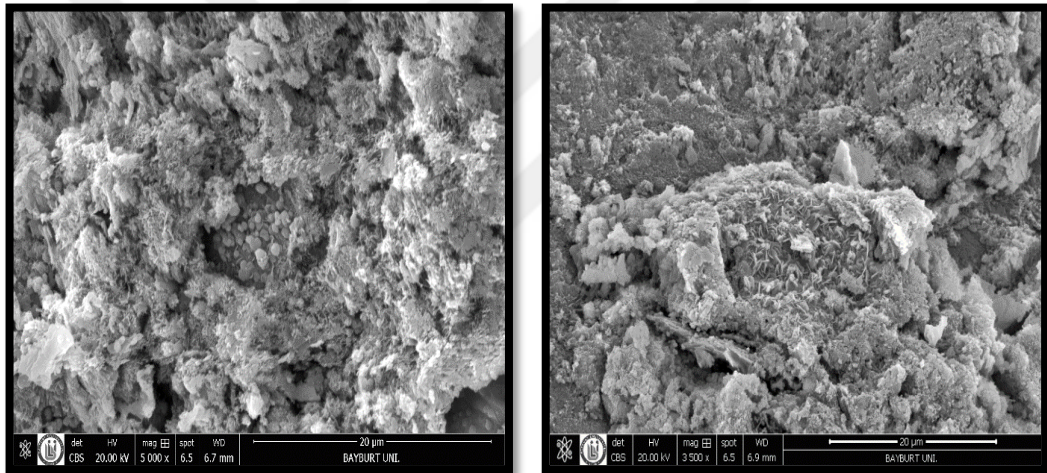
tamamlayan bu çatlakların harcın mekanik özelliklerinin azalmasının ana nedeni olduğu düşünülmektedir. Agrega ile bağlayıcı faz arasındaki bağın homojenliğini kaybederek zayıfladığı görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisiyle C-S-H jellerinin zayıf bir şekilde sıralandığı görülmüştür (Arslan vd, 2006). Sıcaklık artışıyla birlikte CSH jellerinin yapısının bozulması ve içeriğindeki suyu kaybetmesiyle birlikte numunelerin dayanımlarında çok ciddi düşüşler görülmüştür.



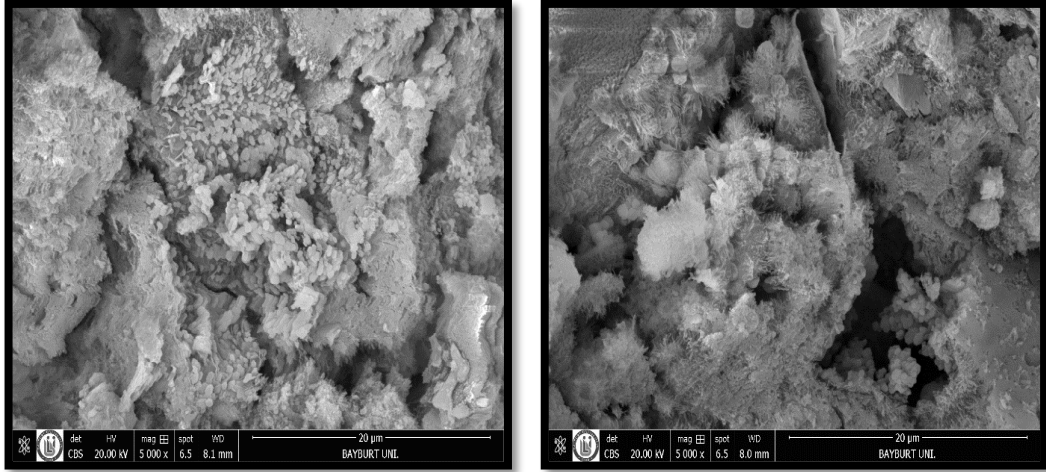
Şekil 4.82 BBT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık sonrası mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı



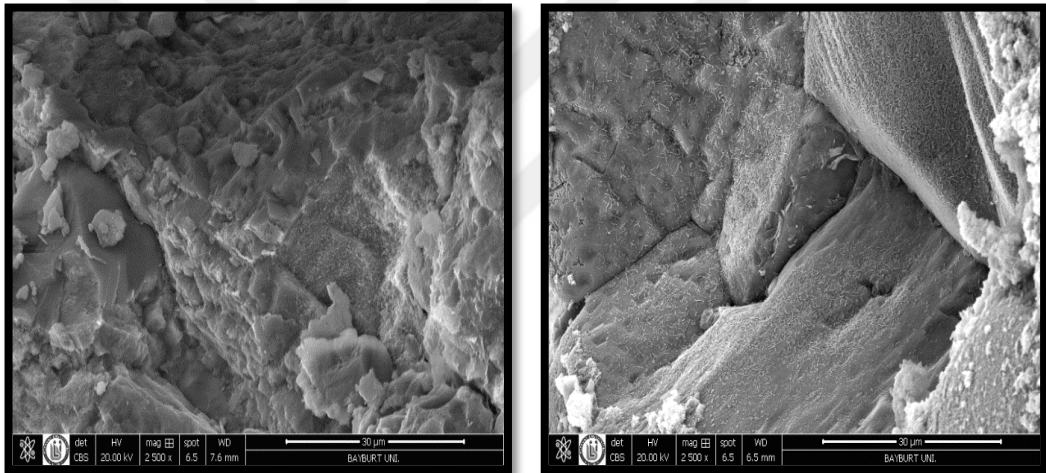
Şekil 4.83 %10 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



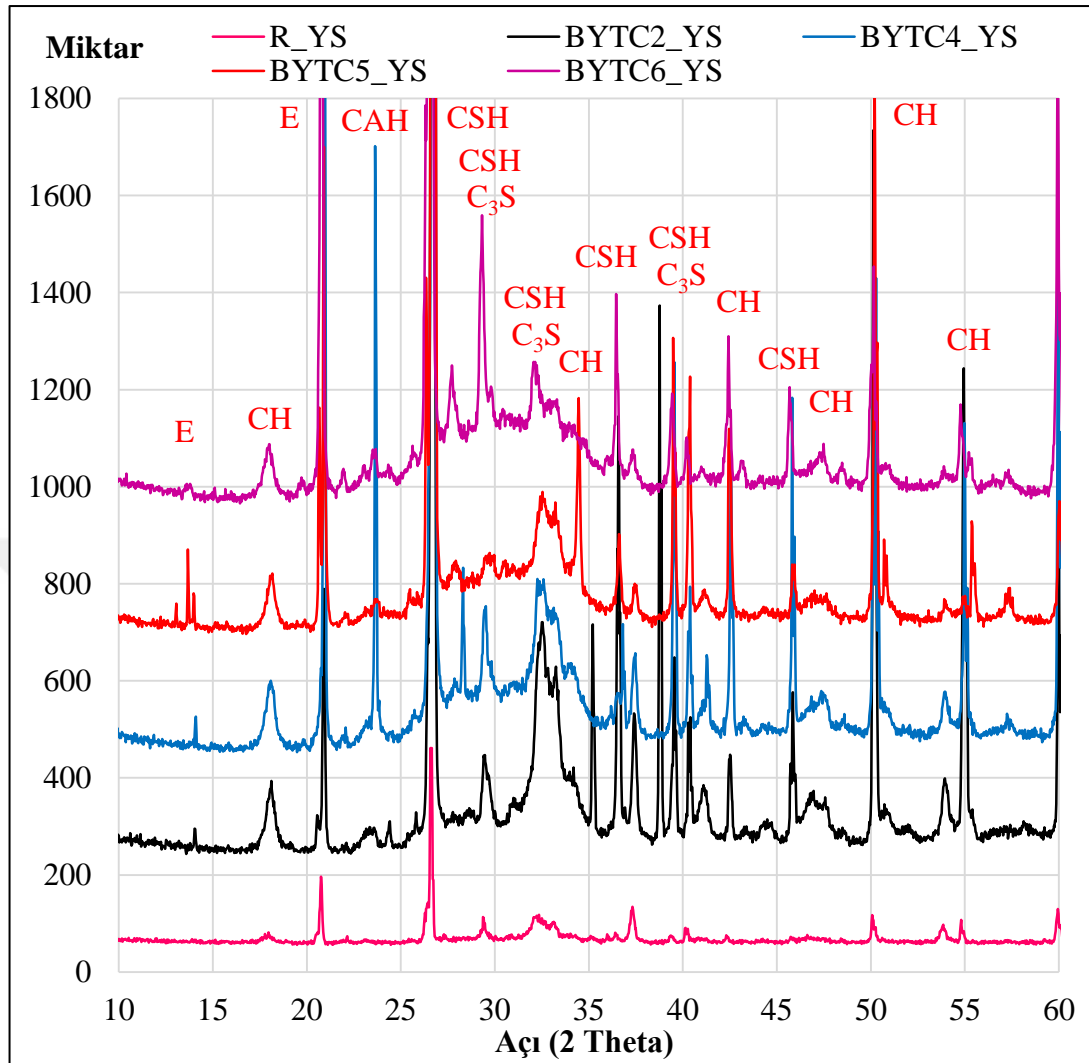
Şekil 4.84 %20 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



Şekil 4.85 %30 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



Şekil 4.86 %40 BYT ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



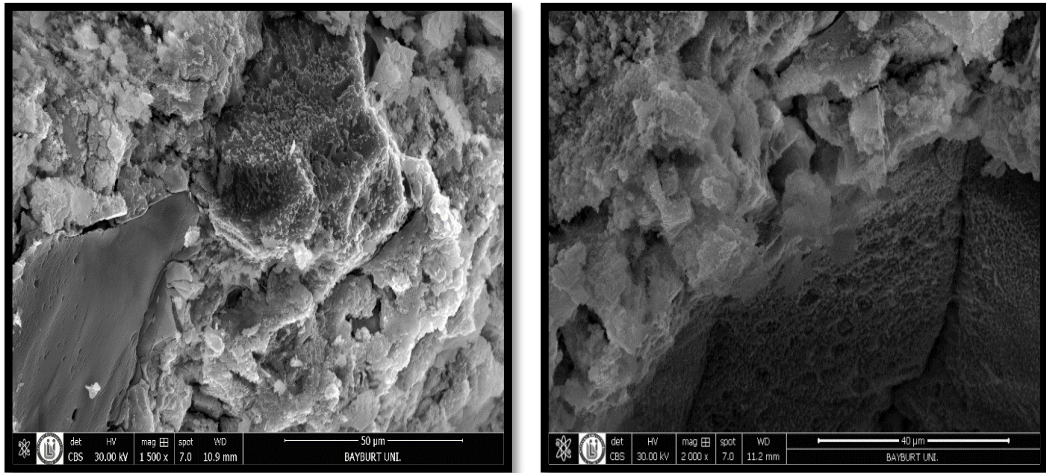
Şekil 4.87 BYT ikameli çimentoların yüksek sıcaklık sonrası mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı

Şekil 4.83, Şekil 4.84, Şekil 4.85, Şekil 4.86 ve Şekil 4.87’de sırasıyla BYT’nin %10,%20,%30 ve %40 ikamesi ile hazırlanan harç numuneleri üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası çekilen SEM görüntüleri ve XRD analizleri verilmiştir.

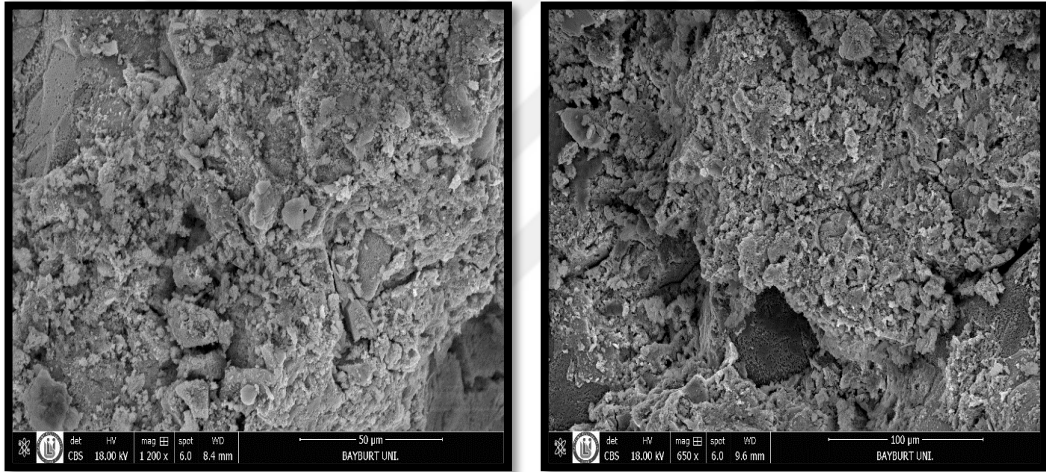
- Şekil 4.83 ve Şekil 4.87’de BYT’nin %10 ikameli çimento harç numunesinin mikroyapısı incelendiğinde kompozit içindeki bağlayıcı fazda referans çimentolu harçta görülen ağ şeklindeki çatlakların daha az olduğu görülmüştür. Agrega ile bağlayıcı faz arasındaki bağın homojenliğini koruduğu ve CSH jellerindeki

bozulmanın az olduğu belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık deneyinde en iyi performans gösteren çimentolu harçların BYT ikameli olanlar olduğu görülmüştür.

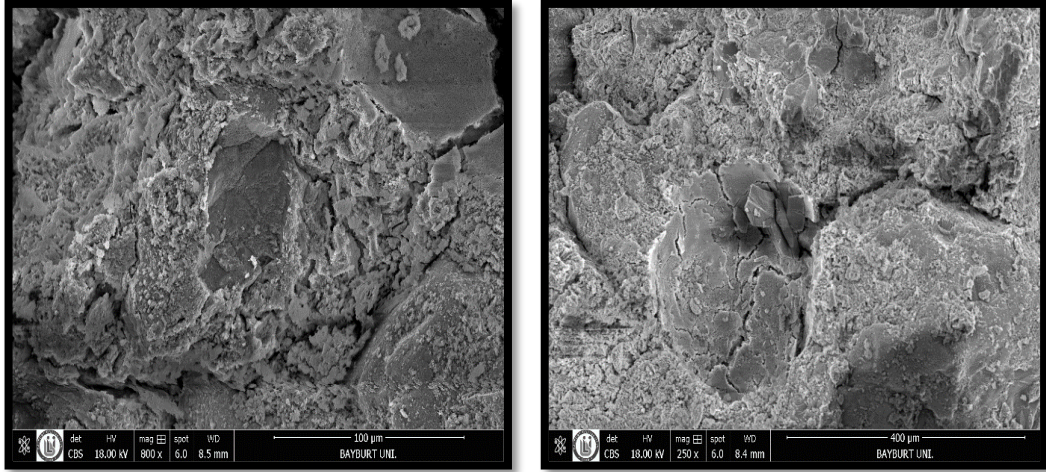
- BYT'nin % 20 ikamesi ile hazırlanan harçlar üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen Şekil 4.84'deki SEM fotoğrafları incelendiğinde yüksek sıcaklık sonucu kompozit içindeki bağlayıcı fazda ve agrega yüzeylerinde çatlakların oluştuğu görülmüştür. Agregaya yüzeyini saran ağısı ve dikensi CSH jellerine rastlanmıştır. CSH jellerinin suyunu kaybetmesi nedeniyle boşluklu bir duruma geldiği görülmüştür.
- Şekil 4.85 ve Şekil 4.87'de BYT'nin % 30 ikamesi ile hazırlanan harçlar üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları ve XRD analizleri verilmiştir. Analizler sonucunda gözenek sayısının fazla olmasının yanında kompozit içindeki bağlayıcı fazda küçük çatlakların oluştuğu görülmüştür. Agregaya ile bağlayıcı faz arasındaki bağın homojenliğini koruduğu ve CSH jellerinde bozulmanın az olduğu söylenebilir.
- BYT'nin % 40 ikamesi ile hazırlanan harçlar üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.86'da XRD analizleri 4.87'de verilmiştir. SEM ve XRD analizleri sonucunda gözenek sayısının fazla olduğu görülmüştür. Çok sayıda çatlak oluşumu gözlenmiştir. Agregaya ile bağlayıcı faz arasındaki bağın homojenliğini kaybederek zayıfladığı belirlenmiştir. Ayrıca CSH jellerinin suyunu kaybetmesi nedeniyle boşluklu bir duruma geldiği görülmüştür.



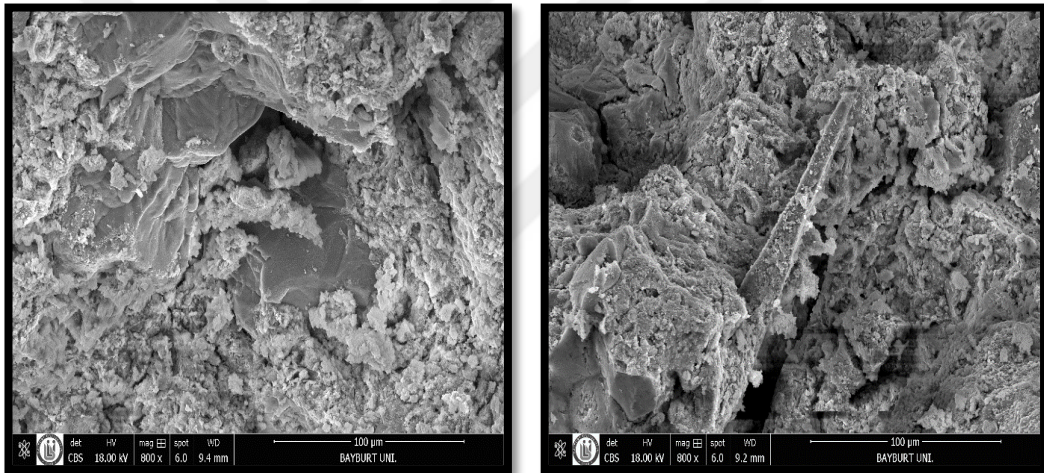
Şekil 4.88 %10 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



Şekil 4.89 %20 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



Şekil 4.90 %30 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri



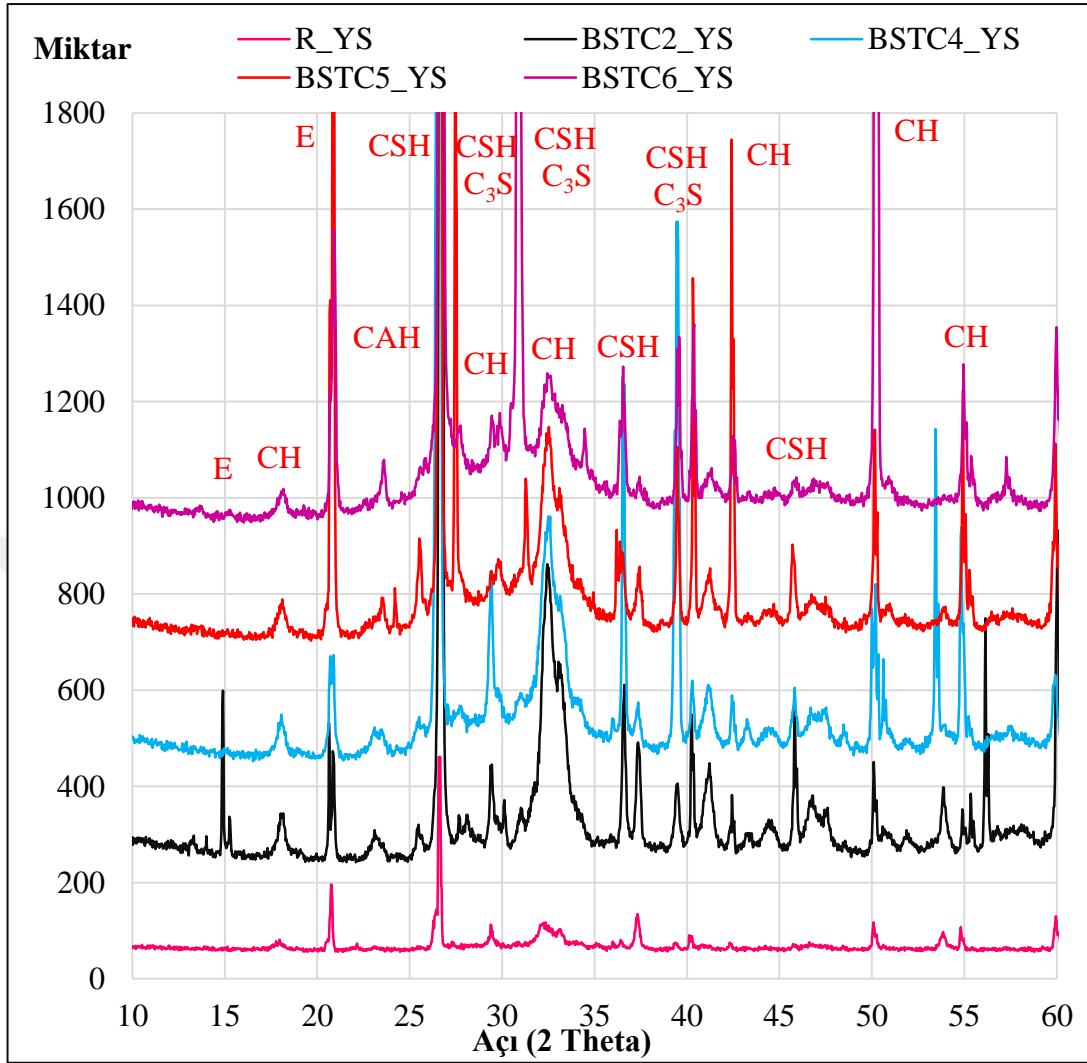
Şekil 4.91 %40 BST ikameli çimentonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.88, Şekil 4.89, Şekil 4.90, Şekil 4.91 ve Şekil 4.92’de sırasıyla BST’nin %10,%20,%30 ve %40 ikamesi ile hazırlanan harç numuneleri üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası çekilen SEM görüntüleri ve XRD analizleri verilmiştir.

- Şekil 4.88 ve Şekil 4.92’de BST’nin %10 ikameli çimento harç numunesinin mikroyapısı incelendiğinde yüksek sıcaklık sonucu kompozit içindeki bağlayıcı fazda ve agrega yüzeylerinde çatlakların oluştuğu görülmüştür. Agrega yüzeyini

saran ağısı CSH jellerine rastlanmıştır. CSH jellerinin suyunu kaybetmesi nedeniyle boşluklu bir duruma geldiği görülmüştür.

- BST'nin % 20 ikamesi ile hazırlanan harçlar üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen Şekil 4.89'daki SEM fotoğrafları incelendiğinde gözenek sayısının fazla olmasının yanında büyük çatlaklara rastlanmıştır. Ağ şeklinde birbirini tamamlayan bu çatlakların harcın mekanik özelliklerinin azalmasının ana nedeni olduğu düşünülmektedir. Agregası ile bağlayıcı faz arasındaki bağın homojenliğini kaybederek zayıfladığı belirlenmiştir. CSH jellerinin yapısında bozulmalar olduğu görülmüştür.
- Şekil 4.90 ve Şekil 4.92'de BST'nin % 30 ikamesi ile hazırlanan harçlar üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları ve XRD analizleri verilmiştir. Analizler sonucunda gözenek sayısının fazla olmasının yanında kompozit içindeki bağlayıcı fazda büyük çatlakların oluştuğu görülmüştür. Agregası ile bağlayıcı faz arasındaki bağın homojenliğinin azaldığı ve CSH jellerinde bozulmalar olduğu görülmüştür.
- BYT'nin % 40 ikamesi ile hazırlanan harçlar üzerinde yapılan 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.91'de XRD analizleri 4.92'de verilmiştir. SEM ve XRD analizleri sonucunda gözenek sayısının fazla olduğu görülmüştür. Çok sayıda çatlak oluşumu gözlenmiştir. Agregası ile bağlayıcı faz arasındaki bağın homojenliğini kaybettiği ayrıca CSH jellerinin suyunu kaybetmesi nedeniyle boşluklu bir duruma geldiği görülmüştür.



Şekil 4.92 BST ikameli çimentoların yüksek sıcaklık sonrası mineralojik analizinin referans çimentonun mineralojik analizi ile karşılaştırma diyagramı

Üretilen katkıli çimentoların yüksek sıcaklık etkisine karşı gösterdikleri dayanıklılık özellikleri genel olarak değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklığın kompozit içindeki bağlayıcı fazda hasara neden olduğu görülmüştür. Bunun ana nedeni bünyelerinde bulunan suyun yüksek sıcaklık etkisiyle jel yapısından ayrılarak, bağlayıcı fazın homojen ve sürekli yapısını bozmasıdır. Ağ şeklinde birbirini tamamlayan çatlaklara rastlanmıştır. Bu sebeplerden dolayı katkıli çimentoların yüksek sıcaklık karşısında beton kalıcılığını olumsuz etkileyeceği düşünülmektedir. Çimentoda katkı olarak BYT ve BST kullanımının BBT'ye oranla yüksek sıcaklık direncini artıracığı görülmüştür.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Bayburt beyaz, yeşil ve sarı taşının; kimyasal ve fiziksel analizleriyle puzolanik aktivitesine bakılıp, çimento içerisinde mineral katkı olarak kullanımlarıyla birlikte çimentonun, standart kıvam suyu ihtiyacı, priz başlangıç ve sonu süreleri ve hacim genleşme değerleri incelenmiştir. Bu çimentolarla üretilen harçların; işlenebilirliğine, eğilmede çekme dayanımına, basınç dayanımına, su emmesine, kapiler su emmesine ve yüksek sıcaklık etkisine bakılmıştır. Ayrıca çimento hamurlarının ve belirli sıcaklığa maruz bırakılan harçların XRD ve SEM analizlerine kontrol çimentosu ve üretilen numunelerle karşılaştırmalı olarak bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çimento üretiminde kullanılan Bayburt beyaz, sarı ve yeşil taşların kimyasal ve mineralojik bileşiminin belirlenmesiyle mineral katkıların puzolanik aktivitesi hakkında ön bilgi sahibi olunmuştur. Hem Türk Standartlarına hem de Amerikan Standartlarına göre yapılan deneyler, Bayburt beyaz, sarı ve yeşil taşının puzolanik aktivitesinin olduğunu göstermiştir.
- Çimentoya katılan BT oranı artışına bağlı olarak, standart kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarları da artmıştır. Kontrol çimento hamuruna göre; en yüksek su ihtiyacı Bayburt beyaz taşının ikamesinde gözlenirken, en düşük su ihtiyacının Bayburt sarı taşı ikameli çimento hamuruna ait olduğu görülmüştür.
- Priz süreleri incelendiğinde; kullanılan katkı çeşidi ve oranına bağlı olarak priz sürelerinin değiştiği görülmüştür. Bayburt beyaz taş katkısının çimentonun priz başlama ve bitirme sürelerini artırdığı görülmüştür. Bayburt yeşil taş katkısı priz başlama süresini azaltırken priz sona erme süresinde gecikmeye yol açmıştır. Bayburt sarı taşı katkılı çimentoların ise priz başlama süresi azalırken, sona erme süreleri referans çimentosundan daha erken veya daha geç sona ermiştir. Yapılan çalışma sonucunda priz sürelerinin TS EN 196-3’de belirtilen “*çimentonun priz başlangıcı 1 saatten az olamaz, çimentonun priz bitişi 10 saatten geç olamaz.*” kuralını sağladığı görülmüştür.

- Çimentoya BT ikamesiyle edilmesiyle elde edilen çimento hamurlarının hacim genleşme değerlerinin 0 ile 2 mm arasında değiştiği görülmüştür. Bu değerlerde TS EN 196-3'te belirtilen 10 mm sınır değerinden düşüktür. Bu durum Bayburt beyaz, yeşil ve sarı taşının hacim genleşmesi sonuçlarına olumsuz bir etkisi olmadığını göstermiştir.
- İkame oranının artışıyla birlikte standart kıvam için gerekli olan su miktarının da artması harç numunelerinde işlenebilirliği azaltacağından en az yayılmayı BBT ikameli harçlar gösterirken BYT ve BST ikameli harçların yayılma değerleri benzerlik göstermiştir. BBT'nin artan ikame oranları ile birlikte işlenebilirlik özelliğinin diğer BT'lere oranla daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durum numuneyi kalıba yerleştirme aşamasını zorlaştırmıştır.
- 2, 28,90 ve 270 gün yaşında harç numunelere bakıldığında eğilme dayanımlarında Bayburt beyaz, sarı ve yeşil taşının ikame oranlarındaki artış ile birlikte düşüş yaşanmıştır. BT kullanımlarında en yüksek eğilme dayanımını %5 ikameli çimento harçları verirken en düşük dayanım %40 ikameli harçlarda görülmüştür.
- BT ikame oranı ile birlikte basınç dayanımlarında düşüşler yaşandığı görülmüştür. Basınç dayanım değerlerinin bazı BT ikamelerinde referans numune değerinin üstünde olduğu görülürken bazı ikame oranlarında yakın dayanım değerlerine ulaştığı saptanmıştır. 28 günlük basınç dayanım değerleri BBT'nin %30 ikamesi ile 49,53 MPa, BYT'nin %30 ikamesi ile 46,19 MPa ve BST'nin %40 ikamesi ile 45,84 MPa olduğunu göstermiştir. TS EN 197-1 no'lu standartta belirtilen dayanım değerlerine göre CEM I 42,5 R çimentosunun 28 günlük dayanımı en az 42,5 MPa, en fazla 62,2 olmalıdır. Bu durum katkılı çimento üretiminde BT'lerin kullanılabilceğini göstermiştir.
- 2 gün yaşındaki numuneler üzerinde yapılan su emme deneyi sonucunda, su emme ve görünür porozite değeri ikame oranı artışıyla artmıştır. Değerlendirmeler su emme miktarı ve görünür porozitenin en fazla BBT ikameli harçlarda, minimum değerlerin BYT ikameli harçlarda olduğunu göstermiştir. 28 günlük veriler su emme ve görünür porozite değerinin ikame oranı artışıyla değiştiğini göstermiştir. Su emme ve porozite

değerleri 2 günlük su emme ve görünür porozite değerlerine oranla daha düşük değerler almıştır. 28 günlük su emme miktarı ve görünür porozite değerlerinin max değerini BYT ikamesi verirken en düşük değeri BBT ikamesi vermiştir. 90 gün sonunda elde edilen veriler su emme ve porozite değerlerinin 2 ve 28 günlük su emme ve görünür porozite değerlerine oranla daha düşük değerler aldığını göstermiştir.

- Kapiler su emme katsayıları 90 günlük süreçte artan BT ikame oranıyla birlikte bütün harç numunelerinde farklı oranlarda artış ve azalışlar göstermiştir. BBT'nin artan ikame oranlarıyla birlikte kapilerite katsayısı referans çimentosuna göre ilk olarak azalış gösterirken daha sonraki ikamelerde artış olmuştur. BYT ikamesi ile kapilerite katsayısında artış ve azalışlar meydana gelmiştir. Artan BST ikamesi kapilerite katsayısını başlangıçta azaltırken daha sonraki değerlerde artış ve azalışlar olmuştur. Kapiler su emme deneyine tabi tutulan numunelerde en fazla artış gösterenin BBT ikameli çimento harçlarının olduğu görülmektedir.
- SEM ve XRD görüntüleri genel olarak ele alındığında kalsiyum-silika-hidrat (CSH) ve kalsiyum hidroksite (CH) ilaveten çimento pastalarında etrenjit, hidrate olmamış çimento taneciklerinin, kılcal ve jel boşluklarının, çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Mikroyapı analiz sonuçlarına göre katkılı çimentoların, ileri yaşlarda kompozit içindeki çimento fazıyla agrega fazı arasındaki bağı kuvvetlendirerek mekanik dayanımları artırdığı ve homojen bir yapı oluşturduğu belirlenmiştir.
- 700 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası alınan örneklerin farklı bölgelerinden çekilen SEM fotoğraflardan gözenek sayısının fazla olmasının yanında çatlakların varlığı da görülmüştür. Mikroyapı yüksek sıcaklık sonucu kompozit içindeki bağlayıcı fazda büyük çatlakların oluştuğu göstermiştir. Ağ şeklinde birbirini tamamlayan bu çatlakların harcın mekanik özelliklerinin azaltmıştır. Agregaya ile bağlayıcı faz arasındaki bağı homojenliğini kaybederek zayıfladığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda C-S-H jeli zayıf bir şekilde sıralanmış ve CSH jellerinin suyunu kaybetmesi nedeniyle boşluklu bir duruma geldiği görülmüştür. Çimentoda katkı olarak yeşil ve sarı taş kullanımının beyaz taşa oranla yüksek sıcaklık direncini artıracığı belirlenmiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harç numuneleri renginde değişikliklerin meydana geldiği görülmüştür. Sıcaklık artışıyla birlikte renk her bir numune grubu için gri, pembemsi ve kül rengine doğru değişim göstermiştir. Renkte meydana gelen değişim ile basınç dayanımındaki değişim arasında paralellik gözlenmiştir. Buradan, renk incelemesi ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebileceği sonucuna varılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin yüzeyindeki renk değişimi, numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrası özelliklerinin tespitinde bir tahribatsız muayene yöntemi olarak kullanılabilir.
- Hazırlanan harç numuneleri üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyi sonrası numunelerin kütle kayıpları artmıştır. Bu kayıplarda BBT'nin ikame oranı artışıyla artış, BYT ve BST'nin ikame oranlarındaki artış ile kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Ancak artan sıcaklık etkisiyle kılcal boşluklardaki ve jel boşluklarındaki suyun çimento harcı bünyesinden uzaklaşması sonucu kütle kayıplarının arttığı söylenebilir.
- Yüksek sıcaklık sonrası mekanik özelliklerindeki değişim, bazı farklılıklar olsa da sıcaklık artışı ile dayanımların azalması şeklinde görülmüştür. Maruz kalınan sıcaklığın yanı sıra sıcaklık etki süresi de mekanik özelliklerdeki değişimi doğrudan etkilemiştir. Sıcaklık arttıkça çekme dayanımı değişimi artan BT ikamelerinde farklı gözlenmiştir. 300°C sıcaklığa kadar maruz kalan numunelerde dayanım artışı görülmüş ve bu değer kontrol numunesinin değerinin üstünde çıkmıştır. Lakin 700 °C'de önemli ölçüde azalmalar görülmüştür.
- Diğer bir mekanik özellik olan basınç dayanımı artan sıcaklıkla birlikte azalmıştır. Bu azalmaya çekme dayanımında olduğu gibi sıcaklık etki süresi önemli ölçüde etki etmiştir. 100 °C'de basınç dayanımı değerleri tüm gruplar göz önüne alındığında 63,03 MPa ile 24,55 MPa arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiş, sıcaklık arttıkça artan ikame oranıyla birlikte basınç dayanımında genel olarak azalma görülmüştür. 90 günlük numuneler 300 °C sıcaklığa maruz kaldığında harç numunelerine ait basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Numunelerin en yüksek dayanımı BYT ve BST ikameli harçlar verirken en düşük dayanımlar BBT katkılı harçlarda görülmüştür. 300 °C'den 700 °C'ye ulaşıldığında

bir anda dayanım kaybı yaşanmıştır. Basınç dayanımı 700 °C’de başlangıç değerine göre % 80 değer kaybetmiştir.

İncelemesi yapılan Bayburt yöresine ait Bayburt taşı olarak bilinen volkanik tüflerin yeterli dayanım indeksine sahip olduğu çimento ve beton üretiminde puzolanik katkı olarak kullanılabilmesi anlaşılmıştır. Bayburt Beyaz Taşının %20, Bayburt Yeşil Taşının %30 ve Bayburt Sarı Taşının %40 ikame oranlarında CEM I (42,5 N/R) ile çimento yerine 45 µm incelik ile puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Yapılan bu çalışma Bayburt taşı ikameli çimento üretimiyle birlikte;

- Hem çevresel sorunların minimize edileceğini hem de çimento üretiminin daha düşük maliyetle yapılacağını,
- Hafif çimento üretiminin gerçekleştirileceğini,
- CEM II ve CEM IV (42,5 N/R) tipi çimento üretiminde BBT, BYT ve BST’nin sırasıyla %20, %30, %40 ikame oranlarında çimento yerine puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilmesini,
- CEM II ve CEM IV (32,5 N/R) tipi çimento üretiminde BBT, BYT ve BST’nin sırasıyla %30, %40, %40 ikame oranlarında çimento yerine puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilmesini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Akgül, E. (2006, Haziran). *Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 7-21.
- Akman, M. S. (1990). **Yapı Malzemeleri**. T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası(1408).
- Alp, I., Deveci, H., Yılmaz, A. O., Kesimal, A. ve Yılmaz, E. (2004). *Taşhane (Terme) Andezitik Tüflerinin Çimentoda Üretiminde Katkı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi. Trabzon.
- Arıcı, E. (1997). *Van Yöresindeki Volkanik Tüflerin Beton Mukavemetine Etkisi ve Taşıyıcı Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ.
- Arslan, M. ve Kırgız, M. S. (2006). *Mermer ve tuğla endüstrisi atıklarının çimentoda mineralojik katkı olarak kullanılması. TÜBİTAK Projesi*, Proje No MAG-HD15 (105M086). Ankara.
- Arslan, M., Aslan, Z. ve Abdurrahman, D. (2005). *Bayburt Tüflerinin Petrografik, Petrokimyasal ve Petrolojik Özellikleri: Doğu Pontid Güney Zonu'nda Eosen Kalkalkalen Felsik Volkanizması. S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Dergisi*, 20(1), 50, 53, 56.
- Aruntaş, H.Y. (1996). *Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği, Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-22.
- ASTM C 618. (1991). *Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. Philadelphia: ASTM.
- ASTM C 642-06. (2006). *Standart Test Method For Density, Absorption and Voids In Hardened Concrete*, American Society of Testing Methods, USA.
- ASTM C 1585-04.(2007). *Standart Test Method For Measurement Of Rate Of Absorption Of Water By Hydraulic Cement Concretes*, American Society of Testing Methods, USA.
- Atan, M. C. (2015, Eylül). *Using Cappadocia Tuff as a Natural Pozzolan in the Cement Production*. A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural Applied Sciences of Middle East Technical University. Ankara.

- Berry, E. V. (1989). *Beneficiated Fly Ash: Hydration, Microstructure and Strength Development in Portland Cement Systems. Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 1*, 241-273. Trondheim: ACI Special Publication 114.
- Bilge, B. (2008, Mayıs). *Portland Çimentosu Farinine İlave Edilen Katkuların Çimentonun Sinterleşme Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Binici, H. (2002). *PÇ-GYFC-Pomza Üçlü Karışımlarının Özellikleri, Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.
- Bulut, Ü. ve Tanaçan, L. (2009). *Perlitin Puzolanik Aktivitesi. İ.T.Ü Dergisi "Mimarlık, Planlama, Tasarım"*, 8(1), 81-89.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M., Sümer, M., ve Yurdusev, M. (2004). *Use Of Zeolite Coal Bottom Ash and Fly Ash As Replacement Materials In Cement Production. Cement and Concrete Research (34)*, 731-735.
- Colleparadi, M.V. (1978). *The Effect of Pozzolanas on the C3S Hydration. Cement and Concrete Research, 8*, 741-752.
- Collephardi, M.V. (1970). *La Cinetica di Penetrazione degli Ioni Cloruro nel Calcestruzzo. II. Cemento(No 4)*, 157-164.
- Cook, D. J. ve Cao, H. T. (1987). *An Investigation of the Pore Structure in Fly Ash / OPC Blends. Proceedings of the 1st International RILEM Congress on Pore Structure and Material Properties, Vol. 1*, 69-76. Versailles.
- Çavdar, A. (2004). *Trabzon Yöresi Tüflerinin Çimentoda Tras Olarak Kullanılabilirliği, Çimento İnceliği ve Tras Oranının Traslı Çimentonun Özelliklerine Etkisi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.
- Çavdar, A. ve Yetkin, Ş. (2004). *Trabzon Yöresi Tüflerinin Çimentoda Tras Olarak Kullanılabilirliği, Bazı Kimyasal ve Mekanik İlişkiler*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Çavdar, A. ve Yetkin, Ş. (2005). *Doğal Puzolan Katkı Oranının Çimentonun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılaşma ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim Dergisi*, 17(4), 687-692.
- Çavdar, A. ve Yetkin, Ş. (2009). *The Effect of Particle Fineness on Properties of Portland Pozzolan Cement Mortars. Turkish Journal of Science Technology*, 4(1), 17-23.

- Çelik, K. (2005, Temmuz). *Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Traslı Çimentolarla Üretilen Aynı Mukavemet Sınıfındaki Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi*, **Yüksek Lisans Tezi**, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, Ö., Yurter, G., Kan, S., ve Yeprem, H. A. (2004). *Farklı Puzolanik Katkılarının Çimentoda Harçlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi*. **Doğuş Üniversitesi Dergisi**, 5(2), 147-154.
- Çimen, Ö. (2005, Eylül). *Pomzanın Mühendislik Karakteristikleri ve Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Stabilizasyonda Kullanılması*. **Türkiye Pomza Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, 251-257. Isparta.
- Davidovitz, J. (1987). *Ancient and Modern Concretes: What is the Difference*. **Concrete International**, 23-25.
- Davis, R. V. *Properties of Mortars and Concretes Containing Portland-Pozzolan Cements*. 32, 80-114. ACI.
- Dayı, M. (2006, Ocak). *Doğal ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretimindeki Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 12-15, 17, 19-20.
- Delibaş, T. (2012). *Effects of Granulated Blast Furnace Slag, Trass and Limestone Fineness on The Properties of Blended Cements*, **MS Thesis**, ODTÜ Graduate School of Natural and Applied Sciences. Ankara.
- Demirer, A. (2009, Mart). *Çimento Katkısı Olarak Kullanılan Farklı Doğal Puzolanların (Tras) Elektrokinetik ve Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi* **Yüksek Lisans Tezi**, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Doruk, M. (1974). *Volkanik tüflerin karayolu yapımında kullanılması ile ilgili bir çalışma*. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Fen Heyeti Müdürlüğü.
- Douglas, E. ve Mainwaring P.R. (1985). *Hydration and Pozzolan Activity of Non Ferrous Slag*. **American Ceramic Society Bulletin**, 64(5), 700-711.
- DPT. (2001). *Yapı Malzemeleri III (Pomza- Perlit- Vermikülit- Flogopit Genleşen Killer)*. **Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Grubu Raporu, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu**. Ankara.
- Duran, F. (2009). *Erciyes volkanizmasının oluşumu, Koçcağz Köyü (Kayseri) dolayının stratigrafisi ve tüflerin yapı - kaplama taşı olarak kullanılabilirliği* **Yüksek Lisans Tezi**, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.
- Duxson, P. ve Provis, J. L. (2008). *Low CO₂ Concrete: Are We Making Any Progress? In BEDP Environment Desing Guide*, Royal Australian Institute of Architects.

- Editör Swamy, R. N. (1986). *Cement Replacement Materials*. Londra: Blackie and Son Ltd.
- Erdoğan, T.Y. (2003). **Beton**. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 15,18,29-35,171-184,190,204. Ankara.
- Erdoğan, T.Y. (2003). *Portland Çimentoları ve Diğer Çimento Türleri*, **Beton**, 11-61, 634-639. Ankara: METU Press.
- Erdoğan, T. Y. (2013, Mart). **Beton**. *İnce Taneli Durumdaki Doğal Puzolan Katkılarının Beton Özelliklerine Etkisi*, 184. Ankara: Odtü Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını.
- Erdoğdu, K. (1996). *Effects of Pozzolanic Additions on Grindability and Some Mechanical Properties of Pozzolanic Cements of Different Fineness Values* **Yüksek Lisans Tezi**, Orta Doğu Teknik Üniversitesi. Ankara.
- Erdoğdu, K., Tokyay, M. ve Türker, P. (2009, Temmuz). *Traslar ve Traslı Çimentolar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu)*, 8. Baskı(24-48). Ankara: TÇMB / AR-GE / Y99-2.
- Erdoğmuş, E. (2006). *Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi*, **Doktora Tezi**, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 48,97.
- Erguvanlı, K. ve Sayar, M. (1955). *Türkiye Mermerleri ve İnşaat Taşları*. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, 115. İstanbul: Kurtulmuş Matbaası.
- Ertek, N. (2008). *Kapadokya (Nevşehir-Kayseri) bölgesi kaolinitik tüflerin oluşumu ve hammadde potansiyeli*, **Yüksek Lisans Tezi**, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 76-78,81-84. Mersin.
- Feldman, R. F. (1981). *Pore Structure Formation During Hydration of Fly Ash and Slag Cement Blends*. **Materials Research Society Annual Meeting**. Boston.
- Fragoulis, D. (1997). *Zeollitic Tuffs of Kimolos Island, Aegan Sea, Greece and Their Industrial Potential*. 27, 889-995.
- Gani, M. J. (1997). **Cement and Concrete**. Faculty of Engineering Monash University Clayton, 83-90.
- Garcia, E. and Sharp, J. H. (2001). *The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures*. **Cement and Concrete Research**(31), 695-702.

- Giergiczny, Z. and Werynska, A. (1989). "Influence of Fineness of Fly Ashes on Their Hydraulic Activity" In Malhotra, V ed., **Proceedings of the 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Conctere.** Trondheim, ACI Special Publication 114, 97-115.
- Gjorv, O. E. ve Vennesland, O. (1979). *Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete.* **Cement and Concrete Research(9)**, 229-238.
- Griesser, A. (2002). *Cement - Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures,* **Doctoral Thesis**, Swiss Federal Institute Of Technology, 16.
- Grzymek, J. V. (1980). *Hydration of Cements with Pozzolan Additions.* **Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement(IV)**, 66-71. Paris.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. and Rangan, B. V. (2004). *Brief Review of Development of Geopolymer Concrete.* **Paper Presented at the George Hoff Symposium.** American Concrete Institute USA.
- Hewlett, P.C. (Dü.). (1998). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete.* **John Wiley and Sons Inc. New York: Fourth Edition.**
- Hooton, R. D. (1984). *Permeability and Pore Structure of Cement Pastes Containing Fly Ash, Slag and Silica Fume.* **Blended Cements.** Denver.
- Huntzinger, D. N. and Eatmon, T. D. (2009). *A Life Cycle Assessment of Portland Cement Manufacturing: Comparing The Traditional Process With Alternative Technologies.* **J. Clean Prod (17)**, 668-675.
- Kaçar, M. (2014,Ocak). *Bayburt Taşının Üç Boyutlu İşlenebilmesi İçin Mekanik Sistemin ve Kontrol Yazılımının Gerçekleştirilmesi,* **Yüksek Lisans Tezi,** Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, 3.Elazığ.
- Karakurt, C. (2008, Temmuz). *Çimento Üretiminde Doğal Zeolit ve Volkanik Tüflerin Endüstriyel Atıklarla Birlikte Kullanılmasının Beton Performansı Üzerine Etkileri,* **Doktora Tezi,** Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı, 6.
- Kavas, T. ve Çelik, M. Y. (2001). *Ayazini (Afyon) Tüflerinin Çimento Sanayinde Tras Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi.*
- Koçak, Y. (2008,Ocak). *Çimento- Puzolan Etkileşiminde Moleküler ve Elektrokinetik Davranışların Araştırılması,* **Doktora Tezi,** Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Kohno, K., Aihara, F. and Ohno, K. (1989). *Relative Durability Properties and Strengths of Mortars Containing Finely Ground Silica and Silica Fume*, In **Malhotra, VM ed. Proceedings of the 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Concrete**. Trondheim, ACI Special Publication 114, 815-826.
- Koral, A., Koral Madencilik A.Ş., Bayburt
- Köleli, Y. ve Ülgür, S. Z. (2015). *TR63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu*. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı. (E. Z. Budak ve F. Gökşen Derleyiciler) Hatay, Kahramanmaraş, Osmaniye.
- Kudaka. (2014). *T. C. Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı TRA1 Düzey 2 Bölgesi Doğaltaş ve Maden Potansiyeli Raporu*. Ankara.
- Leckebush, R. (1984). *Türkiye'deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı*. Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi, 1-27. Ankara.
- Liebig, E. ve Althaus, E. (1998). *Pozzolanic activity of volcanic tuff and suevite, effects of calcination*. **Cement and Concrete Research**, 28,567-575.
- Ludwing, U. and Schwiete, H. E. *Kalk Bindung und Neubildungen bei den Trass-Kalk Reaktinoen*. **Zement Kalk Gips**, 16, 421-431.
- Manmohan, D. and Mehta, P. K. (1981). *Influence of Pozzolanic Materials, Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes*. **Cement and Concrete Aggregates**, 65-73.
- Massazza, F. (1989). *Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 41-79. Ankara.
- Massazza, F. (1991). *Microstructure of Hydrated Pozzolanic Cements*. **1st International Workshop on Hydration and Setting**. (E. London, and F. N. Spon, Dü) Dijon.
- Massazza, F. (1993). *Pozzolanic Cement*. **Cement and Concrete Composites**, 15,185-214.
- Massazza, F. (1998). *Pozzolan and Pozzolanic Cements*. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete 4**, John Wiley and Sons Inc. 471-617. London, New York.
- Massazza, F. and Costa, U. (1987). *Permeabilita' di Paste di Cemento Portland a Pozzolanico: Relazione Con La Tessitura Porosa*. **Convegno AITEC: La Durabilita Delle Opere in Calcestruzzo**, 63-67. Padova.
- Massazza, F. and Daimon, M. (1992). *Chemistry of Hydration of Cements and Cementitious Systems*. **Proceedings of 9th International Congress on the Chemistry of Cements**. Tokyo.

- Mather, B. *Use of Concrete with Low PC Content in Combinations with Pozzolans and Other Admixturesin, Construction of Concrete Dams.* 71, 589-599. ACI.
- MTA. (2005). Bayburt Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeolojisi Raporu.
- Mindess, S. and Young, J. (1981). **Concrete.** Prentice- Hall Inc. 41-94. New Jersey.
- Mohabbı Yaddollahı, M. (2013). *Hasankale Pomzasından Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Geopolimer Çimentosunun Üretilebilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi,* Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nas, S. (2012,Ocak). *Portland Çimento ve Uçucu Kül İkameli Çimentoların Hidratasyon Gelişimleri ile Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi,* Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Neville, A. M. (1981). *Properties of Concrete.* **Longman Scientific and Technical,** 36-115.
- Neville, A. M. (2000). *Properties of Concrete.* **Longman Scientific and Technical. Fourth Edition.** New York, USA.
- Neville, A. M. (2006). *Proporties of Concrete.* 8-18,78. İngiltere: Pearson Education Limited.
- Okucu, A. (1998). *Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri, Doktora Tezi,* Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-54.
- Okucu, A., *Zeolitik Tüflerin Çimento Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi,* Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi. Balıkesir.
- Öneç, A. İ., Altınbaş, A. F., Erkanol, D. and Tulukçu, A. (2005). *Bayburt Taşı ve Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeolojisi. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü Derleme Raporu.*
- Öner, M., Erdoğan, K. and Günlü, A. (2003). *Effect of Components Fineness on Strenght of Blast Furnace Slag Cement. Cement and Concrete Research,* 33,463-469.
- Ören, B. C. (1996). *Pomzanın endüstriyel hammadde olarak değerlendirilebilirliği, Yüksek Lisans Tezi,* Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 17-18. Isparta.
- Özer, E. (1984). *Bayburt (Gümüşhane) yöresinin jeolojisi. Karadeniz Üniversitesi Dergisi,* 3,1-2,77-89.

- Özkuş, H., Taşdemir, M. and Topayay, M. (1999). "Çimento" Beton. Türkiye Hazır Beton Birliği, 18.
- Özturan, T. (1993). *Uluslararası IV. CANMET- ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Bildiriler Kitabı 2*, 57-72, 75-82. TMMOB, İstanbul.
- Palabıyık, H. ve Altunbaş, D. (2004). *Kentsel Katı Atıklar ve Yönetimi, Çevre Sorunlarına Çağdaş Yaklaşımlar: Ekolojik, Ekonomik, Politik ve Yönetmel Perspektifler*, Marin, C. ve Yıldırım, U. 103-124. İstanbul: Beta.
- Pan, S., Tseng, D. and Lee, C. (2003). *Influence of the Fineness of Sewage Sludge Ash on the Mortar Properties. Cement and Concrete Research*, 33,1749-1754.
- Parrott, L. J. (1992). *Magazine of Concrete Research Dergisinde 1991 Yılında, 43. Sayıda 171. Sayfada Yayınlanmış Olan Makaleyle İlgili Yorumlar. Magazine of Concrete Research (44)*, 141-142.
- Plowman, C. (1981). *The Influence of Pulverised Fuel Ash o the Hydration Reactions of Calcium Aluminates. Proceedings of Symposium on the Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete*. Boston: Materials Research Society.
- Postacıoğlu, B. (1986). **Beton-Bağlayıcı Maddeler**. 39-175. İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi.
- Ramachandran, V.S. (1995). **Con320crete Admixtures Handbook**. 114-159. New Jersey, ABD.
- Ramachandran, V.S., Beaudoin, and James, J. (2001). **Concrete Admixtures Handbook**. Noyes Publication, 42-47. New Jersey.
- Raumain, J. C. and Sarkar, S. L. (2001, Mart-Nisan). *21 Yüzyılın Çimentoları. Çimento ve Beton Dünyası*, 36-45.
- Saad, M. N., Andrade, W. P. and Paulon, V. A. *Properties of Mass Concrete Containng an Active Pozzolan Made from Clay. Concrete International*, 59-65.
- Sabir, B., Wild, S. and Bai, J. (2001). *Metacaolin and Calcined Clays as Pozzolan for Concrete: Review. Cement and Concrete Research*, 23-441-454.
- Sağsöz, A.E., (2013, Ağustos). *Kendiliğinden Yerleşen Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinde Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri İle Renk Değişiminin İncelenmesi, Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 21. Trabzon.
- Shannag., M. (2000). *High Strenght Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica*

- Fume. Cement and Concrete Research*, 22,399-406.
- Shi, C. and Day, R. L. (2001). *Comparison of Different Methods for Enhancing Reactivity of Pozzolans. Cement and Concrete Research*, 31,813-818.
- Shoya, M. *Drying Shrinkage and Moisture Loss of Superplasticizer Admixed Concrete of Low Water Cement Ratio. Transactions of the Japan Concrete Institute(II-5)*, 103-110.
- Sınıksaran, M. (2012, Aralık). *Volkanik Tüf Tozları İle Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 12-18. Konya.
- Sri, R. R. and Tam, C. T. (1989). *Properties of Concrete Containing Low Calcium Fly Ash under Hot and Humid Climate. Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 139-155. Trondheim: ACI Special Publication 114 Vol 1.
- Stuart, K. D., Anderson, D. A. and Cady, P. D. (1980). *Compressive Strength Studies on Portland Cement Mortars Containing Fly Ash and Superplastisizer. Cement and Concrete Research*, 10, 823-832.
- Swamy, R. N. (1992). "Role and Effectiveness of Mineral Admixtures in Relation to Alkali Silica Reaction", *The Alkali – Silica Reaction in Concrete*. Swamy, R. N. (Edit.), Van Nostrand Reinhold, 96-121. New York.
- Swamy, R. N. and Mahmud, H. B. (1989). *Shrinkage and Creep Behavior of High Fly Ash Content Concrete. Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 453-475. Trondheim: ACI Special Publication 114 Vol. 1.
- Şafak, A. (2014,Haziran).*Çimento Mineralojisinin ve Petrografisinin Çimento Teknolojisine Katkısı, Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Taban, S. (2010,Mart). *Farklı Tüfit Oranlarda Zeolitik Tüf Katkısının Beton Özellikleri ve Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Taban, S. ve Şimşek, O. *Zeolitik Tüf Katkı Oranı ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(1), 145-153. Ankara.
- Takemeto, K. V. (1980). *Hydration of Pozzolan Cements. Proceeding of 7th International Congress on Chemistry of Cements*, Vol 1. Paris.
- Tarhan, F. ve Bulut, F. (1989). *Yapı taşı olarak Bayburt tüflerinin jeomekanik özellikleri. Doğa*, 3,13,485-498.

- Taşdemir, C. (2003). *Combined Effects of Mineral Admixtures and Curing Conditions on the Sorptivity Coefficient of Concrete*. **Cement and Concrete Research**, 33,1637-1642.
- Taşkın, C. (1999). *Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 1-43.
- Tekin, D. (2014). *Farklı İnceliklerdeki Mineral Katkılı Çimentoların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi*, **Yüksek Lisans Tezi**, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tekin, İ. (2005,Ağustos). *Çimento Harçlarının Porozitesinin Bilgisayarlı Tomografi İle Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tekin, İ. *Properties of NaOH Activated Geopolymer with Marble, Travertine and Volcanic Tuff Wastes*. **Construction and Building Materials(127)**, 607-617.
- Tekin, İ., Kotan, T., Yurdakul, M. ve Öner, E. (2017). *Bayburt Bölgesinde Bulunan Farklı Agregat Tipleri ile Üretilen Geleneksel Betonların Mekanik Mukavemetleri Üzerine Bir Çalışma*. **Politeknik Dergisi**, 20(3), 513-518.
- The Freedonia Group. (2006). *World Cement to 2010*. **Research Report**, USA.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (1997). *Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği T.Ç.M.B / AR-GE/Y97.2, 1-2.
- Topçu, İ. B. ve Karakurt, C. (2007). *Effects of Different Industrial Wastes and Natural Pozzolans on Cement Properties*. **3rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete**, 179-189. TÇMM.
- Troxell, G. V. (1958). *Long Time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete*. **Proceedings of the ASTM Congress(58)**, 1101-1120.
- TS 25. (1975). *Tras*. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS 25. (2008). *Doğal Puzolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan-Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri*. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 1925. (2000). *Doğal taşlar- Deney metotları- Kılcal etkiye bağlı su emme katsayısının tayini*. Ankara: TSE.
- TS EN 196-1, (2002). *Çimento Deney Metotları-Bölüm 1:Dayanım Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 196-3. (2010, Ocak). *Çimento Deney Yöntemleri-Bölüm 3: Priz Süreleri ve Genleşme Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

- Tuncer, E. (2014, Mart). *Gümüşhane Yöresi Volkanik Kayaçların Puzolanik Aktivitesinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi*, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 13-14,16-20,24.
- Tuthill, L. H. and Cordon, W. A., *Properties and Uses of Initially Retarded Concrete*. 52, 273-286. ACI.
- Türkmenoğlu, A. G. and Tankut, A. (2002). *Use of Tuffs From Central Turkey as Admixture in Pozzolanic Cements Assessment of Their Petrographical Properties*. **Cement and Concrete Research**, 32,629-637.
- Ulus, H. (2006,Mart). *Erzincan ve Nevşehir Yöresi Pomzularının Çimentolu Sistemlerde Kullanılabilirliği, Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 21-22,41-42.
- URL-1. (2014, Nisan). www.bayburttasi.com.
- Uz, B. (1994). **Mineraller Kristallografi-Mineraloji**. İstanbul: Kurtiş Matbaacılık.
- Ünsal, A. ve Şen, H. (2008). *Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri, Bölüm 3, Çimentolar (TS EN 197-1)*. Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Laboratuvar Şube Müdürlüğü, 237.
- Vitruvius, A. (1960). **The Ten Boks of Architecture**. Leonard N. Stern Publication, 48-87.
- Vu, D., Stroeven , P. and Bui, V. (2001). *Strenght and Durability Aspects of Calsined Caolin –Blended Portland Cement Mortar and Concrete*. **Cement and Concrete Research**, 23,471-478.
- Xu, A., Sarkar, S. and Nilsson, L. O. (1993). *Effect of Fly Ash on the Mikro Structure of Cement Mortar*. **Materials and Structures**, 26, 414-424.
- Yalçın, H. ve Gürü, M. (2006). **Çimento ve Beton**. 17-22,44,59,73,242. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Yazıcıoğlu, S. ve Demirel, B. (2006). *Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılan Elazığ Yöresi Pomzasının İlerleyen Kür Yaşlarında Betonun Basınç Dayanımına Etkisi*. **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim Dergisi**, 18(3), 367-374. Elazığ.
- Yeğınobalı, A. (1999). *Portland Çimentosu (Bazı Temel Bilgiler)*. **TÇMB**, 1-13.
- Yıldırım, S. F. (2007,Eylül). *Puzolanik Zeolitin Çimentoda Katkı Uygunluğunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi*, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü. Hatay.
- Yıldız, E. (2006, Mart). *Farklı Tipteki Puzolanların Betonun Mekanik Özelliklerine*

Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 79.

Yılmaz, F. (2015,Ağustos). *Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği İle Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 59-60,62,66,70. Trabzon.*

Yılmaz, K., Canpolat, F. ve Arman, H. (2004). *Taban Külü ve Doğal Zeolitin Puzolanik Çimentoda Katkı Olarak Kullanımı.*

Yüzer, N., Aköz, F. ve Öztürk, L. D. (2001). *Yangına Maruz Yapılarda Betonun Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi. Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi(4), 51-60.*



EKLER

Hatice ŞAHİN tarafından deneyler esnasında çekilmiş olan fotoğraflar ve deneylerden elde edilen deneysel veriler

Ek 1: Deneylerde Kullanılan Aletler

Ek 2: Deneylerde Kullanılan Bayburt Taşları

Ek 3: Deneylerde Kullanılan Bayburt Beyaz Taşı

Ek 4: Deneylerde Kullanılan Bayburt Yeşil Taşı

Ek 5: Deneylerde Kullanılan Bayburt Sarı Taşı

Ek 6: Çimento Hamurları

Ek 7: Çimento Harçları

Ek 8: SEM ve XRD Analizleri

Ek 9: Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme ve Basınç Deneyleri

Ek 10: Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Renk Değişimleri

Ek 11: Elek Boyut Analizi Sonuçları

EK 1

EK-1a Deneylerde Kullanılan Aletler



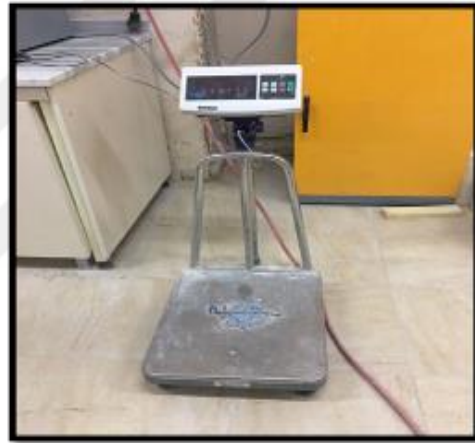
Şekil 1.1 Laboratuvar tipi konkasör



Şekil 1.2 Los angeles aleti



Şekil 1.3 Diskli öğütücü



Şekil 1.4 Terazi



Şekil 1.5 Öğütme sonrası malzeme eleme düzeneği



EK-1b DeneYlerde Kullanılan Aletler



Şekil 1.6 Su arıtma makinesi



Şekil 1.7 Kür Fırını



Şekil 1.8 Kür Fırını



Şekil 1.9 Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 1.10 Hamur ve harç karıştırıcısı

EK-1c Deneylerde Kullanılan Aletler



Şekil 1.11 Terazi



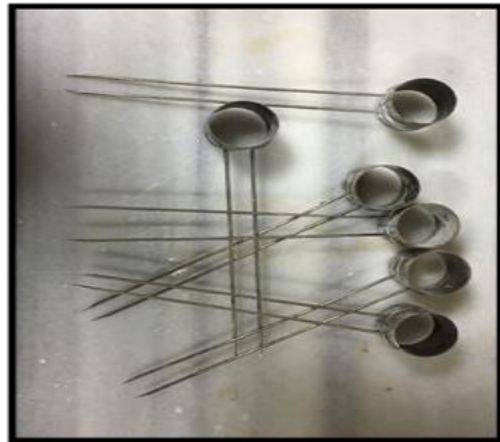
Şekil 1.12 Sarsma tablası



Şekil 1.13 Vicat kalıbı



Şekil 1.14 Vicat aleti



Şekil 1.15 Le-Chatelier halkaları

EK-1d Deneylerde Kullanılan Aletler**Şekil 1.16** Kür havuzu ve iklimlendirici

EK 2**EK-2a** Deneyleerde Kullanılan Bayburt Taşları**Şekil 2.1** Atık haldeki Bayburt taşları**Şekil 2.2** BT'lerin kırıldıktan sonraki halleri

EK 3**EK-3a** DeneYlerde Kullanılan Bayburt Beyaz Taşı**Şekil 3.1** Bayburt Beyaz Taşı**Şekil 3.2** Bayburt Beyaz Taşının öğütülmesi**Şekil 3.3** Bayburt Beyaz Taşının elenmesi

EK-3b Deneylerde Kullanılan Bayburt Beyaz Taşı**Şekil 3.4** Bayburt Beyaz Taşının elenmesi**Şekil 3.5** Bayburt Beyaz Taşının paketlenmesi

EK 4**EK-4a** Deneylerde Kullanılan Bayburt Yeşil Taşı**Şekil 4.1** Bayburt Yeşil Taşı**Şekil 4.2** Bayburt Yeşil Taşının öğütülmesi

EK 5**EK-5a** DeneYlerde Kullanılan Bayburt Sarı Taşı**Şekil 5.1** Bayburt Sarı Taşı

EK-5b Deneylerde Kullanılan Bayburt Sarı Taşı**Şekil 5.2** Bayburt Sarı Taşının öğütülmesi

EK 6

EK-6a Çimento Hamurları



Şekil 6.1 Bayburt Beyaz Taş ikameli çimento hamurları

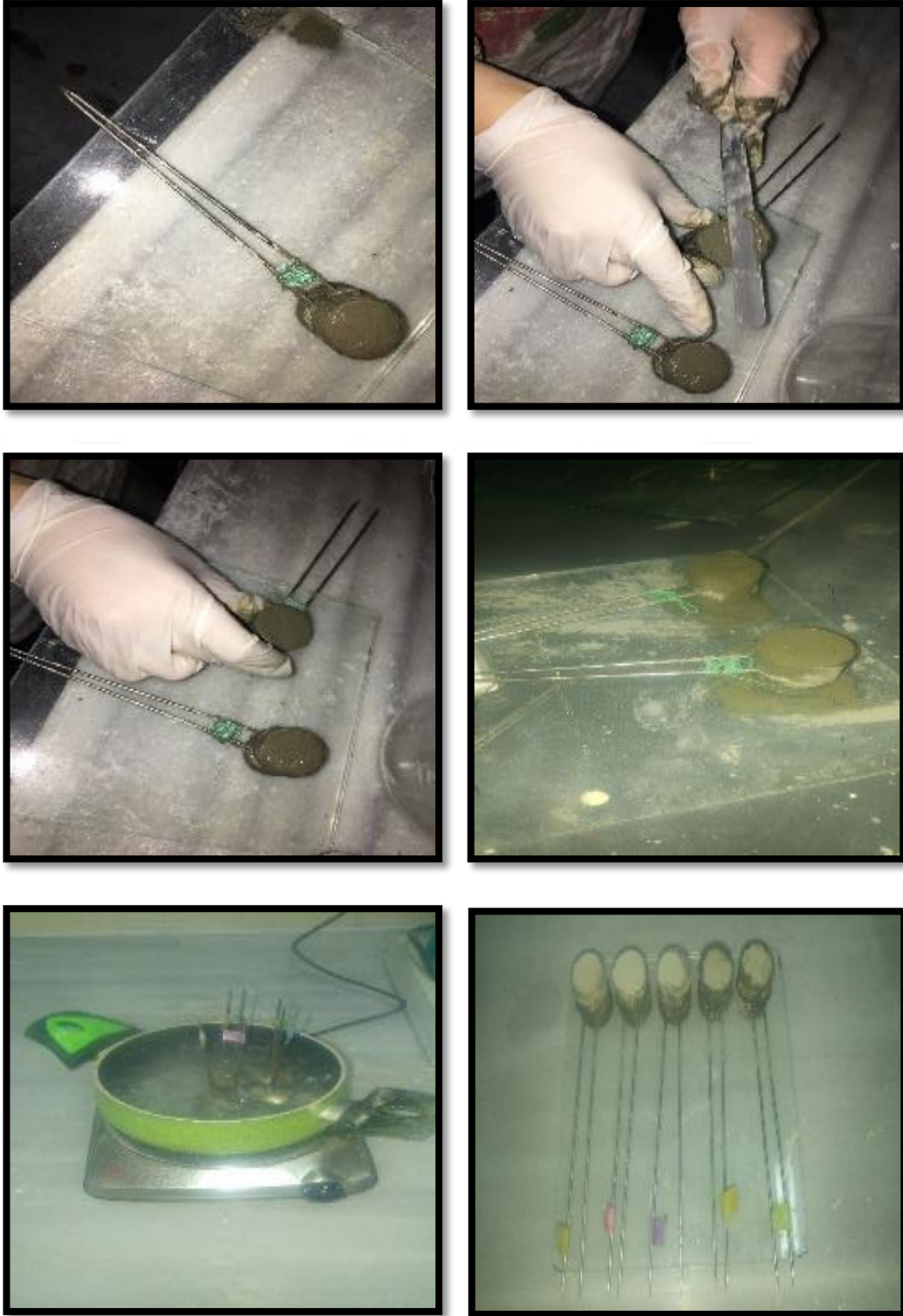


Şekil 6.2 Bayburt Yeşil Taş ikameli çimento hamurları



Şekil 6.3 Bayburt Sarı Taş ikameli çimento hamurları

EK-6b Çimento Hamurları**Şekil 6.4** Bayburt Taşı ikameli çimento hamurları- Referans çimento hamuru**Şekil 6.5** Priz başlangıç ve sonu deneyleri

EK-6c Çimento Hamurları**Şekil 6.6** Hacim genişleme deneyleri

EK 7

EK-7a Çimento Harçları



Şekil 7.1 Harçların kalıba yerleştirilmesi



Şekil 7.2 Kalıpların tesviye edilmesi

EK-7b Çimento Harçları

Şekil 7.3 Kalıpların sökülmesi ve temizliği

EK-7c Çimento Harçları**Şekil 7.4 Harç numunelerin kodlanması****Şekil 7.5 Yayılma Tablası Deneyi**

EK-7d Çimento Harçları**Şekil 7.6** Yayılma Tablası Deneyi

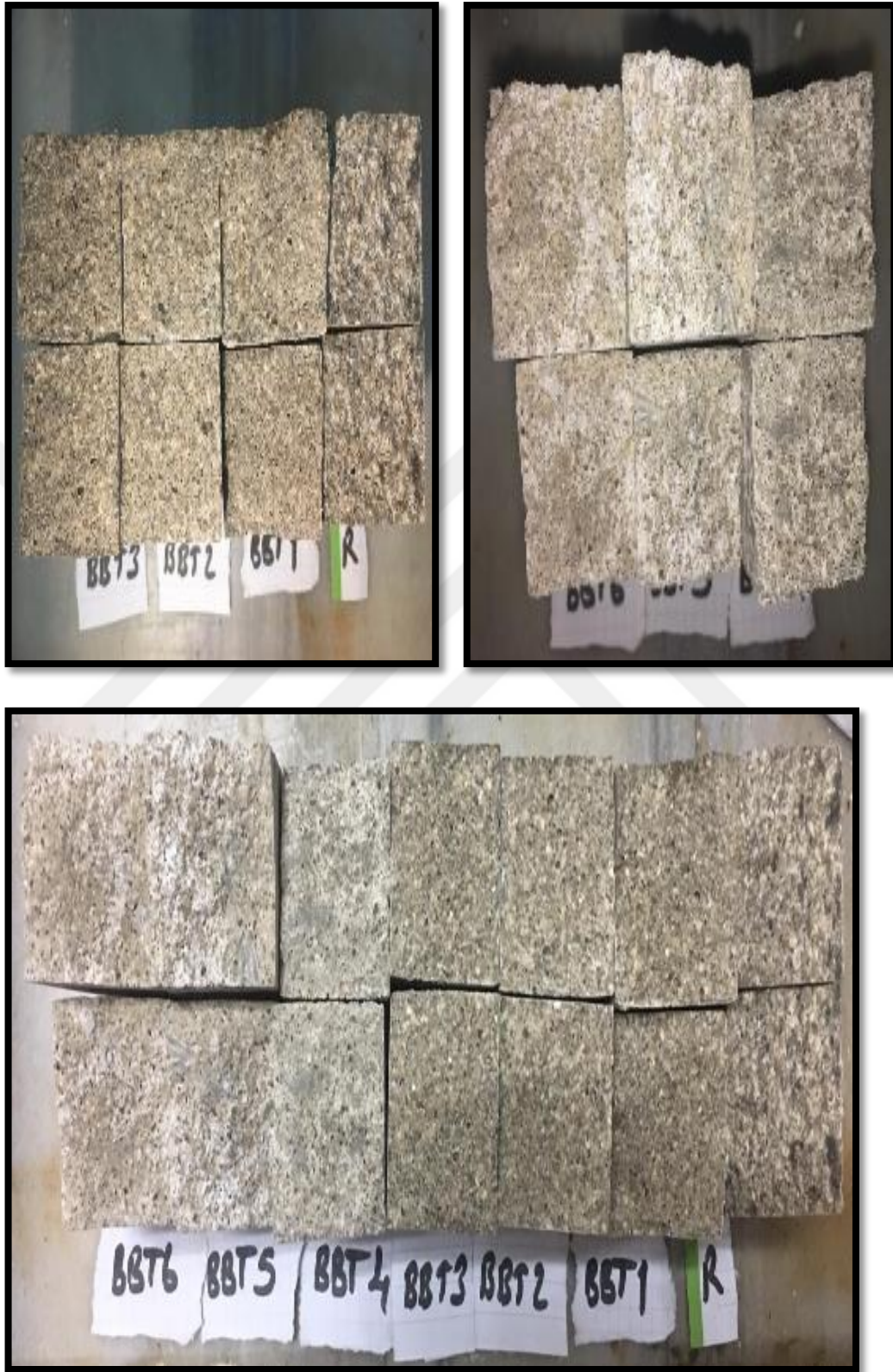
EK-7e Çimento Harçları



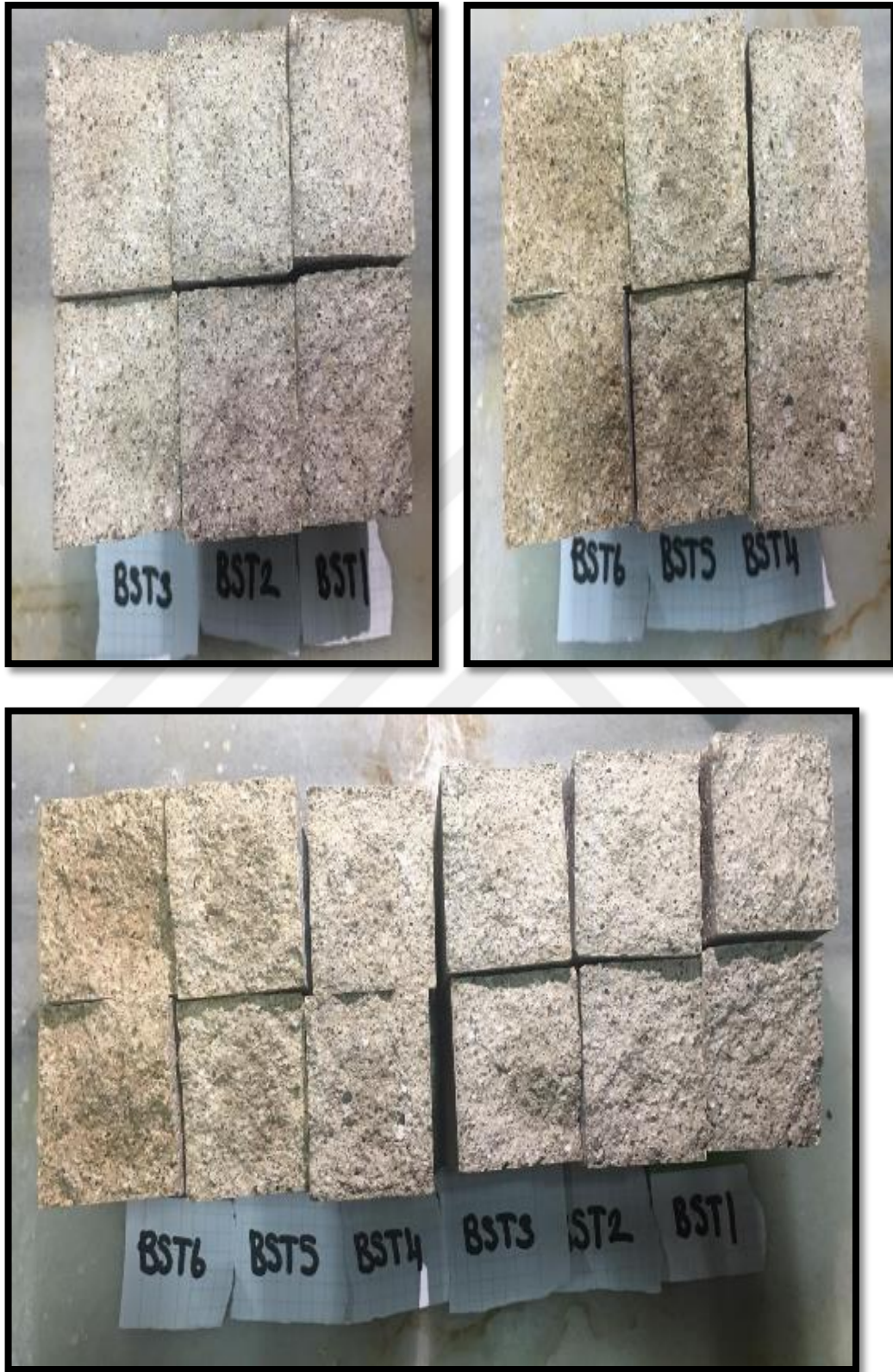
Şekil 7.7 Su emme deneyi

EK-7f Çimento Harçları

Şekil 7.8 Eğilme dayanımı deneyleri

EK-7g Çimento Harçları

Şekil 7.9 Eğilme dayanımı deneyi sonrası BBT ikameli harç numunelerinin görüntüsü

EK-7h Çimento Harçları

Şekil 7.10 Eğilme dayanımı deneyi sonrası BST ikameli harç numunelerinin görüntüsü

EK-71 Çimento Harçları

Şekil 7.11 Eğilme dayanımı deneyi sonrası BYT ikameli harç numunelerinin görüntüsü

EK-7i Çimento Harçları

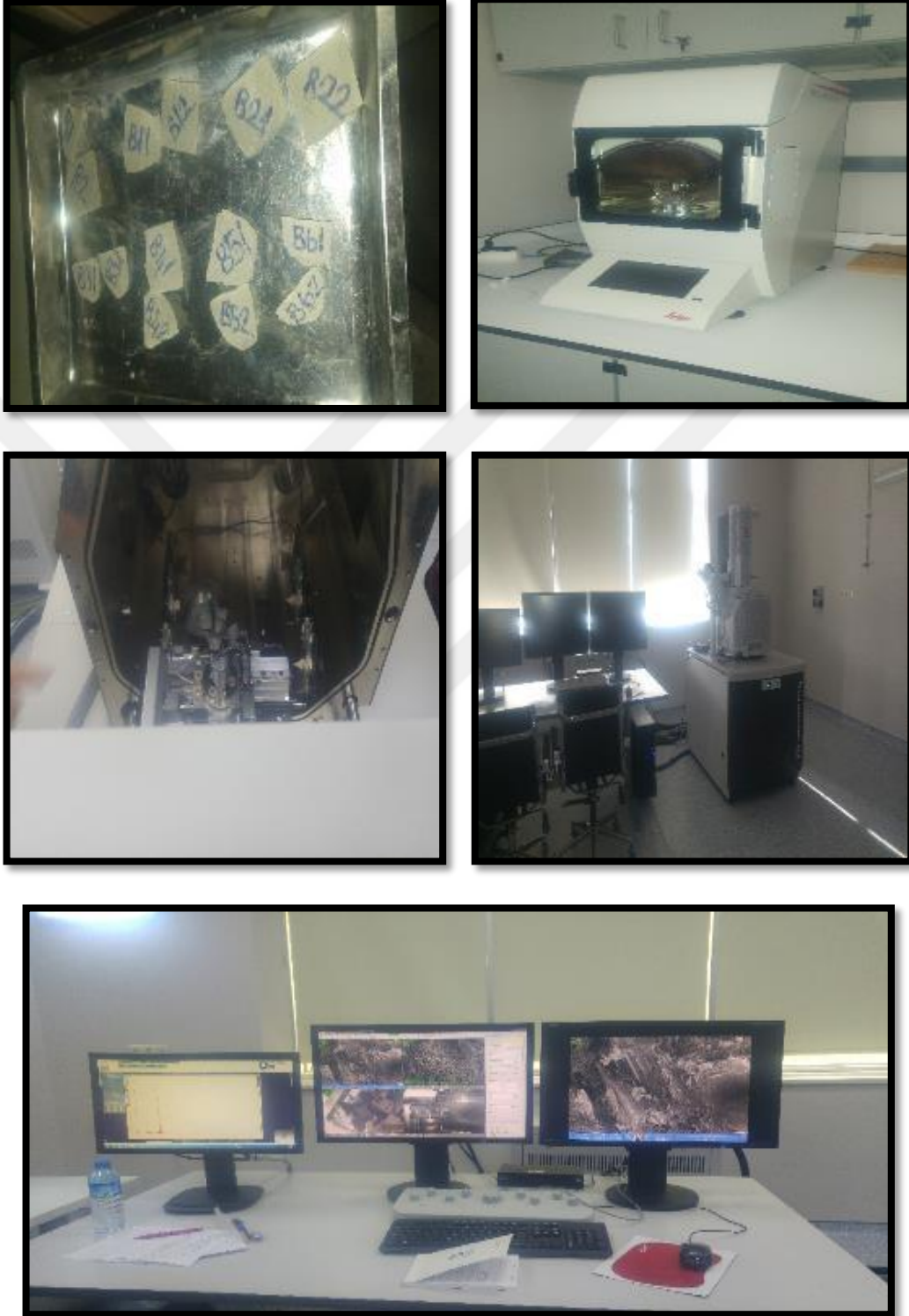
Şekil 7.12 Basınç dayanımı deneyleri

EK-7j Çimento Harçları

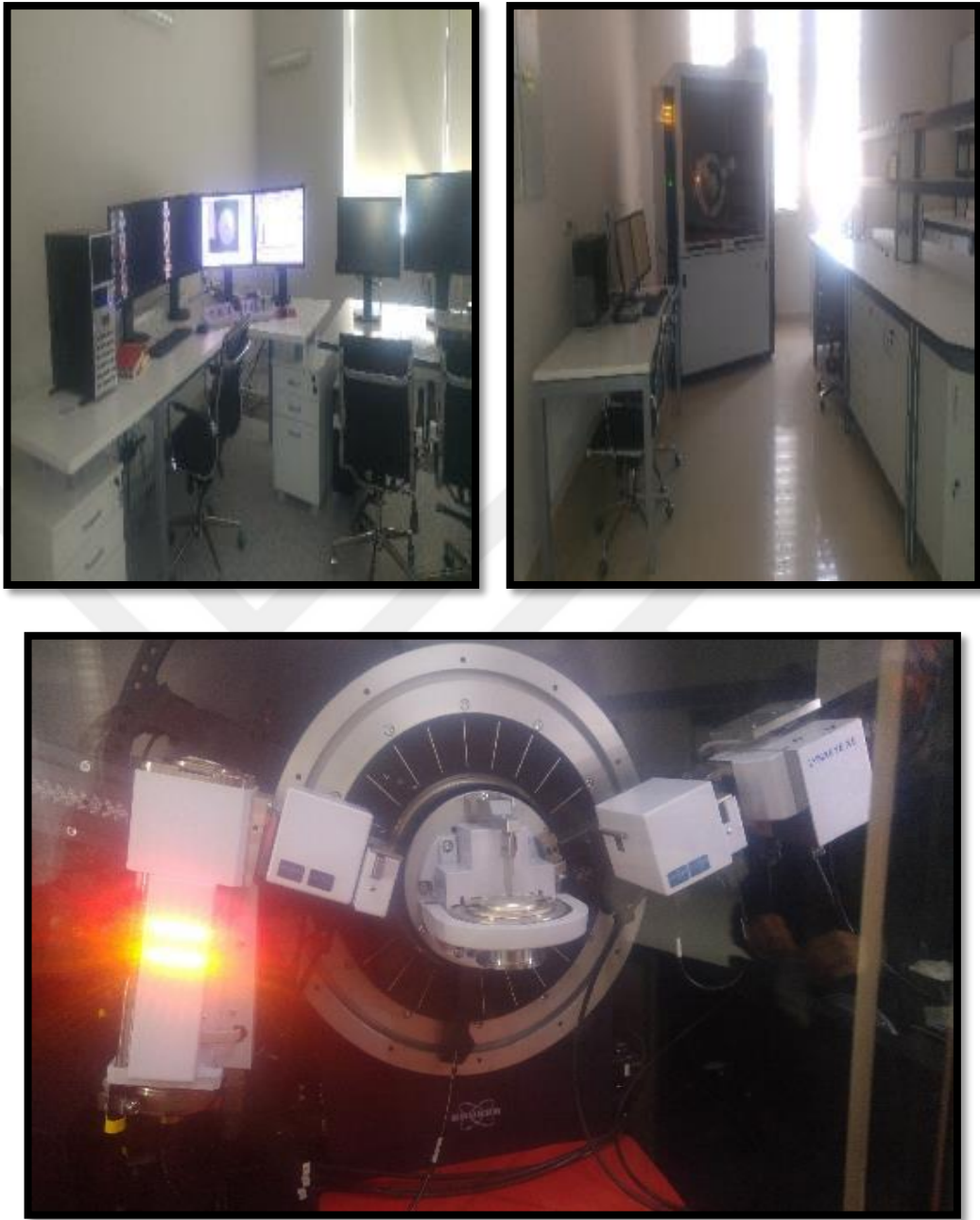
Şekil 7.13 Kapiler su emme düzeneği ve deneyleri

EK 8

EK-8a SEM ve XRD Analizleri



Şekil 8.1 SEM analizleri

EK-8b SEM ve XRD Analizleri**Şekil 8.2** XRD analizleri

EK 9

EK-9a Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme ve Basınç Deneyleri



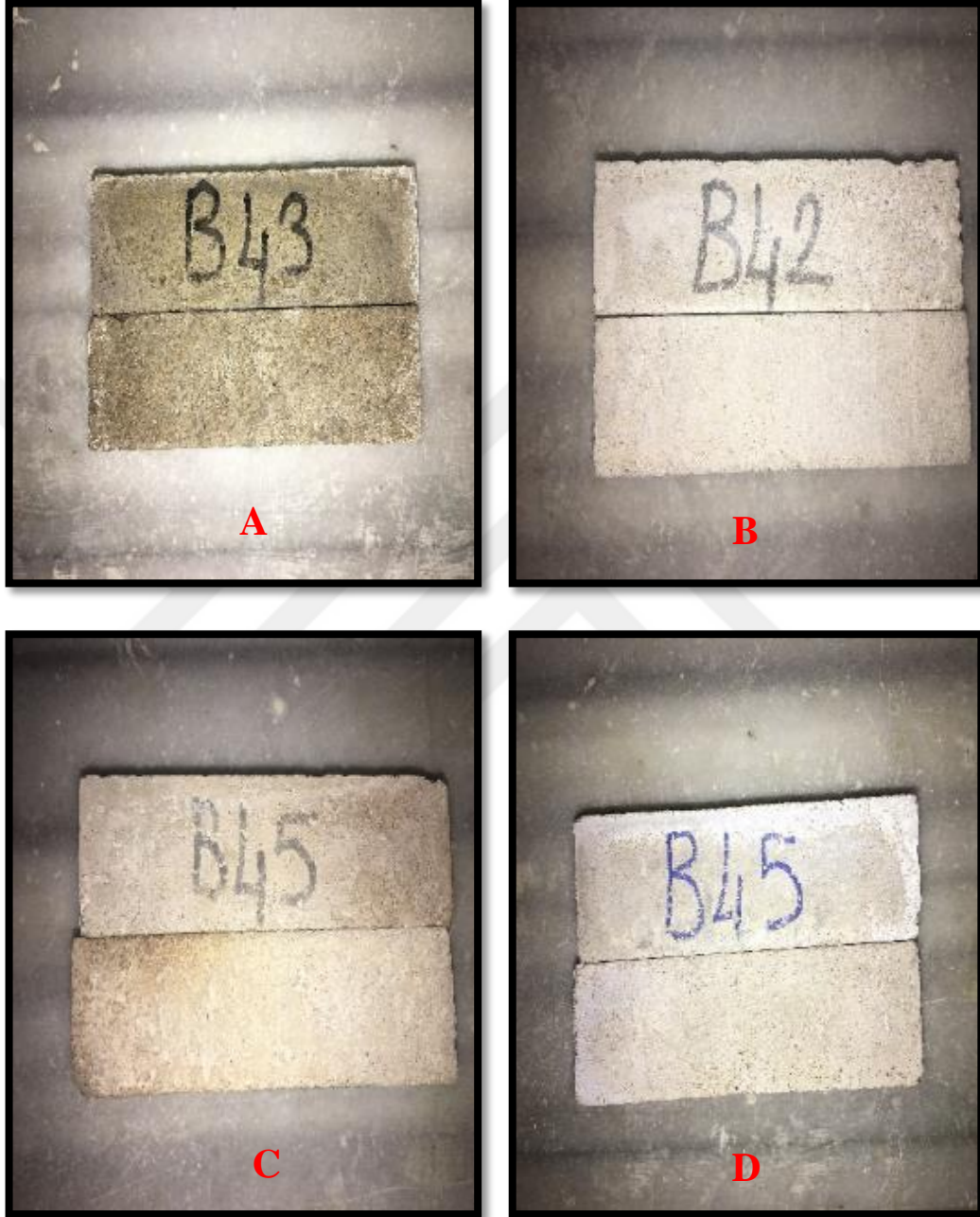
Şekil 9.1 Yüksek sıcaklık sonrası (100 °C) basınç dayanımları



Şekil 9.2 Yüksek sıcaklık sonrası (300 °C) basınç dayanımları



Şekil 9.3 Yüksek sıcaklık sonrası (700 °C) basınç dayanımları

EK 10**EK-10a** Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Renk Değişimleri

Şekil 11.1 Yüksek sıcaklık sonrası BBT ikameli çimento harçlarının renk değişimleri A (20 °C), B (100 °C), C (300 °C), D (700 °C)

EK-10b Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Renk Değişimleri

Şekil 11.2 Yüksek sıcaklık sonrası BYT ikameli çimento harçlarının renk değişimleri A (20 °C), B (100 °C), C (300 °C), D (700 °C)

EK-10c Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Renk Değişimleri

Şekil 11.3 Yüksek sıcaklık sonrası BST ikameli çimento harçlarının renk değişimleri A (20 °C), B (100 °C), C (300 °C), D (700 °C)

EK-11 Elek Boyut Analizi Sonuçları

Elek Sınıfları (µm)	Mineral Katkı Adı Hacimce Geçen (%)			Elek Sınıfları (µm)	Mineral Katkı Adı Hacimce Geçen (%)		
	BBT	BST	BYT		BBT	BST	BYT
0,010	0,00	0,00	0,00	1,096	15,83	7,34	15,20
0,011	0,00	0,00	0,00	1,259	18,99	8,93	18,31
0,013	0,00	0,00	0,00	1,445	22,22	10,63	21,56
0,015	0,00	0,00	0,00	1,660	25,49	12,45	24,94
0,017	0,00	0,00	0,00	1,905	28,79	14,40	28,41
0,020	0,00	0,00	0,00	2,188	32,09	16,48	31,89
0,023	0,00	0,00	0,00	2,512	35,35	18,67	35,32
0,026	0,00	0,00	0,00	2,884	38,53	20,97	38,64
0,030	0,00	0,00	0,00	3,311	41,66	23,38	41,81
0,035	0,00	0,00	0,00	3,802	44,75	25,91	44,87
0,040	0,00	0,00	0,00	4,365	47,85	28,58	47,85
0,046	0,00	0,00	0,00	5,012	51,01	31,43	50,83
0,052	0,00	0,00	0,00	5,754	54,31	34,48	53,88
0,060	0,00	0,00	0,00	6,607	57,79	37,75	57,09
0,069	0,00	0,00	0,00	7,586	61,49	41,25	60,51
0,079	0,00	0,00	0,00	8,710	65,42	44,96	64,16
0,091	0,00	0,00	0,00	10,000	69,57	48,88	68,03
0,105	0,00	0,00	0,00	11,482	73,84	52,96	72,04
0,120	0,00	0,00	0,00	13,183	78,12	57,18	76,07
0,138	0,00	0,00	0,00	15,136	82,26	61,47	79,99
0,158	0,00	0,00	0,00	17,378	86,10	65,81	83,64
0,182	0,00	0,00	0,00	19,953	89,50	70,16	86,93
0,209	0,00	0,00	0,00	22,909	92,38	74,45	89,76
0,240	0,00	0,00	0,00	26,303	94,71	78,64	92,11
0,275	0,00	0,00	0,00	30,200	96,50	82,64	94,02
0,316	0,00	0,00	0,01	34,674	97,82	86,37	95,53
0,363	0,07	0,01	0,11	39,811	98,74	89,74	96,71
0,417	0,52	0,15	0,63	45,709	99,34	92,66	97,64
0,479	1,43	0,55	1,59	52,481	99,72	95,07	98,36
0,550	2,86	1,21	2,99	60,256	99,92	96,94	98,93
0,631	4,78	2,11	4,82	69,183	99,99	98,30	99,36
0,724	7,13	3,21	7,02	79,433	100,00	99,19	99,67
0,832	9,83	4,47	9,52	91,201	100,00	99,72	99,88
0,955	12,75	5,85	12,26	104,713	100,00	99,93	99,97



ÖZGEÇMİŞ

Hatice ŞAHİN

Hatice, 1991 yılında Bayburt'ta doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Bayburt'ta tamamladı. 2010 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun oldu. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi sırada özel bir yapı denetim firmasında kontrol mühendisliği yaptı.