



**VOLKANİK TÜF ESASLI ALKALİLERLE AKTİVE  
EDİLMİŞ BAĞLAYICILARIN FİZİKSEL VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

**İrem DİRİKOLU**

**Yüksek lisans tezi  
İnşaat Mühendisliği  
Anabilim Dalı  
Doç. Dr. İlker TEKİN  
2019  
(Her Hakkı Saklıdır)**

T.C.  
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

VOLKANİK TÜF ESASLI ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ BAĞLAYICILARIN FİZİKSEL  
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

(Physical and Mechanical Properties of Volcanic Tuff Based Alkali-Activated Binders)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem DİRİKOLU

Danışman: Doç. Dr. İlker TEKİN

Bayburt  
Ağustos, 2019

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. İlker TEKİN danışmanlığında, 162004002 numaralı İrem DİRİKOLU tarafından hazırlanan “Volkanik Tüf Esaslı Alkalilerle Aktive Edilmiş Bağlayıcıların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri” adlı bu çalışma 03/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Tezli Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Başkan** : Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN

İmza:

**Jüri Üyesi** : Doç. Dr. İlker TEKİN

İmza:

**Jüri Üyesi** : Dr. Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

.....

Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK 217M431 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

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.

## ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Volkanik Tüf Esaslı Alkalilerle Aktive Edilmiş Bağlayıcıların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

03/08/2019

İrem DİRİKOLU

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bana her türlü desteği sağlayan motivasyonumu hep üst düzeyde tutmama yardımcı olan, bilgisini benimle paylaşmaktan hiçbir zaman çekinmeyen, beni her daim güler yüzlü bir şekilde karşılayan ve tez sürecimde yalnız bırakmayan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. İlker Tekin'e,

Yüksek lisans tezimin tüm aşamalarında maddi ve manevi destek, sevgi ve dualarını benden esirgemeyen kıymetli babaannem Yıldız Dirikolu, babam İbrahim Dirikolu, annem Songül Dirikolu ve halam Sevim Dirikolu'ya,

Maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili amcalarım Aydın Dirikolu, Hüseyin Dirikolu ve çok değerli eşlerine, yine tez sürecinde benden dualarını esirgemeyen ve sürekli yanımda hissettiğim kardeşlerim Yunus Emre Dirikolu ve M. Eyüp Dirikolu ile sevgili kuzenim Yüstra Nur Dirikolu'ya,

Tez sürecinde benden desteğini esirgemeyen ve sürekli yanımda olan değerli dostlarım Bahar Zeybekoğlu, Aliye Oktar, Meltem Durmuş, Melek Durmuş ve Nuray Uğurlu'ya,

Çalışmalarına maddi destek sağlayan ve 1001 Proje kapsamında değerlendiren TÜBİTAK'a, Çalışmalarımın her anında destekleriyle bana güç veren, motivasyonumu sağlayan ve tüm sıkıntılarımın aşılması için ellerinden geleni yapan aile fertlerime tek tek teşekkürlerimi sunarım.

*Bu tezi başta rahmetli dedem M. Nuri Dirikolu'nun anısına olmak üzere tüm aileme ithaf ediyorum.*

İrem DİRİKOLU

Ağustos/2019

## ÖZ

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### VOLKANİK TÜF ESASLI ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ BAĞLAYICILARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

İrem DİRİKOLU

Ağustos 2018, 179 sayfa

Son 50 yılda, teknoloji ve sanayileşmenin gelişimiyle birlikte atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı büyük oranda artmıştır. Bu artışla, inşaat sektörünün vazgeçilmez malzemelerinden çimento, tuğla, kiremit ve seramik gibi ürünlerin üretiminden açığa çıkan salınımlar önemli bir paya sahiptir. Çimento üretimi tek başına dünya CO<sub>2</sub> emisyonunun %8'inden sorumludur. Dolayısıyla araştırmacılar atık malzemelerin kullanılması ile çevreci, CO<sub>2</sub> emisyonu ve maliyeti düşük, Portland Çimentosuna benzer performansa sahip yeni alternatif bağlayıcıları alkali aktivasyon yöntemiyle geliştirmeye çalışmaktadır.

Bu çalışmada, Bayburt bölgesinde bulunan farklı özellikli öğütülmüş tüfler NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve Ca(OH)<sub>2</sub> +Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivatörleri ile belirli oranda karıştırılarak alkali aktive edilmiş hamurlar üretilmiştir. İlaveten, öğütülmüş mermer belli oranlarda karışımlara eklenmiştir. Üretilen taze hamurlar üzerinde TS EN 196-3'e göre standart priz başlangıcı ve bitişi deneyleri ile izafi kıvam tayini ve ASTM C230'a göre yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş hamurlar üzerinde 2, 28 ve 90 gün yaşlarında ASTM C109'a göre basınç dayanımı deneyleri ile su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sertleşmiş hamurlar üzerinde 90 gün yaşında SEM+EDS ve XRD analizleri yapılmıştır.

Elde edilen bulgulara göre, çözelti/toz oranı, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı, çözeltinin sıcaklığı ve NaOH molaritesinin deney sonuçları üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Basınç dayanımları bazı hamur karışımlarında 28 günden sonra azalmıştır. Çoğu hamurda 10 MPa – 38 MPa arasında değişen basınç dayanımları ölçülmüştür. 90 gün sonunda NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivatörlü hamurlarda en yüksek dayanım %100 BYT ile üretilen hamurda 37,8 MPa, Ca(OH)<sub>2</sub>+ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivatörü ile en yüksek dayanım %100 BBT ile 19,7 MPa olarak ölçülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı, volkanik tüf, mermer tozu, priz süresi, kıvam, basınç dayanımı, mikro yapısal analiz

## ABSTRACT

### MASTER THESIS

#### PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF VOLCANIC TUFF BASED ALKALI-ACTIVATED BINDERS

İrem DİRİKOLU

August 2019, 179 pages

In recent 50 years, CO<sub>2</sub> amount releasing to atmosphere have remarkably increased by the development of technology and industrialization. Emissions caused by the production of indispensable materials for construction sector such as cement, brick, tile and ceramic have an important role on this increment. For instance, cement production is responsible for the 8% CO<sub>2</sub> emissions of the world. Therefore, researchers have tried to develop new binding materials similar with the Portland cement which are environmental-friendly, cost effective and with lower CO<sub>2</sub> emission by using alkali-activation method.

In this study, grinded tuffs with different properties from Bayburt region were mixed with NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub>+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> separately in specific ratios, and alkali-activated pastes were prepared. Moreover, grinded marble waste was added to some mixes in order to enhance compressive strength. Initially and final setting time tests according to the TS EN 196-3, flow table test according to the ASTM C230 and relative consistency measurement were performed on fresh pastes. Compressive strength tests according to ASTM C109 and water absorption test at the age of 2<sup>nd</sup>, 28<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> days were performed on hardened alkali-activated pastes as well. In addition to these, SEM+EDS and XRD analysis were applied on hardened pastes at the age of 90<sup>th</sup> day.

As a result of the study, solution/dust ratio, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ratio, solution temperature and NaOH molarity effect to the tests results significantly. Compressive strengths of some pastes decreased between 2<sup>nd</sup> and 28<sup>th</sup> days. Compressive strengths of most alkali-activated pastes are measured between 10 MPa to 38 MPa at the age of 90<sup>th</sup> day. Maximum compressive strength was measured 37,8 MPa on a group of paste which contained 100% Bayburt green tuff and NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> activator at the age of 90<sup>th</sup> day. Maximum compressive strength was measured 19,7 MPa on a group of paste which produced with 100% Bayburt white tuff and Ca(OH)<sub>2</sub>+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> activator at the age of 90<sup>th</sup> day.

**Keywords:** alkali-activated binder, volcanic tuff, marble dust, setting time, consistency, compressive strength, microstructural analysis

## İÇİNDEKİLER

TABLOLAR DİZİNİ.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xv
BİRİNCİ BÖLÜM.....	1
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL ÇERÇEVE VE ALAN .....	5
Alkali-Aktive Edilmiş Malzemeler.....	5
Alüminosilikatlar (Ham Madde). .....	5
Alkali Aktive Edilmiş Malzeme mi Jeopolimer mi? .....	5
Alkali Aktive Edilmiş Malzemelerin Tarihçesi .....	7
Alkali Aktive Edilmiş Malzemelerin (Jeopolimerlerin) Kimyası.....	9
Yüksek kalsiyumlu sistemlerin Alkali Aktivasyonu: $(Na,K)_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . .....	10
Düşük Kalsiyum Sistemlerinin Alkali Aktivasyonu: $(N,K)_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . .....	14
Kullanılan mineral katkı ve bileşenler .....	19
Potansiyel alkali aktivite bağlayıcı bileşenleri: .....	19
Aktivatörler:.....	21
Mikroanalizler.....	23
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	23
X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi. ....	24
Literatür Taraması.....	25
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	31
YÖNTEM.....	31
Materyal .....	31
Bayburt Taşı. ....	31
Mermer Atıkları (Traverten Dokulu).....	36
Su.....	36
Aktivatörler.....	37
Metot.....	37
Aşama 1: Malzeme Temini ve Öğütme.....	38
Aşama 2: Ön Deneyler. ....	38
NaOH aktivatörü ile üretilen alkali-aktive edilmiş hamurlar için ön deneyler. ....	43
Aşama 3: Nihai Deneyler. ....	47
Ca(OH) <sub>2</sub> (söndürülmüş kireç) aktivatörü ile üretilen alkali-aktive edilmiş hamurların deneysel çalışmaları.....	50
Mikroskobik ve minerolojik analizler. ....	53



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM .....	54
BULGULAR VE YORUM .....	54
Çözelti sıcaklığı ve oranı .....	55
Etüv-Kür .....	56
Karışım sırasında suyun rolü .....	59
Molarite.....	60
Ön deneme deneylerinden elde edilen fiziksel özelliklere ait bulgular .....	62
NaOH aktivatörü ile üretilen hamurların taze haldeki deney bulguları.....	62
NaOH aktivatörü kullanılarak üretilen sertleşmiş hamurların ön deney bulguları.....	68
Nihai Hamur Üretimlerinde Fiziksel Özelliklere ait Deney Sonuçları .....	72
NaOH aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz süreleri, kıvam ve yayılma bulgularının değerlendirilmesi. ....	72
Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz süreleri, kıvam ve yayılma bulgularının değerlendirilmesi. ....	77
Nihai Hamur Üretimlerinde Mekanik Özelliklere Ait Deney Sonuçları .....	84
NaOH aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirmeleri.....	84
Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirmeleri.....	112
NaOH aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların su emme deney sonuçları ve değerlendirmeleri.....	130
Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirmeleri.....	131
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ve X-Işını difraksiyonu (XRD) analizi sonuçları.....	132
NaOH aktivatörü ile üretilen hamurların SEM analizi sonuçları. ....	132
Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurların SEM analizi sonuçları. ....	140
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....	146
KAYNAKÇA .....	148

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Bayburt Tüfit Yapılı Taşların Kimyasal Özellikleri .....	35
Tablo 2. Bayburt İli Mermer Ve Tüfit Yapılı Taşların Fiziksel Ve Teknolojik Özellikleri .....	35
Tablo 3. Kullanılan Kür Suyunun Kimyasal Özelliği .....	36
Tablo 4. Sodyum Metasilikatın Teknik Özellikleri (40 – 42 Bome).....	37
Tablo 5. BBT, BYT Ve Mermerin Özgül Ağırlık İle Özgül Yüzey Verileri .....	38
Tablo 6. Farklı Sıcaklık Ve Ç/T Oranında Üretilen Hamurların Karışım Tasarımı.....	39
Tablo 7. Farklı Molariteye Sahip Hamurların Malzeme Karışım Miktarları .....	42
Tablo 8. BBT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının Malzeme Karışım Miktarları .....	44
Tablo 9. BYT İle Üretilen Hamur Ön Deneme Malzeme Karışım Miktarları .....	46
Tablo 10. NaOH Aktivatörlü BBT İle Üretilen Hamurların Karışım Tasarımları.....	49
Tablo 11. NaOH Aktivatörlü BYT İle Üretilen Hamurların Karışım Tasarımları .....	50
Tablo 12. Kireçli BBT İle Üretilen Hamurların Malzeme Karışım Miktarları .....	51
Tablo 13. Kireçli BYT İle Üretilen Hamurların Malzeme Karışım Miktarları .....	52
Tablo 14. Taze ve Sertleşmiş Hamurların Deney Sonuçları .....	56
Tablo 15. Etiiv-Kür Çalışması Basınç Dayanımı Sonuçları.....	57
Tablo 16. Molarite Çalışması Basınç Dayanımı Sonuçları.....	61
Tablo 17. BBT ile üretilen ön deneme hamurlarının priz süreleri ve kıvam deneyi sonuçları	65
Tablo 18. BYT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının Priz Süreleri Ve Kıvam Deneyi Sonuçları.....	67
Tablo 19. BBT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının Basınç Dayanımı Deney Sonuçları....	69
Tablo 20. BYT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının 2 Günlük Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	71
Tablo 21. BBT İle Üretilen NaOH Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları .....	73
Tablo 22. BYT İle Üretilen NaOH Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları .....	76
Tablo 23. BBT İle Üretilen Ca(OH) <sub>2</sub> Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları .....	78
Tablo 24. BYT İle Üretilen Ca(OH) <sub>2</sub> Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları.....	80
Tablo 25. Priz Süresi Tayin Etme Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	82
Tablo 26. Yayılma Tablası Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	83
Tablo 27. BBT İle Üretilen Naoh Aktivatörlü Hamurların Basınç Dayanımı Deneyi Ve Birim Hacim Ağırlık (BHA) Ölçüm Sonuçları .....	84
Tablo 28. BYT İle Üretilen NaOH Aktivatörlü Hamurların Basınç Dayanımı Deneyi ve Birim Hacim Ağırlık (BHA) Ölçüm Sonuçları .....	99
Tablo 29. NaOH Aktivatörü İle Dökülen Hamurların Karşılaştırılması .....	111

Tablo 30. $Ca(OH)_2$ Aktivatörü ve BBT İle Hazırlanan Hamurların Basınç Dayanımı Sonuçları .....	112
Tablo 31. $Ca(OH)_2$ aktivatörü ve BYT ile üretilen hamurların basınç dayanımı sonuçları ..	119
Tablo 32. $Ca(OH)_2$ Aktivatörü İle Dökülen Hamurların Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	126
Tablo 33. $Ca(OH)_2$ Ve NaOH Aktivatörü İle Dökülen Hamurların Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	127
Tablo 34. NaOH Ve $Ca(OH)_2$ Aktivatörlerinin Üretim Esnasında Ve Sonrasındaki Davranışlarının Karşılaştırılması .....	128
Tablo 35. NaOH Aktivatörü Ve BYT İle Üretilen Hamurların Su Emme Deneyi Sonuçları ..	130
Tablo 36. 90 Gün Yaşında $Ca(OH)_2$ Aktivatörü ve BBT ve BYT İle Üretilen Hamurların Su Emme Deneyi Sonuçları .....	131

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Portland çimento kimyası ve jeopolimer kimyası a:PC'nin basit hidrasyon ile sertleşmesi, b:Polikondensasyon yoluyla jeopolimerin sertleşmesi, c: <sup>29</sup> Si NMR spektrumu.....	6
Şekil 2. Alkali ile aktifleştirilmiş cürufufta reaksiyon mekanizması için teorik model...	11
Şekil 3.Farklı bağlayıcı türlerinde çökelen ürünler.....	12
Şekil 4. Al içeren C-S-H Jel modelinin yapısı (a) doğrusal zincirler; (b) zaman zaman çapraz bağlanabilen, düzlemler oluşturan doğrusal zincirler.....	14
Şekil 5. N-A-S-H jel oluşumu için önerilen model.....	17
Şekil 6. BBT'nin minerolojik analizi (XRD analizi).....	32
Şekil 7. BBT'nin mikroskopik görüntüsü (SEM analizi).....	33
Şekil 8. BYT'nin minerolojik analizi (XRD analizi).....	34
Şekil 9. BYT'nin mikroskopik görüntüsü (SEM analizi).....	34
Şekil 10. BYT'nin SEM görüntüsü üzerinde verilen EDS #1 noktasının analizi .....	34
Şekil 11. Öğütülmüş mermerin SEM görüntüsü .....	36
Şekil 12. Öğütülmüş mermerin XRD analizi görüntüsü.....	36
Şekil 13. 10 M derişimle üretilen hamurun a) iç kısmında b) dış yüzeyinde oluşan çiçeklenme.....	61
Şekil 14. 15 M derişimle üretilen hamurun dış yüzeyinde oluşan çiçeklenme.....	61
Şekil 15. Kıvam tayinin belirlenmesinde kullanılan görsel akıcılığın tanımlanması A:1, B:2, C:3, D:4, E:5.....	64
Şekil 16. BBT ile üretilen NaOH aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı.....	74
Şekil 17. BYT ile üretilen NaOH aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı.....	77
Şekil 18. BBT ile üretilen Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile Ç/T oranı arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı.....	79

Şekil 19. BYT ile üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile Ç/T oranı arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı.....	81
Şekil 20. BBT:MT oranı katı madde hacmince 0,5:0,5 olan hamurların basınç dayanımlarının korelasyon eğrileri.....	86
Şekil 21. BBT:MT oranı katı madde hacmince 0,55:0,45 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	87
Şekil 22. Katı maddenin hacmince %55:%45 BBT:MT içerikli $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3:0.45$ oranlı $\text{NaOH}$ aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 22,8 MPa/90 gün) .....	89
Şekil 23. Katı maddenin hacmince %55:%45 BBT:MT içerikli $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3:0.45$ oranlı $\text{NaOH}$ aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 22,8 MPa/90 gün).....	90
Şekil 24. Katı maddenin hacmince %60:%40 BBT:MT içerikli $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3:0.25$ oranlı $\text{NaOH}$ aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 6,55 MPa/90 gün).....	91
Şekil 25. Katı maddenin hacmince %60:%40 BBT:MT içerikli $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3:0.25$ oranlı $\text{NaOH}$ aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 6,55 MPa/90 gün) .....	92
Şekil 26. BBT:MT oranı katı madde hacmince 0,6:0,4 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	93
Şekil 27. Katı madde hacmince %100 BBT ile hazırlanan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	94
Şekil 28. Katı maddenin hacmince %100 BBT içerikli $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3:0.55$ oranlı $\text{NaOH}$ aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 14,3 MPa/90 gün).....	96
Şekil 29. Katı maddenin hacmince %100 BBT içerikli $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3:0.45$ oranlı $\text{NaOH}$ aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 4,8 MPa/90 gün).....	97
Şekil 30. BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,5:0,5 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	99

Şekil 31. BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,55:0,45 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	100
Şekil 32. BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,6:0,4 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	102
Şekil 33. Katı maddenin hacmince %60:%40 BYT:MT içerikli NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> :0.35 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 21,00 MPa/90 gün).....	103
Şekil 34. Katı maddenin hacmince %60:%40 BYT:MT içerikli NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> :0.25 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 2,45 MPa/90 gün).....	104
Şekil 35. %100 BYT ile üretilen hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	105
Şekil 36. Katı maddenin hacmince %100 BYT içerikli NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> :0.45 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 37,8 MPa/90 gün).....	107
Şekil 37. Katı maddenin hacmince %100 BYT içerikli NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> :0.25 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 8,9 MPa/90 gün).....	108
Şekil 38. BBT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0,2:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	111
Şekil 39. BBT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,55:0,15:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	112
Şekil 40. Katı maddenin hacmince %55:%15:%30 BBT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> içerikli Ç/T: 0,9 oranlı Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 19,55 MPa/90 gün).....	113
Şekil 41. BBT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,6:0,1:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	114
Şekil 42. BBT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0:0,5 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	115

Şekil 43. Katı maddenin hacmince %50:%50 BBT içerikli Ç/T: 1,3 oranlı Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 14,49 MPa/90 gün).....	116
Şekil 44. BYT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0,2:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	118
Şekil 45. BYT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,55:0,15:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	119
Şekil 46. BYT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,6:0,1:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	120
Şekil 47. Katı maddenin hacmince %50:%50 BYT:Ca(OH) <sub>2</sub> içerikli Ç/T: 1,0 oranlı Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 11,37 MPa/90 gün).....	122
Şekil 48. BYT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0:0,5 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri.....	123
Şekil 49. BNA4d hamurunun SEM analizi.....	132
Şekil 50. BNA5e hamurunun SEM analizi.....	132
Şekil 51. BNB3c hamurunun SEM analizi.....	132
Şekil 52. BNB5e hamurunun SEM analizi.....	132
Şekil 53. BNC3c hamurunun SEM analizi.....	132
Şekil 54. BNC5e hamurunun SEM analizi.....	132
Şekil 55. BND7b hamurunun SEM analizi .....	133
Şekil 56. BND3c hamurunun SEM analizi.....	133
Şekil 57. BBT ile üretilen NaOH aktivatörlü hamurların XRD analizleri.....	134
Şekil 58. YNA1a hamurunun SEM analizi.....	136
Şekil 59. YNA4d hamurunun SEM analizi.....	136
Şekil 60. YNB1a hamurunun SEM analizi.....	136
Şekil 61. YNB4d hamurunun SEM analizi.....	136
Şekil 62. YNC4d_7 hamurunun SEM analizi.....	136

Şekil 63. YNC5e hamurunun SEM analizi.....	136
Şekil 64. YND2b_7 hamurunun SEM analizleri.....	136
Şekil 65. YND4d_7 hamurunun SEM analizi.....	137
Şekil 66. NaOH aktivatörü ve BYT ile üretilen hamurların XRD analizleri.....	138
Şekil 67. BCA4 hamuru SEM analizi .....	139
Şekil 68. BCA1 hamuru SEM analizi.....	139
Şekil 69. BCB3 hamuru SEM analizi.....	139
Şekil 70. BCB6 hamuru SEM analizi.....	139
Şekil 71. BCC2 hamuru SEM analizi.....	139
Şekil 72. BCC5 hamuru SEM analizi.....	139
Şekil 73. BCD3 hamuru SEM analizi .....	139
Şekil 74. BCD5 hamuru SEM analizi .....	139
Şekil 75. Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörü ve BBT ile üretilen hamurların XRD analizleri.....	140
Şekil 76. YCA4 hamuru SEM analizi.....	141
Şekil 77. YCA1hamuru SEM analizi.....	141
Şekil 78. YCB2 hamuru SEM analizi.....	141
Şekil 79. YCB5 hamuru SEM analizi.....	141
Şekil 80. YCC2 hamuru SEM analizi.....	142
Şekil 81. YCC4 hamuru SEM analizi .....	142
Şekil 82. YCD5 yüksek hamuru SEM analizi.....	142
Şekil 83. YCD1 hamuru SEM analizi.....	142
Şekil 84. Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörü ve BYT ile üretilen hamurların XRD analizleri.....	142



## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

### SİMGELER

%	Yüzde
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alümin
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum Hidroksit (Portlandit)
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum Karbonat
CaO	Sönmemiş Kireç
C-A-S-H	Kalsiyum-Alümina-Silikat-Hidrat
cm	santimetre
C-S-H	Kalsiyum-Silikat-Hidrat
Ç/T	Çözelti/Toz
dk	Dakika
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir oksit
K <sub>2</sub> O	Potasyum Oksit
kg	kilogram
M	Molar
m	metre
MgCO <sub>3</sub>	Magnezyum Karbonat
MgO	Magnezyum Oksit
mmHg	Milimetre cıva
MnO	Mangan Oksit
MPa	Megapaskal
Na <sub>2</sub> O	Sodyum Oksit
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Sodyum Silikat
NaOH	Sodyum Hidroksit
N-A-S-H	Sodyum-Alümina-Silikat-Hidrat
N-S-H	Sodyum-Silikat-Hidrat
°C	Santigrat Derece
SiO <sub>2</sub>	Silis

## KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
ASTM	Amerika Standart Test Metodu
AAS	Alkali aktive edilmiş cüruf
BT	Bayburt Tüf
BBT	Bayburt Beyaz Taşı
BST	Bayburt Sarı Taşı
BYT	Bayburt Yeşil Taşı
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
IPCC	Uluslar arası İklim Değişikliği Paneli
ICCC	Uluslar arası Çimento Kimyası Kongresi
JÇ	Jeopolimer Çimento
MT	Mermer Tozu
MK	Metakaolin
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
PÇ	Portland Çimento
ppm	Milyonda bir birim
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
s/b	Su/Bağlayıcı
TS	Türk Standardı
UK	Uçucu Kül
vd	ve diğerleri
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
XRD	X- ışını difraksiyonu
ZT	Zeolitik Tüf

## BİRİNCİ BÖLÜM

### GİRİŞ

İklim değışikliği, dünyanın karşılaştığı en önemli çevre sorunlarından biridir. Bunun en önemli nedenlerinden biri inşa edilmiş çevrenin atmosferde CO<sub>2</sub> miktarındaki artışına sebep olmasıdır (IPCC, 2007). Bunun en iyi örneği, 18. yy başında atmosferik CO<sub>2</sub> oranı 280 ppm iken 20. yy'da 450 ppm seviyelerinde olmasıdır. Mevcut CO<sub>2</sub> emisyon seviyesinin 2130 yılına kadar 731 ppm'e kadar artacağı ve bundan dolayı dünyanın 3.7 derece ısınacağı düşünölmektedir. Böylece oluşabilecek küresel ısınma, suyun ısıl genişmesinin neden olduğu deniz seviyesinin yükselmesine yol açacak ve deniz seviyesinin 0,40 metrenin üzerine çıkması durumunda Bangladeş'teki alanın %11'ini batıracak ve bunun sonucunda 10 milyon insan evsiz kalacaktır (IPCC, 2007).

İnşaat sektörü, AB'nin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ının sorumlusu ve en büyük enerji kullanıcısıdır. Çimento endüstrisi üretim sürecinde oluşan yüksek sıcaklık, tozluluk, alerjik maddeler ve gürültü nedeniyle çalışanları; ürettiği toz, baca emisyonlarındaki atık gazlar ve toksik kimyasallarla da çevreyi ve çevrede yaşayan halkı olumsuz yönde etkilemektedir. Bir ton çimento üretebilmek için yaklaşık 1,5 ton hammadde, 0,3 ton hava, 6 gigajöl yakıt kullanılırken, 0.94 ton CO<sub>2</sub> atmosfere salınmaktadır. Bunun sebebi, çimento üretilirken başlıca kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir oksitleri ihtiva eden hammaddeler, döner fırınlarında sinterleşme derecesine (1350°C -1450°C) kadar pişirilerek elde edilen yarı mamul olan klinkerin, % 3-5 oranında alçıtaşı ile öğütölmesinden kaynaklanmaktadır. Çimento sanayisi, ayrıca yaş sistemlerinde fırın çıkışındaki yüksek pH, çökelmiş katılar, çözünmüş katıların sızıntısından dolayı veya makine ekipmanlarının soğutulmasından dolayı su kirliliğine de sebep olmaktadır (T.C. Çevre Ve Orman Bakanlığı Çevresel Etki Değerlendirmesi, 2009). Bunların yanı sıra tuğla, seramik karo ve duvar elemanları gibi ürünlerin üretimi sırasında ortaya çıkan gazlar CO<sub>2</sub> emisyon değerlerini artırmaktadır. Bu kapsamda birçok yapı malzemesinin üretiminde kalsinasyon ya da sinter sıcaklıkta pişme prosesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı araştırmacılar endüstriyel yan ürünlerin yeniden kullanımı ile daha düşük CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip düşük enerji ve çevre maliyetli, yüksek performanslı veya sıradan PÇ'den daha yüksek performanslı yeni alternatif bağlayıcılar geliştirmeye çalışmaktadır (Glukhovsky, 1994).Çimento endüstrisi, toplam CO<sub>2</sub>

emisyonunun %8'ine yakınına üretmektedir. Çevre bilincinin her geçen gün artması ve küresel ısınma tehlikesinin de ortaya çıkması sebebiyle çimento üretiminde alternatif malzemelerin kullanımı gündeme gelmiştir (Tekin, 2014).

Genel olarak alkali çimentolar olarak bilinen bir dizi bağlayıcı, bu tür bir malzeme kategorisini oluşturmaktadır (Glukhovsky, 1994). Alkali çimentolar, amorf veya vitroz alümina-silikatlara karşı bir alkali saldırısı sonucu oluşan çimentolu malzemelerdir. Alkali-aktivatörlerle karıştırıldığında, bu malzemeler sertleşmekte ve iyi bağlanma özelliklerine sahip bir yapı elde edilmektedir. Alkali-aktivatör teknolojisinin en önemli özelliklerinden biri, hem doğal malzemelerin (kil veya feldspat gibi) hem de endüstriyel yan ürünlerin (cüruf, kül veya kâğıt çamuru gibi) ana bileşen olarak kullanılabilmesidir.

Alkaliler doğada meydana gelen bazı doğal taş oluşum süreçlerinde önemli rol oynayan eski yapılarda ve çimentoda bulunan bileşenlerdir. Alkali metal bileşikleri, yüksek çözünürlüğü nedeniyle geleneksel hidrolik çimentolu sistemlerin bileşenlerinden ayrı tutulmuştur. Oysaki eski beton yapıların günümüzde halen iyi durumda olmasının nedenlerini ortaya çıkarmak için yapılan çalışmalarda, doğal mineral oluşumlarının stabilitesi ve bileşimi hidrolik çimentolu sistemlerden çok da ayrı olmadığı anlaşılmıştır. Çimento biliminde devrimsel bir keşif yapan Glukhovsky'ye göre periyodik tablonun ilk grubu olan alkali metal (Li, Na, K, Rb, Cs) bileşiklerinin alkali toprak metalleri olan ikinci grup elementleri (Mg, Ca, Sr, Ba) ile hidrolik bağlanma özellikleri benzerdir (Krivenko, 2017).

Alkali bağlayıcıların ana bileşenleri 1967'de Glukhovsky tarafından keşfedildikten sonra alkali aktivite üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Alkali çimento üretiminde alümina-silikat kaynağı olarak metakaolin, puzolanlar, yüksek fırın cürufu, fosfor cürufu, kül, cam atığı, zeolit ve bu malzemelerin iki veya daha fazlasının kombinasyonlarının kullanılabilir olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Zeolitik malzemeler, toksik kimyasal atıkları emme yetenekleri ile bilinmektedir. Jeopolimerler, zeolitlere ve feldispatoidlere benzer şekilde davranmaktadırlar. Jeopolimer yapı, tehlikeli element atıklarını emer ve yarı katı atıkları yapışkan bir katıya dönüştürmek için bir bağlayıcı görevi görür. Jeopolimer bileşikleri ile karıştırılmış atık malzemelerde bulunan tehlikeli elementler, jeopolimerik / zeolitik matrisin üç boyutlu çerçevesine kilitlenir. Yöntem, artırılmış mukavemet, asit direncine sahip üretim ve zararsız malzeme üretimini içermektedir (Davidovits, 2011).

1 ton jeopolimer çimentosunun (JÇ) üretimi sırasında 0,184 ton CO<sub>2</sub> atmosfere salınırken, PÇ üretiminde yaklaşık 1,00 ton CO<sub>2</sub> atmosfere salınmaktadır. Yani JÇ imalat sırasında PÇ'ye göre 5-6 kat daha az CO<sub>2</sub> üretir. Herhangi bir ulusal ekonomik kalkınma

parametresi çimento üretimine bağlı olan altyapıların büyüme oranı ile ilişkilendirilmektedir. Ancak, son yıllarda düşük maliyetli teknolojilerde endüstri atıklarına özellikle de ağır metal içeren endüstriyel atıkların kullanımına talep artmıştır. JÇ'ler ve betonlar ağır metaller içeren atık çamur ve/veya birkaç endüstriyel atığın birleşiminden üretilir. Bilindiği gibi uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve doğal puzolan gibi tamamlayıcı mineral malzemeler ile PÇ'nin kısmen değiştirilmesi sonucunda elde edilen kompoze çimentolarla üretilen betonların dayanım ve dayanıklılık performansı artmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin beton üretiminde kullanılması sonucunda yeşil beton üretilmekte ve sürdürülebilir kalkınma için betonarme yapıların kullanım ömrü artırılmaktadır (Belmokhtar, Ben Allal, & Lamrani, 2016).

Ülkemiz birçok puzolanik özelliğe sahip doğal mineral katkı maddeleri bakımından zengindir. Türkiye'de doğal puzolan yatakları hakkında etüt ve envanter çalışmaları Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Tamamının rezerv miktarı belirlenememiş ve ülkemizde yedi coğrafi bölgenin tamamında puzolan yatakları mevcuttur. Fakat bu yatakların tamamı ülkemizde istenilen şekilde kullanılmadığı düşünülmektedir. Günümüzde doğal taş üretimi sırasında atölye ve ocak işletmeciliğinde ilkel yöntemlerin kullanılması sebebiyle %70'e yakın oranda kayıp yaşanmaktadır. Oluşan atıklar çevreyi kirletmekte, tozmadan dolayı sağlık sorunları yaşanabilmektedir. Bayburt, Doğu Karadeniz bölgesinin doğu pontitler jeolojik bölgesinin içinde kalan, sedimentler, metamorfik ve volkanik taş oluşumlarının yer aldığı, doğal taş çeşitliliği ve zenginliğine sahip bir ilimizdir. İl merkezinde bulunan tüfit yapıları kayaçlar ekonomik değere sahip olup, bunlar daha çok kaplama amaçlı kaba ve ince yonu olmak üzere iki ayrı yöntemle işlenmekte ve yapı sanayine kazandırılmaktadır. Ancak bu taşların temininde oldukça ilkel yöntemler kullanılmaktadır. Bayburt Taşı olarak bilinen bu tüfit yapıları ocak işletmelerinde modern yöntemlere geçilmemesinden ötürü %70'e varan kayıplar oluşmakta ve bunlar tarım arazilerini ve havayı kirleterek, çevre ve sağlık problemlerine sebep olmaktadır. Bayburt ili içinde 3 çeşit farklı renkli tuf bulunmaktadır. Sarı, yeşil ve beyaz olmak üzere sınıflandırılabilen ve kimyasal yapıları birbirlerine çok benzerlik gösteren bu taşlar içinde beyaz tuf zeolitik karakterde, yeşil tuf tras özelliğine sahip ve sarı tuf ise kilsli yapıların daha belirgin olduğu bir yapıdadır. Bunlardan beyaz tuf daha çok binaların ve yapıların kaplama taşı olarak kullanılmakta, sarı tuf el işçiliği ile süs malzemesi yapımında ve yine kaplama nadiren malzemesi olarak, yeşil tuf ise çimento hammaddesi ve yine kaplama taşı olarak kullanılmaktadır. Her bir tuf ocaktan çıkarılırken ve işleme sırasında %30-70 arasında atık oluşturmaktadır. Bu atıkların boyutları mikro boyuttan makro boyuta kadar çeşitlendirilebilir. Atıkların değerlendirilmesi için

herhangi bir çalışma yapılmamış olup bu atıklar uzun vadede hem çevre hem de sağlık sorunlarına sebep olabileceği düşünülmüştür.

Bu kapsamda, bu çalışmada öncelikle Bayburt taşı olarak bilinen tüflerin imalat atıklarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Amaç kapsamında atıkların yeni bir ürüne dönüştürülmesi planlanmış ve bu ürünün çimento gibi bağlayıcı özellik gösterebilmesi için alkali-aktivasyon metodundan yararlanılmıştır. Böylece, doğal puzolanlarla üretilen alkali-aktif edilmiş bağlayıcı hamur, çimento yerine kullanılarak üretilen betonların mekanik mukavemetlerini koruma/iyileştirme ve açığa çıkacak CO<sub>2</sub> salınımını azaltma konusunda öncülük edilmesi düşünülmüştür. Bu işlemler gerçekleştirilirken kalsinasyon veya sinterleşme prosesi kullanılmayacak, böylece bağlayıcı hamur üretimi sırasında CO<sub>2</sub> salınımı minimize edilecektir. Çalışmada kullanılan hammaddelerden bazılarının üretimi sırasında CO<sub>2</sub> salınımı olmasına karşın bu bileşenlerin kullanımı toplam malzeme içinde sınırlı tutulacaktır. Bu kapsamda çalışmanın araştırma sorusu “*Bayburt zeolitik tüfü ve trasının alkali-aktivasyon yöntemiyle bağlayıcı hamur üretilir mi?*” olarak oluşturulmuştur. Çalışmanın hipotezi araştırma sorusuna bağlı olarak “*Herhangi bir ısı işlem yapılmadan doğal halde kullanılan öğütülmüş Bayburt zeolitik tüf ve Bayburt trası hammaddelerinin NaOH veya Ca(OH)<sub>2</sub> ve camsuyu ile aktive edilmesi sonucunda en az 32,5 MPa dayanıma sahip bağlayıcı hamur üretilir.*” olarak oluşturulmuştur.

## KURAMSAL ÇERÇEVE VE ALAN

### Alkali-Aktive Edilmiş Malzemeler

#### Alüminosilikatlar (Ham Madde).

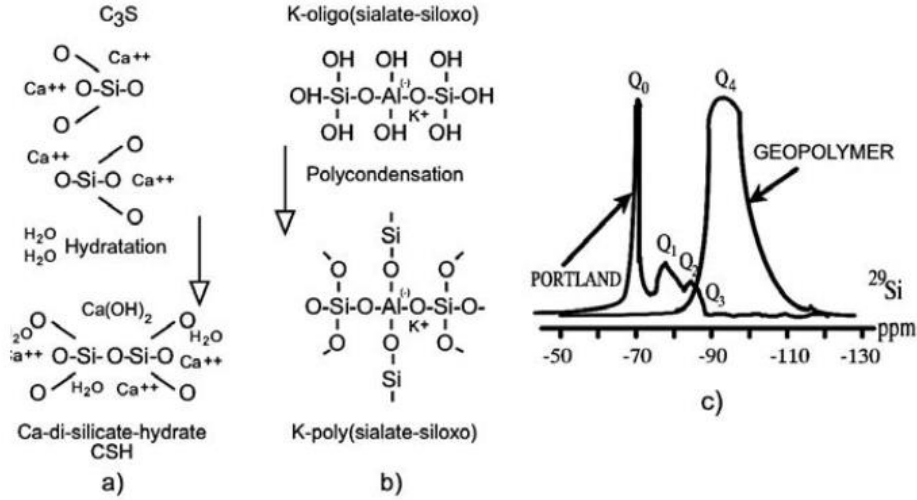
Hem silis hem de alüminyum, dünyada bulunan en yaygın elementlerdir. Dünya kıtasal kabuğunun % 75'inden fazlası silikat ve alüminosilikatlardan oluşmaktadır. Silis, ortamda +4 yükseltgenme durumuna sahiptir. Normal sıcaklık ve basınç koşullarında, her silis atomu hemen hemen her zaman dört oksijen atomuna bağlı bulunur. Böylece, silikatlarda ve alüminosilikatlarda bulunan temel Si birimi, sadece  $\text{SiO}_4$  olarak yazılabilir. Si tetrahedral yapıları, bir oksit iyonunu ortadan kaldırarak ve silikat mineralleri oluşturmak için bir başkasını paylaşarak birbirlerini polimerize etme eğilimine sahiptirler. Polimerizasyon boyutunda bir artışla birlikte Si'nin O'ya oranı, tek  $\text{SiO}_4$  yapısı içeren ortosilikatlar için 1:4'ten, tamamen polimerize 3D-çerçeve yapısı için 1:2'ye düşer. Çerçeve yapısında bulunan her oksijen atomu iki silis atomu arasında paylaşılmaktadır (Davidovits, 2018).

Alüminyum oldukça elektropozitif bir elementtir ve sadece oksijen atomlarıyla birlikte  $\text{Al}^{+3}$  olarak gözlenir. Silisyum ve alüminyum için kovalent yarıçaplar sırasıyla 1.17 ve 1.26 Å olduğundan,  $\text{SiO}_4^{4-}$  polimerizasyonu sırasında, atom büyüklüğünün bakış açısından Si atomlarının Al atomları ile değiştirilmesi mümkündür. Ancak, negatif yük artacaktır; örneğin, dört silikon atomundan biri alüminyum ile ikame edildiğinde  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{-2}$  katmanı  $[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]^{-5}$  olur. Bu nedenle, bu yükleri telafi etmek için metal katyonlara ihtiyaç vardır, sonuç olarak da metal katyonlar alüminosilikat mineralleri için müthiş çeşitlilikte formüller ve yapılar sunmaktadır. Alüminosilikat mineralleri, Al ve Si oksitler içeren geniş bir mineral grubudur, ancak kimyasal bileşim, kristal yapı, yoğunluk, sertlik ve parajenezde farklılıklar gösterir (Davidovits, 2018).

#### Alkali Aktive Edilmiş Malzeme mi Jeopolimer mi?

AAM, polimer değildir, bu yüzden “jeopolimer” olarak adlandırılmazlar. Bilim adamları şu anda kanıtlanmış olan bu gerçeğe aynı fikirde ilerlemekte ve AAM ile jeopolimerleri eşanlamlı olarak düşünmenin büyük bir bilimsel hata olduğunu kabul

etmektedirler. Jeopolimer çimento, NASH veya KASH gibi bir CSH türevi değildir. Dolayısıyla bilim adamları CSH terminolojisinin Portland çimentosundan uygulanmasının sadece uygun olmadığını aynı zamanda da NASH ve KASH olarak adlandırmanın tamamen yanlış olduğunu belirtmektedir.



Şekil 1. Portland çimento kimyası ve jeopolimer kimyası a:PC'nin basit hidrasyon ile sertleşmesi, b:Polikondensasyon yoluyla jeopolimerin sertleşmesi, c: $^{29}\text{Si}$  NMR spektrumu

PC kimyası kalsiyum silikat hidrasyonuyla başlamakta ve kalsiyum silikat hidrat CSH ile son bulmaktadır. Alkali aktive edilmiş çimento malzemelerini bilim adamları, jeopolimer için kalsiyumun yerine sodyum ve potasyum kullanarak üretmektedirler. Jeopolimer için de sodyum-alümina-silikat hidrat NASH ve potasyum-alümina-silikat hidrat KASH elde ettiğini iddia etmektedirler.

### AAM; bilim adamları

Ca ile birlikte Na ve K ile

### Portland Çimento

$\text{CaO}.\text{SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$  Kalsiyum Silikat Hidrat

C-S-H

### Jeopolimer

$\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{H}_2\text{O}$  sodyum alümina silika hidrat

N-A-S-H



Jeopolimerler, yüksek moleküler yapılar veya makro moleküllerdir yani özet olarak polimerdirler. Bunun karşısında, AAM ise küçük moleküllü bir kimyaya dayanır ve polimer değildir. Bu nedenle jeopolimer olarak adlandırılmadıkları açıktır. Jeopolimerler ve AAM çok farklı iki kimyasal sistemdir. Aslında alkali aktivasyon olarak adlandırılan şey jeopolimerizasyonun ilk basamağıdır. Jeopolimer prosesinin hazırlık aşamaları 6 adımda açıklanabilir.

1. Alkali aktivasyon (alkalinasyon)
2. Silikatların depolimerizasyonu
3. Oligosialatların jel formasyonu
4. Polikondansasyon
5. Ağ yapısı oluşturma
6. Jeopolimerlerin katılaşması

Jeopolimerler için aktivatör yoktur, reaktif ya da sertleştirici alkaliler bulunmaktadır ve aktive edecek hiçbir şey yoktur. Aktivatör olmamasının nedeni reaktif içeriklerle uğraşılmasıdır. Jeopolimerizasyon inert ya da kristal görünümlü alüminosilikatların tamamen çözünmesini gerektirmektedir. Bu açıklamalarda da olduğu gibi AAM ve jeopolimer iki farklı kimyadan oluşmaktadır. Bu tezde bugüne kadar yapılmış olan çalışmalarda jeopolimer ile AAM'nin farklı olduğu bilinmediğinden kaynak alıntılarında yazılanların aynı değiştirilmeden kullanılmıştır (Davidovits, 2018).

### **Alkali Aktive Edilmiş Malzemelerin Tarihçesi**

Altmış yıl önce, alkalilerin normal Portland çimento (PÇ) matrisinde serbest bulunabildiği düşüncesi insanlar tarafından gereksiz bir varsayım olarak nitelendirilmiştir. Victor Glukhovsky, ilk olarak "alkali" olarak adlandırılan ve çimento esaslı 'alkali çimentolar' ismiyle yeni bir malzemenin geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi için bir temel olarak kabul edilen bu varsayımı ortaya çıkarmıştır. Bu fikrin geçerliliği, altmış yıldan fazla süren evrimsel gelişim ve bu yeni malzemelerin çeşitli büyük ölçekteki pratik kullanımları; uygulamalardaki deneyim ile doğrulanmıştır. Alkali ile aktive edilmiş çimentolu malzemelerin, alkali ile aktive edilmesine ve beton yapılarının analizine ait bulguların yanı

sıra alkali miktarının ve alümina silikat bileşeninin tipinin bir fonksiyonu olduğu çalışmalarda rapor edilmiştir (Krivenko, 2017).

Alkali aktivasyon ilkesi günümüzde 70 yıldan daha fazla süre bilimsel araştırma alanı haline gelmiştir. Bununla birlikte alkali aktive edilmiş çimentolar üzerine daha kapsamlı ve sistematik bir araştırma V.D. Glukhovski ve ekibi tarafından Kiev’de 1950’li yılların sonunda başlatılmıştır. Aynı şekilde Kiev’de; biri 1979’da diğeri 1984 yılında alkali aktive edilmiş cüruf (AAS) tabanlı ürünler ve uygulamaları üzerine en az iki ulusal konferans düzenlenmiştir. İkinci konferans, Sovyetler Birliği’nin bütün bölgelerinden gelen 235 yayın, alkali ile aktive edilmiş cüruf çimentolar, betonlar ve konstrüksiyonlar üzerine sunulmuş ve ardından bu alanlardaki yaklaşık 30 yıllık tecrübe yansıtılmıştır.

Uzunca bir süreden sonra alkali ile aktive edilen bağlayıcıların ve betonların başarılı bir şekilde uygulanmasına rağmen, 1990’lı yıllarda bu ürünün gelişimiyle ilgili gözle görülür bir yavaşlama olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, karbondioksit salınımının azaltılması ve sürdürülebilir yeşil yapılar üzerine alkali ile aktive edilen bağlayıcı teknolojisinin canlandırılması son 10 yılda artış göstermektedir. ‘Jeopolimer betonların’ patentlenmesi ile çeşitli ülkeler tarafından yapılan jeopolimer araştırmalarına yapılan yatırımlarla AAS ve ilgili teknolojilerin yeniden gelişmesine neden olmuştur. İlerleyen süreçte alkali ile aktive edilen bağlayıcıların teknolojisi Doğu Avrupa ülkelerinde oldukça hızlı yayılmıştır. Romanya’da 15-20 yıllık kaldırım taşları ve diğer prekast elemanları hâlihazırda çok iyi durumdadır. AAS formülasyonlarına dayalı, bazıları silindir sıkıştırma yöntemine dayanan birçok yol ve otoyol bölümü, Doğu Avrupa’da ve Fransa’da gözle görülür şekilde 10-25 yıl boyunca iyi durumda kalmıştır (Torgal, Labrincha, Leonelli, Palomo, & Chindapasirt, 2015).

Eski beton yapıların mükemmel dayanıklılığı, günümüz PÇ’ye kıyasla eski çimentolarda bulunan oldukça fazla miktarda alkali metal bileşiğine bağlanmıştır. Bunun, alkali alüminosilikat hidrat bileşiklerinin bir çimento taşı yapısının oluşumu ile sonuçlandığı ve doğal zeolitlerin benzerlerinin, kalsiyum silikat hidratları oluşturduğu görülmüştür. Aynı zamanda, küresel sürdürülebilir kalkınma stratejisi, yapı malzemeleri endüstrisi ve özellikle çimento endüstrisine göre bazı avantajları olduğu gözlemlenmiştir (Malinowski 1982, & Glukhovsky 1989).

V. Glukhovsky, çimento bilimi için devrim niteliğinde bir keşif yaparak alkali metallerin (Li, Na, K, Rb, Cs) bileşiklerinin, toprak alkali metallerine (Mg, Ca, Sr, Ba) benzer hidrolik bağlanma özellikleri gösterdiğini belirtmiştir. Bu bileşiklerin çimentolu sistemler olarak kullanılması fikri atmosferik reaktiflere karşı daha yüksek stabilite ve dirence sahip

olduğu bilinen, sodyum-potasyum ve kalsiyum alüminosilikat bileşiklerinin toplanan jeolojik verilerine dayanmaktadır.

### **Alkali Aktive Edilmiş Malzemelerin (Jeopolimerlerin) Kimyası**

Alkali çimentolar, amorf veya camsı alümina silikatlara karşı bir alkali saldırısı sonucu oluşan çimentolu malzemelerdir. Alkali aktivatörlerle karıştırıldığında, bu malzemeler sertleşmekte ve iyi bağlanma özelliğine sahip malzeme elde edilmektedir. Alkali aktivasyon teknolojisinin en belirgin özelliklerinden biri, hem doğal (kil veya feldspat gibi) hem de endüstriyel yan ürünlerin (cüruf, kül veya kâğıt çamuru gibi) ana malzeme olarak kullanılabilmesidir.

Son zamanlarda çok çeşitli alkali-aktive edilmiş çimentolar geliştirilmiştir. Çimento esaslı bileşenlerin (CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sistemi) doğasına bağlı olarak, alkali çimentolar iki ana kategori altında gruplandırılabilir: (1) *yüksek kalsiyumlu* ve (2) *düşük kalsiyumlu* çimentolar. Aktivasyon modeli de her biri için farklı olmaktadır.

**Model 1; (Na,K)<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O sistemi:** Bu modelde, yüksek fırın cürufu gibi kalsiyum ve silisyum bakımından zengin malzemeler (SiO<sub>2</sub> + CaO > % 70) belli (orta) alkalın koşullar altında aktive edilmektedir. Bu durumda, ana reaksiyon ürünü, yapısında Al alabilen PÇ hidratasyonunda elde edilen ürün jele benzer bir C-A-S-H (kalsiyum alümina silikat hidrat) jelidir (Fernández-Jiménez, 2000).

**Model 2; (Na,K)<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O sistemi:** Bu modelde aktive edilen malzemeler öncelikle Al ve Si'den oluşur. Metakaolin veya F tipi uçucu kül gibi bu ikinci alkali aktivasyon prosedüründe kullanılan malzemeler düşük CaO içeriğine sahiptir. Bu durumda, reaksiyonları başlatmak için daha agresif ortam gerekmektedir. (yüksek alkalın ortam ve 60-200 °C'lik kür sıcaklığı). Bu durumda oluşan ana tepkime ürünü üç boyutlu bir inorganik alkalın polimer, bir N-A-S-H (veya alkali alümina silikat hidrat) jelidir ve bu da bir zeolit yapısı olarak kabul edilebilmektedir (Torgal vd., 2015). Bu jel diğerleri arasında geo veya inorganik polimer isimleriyle de geçmektedir (Shi C., Krivenko P.V, & Roy, 2006).

Günümüzde, üçüncü bir alkali aktivasyon modeli önceki ikisinin bir kombinasyonu olarak da tarif edilebilmektedir. Burada oluşan ürün, CaO+SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %20'den fazla olan maddelerin alkali aktivasyonu sonucunda oluşan karıştırılmış veya hibrit bir alkali çimento olarak bilinen yeni bir bağlayıcı türüdür (Alonso, & Palomo, 2001). Bu bağlayıcılar iki gruba ayrılmaktadır:

**A Grubu:** Kompoze Portland çimentosu gibi (CEM IIIb, CEM IV, CEM V), düşük oranda PÇ klinkeri içeriğine ve yüksek oranda (%70'in üzerinde) mineral katkılara sahip olan malzemeleri içermektedir. (Palomo A., Fernandez-Jimenez, Kovalchuk, Ordonez, & Naranjo, 2007).

**B Grubu:** PÇ klinkeri içermeyen karışımları kapsamaktadır: Yüksek Fırın Cürufu + Kül, Fosforlu Cüruf + Yüksek Fırın Cürufu + Kül vb.

Bu üçüncü grupta (kibrit çimentolar) çökelen tepkime ürünleri oldukça karmaşıktır; C-A-S-H (bileşimi içine sodyum alır) jelleri içeren ve (N, C)-A-S-H (yüksek kalsiyum muhtevalı N-A-S-H jelleri) çimentolu jellerin bir karışımını içermektedir (Torgal *vd.*, 2015).

**Yüksek kalsiyumlu sistemlerin Alkali Aktivasyonu:  $(Na,K)_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ .**

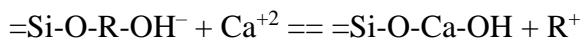
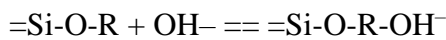
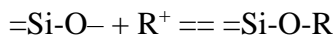
#### *Başlangıç Malzemelerinin Bileşimi*

Kalsiyum bakımından zengin alkali çimento ve beton hazırlamak için kullanılan en yaygın malzeme yüksek fırın cürufudur. Cürufun ana bileşenleri %35-40 CaO, %25-35 SiO<sub>2</sub>, %5-10 MgO ve %5-15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'tir (Provis, & Deventer, 2009). Geriye kalan bileşenler ise %1'in altında olmak üzere S, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO ve K<sub>2</sub>O bileşikleridir. Yani cüruf; hem ağ oluşturu anyonlar (SiO<sub>4</sub>)<sup>-4</sup>, (AlO<sub>4</sub>)<sup>-5</sup> ve (MgO<sub>4</sub>)<sup>-6</sup> hem de ağ değiştirici katyonlar Ca<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup> ve Mg<sup>+2</sup> içermektedir.

Alkali aktivasyon proseslerinde cüruf reaksiyonu, büyük oranda %90'ın üzerindeki değerlerin önerildiği vitroz faz içeriğine bağlıdır (Swamy, & Bouikni, 1990). Bununla birlikte, düşük vitroz faz içeriğine (%30-65) sahip cüruf da iyi sonuçlar verebilmektedir. Değerin normalde 1.3 ile 1.5 arasında değişen bir parametre olan depolimerizasyon derecesi (DP), görünüşte cüruf reaktivitesi ile doğrudan bir ilişki içerisindedir (Torgal *vd.*, 2015).

#### *Reaksiyon Mekanizması*

Glukhovsky ve Krivenko (Glukhovsky, 1994, & Krivenko, 1994). Aşağıda özetlenen reaksiyon serileri aracılığıyla yüksek fırın cürufu gibi silika ve kireç açısından zengin malzemelerin alkali aktivasyonunu açıklayacak bir model önermişlerdir.



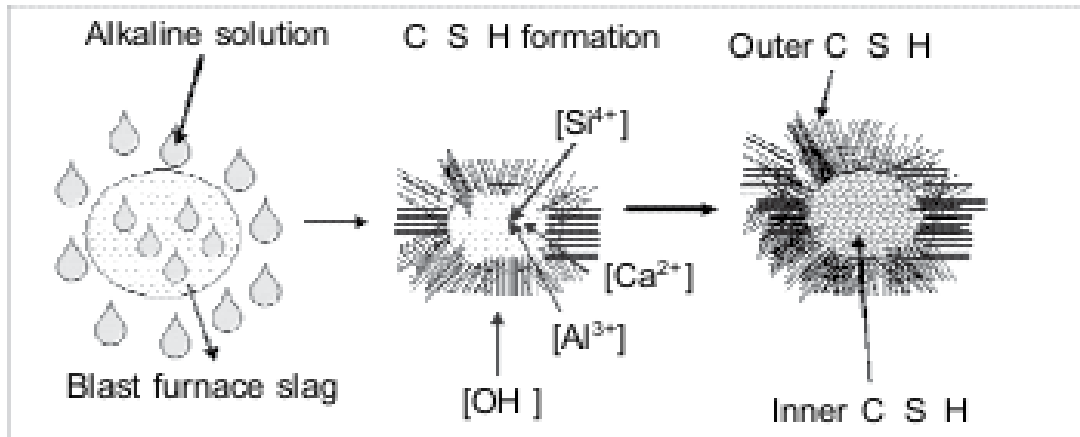
Alkali katyonu (R<sup>+</sup>), Ca<sup>+2</sup> iyonlarıyla katyonik değişim yoluyla hidrasyonun ilk evrelerinde sadece bir katalizör görevi görmektedir. Fernandez-Jiménez (2000) çözeltideki

anyonun doğasında, özellikle erken yaşlarda ve hamurun priz almasının aktivasyonunda etkili bir rol oynadığını belirtmişlerdir (1990'da Glasser tarafından önerilen bir modele dayanarak).

### Tepkime Ürünleri

PÇ hidratasyonunda çoğunlukla oluşan reaksiyon ürünü, malzemenin öncelikle mekanik özelliklerine bağlı olduğu bir C-S-H tipi jeldir. İkincil ürünler portlandit, etrinjit ve kalsiyum monosülfalüminatı kapsamaktadır (Taylor, 1990). İşlem alkali çimentolarda da benzerdir. Ana reaksiyon ürünü olan bir jel (bileşimi ve yapısı, OPC hidratasyonunda üretilen standart C-S-H'ye göre değişir), bir dizi ikincil ürün ile birlikte oluşmaktadır. Üretilen ikincil ürün tipi, başlangıç malzemesinin bileşimine, aktivatör tipi ve konsantrasyonuna, kür koşullarına ve pH'a bağlıdır.

Şekil 1'de, OPC hidratasyonunda oluşan en yaygın reaksiyon ürünleri (yüksek ve düşük kalsiyumlu) ile alkali çimento aktivasyon ürünleri karşılaştırılmıştır (Provis, & van Deventer, 2009).



Şekil 2. Alkali ile aktifleştirilmiş cürufta reaksiyon mekanizması için teorik model

Genel olarak, malzemelerin alkali ile aktivasyonu sırasında oluşan reaksiyon ürünlerinin doğası ve bileşimi, araştırmanın bu alanının en tartışmalı yönleri ve en çok çalışmaya muhtaç alanlar arasındadır. Bununla birlikte çoğu yazara göre:

- Ana hidratasyon ürünü C-A-S-H jelidir. Bu jel PÇ hamurunda oluşan jelden biraz daha farklıdır, çünkü daha düşük bir C/S oranına ( $C/S = 0.9-1.2$ ) sahiptir. C-A-S-H jelinin yapısı ve bileşimi ile diğer ikincil fazların veya bileşiklerin varlığı, kullanılan aktivatör türüne ve miktarına, cüruf yapısı ve bileşimi ile maddenin sertleştiği kür koşullarına bağlıdır.
- Cürufun alkali ile etkinleştirilmesi sırasında oluşan mineraller ise şöyledir:

- NaOH Fernández-Jiménez, (2000); camsuyu ile aktive olan cürufta hidrotalsit ( $Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4HO$ ) olarak bilinen bir faz tespit edilmiştir.
- Sadece NaOH ile aktive olan cürufta  $C_4AH_{13}$  tipi fazlar tespit edilmiştir. Bu fazlar 0.1-0.2 mm kalınlığında ve yaklaşık 1.5 mm çapında levhacıkları ve trombositleri oluşturur (Wang & Svrivener, 1995). Cüruf hamurlarında NaOH ve  $Ca(OH)_2$  ile aktive olan  $C_4AcH_{11}$  ve  $C_8Ac_2H_{24}$  gibi karbonatlı fazlar gözlemiştir.

Binder type		OPC	Alkaline cement	
			$(Na,K)_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$	$(Na,K)_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$
Reaction product	Primary	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H
	Secondary	$Ca(OH)_2$ $AF_m$ $AF_t$	Hydrotalcite $[Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O]$ $C_4AH_{13}$ CASH <sub>8</sub> $C_4AcH_{11}$ $C_8Ac_2H_{24}$	Zeolites: hydroxysodalite, zeolite P, Na- chabazite, zeolite Y, faujasite

C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N = Na<sub>2</sub>O, H = H<sub>2</sub>O, c = CO<sub>2</sub>

Şekil 3. Farklı bağlayıcı türlerinde çökelen ürünler

#### Oluşan jelin mikro ve nanoyapısı: C-A-S-H tipi jeller

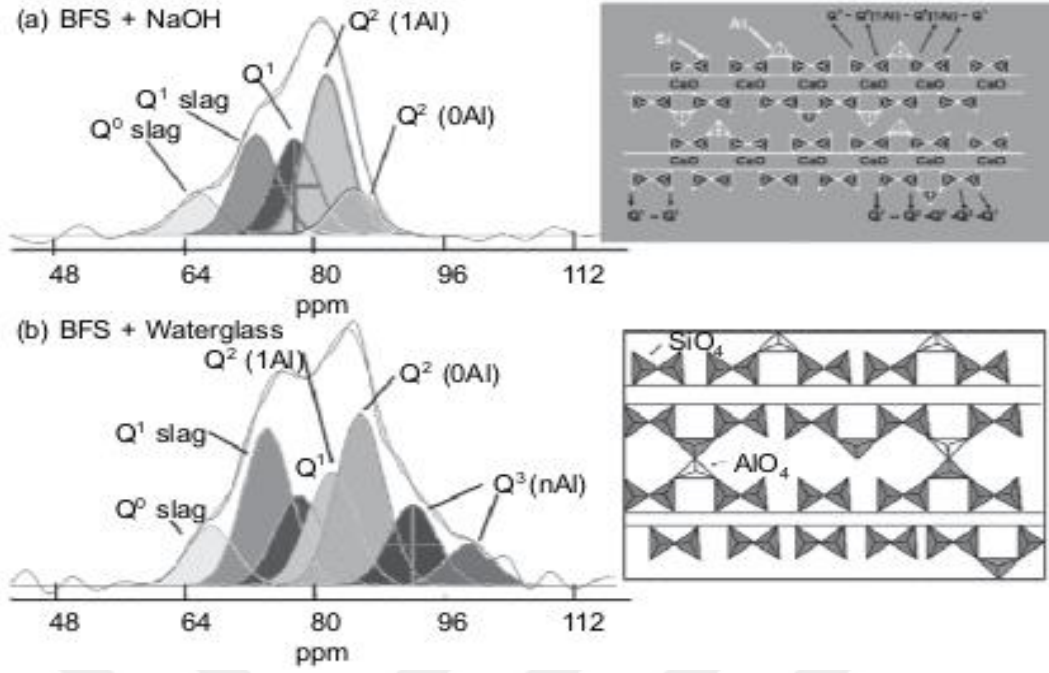
Yüksek fırın cürufunun alkali ile etkinleştirilmesi, cürufun kimyasal ve mineralojik bileşimine, ayrıca aktivatör tipi ve bileşimine göre hafif farklılık gösterebilir. NaOH ve camsuyu, en sık kullanılan iki aktivatördür. Wang ve Scrivener, (1995) SEM+EDX analizi ile belirlediği üzere aktivasyonun erken safhalarında hidrasyon ürünleri, başlangıçta alkali çözeltinin dolduğu parçacıklar arası boşluklarda çökmüştür. Aktivasyon ilerledikçe (5-7 gün), açık renkli ve daha ince cüruf halkalarının etrafında 0.5-1 mm koyu halkalar olduğu gözlemlenmiştir. EDX mikro analizi, aktivatörün türüne bakılmaksızın, çoğunlukla az miktarda Na, Mg, Al ve S içeren düşük bir Ca/Si oranına sahip bir C-S-H jel olduğunu doğrulamıştır. NaOH aktivatör olarak kullanıldığında, reaksiyonun erken evrelerinde yarı kristal bir C-S-H jel (I) görülmüş, cam suyuyla kristalleşmede ise bir tam yıl hidrasyon sonrasında bile çok düşük kaldığı görülmüştür.

Fernández-Jiménez, Puertas, Sobrados ve Sanz, (2003) ayrıca bu malzemeleri incelemek için farklı mikroskopik teknikler kullanmışlardır. Şekil 2, başlangıç cürufunun ve NaOH ve cam suyuyla aktivasyonu sonucundan elde edilen ürünlerin bir dizi transmisyon

elektron mikroskopunu (TEM) içermektedir. Elektron kırınım modellerinin (EDX) bir analizi, ana reaksiyon ürünü olarak yaprak şeklinde bir yarı kristal C-S-H varlığını kanıtlamıştır. 7 günlük malzemelerin EDX mikro analizinde, cam suyu ile yapılan hamurların NaOH hamurlarından (0.9-1.0) daha düşük Ca/Si oranlarına (0.6-0.7) sahip oldukları ortaya çıkmıştır. Tüm hamurların bileşiminde alüminyum ve sodyum tespit edilmiştir. Hidrotalsit denilen bir magnezyum ve alüminyum açısından zengin sekonder faz da görülmüştür.

Çimentolu jellerin nano-yapısı, amorf yapıları nedeniyle kolaylıkla tespit edilemez. Son yıllarda birçok karakterizasyon tekniğinin uygulanmasının bir sonucu olarak edinilen bilgilerde nükleer manyetik rezonansın (NMR) (Engelhardt ve Michel, 1987), oluşan çeşitli jellerin yapısını belirlemek ve tanımlamak için model geliştirmede avantajlı olduğu kanıtlanmıştır.  $Al^{+3}$ 'ün varlığının, daha uzun doğrusal zincirlere sahip jellerin yanı sıra, dağınık zincirler arası, Si-O-Al bağlarının ve dolayısıyla iki boyutlu yapıların olası varlığına neden olduğu da gösterilmiştir. Bu koşullar altında C-S-H jelleri C-(A)-S-H jelleri haline gelmektedir. Ayrıca, çalışmalarda aktivatör türünün jel yapısındaki silikat türlerinin yoğunlaşması üzerinde doğrudan etkisi olduğunu tespit edilmiş; cam suyu kullanıldığında, oldukça yoğunlaşmış yapılar oluştuğu kanıtlanmıştır.

Puertas, Palacios, Manzano, Dolado, Rico ve Rodriguez, (2011) bir NaOH çözeltisi ile aktive edilen cürufufta oluşan C-A-S-H jellerinde, silikat zincirlerindeki köprüleme konumlarında tetrahedral alüminyumun varlığı,  $Q^2$  (1Al) birimlerinin sayısının ve az miktarda  $Q^3$  (nAl) birimlerinde önemli miktarda artış ile birlikte ele alınmıştır. Aktivatör olarak cam suyu kullanıldığında C-A-S-H jelleri, tetrahedral köprüleme pozisyonlarında daha yüksek bir alüminyum içeriğine sahip olmakta ve zincir çapraz bağlanmaya ve  $Q^3$  (nAl) birimlerinin yüzdesinin önemli oranda yükselmesine ve bununla birlikte bazı bölgelerde katmanlı yapıların oluşumuna neden olmaktadır.



Şekil 4. Al içeren C-S-H Jel modelinin yapısı (a) doğrusal zincirler; (b) zaman zaman çapraz bağlanabilen, düzlemler oluşturan doğrusal zincirler

Bu jelin, bir Si'nin bir Al tetrahedron ile değiştirilmesi durumunda oluşan yük dengesizliğini nötralize eden az miktarda alkaliyi (normalde  $\text{Na}^+$ ) de bulundurduğu gözlemlenmiştir. Aslında, bunlar C-(N)-A-S-H jelidir. Hannus, Kiricsi, Lentz ve Nagy (1999), bu jelin, çapraz bağlı ve çapraz bağlı olmayan tobermorit esaslı yapıların bir karışımı olarak tanımlanması için bir model önermişlerdir (çapraz bağlı ikame edilmiş tobermorit modeli, CSTM).

#### Düşük Kalsiyum Sistemlerinin Alkali Aktivasyonu: $(\text{N,K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ .

##### Başlangıç malzemelerinin bileşimi

Uçucu kül ve metakolinin, yüksek maliyetli oluşu kullanımlarını kısıtlamasına rağmen, alkali çimento ve beton üretiminde yaygın olarak kullanılan düşük kalsiyumlu malzemelerdir.

Metakolin, killerin saflığına ve kristalizasyon derecesine bağlı olarak, 650-850 °C arasında değişen sıcaklıklarda kaolinit kil kalsinasyonu sonucunda oluşan puzolanik bir malzemedir (Provis, & van Deventer, 2009).

Genel olarak, metakaolin, silisin 4 (tetrahedral) koordinasyon sayısına sahip olduğu, alüminyum sayıları 4, 5 ve 6 olan silikat ve alüminatlardan oluşan dönüşümlü bir dizi etrafında yapılanmıştır. Alkali aktivasyonunda alümina silikatların kaynağı olarak metakaolin



kullanılabilirlik durumu; ilk kaolinit partikül boyutu, saflık ve kristal yapı gibi ölçülere bağlıdır. Kural olarak, metakaolin partikülleri 5 mm'nin altında olmalıdır ve iç kili tanesi boyutu 20 nm olmalıdır (Li, Sun, & Li 2010).

Uçucu kül morfolojisi, diğer küçük küreleri barındırabilen ya da içi boş küreler ile karakterize edilir. Aslında, kuvars (% 5-13), mülit (% 8-14) ve manyetit (% 3-10) gibi birtakım vitröz faz ve az sayıdaki kristal fazdan oluşur (Fernández-Jiménez & Palomo, 2003). Bununla birlikte, uçucu kül bileşimi, kullanılan kömür türüne ve santralde yer alan yakma işlemine bağlı olarak değişebilir. Çok sayıda külün kapsamlı bir incelemesinden sonra, Fernández-Jiménez ve Palomo (2003), bir F tipi külün alkali çimentoların üretiminde kullanılmaya uygun olması için aşağıdaki şartları yerine getirmesi gerektiği sonucuna varmışlardır:

- Yanmamış yüzde <5%
- $[\text{Fe}_2\text{O}_3] \leq 10\%$ ;
- $[\text{CaO}] \leq 10\%$ ;
- Reaktif  $[\text{SiO}_2] > 40\%$ ;
- % 80-90 partiküller <45 mm
- vitröz faz içeriği > % 50
- a  $[\text{SiO}_2]_{\text{reaktif}} / [\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{reaktif}} \text{ oranı} > 1.5$

#### *Reaksiyon Mekanizması*

Silika ve alüminyum bakımından zengin maddelerin alkali aktivasyonu cüruf aktivasyonundan sonra keşfedilen yeni bir araştırma alanı olduğu için daha çalışmalar azdır. Glukhovsky (1994), puzolanik malzemelerin aktivasyon reaksiyonları için genel bir mekanizma önermiştir; bu mekanizma üç aşamadan oluşmaktadır:

- a) Tahribat-koagülasyon;
- b) Koagülasyon (topaklaşma)-yoğunlaşma;
- c) Yoğunlaşma - kristalleşme.

İlk olarak, Eşitlik 1'de reaksiyon alkali aktivatördeki  $\text{OH}^-$  iyonları Si-O-Si bağlarını parçaladığında başlamaktadır. İyonlar, silis atomlarının etrafına elektron iyonlarını yeniden dağıtmakta ve Si-O-Si bağlarını zayıflatarak koparılmasını daha da zorlaştırmaktadır. Bu saldırıda silanol (-Si-OH) ve sialat (-Si-O-) türleri bulunmaktadır. Si-O- $\text{Na}^+$  bağlarının

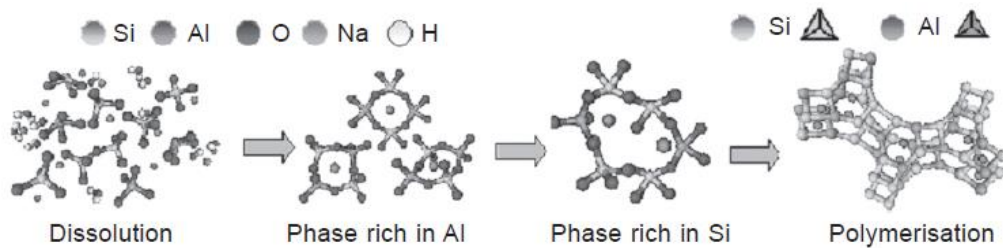


bileşimi, asal maddenin mineralojisi ve kimyasal bileşimi, kullanılan alkalinin etkinleştirici ve sertleştirme koşullarına bağlıdır. Metakaolin ve uçucu külün alkali aktivasyonu ile ilgili mekanizmalar, genel olarak yukarıda tarif edilen aşamalara uygun olmakla birlikte, aşağıda açıklandığı gibi değişmektedir.

Palomo, Fernandez-Jimenez ve Kovalchuck (2005), zeolit sentezine dayanan uçucu külün alkali aktivasyonunu tanımlayan bir model önermişlerdir. Bu modelde, süreç iki aşamadan oluşmaktadır:

- Çekirdeklenme, kül içinde bulunan alüminatların çözünmesi ve polimerizasyon yoluyla kompleks iyonik türlerin oluşumu,
- Büyüme, çekirdekler kritik bir boyuta ulaştığında kristal büyümeye başlar. Deneysel koşullar nedeniyle bu aşama çok yavaştır. Külün alkaliyle aktive edilmesinin sonucu ana bileşeni N-A-S-H jel veya 'zeolit öncüsü' olarak bilinen bir alümina silikat jel olan çimento özellikli amorf bir matris oluşur. Varsayım olarak da, bu jel sonunda bir zeolite dönüşebilir.

Bu model daha sonra çeşitli yazarlar tarafından revize edilmiştir (Palomo, Fernandez-Jimenez, & Kovalchuck, 2005). Yeni modele göre (bkz. Şekil 5), N-A-S-H jel oluşumu aşağıdaki gibi özetlenebilecek bir dizi aşamayı içermektedir. Alüminosilikatın kaynağı alkali çözeltiyle temas girdiğinde, başta silis ve alümina monomerler olmak üzere birçok türe dönüşür. Bu monomerler; dimerleri oluşturmak üzere etkileşime girer, bu dimerler de trimerler, tetramerler vb. oluşturmak üzere diğer monomerlerle reaksiyona girer.



Şekil 5. N-A-S-H jel oluşumu için önerilen model

Bu jel başlangıçta alüminyum bakımından zengindir (Jel 1, metastabil bir ara reaksiyon ürünü olarak adlandırılır). Oluşumu, reaksiyonun erken evrelerindeki alkali ortamdaki yüksek  $Al^{3+}$  iyon içeriği ile açıklanabilir (ilk birkaç saatten itibaren ilk birkaç saat arasında). Reaktif alüminyum silisten daha hızlı çözünür, çünkü Al-O bağları Si-O bağlarından daha zayıftır. Reaksiyon ilerledikçe, orijinal alüminosilikat kaynağındaki Si-O grupları çözündürülür ve reaksiyon ortamındaki silikon konsantrasyonu yükselir ve oradaki

N-A-S-H jelindeki oranı (Jel 2) artar. Bu yapısal düzenleme, oluşan çimentonun birçok fiziksel özelliklerinin gelişiminde aracı olan polimerin son kompozisyonunu, ayrıca gözenek mikro yapısını ve malzemedeki dağılımı belirler.

### *Reaksiyon ürünleri*

Silis ve alümin bakımından zengin maddelerin uçucu kül ve metakaolin gibi alkalin aktivasyonunda üretilen ana reaksiyon ürünü, NASH jel olarak bilinen bir amorf alkali alüminosilikat hidrattır ( $Mn-(SiO_2) - (AlO_2) n.wH_2O$ ) (Palomo *vd.*, 2005) (bkz. Şekil 5). Bu ürün ayrıca AIP, alkalin inorganik polimer adıyla da geçer. Silis ve alüminyum tetrahedraları rastgele dağıtılarak üç boyutlu bir iskelet oluşturulur (Provis, & van Deventer, 2009). Bu tip sistemlerdeki ikincil reaksiyon ürünleri, hidroksitodalit, zeolit P, Na- kabazit, zeolit Y ve faujasit gibi zeolitlerdir (Torgal *vd.*, 2015).

Birçok yazar tarafından yapılan araştırmalar (Palomo *vd.*, 2005), hem kür sıcaklığının hem de aktivatör tipinin reaksiyon kinetiğini etkilediğini ve tepkime derecesinin kalıpla yükseldiğini göstermiştir. Alüminosilikat aktivasyonunda üretilen ürünlerin (N-A-S-H jel-benzeri ve zeolit çökeltileri) doğası, aynı zamanda kürlenme süresi ve sıcaklığa göre değişmektedir. Uzun kür süreleri, silika açısından zengin ürünlerin oluşumuna neden olur ve malzemede mekanik mukavemetin gelişmesini desteklemektedir.

Ayrıca, hammaddede ana ürün olarak üretilen N-A-S-H jelinin silis oluşturan parçası tek kaynak değildir; yani bu kısım aktivatörde de bulunabilir (cam suyu- sodyum silikat) (Torgal *vd.*, 2015). Aslında, normalde bir alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat içindeki silis, yüksek ölçüde çözünür ve sonuç olarak N-A-S-H jeline kolayca alınır.  $SiO_2/Na_2O$  oranına doğrudan bağlı olan bu tür sodyum silikattaki polimerizasyon derecesi, N-A-S-H jel oluşumu ile ilgili çeşitli aşamalarda ortaya çıkan jellerin yapısını belirler.

Criado, Fernandez Jimenez, De La Torre, Aranda ve Palomo (2007), farklı derecelerde aktivatör polimerizasyonunun (0.17, 0.60 ve 1.90 olan  $SiO_2/ Na_2O$  oranları), uçucu külün alkali aktivasyonunda üretilen ara reaksiyon ürünleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu parametrenin, oluşan başlangıç jelin kinetiği, yapısı ve bileşimi üzerinde önemli bir rol oynadığını gözlemlemişlerdir. Çözünebilir silisin eklenmesi, ara ürünü etkiler, ancak son reaksiyon ürünlerini etkilemez. Si/Al oranının N-A-S-H jelde kesin olarak yükselmediğini ve en uygun değer 2 olarak görüldüğünü ve sistemin başlangıç koşullarından bağımsız olarak termodinamik stabilite nedenleriyle eğilimi gösterdiklerini belirtmişlerdir. Bu yazarlar ayrıca yüksek polimerize silisin N-A-S-H jel oluşumu kinetikleri üzerindeki etkisinin geciktirici kül reaksiyonunu ve zeolit kristalleşmesini içereceğini öne sürmüşlerdir.

## **Kullanılan mineral katkı ve bileşenler**

### **Potansiyel alkali aktivite bağlayıcı bileşenleri:**

#### ***Uçucu Kül.***

Uçucu kül, kömürün yanmasından elde edilen endüstriyel bir yan üründür. Kimyasal bileşimlerine bağlı olarak uçucu külün kimyasal bileşimi büyük ölçüde kömür yapısına göre değişir. Çoğu bileşende silika ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksitler ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), kireç ( $\text{CaO}$ ) ve yanmamış kömür olmakla birlikte bu bileşenlerin yüzdesi külden küle değişmektedir. Uçucu küller iki grupta sınıflandırılır.

I. **F tipi uçucu kül:** % 10'un altında  $\text{CaO}$  içeriğine sahiptir. Antrasit veya bitümlü kömür kalsinasyonu sonucu en çok kullanılan kül ve en sık kullanılan tiptir. Bu tür küldeki çoğu oksitler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve demir oksitlerdir. pH değeri normaldir ve 10'un üzerinde olabilir. Genel olarak silika ve alümina bazlı alkali çimentolarda hammadde olarak kullanılan tiptir (Torgal vd., 2015).

II. **C tipi uçucu kül:** Yüksek  $\text{CaO}$  içeriğine sahiptir. (% 10'dan fazla, genellikle % 15 ila % 30). Yağsız kömür veya linyitin kalsinasyonu sırasında üretilen bu kül, puzolanik ve çimentoya benzer özellikler sergiler (Torgal vd., 2015).

#### ***Yüksek fırın cürufu.***

Yüksek fırın cürufu bileşenleri, kullanılan demir tipine ve kullanılan cevhere göre değişir. Sistemsel olarak YFC,  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  dört bileşenli diyagramda temsil edilebilir (Shi, Krivenko, & Roy, 2006). Çimento yerine kullanılabilen cürufun temel gereksinimleri aşağıda listelenmiştir (Fernández-Jiménez, 2000).

- Granül veya pelet haline getirilmeli ve % 85-95 arası bir camsı faza sahip olmalıdır.
- Bazik olmalıdır, yani  $\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2$  oranı > 1 olmalıdır. Bazik cüruf, daha yüksek bir hidrolik potansiyele sahiptir, çünkü kireç içeriği, aktivasyonunu daha iyi kontrol eder. Buna rağmen, asit cürufu da alkali aktive olabilir (Torgal vd., 2015).

#### ***Metakaolin ve Diğer Kaolinit Killeri.***

Kaolin, normal olarak ağırlıkça % 15'in üzerinde (esas olarak kaolinitik) kil materyali olan beyaz veya açık renkli bir kayadır. Kaolin, su ve atmosferik  $\text{CO}_2$  kaynaklı feldispat ayrışmasının ürünüdür. Kaolinit, kaolin işlenerek elde edilir. Kaolinit, bileşimi  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  olan bir kil minerali türündendir. Metakaolin, kimyasal bileşimi, başlangıç kaolinitinin kimyasal ve mineralojik bileşimi tarafından büyük ölçüde etkilenen, amorf, oldukça reaktif bir alüminosilikattır. İç yapısında bulunan oksitler,  $\text{SiO}_2$  (% 40-70) ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (% 20-35), daha

düşük oranlarda  $Fe_2O_3$  ve  $TiO_2$  (<% 1) ve diğer alkali oksitleri ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) içerir. Kaolinitin ısıtılması, metakaoline ek olarak kuvars veya illit gibi kristal bileşikler verebilir (Torgal vd., 2015).

### ***Silis Dumanı.***

Silis dumanı silikon metal veya ferrosilikon alaşım endüstrisinin yan ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır.

### ***Zeolit.***

Doğal puzolanların aktivitesi açısından kimyasal bileşimin, özgül yüzeyin ve mineralojik yapının önemli rol oynadığı bilinmektedir. Genel olarak, puzolan tarafından bağlanan kireç miktarındaki aktif fazların miktar ve yapısı, karışımın kireç/puzolan oranı,  $SiO_2$  içeriği, kür süresine bağlı olduğu birçok araştırma tarafından ispatlanmıştır.

Sedimanter kökenli zeolitler örneğin,  $Na[AlSi_2O_6].H_2O$  analsim, ( $K_2,Ca$ )  $[Al_2SiO_{12}].4.5H_2O$  filipsit, ( $Ca, Na_2, K_2$ )  $[Al_2Si_9O_{22}].6H_2O$  mordenit,  $Na_2 [Al_2Si_3O_{10}].2H_2O$  natrolit,  $Ca[Al_2Si_3O_{10}].2H_2O$  skolesit ve diğer zeolitler düşük sıcaklıktaki hidrotermal reaksiyonların sonucu olarak artık toprakta meydana gelmektedirler (Krivenko, 2017).

Tras volkanik orijinli doğal bir hammaddedir; temel olarak silis ve alüminyum oksitten oluşmakta ve eser miktarda kireç içermektedir. Trasın tek başına hidrolik bağlayıcı özelliği bulunmamaktadır. Tepkimeye girmek için kirece gereksinim duymakta ve bağlayıcı özelliklere sahip ürünler vermektedir. Silika ve kireç arasında meydana gelen tepkimeler puzolanik tepkime olarak bilinmektedir. Tras katkı maddesi olarak kullanıldığında, klinkerin suyla reaksiyonu sonucunda açığa çıkan kireç puzolanik reaksiyonun meydana gelmesini, trasın bağlayıcı özellik kazanmasını sağlamaktadır. Doğal puzolanlar, katkıli çimentoların geçirgenliğinin düşük olmasına sebep olurken, PÇ'ye göre de sülfat etkisi gibi kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olmalarını sağlamaktadır (Taban, & Şimşek, 2008).

ZT'ler alkali ve toprak alkali metallerin sulu alümina silikatları olarak tanımlanmaktadır. Zeolitik tüfler kimyasal özellikleri ve kristal yapıları nedeniyle günümüz endüstrisinin önemli hammaddeleri arasında yer almaktadır. ZT'ler çok küçük gözenekli yapıya sahip maddelerdir. Zeolitlerin kristal yapı ve kimyasal özelliklere sahip olması moleküler elek, seçimli adsorbsiyon ve katalitik kullanım alanları gibi uygulamalarda değerlendirilebilmelerini sağlamaktadır (Taban, & Şimşek, 2008). ZT'lerin kullanılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliği ile soğutma ve ısıtma sistemlerinin hem ilk yatırımlarında hem de yapıların kullanımları süresince ortaya çıkan enerji harcamalarında önemli tasarruflar sağlamaktadır (Bektaş, Uzal, & Turanlı, 2003).

Silisyum bakımından zengin olarak bu çalışmada volkanik tuf olan Bayburt Taşı (BT) kullanılmıştır. Tekin (2017) yapmış olduğu makale çalışmasında BT' nin ana bileşenlerini %68.9 SiO<sub>2</sub>, %12 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %0.34 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 3.85 CaO olarak bulmuştur. Diğer bileşenler ise MgO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O olmaktadır. Bu araştırmaya göre BT'de toplam SiO<sub>2</sub>+CaO>%70 olmaktadır ve BT'nin SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamı %70'ten fazla olduğu için ASTM C618' e göre puzolanik yapıda olduğu kabul edilmektedir.

#### ***Diğer Alüminosilikat Malzemeler:***

Volkanik kül ve bazı doğal puzolanlar alkali aktivasyona duyarlı diğer alüminosilikat malzemeleridir. Doğal puzolanların kökeni olan volkanik kül, başlangıçta Romalılar tarafından beton yapmak için kullanılmıştır. Bu kül, toz haline getirilmiş volkanik kaya ve camın küçük parçacıklarından oluşur. Patlama sonrası hızlı soğumanın bir sonucu olarak, volkanik kül yüksek kimyasal reaktivite sergiler. Bu, büyük oranda camsı fazı ve yüksek silis-alümina içeriği ile birlikte alkali aktivasyonu için önemli bir hammaddedir (Provis, & van Deventer, 2014).

Volkanik kül normalde yüksek SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO içeriği ile birlikte, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O ve TiO<sub>2</sub> gibi diğer oksitlerin daha küçük oranlarının yanı sıra diğer birçok elementin kalıntıları ile karakterize edilir (Provis, & van Deventer, 2014).

Doğal puzolanların günümüzde yüksek alkali aktivasyon potansiyeline sahip başka bir hammadde olduğu ispatlanmıştır (Allahverdi, Mehrpour, & Kani 2008). Düşük kireç içeriği ve sodyum bakımından zengin zeolitli puzolanlar ve yüksek çözünür silis içeriği olan doğal puzolanlarda, optimum SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar oranı düşüktür fakat CaO bakımından zengin veya önceden kalsine edilmiş puzolanlardan daha yüksektir (Bondar, Lynsdale, Milestone, Hassani, & Ramazeniyanpour 2011). Yüksek sıcaklıkta kürlenmenin de bu malzemelerin mekanik mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı Najafi Kani ve Allahverdi, (2009) çiçeklenme riskini azalttığı gösterilmiştir (Najafi Kani, & Allahverdi, 2009).

#### **Aktivatörler:**

Kostik alkaliler veya alkali tuzları genel olarak alkali aktive edilmiş çimentolarda veya betonlarda alkali aktivatör olarak kullanılırlar. Kimyasal alkali bileşenlerini altı grupta sınıflandırmıştır.

1. Kostik alkaliler
2. Silikat içermeyen zayıf asit tuzları
3. Silikatlar

4. Aluminatlar
5. Aluminosilikatlar
6. Silikatsız güçlü asit tuzları

Tüm bu aktivatörler arasında NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O.nSiO<sub>2</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en ekonomik kimyasal yapıya ve geniş kullanım alanına sahiptir. Bazı potasyum bileşenleri laboratuvar ortamında kullanılır. Ancak bunların potansiyel uygulamaları ulaşılabilirliği ve fiyatlarına göre kısıtlıdır. Diğer taraftan sodyum ve potasyum bileşenlerinin özellikleri çok benzerdir (Shi *vd.*, 2006). Bu çalışmada NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır.

**I. NaOH:** NaOH, dünyanın en kuvvetli bazı olmasının yanı sıra kimya sanayisinin de temel kullanılan hammaddesidir. Yanıcı değildir ve su ile temas edince ısı vermektedir. Kostik iyi bir dezenfektandır ve saflık oranına göre ticari farklılık göstermektedir (Öksüzer, 2016).

**II. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:** Sodyum silikat Na<sub>2</sub>O.nSiO<sub>2</sub> formülündeki bileşenlerin genel adıdır. n katsayısına bağlı olarak özellikleri ve kullanım alanları değişmektedir.

Daha düşük bir modül ile sodyum silikat çözeltisi üretmek için yüksek bir modül ile bir sodyum silikat çözeltisine NaOH eklenir. Belirli bir modül ve konsantrasyon için, ayarlanan silikat çözeltisinin doğrudan NaOH ile karşılaştırıldığında farklı türlere sahip olması da beklenebilir. 1'in üzerinde modüle sahip alkali silikat üretmek için bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, su ile karıştırılmış organik çözücüler, sulu silikatın bir çözücü içinde çözüldükten sonra hidrate silikat elde etmek için kullanılır. Bu yöntem, optimal modül ve konsantrasyonla doğrudan cam suyu üretilmesine izin verir (Shi *vd.*, 2006).

**III. Söndürülmüş kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>):** Kalsiyum karbonat içerikli kireçtaşları 900-1000 °C sıcaklıkta kalsinasyonu ile sönmemiş kireç (CaO) elde edilmektedir. Sönmüş kireç sönmemiş kirecin su ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşan Ca(OH)<sub>2</sub>'dir. Kireç antik çağlardan bu yana bilinen, çok yönlü kullanılan maddedir. Piramitlerin yapımında, Roma ve Yunan imparatorluğu dönemlerinde farklı yapılan inşasında kireç kullanıldığı bilinmektedir. Kireç endüstri, tarım ve çevre sektörlerinde kullanım olarak gittikçe artmaktadır. Bu da kireç üretim yerlerinin yaygınlığı, kullanım yerlerine yakınlığı, üretim teknolojisinin gelişmesi ve fiyatının diğer bağlayıcılara oranla daha ucuz olmasını sağlamaktadır.

Kalsinasyon sıcaklığı CO<sub>2</sub> gazının kısmi basıncına bağlı olarak değişmektedir. CaCO<sub>3</sub>, %100 CO<sub>2</sub> atmosferinde 760 mmHg basıncında 898 °C'de bozunmaktadır. Bozunma dış kabuktan içeri doğru oluşmaktadır. Kireçtaşının boyutu büyüdükçe de kalsinasyon sıcaklığı arttırılmalıdır. Dış kabuk ile iç kabuk arasında 150-350 °C fark oluşabilmektedir. Pratikte



kalsinasyon 1050-1200 °C arasında yapılmaktadır. Kireçtaşının minimum sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmesinin nedeni kalsinasyon hızının sıcaklık ile artması ve bu durumda da fırın kapasitesinin artmasıdır. Fakat kalsinasyonda elde edilen kirecin reaktivitesi azalacağından dolayı 1200 °C'den daha yüksek sıcaklıklar özel durumlar dışında tercih edilemez (Çiçek, 1999).

## **Mikroanalizler**

### **Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.**

Taramalı Elektron Mikroskobu ya da SEM (Scanning Electron Microscope) çok küçük alana odaklanan yüksek enerjili elektronlar ile yüzeyin taranması prensibi ile çalışmaktadır. En sık kullanılan haliyle, yüzeyden yayılan ikincil (secondary) elektronlarla yapılan ölçüm, özellikle yüzeyin engebeli (topografik) yapısı ile ilişkili görüntü oluşturur. SEM birçok dalda araştırma-geliştirme çalışmalarında, mikro elektronikte yonga üretiminde, sanayinin çeşitli kollarında hata analizlerinde, biyolojik bilimlerde, tıp ve kriminal uygulamalarda sık kullanılmaktadır. SEM görüntü, yüksek voltajla hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması esnasında elektron ve numune atomları arasındaki etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra katot ışınlarının tüpünün ekranına aktarılması ile elde edilmektedir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilerek bilgisayar monitörüne aktarılmaktadır (Şahin, 2018). SEM;

- Lif kesitlerinin incelenmesinde kullanılır.
- Kaplama yüzeylerinin karakterizasyonunda kullanılır.
- Tüm katı malzemelerin nano ve mikro ölçeklerde yapı tayininin edilmesini sağlamak ve yapıların elementel analizlerini yapabilmektedir. Bu yüzden tüm endüstri sektörlerinde çeşitli tekniklerle üretilen veya aynı teknikte farklı firmalar tarafından üretilmiş malzemelerin karşılaştırılması için kullanılmaktadır.

SEM cihazında iletken olmayan numuneler çok ince iletken malzeme ile kaplanmaktadır. Kaplandıktan sonra incelenebilir hale gelmektedir. Numune elektron mikroskobunda incelenmeye hazır hale getirilmektedir. Numunenin yapısına bağlı olarak değişkenlik gösteren vakumlanma süresi bulunmaktadır. Bu süre ortalama 30 dakikadır. Vakum süresi bittikten sonra numunenin yüzeylerinden resim alınabilir. Numunenin elementel analizi yaklaşık olarak 2-3 dakika sürmektedir. Bir numunenin incelenmesi tam anlamıyla numunenin yapısına bağlıdır ve ortalama 45 dk ile bir saat arasında değişmektedir.

## **X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi.**

Kristal atomlarının geometrik düzenleri ile aralarındaki mesafe hakkında birçok bilgi bu yöntemle elde edilmektedir. Dolayısıyla x-ışınları kırınımı (XRD) kristalin bileşiklerin kalitatif olarak tanınmasında pratik ve uygun yöntemdir. X-ışını kırınımı, aşırı miktarlarda X-ışını verilerini işleyebilen çok yüksek hıza sahip bilgisayarların kırınımı ile büyük ölçüde gelişmiştir. XRD tekniği, kristal düzleminin birim hücre boyutları ile beraber kristal atom düzlemleri arasında uzaklığı belirleyebilen tekniktir. X-ışınının içerisinden geçtiği madde elektronları arasında etkileşme sonucunda saçılma oluşmaktadır. Eğer x-ışınları bir kristaldeki düzenli ortamdan saçılırsa, saçılmayı yapan merkezler arasında bulunan uzaklık X-ışınının dalga boyu ile aynı mertebeden olduğu için saçılan ışınlar olumlu veya olumsuz girişim yapmakta ve kırınım oluşmaktadır.

XRD çalışmalarında, dalga boyu sabit x-ışınları kullanılmaktadır. X-ışınlarının kaynağı X-ışını tüpleridir. Dalga boyu sabit X-ışınları elde edebilmek için, ısıtılan tungsten filamandan ısı tahriki ile yayınlanan elektronlar elektromanyetik bir alan içerisinde hızlandırılmaktadır. Hızlandırılarak yüksek enerji kazandırılan elektron demeti anota çarptığında elektronlar anotun elektron kabuklarına girmektedirler. Yüksek enerjili elektron demeti çekirdeğe yakın kabuktaki elektrona çarparak onu yerinden çıkarmayı başarırsa elektron kaybindan dolayı atom kararsız hale geçmekte ve boş kalan elektronun yeri yüksek enerjili kabuktaki elektron tarafından doldurulmaktadır. Bu elektron geçişinden kaynaklanan enerji farkı karakteristik x-ışını fotonu olarak yayınlanmaktadır. X-ışınları örgüdeki atomların düzenlenişine bağlı olarak farklı numunelerde farklı kırınıma uğramaktadırlar. Vakum altındaki kapalı tüpteki filaman akımının uygulanmasıyla ısıtılmaktadır. Akım yükseldikçe filamandan yayılan elektron sayısı da o kadar yükselmektedir. Sonra hedefle filaman yüksek potansiyel arasına uygulanmaktadır. Bu potansiyel sayesinde elektronların kinetik enerjileri artmakta ve hedefe doğru hızlanmaktadır. Bu elektronlar hedefe çarptıklarında X-ışınları üretilmektedir. Bu X-ışınları hedef malzemelerin karakteristiği olmakta ve bunların toplanması sağlanarak numune üzerine düşürülmektedir. X-ışını bir atoma çarptığında atomun etrafındaki elektronlar gelen ışın ile aynı frekansta titreşmekte ve her doğrultuda yıkıcı bir girişim söz konusu olmaktadır. Yani bir araya gelen dalgalar farklı fazlardadır.

XRD analizleri sayesinde çimento fazları tanımlanabilmekte ve faz kompozisyonları kısa bir süre içinde düşük hata payları ile bulunabilmektedir. X-ışınları kırınımı günümüzde malzemelerin karakterizasyonu için bilimsel ve endüstriyel araştırmalarda; kimya, biyoloji, fizik, malzeme-metalurji, jeoloji, çimento, seramik, biyokimya ve teknolojik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca XRD uygulamaları; nicel faz analizleri, sıcaklık ve basınç

gibi fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerin incelenmesi, malzemenin içerdiği fazların belirlenmesi, tanecik boyutu ile yönelimi belirleme, kristal örgü sabitlerinin bulunması ve kimyasal kompozisyonları (bileşimi) belirleme şeklinde sıralanabilmektedir.

### **Literatür Taraması**

Palomo, Grutzeck ve Blanco (1999), katı madde olarak sadece **uçucu kül (UK)** kullanarak aktivasyon mekanizması yüksek alkali çözeltiler ile çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada NaOH, KOH ve cam suyu ile hazırlanan çözeltilerle yüksek OH<sup>-</sup> konsantrasyonda alkali aktivatörler ve ardından uçucu küllü hamurlar üretilmiştir. Reaksiyon ürünleri, zeolitik yapılara benzerlik göstermekte olan amorf alüminasilikat jeli olduğu anlaşılmıştır. Çözelti/UK oranları ile birlikte numunelerin kür sıcaklığı ve süresine göre nihai ürünün mekanik mukavemetlerinin gelişimi önemli ölçüde etkilenmiştir. Uçucu küllü jeopolimerler 5 saat 85 °C’ de kürlendikten sonra 60 MPa’ya kadar basınç dayanımı değeri elde edilmiştir.

Degryse, Elsen ve Waelkens (2002), üç farklı agrega türü kullanılarak tamir **harçlar** üretilmiştir. **Kireçtaşı**, yerel işletmelerden üretilen kırılmış **seramik** ve **volkanik tüf** kullanılmıştır. Deney sonuçlarında agrega olarak yalnızca kırılmış seramik içeren harçların zayıf oldukları belirtilmiştir. Harç dayanımlarının kireçtaşı eklenerek artırıldığı ve volkanik malzeme ile kireçtaşından üretilen harçların en iyi sonuçları verdiği belirtilmiştir. Ayrıca kireçtaşı ve volkanik agregalarla üretilen harçların donma çözülme dayanımlarının da mekanik dayanıma bağlı olduğu görülmüştür.

Papayianni ve Stefanidou (2005), su/bağlayıcı oranı, toplam hacim içeriği, zamana bağlı olarak porozite gelişimi ve dayanım porozite ilişkisi matematiksel ifadelerle açıklanmak üzere belirli sayıda kireç-puzolan **harçları** üretilmiştir. Sonuçlarda su/bağlayıcı oranının poroziteyi arttırmada en önemli parametre olduğu anlaşılmıştır. Zamanla kireç-puzolan harçlarının porozitesinin azaldığı görülmüştür.

Zeybek (2009), C ve F sınıfı (**UK**) kullanarak ürettiği jeopolimer tuğlaları 30 MPa basınçla şekillendirdikten sonra farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde ısıl işleme maruz bırakmışlardır. Ardından basınç dayanımları, su emme, yoğunluk ve donma-çözülme dirençleri belirlenmiştir. Üretilen tuğlalar Si/Al:2 ile 60 °C sıcaklıkta 24 saatlik ısıl işlem sonrasında basınç dayanımı 45 MPa olduğu belirlenmiştir.

Rattanasak ve Chindaprasirt (2009), NaOH çözeltisiyle hazırlanan **UK** ile üretilen jeopolimer için karıştırma prosedürü üzerine çalışmıştır. Bu jeopolimer için ayrı karıştırma ve normal karıştırma metotları uygulanmıştır. NaOH çözeltisi ilk 10 dakika boyunca UK ile karıştırılmış ve sonra sodyum silikat çözeltisi karışıma ilave edilmiştir. Normal karıştırmada

ise UK, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi birleştirilmiş ve yine aynı sürede karıştırılmıştır. Jeopolimerler 48 ve 65 °C’de kür edilmiştir. Ardından **hamurun** mikro yapısı ve **harçların** basınç dayanımı araştırılmıştır. Sonuç olarak NaOH konsantrasyonunun ve NaOH ile karıştırma süresinin etkin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 10 M NaOH ve sodyum silikat ile NaOH oranı 1:3 karışımlarında basınç dayanımının 70 MPa’ya kadar mukavemetli olduğu görülmüştür.

Allahverdi, Najafi Kani ve Yazdanianpour (2010), bu çalışmada **pomza** tipi doğal puzolanın alkali aktivasyonu ile jeopolimer çimento **hamuru** tasarlamıştır. **Yüksek fırın cürufuyla** (YFC) birlikte hazırlanan karışımların; 28 günlük basınç dayanımları ve karışım süreleri farklı miktarda YFC, Na<sub>2</sub>O içeriği ve s/b (su/bağlayıcı) oranıyla çalışılmıştır. Sonuçlara göre ağırlıkça %5 YFC ve %8 Na<sub>2</sub>O içeren karışımın 28 günlük basınç dayanımı 36 MPa’yı göstermiştir. Ağırlıkça %5 YFC içeren karışımlar en iyi mukavemeti göstermiştir. SEM sonuçlarına göre küçük YFC parçacıklarının tamamen reaksiyona girerken, büyük parçacıkların ise alkali aktivatörlerle kısmen reaksiyona girerek kompozit bir mikroyapı oluşmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

Toprak (2011), termik santral taban külünün alkali aktivasyonu ile üretilen jeopolimer **harçların** birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları, jeopolimer **hamurların** priz süreleri ve hacim sabitlikleri belirlenmiştir. Ayrıca sülfat, asit, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklılıkları incelenmiştir. Sonuç olarak %12 Na<sub>2</sub>O ve %8 SiO<sub>2</sub> içeren alkali çözelti ile aktive edilen jeopolimer **hamurlar** 20 °C’de 28 günde 25-30 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır.

Kantarıcı (2013), Elazığ ferrokrom cürufu Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH aktivatörleri ve dere agregası ile kırma kum kullanılarak **jeopolimer beton** numuneler üretmiştir. Bu numunelerin basınç dayanımları, bazı fiziksel özellikleri, yangın dayanımları ve mikro yapıları incelenmiştir. Bu betonları kıyaslamak amacıyla da normal PÇ’li betonlar üretilmiştir. Bu sonuçlara göre Elazığ ferrokrom cürufu ile üretilen beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları normal PÇ’li betonlara göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca yangın sonrası basınç dayanımları kontrol betonlarına göre artmıştır. En düşük dayanımlar ise 700 °C’de elde edilmiştir.

Yaddollahi (2013), **pomzayı** çimento inceliğinde öğüttükten sonra farklı oranlarda silika modülü, Na<sub>2</sub>O ve s/b oranlarında dokuz farklı jeopolimer **hamur** üretmiş ve kür uygulamıştır. En yüksek dayanımlı hamurdan üretilen **harcın** mukavemeti ve **betonun** yüksek sıcaklıktan önce ve sonra birim ağırlıkları, ultra ses geçiş hızı, basınç mukavemetleri, ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklıklardaki mukavemet değişiklikleri incelenmiştir. Sonuç olarak

en yüksek basınç dayanımı 0,68 silika modülü ve 0,36 su/bağlayıcı oranına sahip **hamur** numunelerde elde edilmiştir. 28 günde 40,28 MPa dayanımında jeopolimer üretilmiş ve bu jeopolimerlerin harç ve beton üretiminde kullanılabileceğini ve çimentoya alternatif bağlayıcı olabileceği vurgulanmıştır.

Yonar (2014), **UK**, 0-8 ve 8-16 mm arası dere agregası ve farklı oranlarda PVA fiber kullanarak farklı sıcaklıklarda termal kürlere tabi tutulan **jeopolimer betonlar** üretmiştir. Üretilen numuneler 28 gün boyunca hava kürüne tabi tutulmuş, ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak ultrasonik ses geçirgenliği, basınç dayanımı ve eğilme-çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak numunelere uygulanan sıcaklıklar arttıkça basınç dayanımı, ultrasonik geçiş hızı ve eğilme çekme dayanımı çoğu numunede azalmıştır. En yüksek basınç dayanımı 60 °C'de ısıtılma tabi tutulan numuneden 45 MPa olarak ölçülmüştür.

Aykut (2015), **Bayburt taşı** ve **traverten atıkları** ile NaOH aktivatörü jeopolimerizasyon yöntemi kullanılarak yüksek dayanıma sahip tuğla üretilmesi amaçlamıştır. Bayburt taşı ve traverten hamurların 5M ve 10M NaOH çözeltisi ile belirli oranlarda karıştırılarak **hamur** üretmiştir. Hamur numuneler 20, 40 ve 80 oC sıcaklıklarda sertleştirilmiş ve standart priz deneyi, eğilme ve basınç dayanımı, aşınma dayanımı, su emme, birim hacim ağırlık ile yüksek sıcaklık gibi deneyler numuneler üzerinde gerçekleştirmiştir. Deneyler sonunda üretilen jeopolimer tuğlanın geleneksel tuğlaya göre CO2 salınımının sıfır olduğunu, dayanımının daha yüksek olduğunu ve daha ekonomik olduğunu belirtmiştir.

Görür (2015), **F sınıfı UK**, CEN referans kumu, NaOH ve su kullanarak farklı derişim oranlarında NaOH ile karıştırıp **jeopolimer harçlar** üretmiştir. Bu harçlar üzerinde farklı sıcaklık ve kür süreleri uygulanmıştır. Harçlar üzerinde işlenebilirlik ve priz süresi tayinleri yapılmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre en uygun derişim belirlenmiş ve bu derişim üzerinde hazırlanan karışım üzerinde farklı sıcaklık ve kür süreleri uygulanarak mekanik ve durabilite özellikleri tespit edilmiştir. Bu harçlar PÇ ile üretilen karışımlar ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak 100 MPa üzerinde dayanım ve PÇ'ye göre daha iyi durabilite özelliklerine sahip jeopolimer harçlar elde edilmiştir.

Girgin (2016), **UK**, **metakaolin** ve alkali aktivatörler kullanarak jeopolimer **hamurlar** üretmiştir. Üretilen numunelere farklı sıcaklık ve sürelerde kür uygulanmıştır. Jeopolimer hamurların basınç dayanım değerleri belirlenmiş ve numuneler 24 saat su tankında bekletilmiştir. Ardından su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak kür süresi arttıkça porozite ve su emme oranlarının azaldığı görülmüştür. Yoğunluk değerleri kür süresine bağlı olarak artış göstermiştir. Basınç

dayanımları 8,4 MPa- 28,9 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Görünür porozite oranları %26,9 - %45,5 ve su emme oranları %16,7- %38,7 arasında değişmiştir.

Tekin (2016), **Mermer, traverten ve doğal puzolan atıkları** ile alkali aktivatör olarak 1M, 5M ve 10M NaOH çözeltisi kullanarak jeopolimer kompozit **hamurları** üretmiştir. Hamurlar 20, 45 ve 75 °C etüvlerde 24 saat bırakılmıştır. Ardından **hamurlar** ayrı ayrı nemli ve kuru ortamda tutulmuştur. Dayanım testleri 2, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Hamurların nemli ortamda basınç dayanımları zamana bağlı olarak azalmış ancak kuru ortamda ise artmıştır. En yüksek dayanım 90 günde 10M derişimle üretilen ve 20 °C'de kürlenene hamurdan 46 MPa olarak ölçülmüştür.

Öksüzer (2016), farklı oranlarda **mermer atıkları** ile **Bayburt taşı** 10M derişimli NaOH ile aktive etmiş ve jeopolimer **hamurlar** üretmiştir. Farklı inceliklerde kullanılan Bayburt taşı ve mermer atıkları farklı oranlarda polipropilen mikro lifli ve lifsiz hamur karışımlar üretmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme, kapiler su emme, aşınma direnci, ısıl iletkenlik ve yüksek sıcaklığın dayanım üzerindeki etkileri test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda %60 Bayburt taşı kullanılarak 90 günde lifsiz kompozitte yaklaşık 34 MPa, lifli kompozitlerde 39 MPa basınç dayanımına ulaşılmış ve görünür porozite değerleri yaklaşık %25-45 oranlarında olan jeopolimer kompozit hamurların genel olarak su direncinin zayıf olduğu belirlenmiştir.

Omeed Ali (2016), **UK**'ün alkali ve çimento ile birlikte **harçlar** üzerinde alkali aktivasyonu incelemiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Farklı oranlarda UK ve PÇ kendi aralarında **harçlara** ikame ettirilerek iki farklı kür durumunda kür edilmiştir. İlk kür yönteminde kalıp içinde ve kalıptan çıkarılan numuneler sıcaklığı 20 °C ve bağlı nemi %60 olan laboratuvar ortamında deney gününe kadar bekletilmiştir. Diğer kür yöntemi ise kalıplarıyla beraber 75 °C etüvde 24 saat bekletilmişlerdir. Ayrıca işlenebilirlik deneyi, eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak UK oranı arttıkça işlenebilirlik özelliği ve NaOH ile aktive edilmiş, sıcak kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı artmıştır. Ayrıca Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren karışımlar üzerine sıcak kür uygulamasının olumlu sonuç verdiği görülmüştür.

Öksüzer ve Tekin (2016), **traverten ve zeolit** içerikli doğal puzolanın 10M NaOH çözeltisi ile jeopolimer **hamurlar** hazırlanmıştır. NaOH çözeltisi toplam toz hacminde 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 oranlarında denemeler gerçekleştirilmiştir. açık havada kürlenene hamurların 2, 7, 28, 56, 90, 180 ve 360 gün yaşlarında basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. 10M NaOH konsantrasyonuna sahip NaOH çözeltisi belirli bir orana kadar basınç dayanımında artış sağlarken nihai dayanımlarda ise belirli bir orandan sonra

düşüş meydana getirmiştir. En yüksek dayanım 360 gün sonunda 35,63 MPa olarak ölçülmüştür ve nihai dayanımlarda çözelti oranının düşük olduğu hamurlar daha yüksek dayanım vermiştir.

Öksüzer ve Tekin (2016, Eylül ), Bayburt bölgesinden elde edilen **zeolit** içerikli **doğal puzolan atıkları** ve **traverten atıkları** kullanılarak jeopolimer kompozit **hamurlar** üretilmiştir. Deneysel çalışmada 5M ve 10M derişime sahip NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Hamurlar  $\pm 2$  °C havada kürlenmiştir. 7, 28 ve 90 gün yaşında hamurlar üzerinde basınç dayanımı gerçekleştirilmiştir. En yüksek basınç dayanımı sonucuna 90 gün yaşında 10M NaOH çözeltisi ile hazırlanan hamurdan 46 MPa olarak ölçülmüştür.

Gümüş (2016), **metakaolin** ve **UK**'ün  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH ile 0-5 mm, 5-15mm, 15-22 mm agrega sınıflarıyla farklı oranlarda karıştırılarak **betonlar** üretilmiştir. Numuneler laboratuvar ortamında bir gün bekletildikten sonra kür işlemleri yapılmıştır. jeopolimer betonların; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünen yoğunluk gibi fiziksel özellikleri ultrases değerleri 7 günlük örnekler üzerinde belirlenmiştir. Sonuç olarak kür sürelerinin uzaması ve UK oranının artmasıyla basınç dayanımları artmıştır.

Ekinci (2017), Nevşehir yöresinden temin edilen **volkanik tüfle** hazırlanan jeopolimer **betonlar** iki farklı grup halinde üretilmiştir. İlk grup silis modülü 0.8 ve 0.6, ikinci grup ise 10, 12, 14 ve 16 M NaOH kullanılarak aktive edilmiştir. Farklı kür sıcaklıkları ve alkali s/b oranı kullanılmıştır. İki grupta da en yüksek dayanımı veren betonlara farklı oranlarda nano silika, mikro silika ve stiren-bütadien lateks katkısının etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, NaOH kullanılarak aktive edilen jeopolimer betonların silis kullanılarak aktive edilen betonlara göre daha yüksek basınç dayanımı değerleri olduğunu ortaya çıkarmıştır. SEM analizi ve su emme deney sonuçları, mikro silika ilavesinin kompakt bir yapının oluşmasına yardımcı olduğunu göstermiştir.

Nikolov, Rostovsky ve Nugteren (2017), **doğal zeolit** ile NaOH,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  kullanarak jeopolimer **hamur** ve **harçlar** üretilmiştir. Sertleştirilmiş hamurlar geleneksel yöntemler ile mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Malzemelerin yapıları ve bileşenleri XRD, DTA, TGA ve SEM ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre farklı aktivatörler kullanılarak üretilen zeolitlerin çözünmeleri ve katı jeopolimer yapı oluşumu görülmüştür. Basınç dayanımları düşük olmasına rağmen oda sıcaklığında kürlenmiş ve kaplama olarak kullanılan doğal zeolit esaslı jeopolimerler betona çok iyi yapışma özelliği göstermektedirler.

Bingöl (2018), öğütülmüş granüle **YFC**'yi  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile aktive ederek mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada farklı sodyum oranları **harç** karışımına farklı

şekillerde ilave edilmiştir. deneyler sonucunda optimum sodyum (%4, %8 ve %12) oranlarında **harçlar** üretildikten sonra 24 saat 75 °C’de etüvde, 28 gün suda ve 28 gün havada kür etmiştir. sertleşen numuneler üzerinde rötre, aşınma, asit ve baz etkisi, karbonatlaşma, hızlı klor geçirimsizliği, yüksek sıcaklık, ıslanma-kuruma etkileri, birim hacim ağırlık, kılcal su emme ve işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. jeopolimer harçların sonuçlarını kıyaslamak üzere PÇ’li (CEM I 42.5 R) kontrol harçları üretmiştir. Sonuç olarak jeopolimer harçların kontrol harçlarına göre çok daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir.

Ibrahim, Johari, Rahman, Maslehuddin ve Mohamed (2018), alkali-aktif edilmiş **betonun** geliştirilmesini sağlamak için **doğal puzolan** ile nanosilika %7,5 oranında yer değiştirilerek 180 gün oda sıcaklığında kür ile basınç dayanım gelişimini izlemiştir. Aynı zamanda eğilme dayanımı ve elastisite modülü de gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucuna göre nanosilika içermeyen **doğal puzolanlı betonların** alkali aktif edilmiş beton üretiminde öncü malzeme olarak kullanılabilirliği görülmüştür. Bununla birlikte nanosilika içeren alkali aktif edilmiş betonlarda mekanik ve mikroyapısal özelliklerde kayda değer artışlar görülmüştür. %5 ve %7,5 nanosilika ilavesiyle üstün mekanik özellikler ve öncü materyallerin polimerik bileşiklere daha büyük dönüşümüne bağlı olarak yoğun mikro yapılar gözlemlenmiştir. Araştırma yeşil yapı malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesi için nano malzemelerin önemini vurgulamaktadır.

Özer (2018), **doğal zeolit** ve aktivatör olarak NaOH birleştirilerek jeopolimer bağlayıcı **hamur** madde üretmiştir. Üç farklı agrega/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Numuneler 72 saat 90 °C ısı küründe tutulmuş ve CEM I 42.5 N yerine farklı oranlarda doğal zeolit kullanılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları, birim hacim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri ve mikro yapıları (XRD, SEM-EDX) incelenmiştir. Sonuçlara göre zeolit oranı arttıkça viskozite genel olarak artmıştır. Agregat/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımlarında artış görülmüştür. %10 zeolit ve Agregat/bağlayıcı oranı 1,75 olan numunelerin en yüksek basınç dayanımı 78,5 MPa olarak ölçülmüştür. Zeolit miktarı arttıkça da birim hacim ağırlıklarında azalmalar meydana gelmiştir.

Şahin (2018), **Bayburt beyaz tüfü, sarı tüfü ve yeşil tüfü** farklı boyutlarda öğütmüş ve çimentoya %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında ikame ederek **harç** numuneler elde etmiştir. Harçlar üzerinde standart kıvam, priz başlangıcı ve bitişi ile genişleme deneyleri ve 2, 28, 90 ve 270 gün yaşında eğilme ve basınç deneyleri ile 2,28 ve 90 gün yaşında su emme, kapiler su emme deneyleri gerçekleştirmiştir. 90 gün yaşında da yüksek sıcaklık etkisini gözlemlenmiştir. En yüksek dayanımı 270 günde 70,4 MPa olarak ölçülmüştür.



## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### YÖNTEM

#### Materyal

##### Bayburt Taşı.

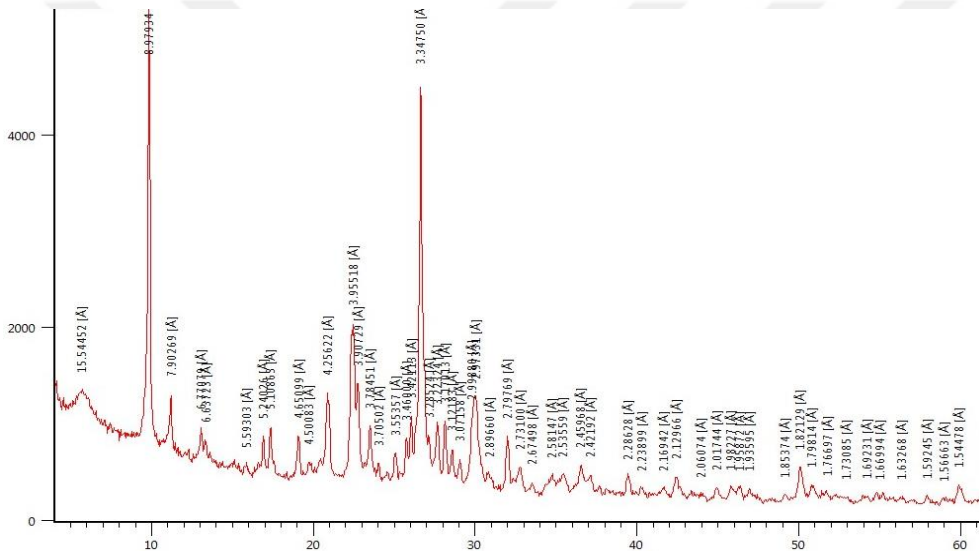
Bayburt ili ve çevresinde bulunan ve “Bayburt Taşı” olarak adlandırılan Bayburt tüf (BT) ve tüfitleri şehir ekonomisinde ticari bir öneme sahiptir (Önenç, Altınbaş, Erkanol, & Tulukçe, 2005). Tüfler bölgede yaygın olarak kullanılan endüstriyel hammadde kaynaklarındandır. Kolay işlenebilmesi ve hafif olmasından dolayı yapı taşı olarak özellikle tarihi eser onarımında ve camii yapımında sıklıkla kullanılmaktadır.

Tüfler çoğunlukla sarımsı-krem ve krem renklerindedir. Ancak bazı yerlerde oldukça çatlaklı olup ayrışmışlardır. Ayrışma gerçekleşen yüzeyler sarımsı kahve renklerindedir. Taş ocakları içerisinde bazı bölgelerde tüf içlerinde yeşil renge (zeolit ve klorit) beneklerin olduğu ve kayacın yoğunlaştığı bazı yerlerde zeolitlenme ve kloritlenme nedeniyle tamamen yeşil tonlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. İnce taneli olan tüflerde klorit mineralinin yağışlar nedeniyle yıkanması ve klorit mineralinin bozulmasından dolayı ikincil küçük gözenekte görünümüne ortaya çıkmıştır (Arslan, Aslan, & Abdurrahman, 2005).

Taşın rezervi, tahmini olarak blok verimi ile çarpıldığında 453.382 ton civarındadır ve bu rakam işletilebilir rezervi göstermektedir. Günün teknolojisine göre üretim yapmak ve işletmelerde kayıpların azaltılması BT'nin veriminin artırılabilceğini göstermektedir. Çalışmalarla BT'nin görünür rezervinin yılda 15.000 ton üretim yapmakta olan 10 işletmeyi 20 yıl kadar besleyecek potansiyelin olduğu belirlenmiştir (Kaçar, 2014). Gevenli, Toptepe, Gümüşdamla, Konakdağ ve Sırataşlar sahalarında yapılan çalışmalar sonucunda BT'nin tahmini görünür rezervleri yaklaşık 2,5 milyon tondur. Bayburt bölgesinde yer alan tüflerin üç türü vardır. Bunlar renklerine göre beyaz, sarı ve yeşil olmak üzere sınıflandırılmıştır. Çalışmada beyaz ve yeşil tüf kullanılmıştır.

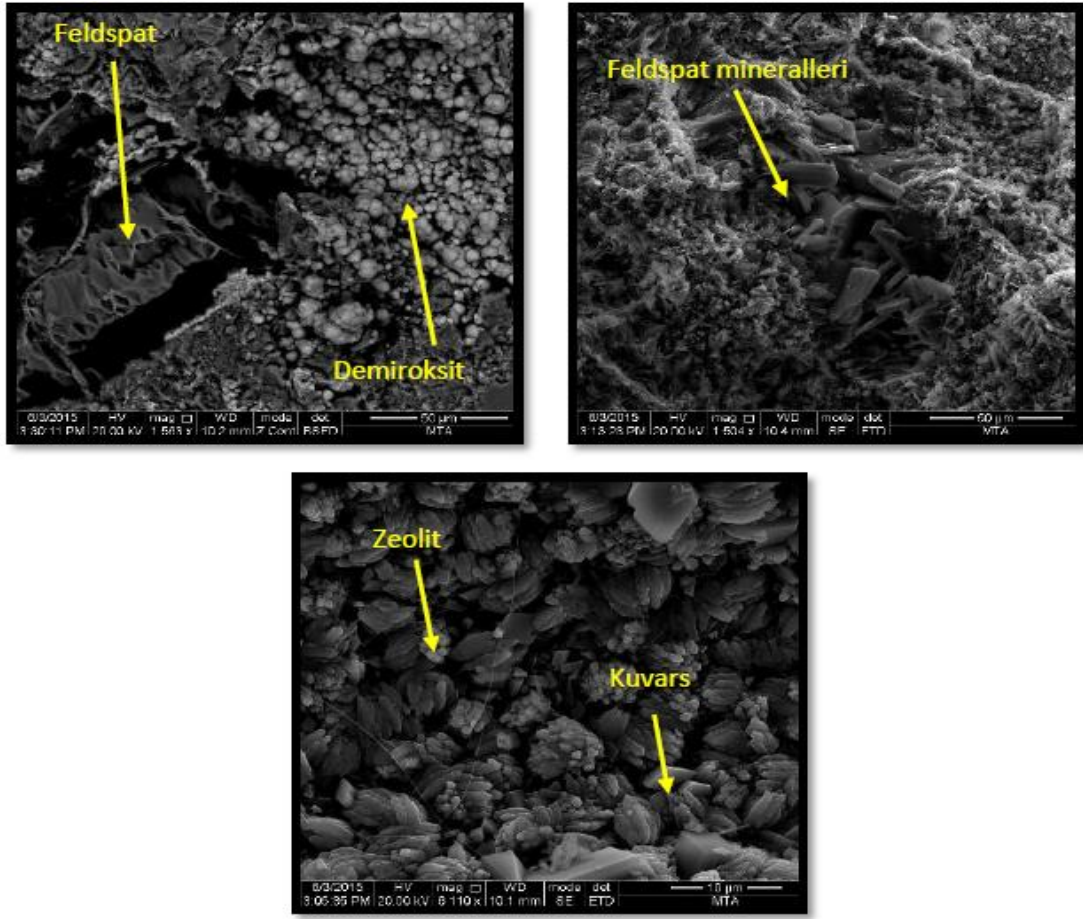
- **Bayburt Beyaz Tüfü (BBT)**

Bayburt Beyaz Tüfü (BBT) riyo-dasitik bileşimli vitrik tüf olup, kayaç içerisinde volkanik malzemeden oluşan bir matriks ve matriks içerisinde kuvars, plajiolaz, biyotit ve kaya parçaları bulunmaktadır (Yılmaz, 2015). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü mineraloji ve petrografi laboratuvarında gerçekleştiren analizlerde; BBT makroskobik tanımlamalara göre porfirik dokulu, alkali feldspat, kuvars, zeolit ve opak minerallerden oluşmuş ve zeolit formdaki klinoptilolit, höylandit benzeri yapılara sahiptir. Aynı zamanda bu tanımlamaya göre zeolitik tüf olarak da adlandırılmış, sarımsı gri renkte ince dokulu ve masif bir yapıya sahiptir. BBT'nin kimyasal özellikleri Tablo 1'de fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri Tablo 2'de ve mineralojik özellikleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. BBT'nin mineralojik analizi (XRD analizi)

Şekil 6'da verilen XRD analizine göre yüksek oranda amorf yapıya ve zeolit minerali bakımından zengin hamur içerisinde kuvars ve feldspat mineralleri kırıklı ve yer yer köşeli olarak gözlenmiştir. İnce kesitlerde akma dokusu ve volkanik camsı parçalar da yapı içerisinde görülmüştür. Şekil 7'de gösterilen SEM görüntülerinde de yoğun kuvars ve zeolit mineralleri görülmektedir.



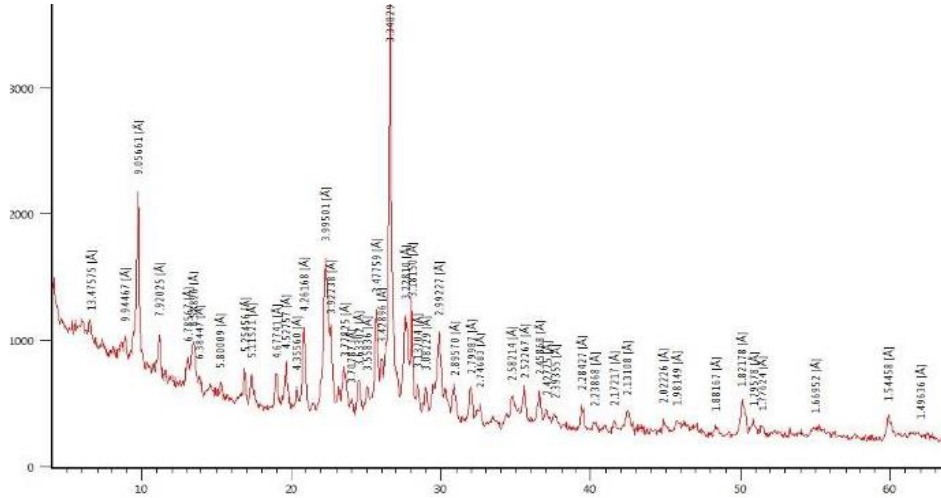
Şekil 7. BBT'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi)

- **Bayburt Yeşil Tüfü (BYT)**

Bayburt Yeşil Tüfü (BYT), doluluk oranı, çekme ve basınç mukavemet değerleri, sertliği ve sıklığı ile Bayburt'un ve Türkiye'de bulunan diğer tüflerden farklı özellikler göstermektedir. BYT riyolitik bir tüf olup, kayaç içinde volkanik malzemelerden oluşan bir matriks ve bu matriks içerisinde kuvars, plajiyoklaz ve kloritleşmiş biyotit mineralleri bulunmaktadır (Kudaka, 2014). Yoğunluğu düşük, ağırlıkça da su emme oranı yüksektir. Ancak buna karşın aşınma ve eğilme dirençleri daha iyidir (Yılmaz, 2015). BYT'nin kimyasal özellikleri de Tablo 1'de, fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri Tablo 2'de ve mineralojik özellikleri Şekil 8'de verilmiştir.

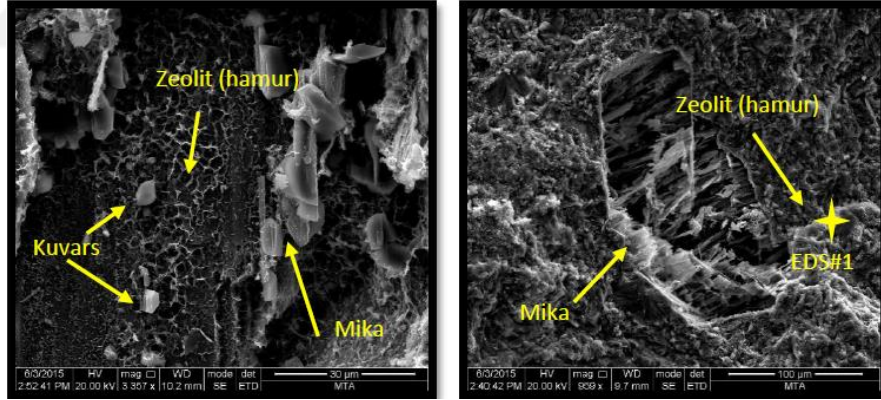
MTA mineraloji ve petrografi laboratuvarında BYT üzerinde gerçekleştiren analizlere göre: BYT grimsi yeşil renkte, masif yapılı, ince taneli bir makroskobik yapıya sahiptir. Dokusu porfiriktir ve içerisinde kuvars, biyotit, plajiyoklas, opak mineraller, zeolit ve alkali feldspat bulundurmaktadır. Tipik tüf dokulu kayaçta hamur içerisinde dağınık halde

fenokristaller gözlemlenmektedir. Hamurun tamamı neredeyse zeolit kristallerinden oluşmuş ve biyotit mineralleri de akma dokularında gözlemlenmiştir.

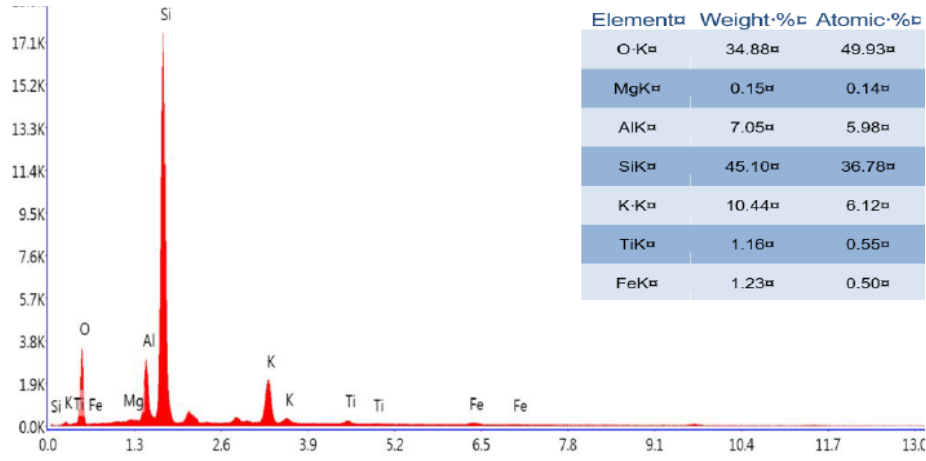


Şekil 8. BYT'nin mineralojik analizi (XRD analizi)

Şekil 8'de verilen XRD analizine göre yoğun olarak zeolit, kuvars, mika grubu ve feldspat mineralleri görülmüştür. Şekil 9'te verilen SEM görüntüleri ile bu bilgiler desteklenmektedir. Şekil 9'da alınan noktadan EDS analizi yapılmış ve Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. BYT'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi)



Şekil 10. BYT'nin SEM görüntüsü üzerinde verilen EDS #1 noktasının analizi

Tablo 1. Bayburt Tüfit Yapılı Taşların Kimyasal Özellikleri

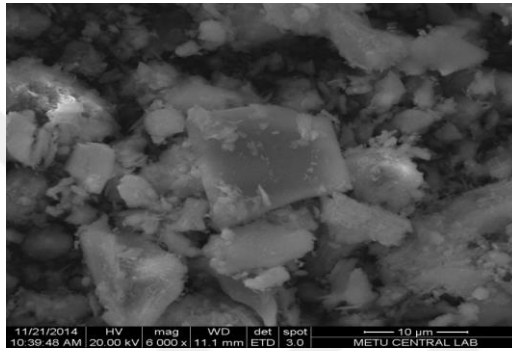
Oksitler	MT
SiO <sub>2</sub>	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.32
CaO	53.68
MgO	0.22
SO <sub>3</sub>	-
Na <sub>2</sub> O	-
K <sub>2</sub> O	-
Toplam	99.28
K.K.	43.80

Tablo 2. Bayburt İli Mermer Ve Tüfit Yapılı Taşların Fiziksel Ve Teknolojik Özellikleri

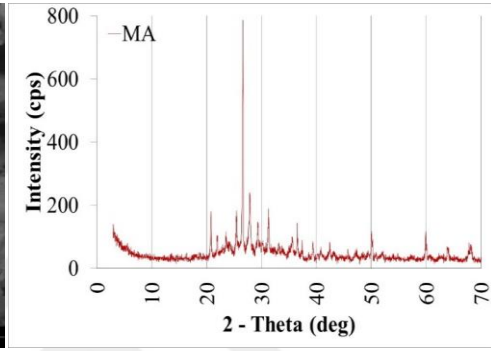
Özellikler	BBT	BYT	Mermer
Özgül ağırlık (Taş blok halde)	2,37	2,74	2,72
Sertlik (Mohs)	4-5	3-4	2,5-3
Görünür porozite (%)	20,6	13,3	0,197
Basınç dayanımı (MPa)	44,1	96,8	127,2
Darbe dayanımı (MPa)	0,8	3,7	3,44
Eğilme dayanımı (MPa)	12,3	22,9	4,3
Ortalama Aşınma Dayanımı (cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> )	25	26,4	-

### Mermer Atıkları (Traverten Dokulu).

Mermerin ticari ve bilimsel olarak iki farklı tanımı yapılmaktadır. Bilimsel olarak mermer; başkalaşım (metamorfizm) süreci geçiren kalker dolomit gibi karbonat bileşimli kayalara denmektedir. Bu çalışmada kullanılan mermer Bayburt ili çevresinde faaliyet gösteren mermer kesim atölyelerinden paledyen olarak temin edilmiştir. Traverten dokulu mermer atıkları için SEM (mikro yapı analizi), XRF (oksidal analiz) ve XRD (minerolojik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bayburt ili traverteninin mikroskobik ve minerolojik analiz sonuçları Şekil 11 - Şekil 12’de ve oksidal analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 11. Ögütülmüş mermerin SEM görüntüsü



Şekil 12. EDS analizi

### Su.

Bu çalışmada şehir şebekesinden alınan musluk suyu kullanılmıştır (içilebilir su). Bayburt şebeke suyunun kimyasal analizi Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Kullanılan Kür Suyunun Kimyasal Özelliği

Kimyasal İçerik	Karışım Suyu	Kimyasal İçerik	Karışım 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 (µg/L)	0,23
Demir (µg/L)	<0,05	Flor (µg/L)	0,8
Kadmiyum (µg/L))	0,143	Sülfat (µg/L)	22
Renk	3		

## **Aktivatörler.**

### ***Kireç.***

Deneysel çalışmalarda söndürülmüş teknik kireç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) olarak bilinen toz halde, yüksek reaktiviteye sahip (min. %90  $\text{Ca(OH)}_2$ ), yoğunluğu yaklaşık  $1.5 \text{ g/cm}^3$  olan 90 mikron üstünde en fazla %5 kalıntı bırakan kireç kullanılmıştır.

### ***NaOH.***

Deneysel çalışmalarda Solvay (Fr) marka pelet halde en az %99,9 NaOH içeren kostik adıyla da bilinen malzeme kullanılmıştır.

### ***Sodyum Meta Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).***

Silmaco silikatlarından elde edilen sodyum meta silikatın modülü (ağırlıkça  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ )(Ms)=1.2 olan sıvı formu kullanılmıştır. Sodyum meta silikatın teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. *Sodyum Metasilikatın Teknik Özellikleri (40 – 42 Bome)*

Kimyasal formül	$\text{Na}_2\text{SiO}_3.n\text{H}_2\text{O}$
Derece	40 – 42°
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	1.396 – 1.418
$\text{Na}_2\text{O}$ (% ağırlıkça)	11.3 – 12.9
$\text{SiO}_2$ (% ağırlıkça)	22.6 – 25.8
Modül ( $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ )	1:2

## **Metot**

Deneysel çalışma 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla:

- Aşama 1: Malzeme temini ve Öğütme
- Aşama 2: Ön deneyler
- Aşama 3: Nihai deneyler

## Aşama 1: Malzeme Temini ve Öğütme.

İlk olarak deneysel çalışmada kullanılacak olan malzemeler Bayburt ili içerisinde faaliyet gösteren taş ocaklarından temin edilmiş ve daha sonra laboratuvar tipi konkasörde kırılarak öğütme işlemi için uygun boyutlara ( $D_{max}$ : 2 mm) indirgenmiştir. Çalışmada alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH pelet halde ve  $Na_2SiO_3$  ise sıvı 40 bome olarak bilinen şekilde temin edilmiştir.

Yatay eksenli bilyeli değirmende Mermer, BBT ve BYT %90'ı 100 mikrondan geçecek şekilde öğütülmüştür. Ardından tane dağılımı ve özgül yüzey analizleri Master sizer 3000 (Malvern) ile Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Toz malzemelerin özgül ağırlık deneyleri Bayburt Üniversitesi Yapı Malzemeleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin  $D_{90}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{10}$  verileri ile özgül yüzey ve özgül ağırlık verileri Tablo 5'te verilmiştir. (Ek 1)

Tablo 5. BBT, BYT Ve Mermerin Özgül Ağırlık İle Özgül Yüzey Verileri

Hammadde	Özgül Ağırlık ( $g/cm^3$ )	Özgül Yüzey (BET) ( $cm^2/g$ )	İncelik (Elek analizi) ( $\mu m$ )		
			$D_{90}$	$D_{50}$	$D_{10}$
BBT	2,43	11237	61,3	16,6	3,94
BYT	2,61	8420	83,0	26,4	9,82
Mermer	2,71	2645	100	35	3,5

Daha sonra öğütülen toz malzemeler kapalı kaplar içerisine alınmış ve tüm taşlarla mermer atıklarının öğütme işlemi tamamlandıktan sonra 24 saat 105 derecelik etüvde kuruması (nemini tamamen kaybetmesi) için bekletilmiştir. 24 saatin sonunda toz malzemeler etüvün içinde soğutulmuş ve sonra da poşetlenerek ortamdan nem alması engellenecek şekilde poşetlerin ağzı sıkıca bağlanıp kapalı kaplar içerisinde deney gününe kadar muhafaza edilmiştir.

## Aşama 2: Ön Deneyler.

### Çözelti oranı ve Sıcaklık.

Çalışmanın deneysel aşamasında kullanılmak üzere öncelikle çözelti hazırlanmıştır. Çözelti hazırlanırken ilk olarak karışım miktarları önceden belirlenen 40-42 bome sıvı  $Na_2SiO_3$



çözeltisi ile karışım tasarımında belirtilen miktarlarda NaOH karıştırılmıştır. Oda sıcaklığında hazırlanan çözeltinin sıcaklığı hızlı bir şekilde yaklaşık  $85\pm 5$  °C'ye kadar yükselmektedir. 10 M – 20 M NaOH derişimli çözelti hazırlığında oluşan bu sıcaklık yükselmesinden dolayı çözelti sıcaklık parametresini değerlendirmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada nihai çalışmada üretilmesi planlanan kompozitlerden seçilen bir grup üzerinde 20 °C, 50 °C ve 80 °C çözelti sıcaklıklarında karışımlar hazırlanarak basınç dayanımı, priz süresi ve rötre ölçümünü amaçlayan denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu serilerin her biri 7 dökümden oluşmaktadır. Toplamda 21 döküm yapılmıştır. Ön deneme karışım tasarımı Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. *Farklı Sıcaklık Ve Ç/T Oranında Üretilen Hamurların Karışım Tasarımı*

No	Ref. No	Ref. No	Bileşenlerin oranları (ağırlıkça)					Ç/T	Çözelti Sıcaklığı (°C)
			BBT	MT	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Su		
1	A109	A209	0,24	0,29	0,10	0,33	0,04	0,9	20
2	A108	A208	0,25	0,30	0,10	0,31	0,04	0,8	
3	A107	A207	0,27	0,32	0,09	0,28	0,04	0,7	
4	A106	A206	0,28	0,34	0,08	0,26	0,03	0,6	
5	A105	A205	0,30	0,36	0,07	0,23	0,03	0,5	
6	A104	A204	0,33	0,39	0,06	0,20	0,03	0,4	
7	A103	A203	0,35	0,42	0,05	0,16	0,02	0,3	
8	B109	B209	0,24	0,29	0,10	0,33	0,04	0,9	50
9	B108	B208	0,25	0,30	0,10	0,31	0,04	0,8	
10	B107	B207	0,27	0,32	0,09	0,28	0,04	0,7	
11	B106	B206	0,28	0,34	0,08	0,26	0,03	0,6	
12	B105	B205	0,30	0,36	0,07	0,23	0,03	0,5	
13	B104	B204	0,33	0,39	0,06	0,20	0,03	0,4	
14	B103	B203	0,35	0,42	0,05	0,16	0,02	0,3	
15	C109	C209	0,24	0,29	0,10	0,33	0,04	0,9	80
16	C108	C208	0,25	0,30	0,10	0,31	0,04	0,8	
17	C107	C207	0,27	0,32	0,09	0,28	0,04	0,7	
18	C106	C206	0,28	0,34	0,08	0,26	0,03	0,6	
19	C105	C205	0,30	0,36	0,07	0,23	0,03	0,5	
20	C104	C204	0,33	0,39	0,06	0,20	0,03	0,4	
21	C103	C203	0,35	0,42	0,05	0,16	0,02	0,3	

Farklı ortam sıcaklıklarında ve nemde dökülen hamurların hem dayanımda hem de karbonatlaşmada ortaya çıkan farklı sonuçlarından dolayı bu çalışma iki farklı proseste tekrar gerçekleştirilmiştir. Birinci döküm metodunda; ilk olarak karışım tasarımlarında belirtilen miktarlarda sırasıyla Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, su ve pelet halde NaOH mekanik karıştırıcıda 5 dk süreyle (NaOH tamamen çözülene kadar) karıştırılmıştır. Bu sırada çözeltinin pH'ı 14 ve sıcaklığı

yaklaşık  $83\pm 3$  °C olmaktadır. Çalışma 3 farklı sıcaklıktaki çözeltilerle gerçekleştirileceği için üretilen çözelti beherle birlikte su içinde 50 °C ve 20 °C sıcaklığa gelene kadar bekletilmiştir. Çözeltinin kristallenmesini önlemek için sık sık karıştırma işlemi yapılmıştır. Karıştırma işleminin birinci prosesinde ilk önce çözelti+BT karışımı 45 saniye karıştırıldıktan sonra MT eklenmiş ve sırasıyla 30 s yavaş hızda (140 RPM), 90 s hızlı olarak (280 RPM) karıştırılmıştır. Sonrasında karışım durdurularak elle hamur bileşenler yeniden harmanlanmıştır. Son olarak mikserde 30 s süreyle hamur malzeme 280 rpm'de karıştırıldıktan sonra üretilen hamur önceden yağlanmış olan 50x50x50 mm boyutlu metal kalıplara yerleştirilmiştir.

İkinci döküm metodunda ise; ilk olarak karışım tasarımında 20 mol olarak belirlenen NaOH+su çözeltisi NaOH su içerisinde çözülene kadar mekanik karıştırıcıda 5 dk süreyle karıştırılmıştır. Bu sırada çözelti pH:14 ve sıcaklığı yaklaşık 80 °C olmaktadır. Çözelti hazırlığında sıcaklık sabitleme süreci birinci aşamadaki gibi yapılmıştır. Karıştırma işleminin ilk aşamasında sırasıyla  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve BT mikserde dökülmüştür.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ +BT karışımı 45 s 140 rpm'de karıştırılmıştır. Sonrasında MT eklenmiş ve sırasıyla da 30 s 140 rpm, 30 s 280 rpm karıştırılmıştır. Karışım durdurularak elle hamur bileşenler yeniden harmanlanmıştır. Son olarak 20 mol NaOH+su çözeltisi karışım tasarımında belirtilen miktarda hamura eklenmiştir. 45 s 140 rpm ve 45 s 280 rpm karıştırıldıktan sonra karışım işlemi durdurulmuştur. Elle hamur bileşenler tekrar harmanlanmış ve önceden hazırlanmış olan 20 mol NaOH+su çözeltisi ağırlıkça istenilen miktarda tartıldıktan sonra hamur, önceden yağlanmış 50x50x50 mm boyutlu metal kalıplara yerleştirilmiştir. Tabloda yapılan kodlamaya göre A, B ve C harfleri sırasıyla 20, 50 ve 80 °C çözelti sıcaklıklarını belirtmektedir. 1 rakamı ise 1. Prosesi göstermektedir (Bulgular ve yorum kısmında ikinci procesi belirtmek için 2 rakamı da kullanılmıştır). Sondaki sayılar sırasıyla ağırlıkça Ç/T oranlarını belirtmektedir. Ayrıca planlamada NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı ağırlıkça 0,44 olarak sabit tutulmuştur. Hacimce katı bileşenlerin birbirlerine oranları %50:%50 olarak planlanmıştır. Toplam çözeltinin NaOH molaritesi 11,6 olarak hesaplanmıştır.

DeneySEL çalışmalarda kullanılan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ +NaOH çözeltisinin NaOH derişiminin çok yüksek olması sebebiyle (8M – 22M) birkaç farklı çözelti hazırlık metodu uygulanmıştır. Bu metotlar çözelti hazırlanma metodunu değiştirmek, karışım sırasında bileşenlerin sırasını değiştirmek ve çözelti ile katı madde ekleme sırasını değiştirmekten ibarettir. Bu kapsamda birinci denemede öncelikle çözeltinin sıcaklığı ortam sıcaklığına kadar düşürülmüştür. NaOH derişimleri kontrol etmek amacıyla Ortam sıcaklığındaki çözeltiye belli miktarlarda su eklenmiş ve ardından çözelti karıştırılmıştır. Ortam sıcaklığındaki çözelti karıştırmanın

etkisiyle tekrar ısıtarak 45 °C üzerine çıkmıştır. Çözelti tekrar soğutulduğunda, çözeltinin hızla kristalleştiği görülmüş ve döküm için gerekli olan akışkanlığını kaybedince çözelti hazırlanış şeklinin değiştirilmesi planlanmıştır. İkinci denemede  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ +Su birlikte karıştırılmış ve ardından pelet haldeki NaOH çözeltiye eklenmiştir. NaOH'in tamamen çözündüğüne emin olunduktan sonra çözelti soğumaya bırakılmıştır. Çözelti sıcaklığı yaklaşık  $50\pm 5$  °C olduğunda mikserde dökülmüştür. Ancak su miktarı ve malzemelerin mikserde dökülme sırasının da dayanım ve işlenebilirlik üzerinde önemli bir parametre olduğu gözlemlendikten sonra çözelti hazırlanışı en yüksek dayanımlı numune üretimine göre şekillendirilmiştir. Böylece önce en yüksek dayanımı üreten çözeltinin NaOH ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  molarite derişim değeri belirlenmiştir. Belirlenen molarite değerine bağlı olarak NaOH+su ile istenilen molaritede çözeltiler hazırlanmış ve karışım tasarımında bu çözeltiler öncelikle  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile karıştırılmıştır. (Ek2)

İlk dökümlerde mikserdeki çözeltiye ( $(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}+\text{su})$  veya  $(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{Ca}(\text{OH})_2)$ ) öğütülmüş toz halde Bayburt taşı (BT) eklenmiş ve 30 s yavaş hızda (140 rpm) karıştırılmıştır. Mikserde karıştırılan malzeme daha sonra yaklaşık olarak 10 saniye kadar kaşıkla harmanlanmış ve mikserin kenarlarına yapışan toz malzemenin karışımın içine katılması sağlanmıştır. Ardından atık mermer tozu (MT) karışıma eklenip 30 s tekrar yavaş hızda (140 rpm) karıştırılmıştır. Ardından mikserin hızı iki kat arttırılmıştır (280 rpm). Bu hızda 30 s karışıma devam edilmiştir. Üretilen hamurlar hızlı bir şekilde priz almaya başladıkları için kıvam tayini deneyi çoğu numunede yapılamamıştır. Mikserdeki karışım derhal bekletilmeden vicat halkasının ve küp kalıpların içine aktarılmış ve priz süreleri her bir dakikada bir defa olacak şekilde ölçüm alınarak tayin edilmiştir.

Sonraki deneme dökümlerinde karışım şekli ve sırası değiştirildiği için hamurların karışım süreleri de değişmiştir. Buna göre  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltisinin içerisine BT eklendikten sonra mikser 45 s yavaş hızda karıştırılmıştır. Daha sonra MT eklenmiş ve mikser 30 s yavaş ve 30 s hızlı karıştırılmıştır. NaOH çözeltisi de eklenip 45 s yavaş hızda ve 45 saniye de hızlı karıştırılmıştır. Bazı hamurlar mikserde karışım halindeyken katılma başladığı ve yerleştiremeyeceği gözlemlendiğinde karışım süreleri belli oranlarda değiştirilmiştir. Karışım süresi tamamlanan hamurlar hızlı bir şekilde kalıplara ve vicat halkasına dökülmüştür.

#### ***Kür ön deneme çalışmaları.***

Bu çalışmada BBT bileşeni ile  $50\times 50\times 50$  mm'lik küp kalıplarda hamur numuneler üretilmiştir. Hamur numunelerinin 2, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımları ölçülmüştür. 5 farklı kür ortamı belirlenmiş ve numunelerden bir kısmının 2, bir kısmının ise 7 gün

yaşlarında ortam koşulları değiştirilmiştir. Böylece hamur numunelerin bir kısmı 2 gün, bir kısmı 7 gün ve geri kalanı ise 28 gün kür ortamlarında tutulmuştur. Numunelerin buldukları ortamlar ve kırım süreleri şu şekildedir:

- A: kuru ortam (%20-25 nem)
- B: orta nemli ortam (%45-55 nem)
- C: %90 nemli ortam
- D: 50 °C etüv kürü ve %90 nemli ortam
- E: 80 °C etüv kürü ve %90 nemli ortam
- a: 2. gün basınç dayanımı deneyi
- b: 7. gün basınç dayanımı deneyi
- c: 28. gün basınç dayanımı deneyi
- 0: tamamen aynı ortam kürü
- 2: 2 gün kür süresi
- 7: 7 gün kür süresi
- 1:kuru (%30 nem), 2:nemli (%50 nem)

#### ***Molarite ön deneme çalışması.***

Bu çalışmada farklı NaOH derişimlerinin (molarite bazında) hamurlar üzerinde priz süresi, işlenebilirlik ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Buna göre 10 M, 15 M ve 20 M sulu çözeltiler hazırlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ön dökümlerde en yüksek basınç dayanımı alınan hamur üzerinde yapılan çalışmanın tasarımı Tablo 7’de verilmiştir. Bu çalışmada çözelti ön dökümlerden farklı olarak hazırlanmıştır. Buna göre istenilen molarite için su+NaOH öncelikli olarak bir kapta hazırlanmıştır. NaOH+su çözeltisi ardından  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile karıştırılmış ve soğutularak hamur üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada TS-EN 196-1’e göre 2 ve 28 gün yaşında basınç dayanımı alınmıştır. Deneysel çalışmalarda toplam katı bileşenlerin hacimce oranı BT:MT 0,5:0,5 olarak, NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı 0,45 olarak, Ç/T: 0,90 olarak ve NaOH molaritesi toplam çözelti için 11,6 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7. *Farklı Molariteye Sahip Hamurların Malzeme Karışım Miktarları*

No	Ref. No	Molarite	Ağırlıkça bileşen oranları				
			BBT	MT	NaO	NaSi	Su
22	M1	10	0,15	0,15	0,07	0,35	0,27
23	M2	15	0,15	0,15	0,07	0,35	0,27
24	M3	20	0,15	0,15	0,07	0,35	0,27

## **NaOH aktivatörü ile üretilen alkali-aktive edilmiş hamurlar için ön deneyler.**

### ***Taze hamur deneyleri.***

#### *BBT ile üretilen hamurların priz sürelerinin belirlenmesi:*

Çalışmada üretilen alkali-aktive hamurların priz başlangıcı ve bitiş sürelerini kontrol edebilmek için Bayburt Üniversitesi 20±2 °C sıcaklıkta ve %30±5 bağıl neme sahip Yapı Malzemeleri laboratuvarında TS EN 196-3'e göre priz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada amaç sıvı Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> etkisinde çok hızlı gerçekleşen katılaşmadan dolayı oluşan işlenebilirlik kaybını en aza indirmektir. Bu amaçla çözelti karışımına toplam malzeme ağırlığının %0, %5, %10, %15'i oranlarında su ekleyerek aktivatör etkisinin azaltılması düşünülmüştür. Bu planlamada aynı zamanda çözelti/toz (Ç/T) malzeme oranı da 1,4'ten 1,1'e düşürülmüştür. Böylece su/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı ile Ç/T oranının priz sürelerine etkisi de denenmiştir. Bu amaçla Tablo 7'de farklı karışım tasarımları oluşturulmuştur. Ç/T oranı aynı olan hamurlarda katı bileşenlerin oranları sabit tutulurken NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranları %5, %10 ve %15 azaltılarak tekrar priz sürelerine etkileri değerlendirilmiştir. Tablo 8'de yine karışım tasarımında çözülden gelen NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı da 0,66 – 0,55 ve 0,45 olmak üzere üç farklı oranın priz sürelerine etkisi de değerlendirilmiştir. İlâveten katı bileşenler hacimce 5 farklı oranda BBT:MT planlaması yapılmıştır. BT:MT oranları sırasıyla 0,50:0,50 – 0,60:0,40 – 0,80:0,20 ve 1,00:0 olmak üzere 4 farklı BT:MT oranının da etkileri çalışılmıştır. Böylece toplam 82 grup numune üretilmiştir. Deneysel çalışmada TS EN 196-3'e göre Vicat iğnesi hamur tabanından 5-7 mm yukarıda olduğunda priz başlangıcı ve hamura batmadığı anda da priz bitiş süresi olarak kaydedilmiştir.

Öncelikle deney şemasını belirlemek amacıyla tüm serilerden 15'er döküm yapılmıştır ve buna göre parametreler belirlenmiştir. 4x4x16 boyutunda üretilen hamurların 2 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımları, molariteleri, Ç/T oranı, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı, su miktarı ve sıcaklık küre gibi parametreler dikkate alınarak şema netleştirilmiştir. Tüm priz süresi kontrol amaçlı gerçekleştirilen ön denemelerde bir önceki çözelti sıcaklığı etkisi deneylerinde elde edilen verilere göre priz süresini istenilen düzeye çekebilmek ve işlenebilirliği arttırmak amacıyla çözelti sıcaklığı 50±5 °C sıcaklıkta karışımlar hazırlanmıştır.

Tablo 8. BBT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının Malzeme Karışım Miktarları

No	Ref. No	Toplam katı (hacimce)		NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ağırlıkça)	Malzemelerin ağırlıkça oranları					Ç/T (Ağırlıkça)
		BBT	MT		BBT	MT	NaO	NaSi	Su	
25	B5aN1	0,5	0,5	0,66	0,20	0,23	0,15	0,32	0,10	1,3
26	B5aN2	0,5	0,5	0,66	0,21	0,24	0,16	0,34	0,05	1,2
27	B5aN3	0,5	0,5	0,66	0,22	0,25	0,16	0,37	0,00	1,1
28	B5aN4	0,5	0,5	0,66	0,22	0,25	0,15	0,33	0,05	1,1
29	B5aN5	0,5	0,5	0,66	0,22	0,25	0,13	0,30	0,10	1,1
30	B5bN1	0,5	0,5	0,55	0,20	0,23	0,13	0,34	0,10	1,3
31	B5bN2	0,5	0,5	0,55	0,21	0,24	0,14	0,36	0,05	1,2
32	B5bN3	0,5	0,5	0,55	0,22	0,25	0,14	0,39	0,00	1,1
33	B5bN4	0,5	0,5	0,55	0,22	0,25	0,13	0,34	0,05	1,1
34	B5bN5	0,5	0,5	0,55	0,22	0,25	0,12	0,31	0,10	1,1
35	B5cN1	0,5	0,5	0,45	0,20	0,23	0,11	0,35	0,10	1,3
36	B5cN2	0,5	0,5	0,45	0,21	0,24	0,12	0,38	0,05	1,2
37	B5cN2a	0,5	0,5	0,45						
38	B5cN2b	0,5	0,5	0,45						
39	B5cN3	0,5	0,5	0,45	0,22	0,25	0,12	0,41	0,00	1,1
40	B5bN4	0,5	0,5	0,45	0,22	0,25	0,11	0,36	0,05	1,1
41	B5cN4a	0,5	0,5	0,45						
42	B5cN4b	0,5	0,5	0,45						
43	B5cN5	0,5	0,5	0,45	0,22	0,25	0,10	0,33	0,10	1,1
44	B5dN1	0,5	0,5	0,35	0,21	0,24	0,1	0,41	0,05	1,2
45	B5dN1a	0,5	0,5	0,35	0,22	0,25	0,09	0,39	0,04	1,1
46	B5dN2	0,5	0,5	0,35	0,22	0,25	0,09	0,39	0,05	1,1
47	B5dN2a	0,5	0,5	0,35	0,24	0,27	0,09	0,37	0,05	1,0
48	B5dN3	0,5	0,5	0,35	0,22	0,25	0,08	0,35	0,09	1,1
49	B6aN1	0,6	0,4	0,66	0,25	0,19	0,15	0,31	0,10	1,3
50	B6aN2	0,6	0,4	0,66	0,26	0,19	0,16	0,34	0,05	1,2
51	B6aN3	0,6	0,4	0,66	0,27	0,20	0,16	0,37	0,00	1,1
52	B6aN4	0,6	0,4	0,66	0,27	0,20	0,15	0,33	0,05	1,1
53	B6aN5	0,6	0,4	0,66	0,27	0,20	0,13	0,30	0,10	1,1
54	B6bN1	0,6	0,4	0,55	0,25	0,19	0,13	0,33	0,10	1,3
55	B6bN2	0,6	0,4	0,55	0,26	0,19	0,14	0,36	0,05	1,2
56	B6bN3	0,6	0,4	0,55	0,27	0,20	0,14	0,39	0,00	1,1
57	B6bN4	0,6	0,4	0,55	0,27	0,20	0,13	0,35	0,05	1,1
58	B6bN5	0,6	0,4	0,55	0,27	0,20	0,12	0,31	0,10	1,1
59	B6cN1	0,6	0,4	0,45	0,25	0,19	0,11	0,36	0,10	1,3
60	B6cN2	0,6	0,4	0,45	0,26	0,19	0,12	0,38	0,05	1,2
61	B6cN2a									
62	B6cN3	0,6	0,4	0,45	0,27	0,20	0,12	0,41	0,00	1,1
63	B6cN4	0,6	0,4	0,45	0,27	0,20	0,11	0,36	0,05	1,1
64	B6cN4a									

Tablo 8. BBT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının Malzeme Karışım

Miktarları(devamı)

65	B6cN5	0,6	0,4	0,45	0,27	0,20	0,10	0,32	0,10	1,1
66	B6dN1	0,6	0,4	0,35	0,26	0,2	0,1	0,4	0,05	1,2
67	B6dN1a	0,6	0,4	0,35	0,27	0,2	0,09	0,39	0,04	1,1
68	B6dN1b	0,6	0,4	0,35	0,27	0,2	0,09	0,38	0,05	1,1
69	B6dN1c	0,6	0,4	0,35	0,29	0,22	0,09	0,37	0,05	1,0
70	B6dN2	0,6	0,4	0,35	0,3	0,23	0,08	0,34	0,04	1,1
71	B8aN1	0,8	0,2	0,66	0,34	0,10	0,15	0,31	0,10	1,3
72	B8aN2	0,8	0,2	0,66	0,36	0,10	0,16	0,33	0,05	1,2
73	B8aN3	0,8	0,2	0,66	0,37	0,10	0,16	0,36	0,00	1,1
74	B8aN4	0,8	0,2	0,66	0,37	0,10	0,15	0,33	0,05	1,1
75	B8aN5	0,8	0,2	0,66	0,37	0,11	0,13	0,29	0,10	1,1
76	B8bN1	0,8	0,2	0,55	0,34	0,10	0,13	0,33	0,10	1,3
77	B8bN2	0,8	0,2	0,55	0,36	0,10	0,14	0,35	0,05	1,2
78	B8bN3	0,8	0,2	0,55	0,37	0,10	0,14	0,39	0,00	1,1
79	B8bN4	0,8	0,2	0,55	0,37	0,10	0,13	0,35	0,05	1,1
80	B8bN5	0,8	0,2	0,55	0,37	0,10	0,12	0,31	0,10	1,1
81	B8cN1	0,8	0,2	0,45	0,34	0,10	0,11	0,35	0,10	1,3
82	B8cN2	0,8	0,2	0,45	0,35	0,10	0,12	0,38	0,05	1,2
83	B8cN2a	0,8	0,2	0,45						
84	B8cN3	0,8	0,2	0,45	0,37	0,10	0,12	0,40	0,00	1,1
85	B8cN4	0,8	0,2	0,45	0,37	0,10	0,11	0,36	0,05	1,1
86	B8cN4a	0,8	0,2	0,45						
87	B8cN5	0,8	0,2	0,45	0,37	0,10	0,10	0,33	0,10	1,1
88	B1aN1	1	0	0,66	0,44	0,00	0,15	0,31	0,10	1,3
89	B1aN2	1	0	0,66	0,45	0,00	0,16	0,34	0,05	1,2
90	B1aN3	1	0	0,66	0,48	0,00	0,16	0,36	0,00	1,1
91	B1aN4	1	0	0,66	0,48	0,00	0,15	0,33	0,05	1,1
92	B1aN5	1	0	0,66	0,48	0,00	0,13	0,29	0,10	1,1
93	B1bN1	1	0	0,55	0,43	0,00	0,13	0,34	0,10	1,3
94	B1bN2	1	0	0,55	0,45	0,00	0,14	0,36	0,05	1,2
95	B1bN3	1	0	0,55	0,48	0,00	0,14	0,38	0,00	1,1
96	B1bN4	1	0	0,55	0,48	0,00	0,13	0,35	0,05	1,1
97	B1bN5	1	0	0,55	0,48	0,00	0,12	0,30	0,10	1,1
98	B1cN1	1	0	0,45	0,43	0,00	0,11	0,36	0,10	1,3
99	B1cN2	1	0	0,45	0,45	0,00	0,12	0,38	0,05	1,2
100	B1cN2a	1	0							
101	B1cN3	1	0	0,45	0,48	0,00	0,12	0,40	0,00	1,1
102	B1cN4	1	0	0,45	0,48	0,00	0,11	0,36	0,05	1,1
103	B1cN4a	1	0							
104	B1cN5	1	0	0,45	0,48	0,00	0,10	0,33	0,10	1,1

Tablo 8’de “B” BBT’yi, “5, 6, 8, 1” terimleri BBT’nin katı bileşen hacmine oranını, “a” NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,66 için, “b” NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,55 için ve “c” NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,45 için kodlanmıştır. “N” terimi NaOH birincil aktivatörünü ve sondaki 1 – 5 numaraları döküm sayısını belirlemektedir. Ayrıca basınç dayanımı yüksek olan hamurların bir alt serisi daha üretilmiştir. Bu seriler; NaSi yerine su katılarak ve Ç/T oranları azaltılarak düşük sıcaklıklarda

(45 ±2 °C) kıvamları belirlenmiştir. Hamur tasarımları aynı olmuş sadece çözelti miktarı değiştirilmiştir. Her bir seride 15 hamur numune üretilmiştir. Bu dökümlerde kıvamları akıcı olanlar belirlenmiştir. Literatürde en yüksek basınç dayanımını sağlayan NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 2/3 (0,66) olarak belirtilmektedir. Bu sebeple çalışmanın ön üretim planlaması da bu veri esas alınarak oluşturulmuştur. Bazı serilerin molarite ve Ç/T oranları artırılarak optimizasyon çalışması genişletilmiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak BYT ile üretilen alkali-aktive edilmiş hamurların priz sürelerini belirlemek amacıyla TS EN 196-3'e göre taze hamur deneyi gerçekleştirilmiştir.

*BYT ile üretilen hamurların priz sürelerinin belirlenmesi:*

Tablo 9. BYT İle Üretilen Hamur Ön Deneme Malzeme Karışım Miktarları

No	Ref.	Toplam katı madde (hacimce)		NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ağırlıkça)	Ağırlık (%)				Su	M (M)	Ç/T (Ağırlıkça)
		BYT	MT		BYT	MT	Na	NaS			
105	YAaN1	0,4	0,6	0,66	0,10	0,16	0,12	0,39	0,23	22,1	1,10
106	YAbN2	0,4	0,6	0,55	0,10	0,16	0,10	0,40	0,24	18,5	1,10
107	YAcN3	0,4	0,6	0,45	0,10	0,15	0,08	0,41	0,25	15,1	1,10
108	YAdN4	0,4	0,6	0,35	0,10	0,15	0,07	0,43	0,26	11,5	1,10
109	YAeN5	0,4	0,6	0,25	0,11	0,16	0,05	0,43	0,26	8,2	1,00
110	YBaN1	0,5	0,5	0,66	0,13	0,13	0,12	0,39	0,23	22,1	1,10
111	YBbN2	0,5	0,5	0,55	0,13	0,13	0,10	0,40	0,24	18,5	1,10
112	YBcN3	0,5	0,5	0,45	0,13	0,13	0,08	0,41	0,25	15,1	1,10
113	YBdN4	0,5	0,5	0,35	0,13	0,13	0,07	0,43	0,26	11,5	1,10
114	YBeN5	0,5	0,5	0,25	0,12	0,12	0,05	0,44	0,26	9,2	1,10
115	YCaN1	0,55	0,45	0,66	0,15	0,12	0,12	0,39	0,23	22,1	1,10
116	YCbN2	0,55	0,45	0,55	0,14	0,12	0,10	0,40	0,24	18,5	1,10
117	YCeN3	0,55	0,45	0,45	0,14	0,12	0,08	0,41	0,25	15,1	1,10
118	YCdN4	0,55	0,45	0,35	0,14	0,11	0,07	0,43	0,26	11,5	1,10
119	YDaN1	0,6	0,4	0,66	0,16	0,11	0,12	0,39	0,23	22,1	1,10
120	YDbN2	0,6	0,4	0,55	0,16	0,10	0,10	0,40	0,24	18,5	1,10
121	YDcN3	0,6	0,4	0,45	0,15	0,10	0,08	0,41	0,25	15,1	1,10
122	YDdN4	0,6	0,4	0,35	0,15	0,10	0,07	0,43	0,26	11,5	1,10
123	YFaN1	1	0	0,66	0,27	0,00	0,12	0,39	0,23	22,1	1,10
124	YFbN2a	1	0	0,55	0,26	0,00	0,10	0,40	0,24	18,5	1,10
125	YFbN2b	1	0	0,55	0,30	0,00	0,09	0,38	0,23	18,5	0,90
126	YFbN2c	1	0	0,55	0,36	0,00	0,09	0,35	0,21	18,5	0,70
127	YFcN3	1	0	0,45	0,26	0,00	0,08	0,41	0,25	15,1	1,10
128	YFdN4	1	0	0,35	0,25	0,00	0,07	0,43	0,26	11,5	1,10

BYT ile yapılan çalışmanın ön dökümleri bir önceki BBT'nin ön denemeleri ile benzer planlanmıştır. Ancak bu deneme planlamasında NaOH molaritesinin priz süreleri,



işlenebilirlik ve basınç dayanımlarına etkisi temel alınmıştır. Bu kapsamda 22 M – 11 M derişim aralığında NaOH çözeltisi ile karışımlar hazırlanmıştır. Ön denemelerde üretilen hamurların karışım tasarımları Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 9’daki adlandırmada “ “Y” terimi BYT’yi, “N” terimi NaOH aktivatörünü, “A, B, C, D ve F” terimleri sırasıyla BYT:MT oranlarını (0,40:0,60, 0,50:0,50, 0,55:0,45, 0,60:0,40, 1:0 olarak) göstermektedir. “a, b, c, d ve e” harfleri NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranını göstermektedir, bu oranlar sırasıyla 0,66 - 0,55 - 0,45, 0,35 ve 0,25 olarak planlanmıştır. 1,2,3,4 ve 5 rakamları sırasıyla 22,1M, 18,5M, 15,1M, 11,5M ve 8,2M’yi temsil etmektedir. Karışımlarda molarite hesabı sistemdeki tüm su bileşenlerini dikkate alarak hesaplanmıştır.

### ***Sertleşmiş Hamur Deneyleri.***

Bu çalışmada BBT ve BYT için TS EN 196-1’e göre basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Tablo 8 ve 9’da oluşturulan karışım tasarımları kullanılarak her bir grup karışım tasarımından 50x50x50 mm boyutlu 6’şar adet hamur üretilmiştir. BBT ve BYT ile üretilen hamurlarda 2 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunların yanı sıra hamurların erken süreçte su emme dirençleri olup olmadığı da denemiştir. böylece hangi tasarımın başarılı sonuç vereceği ve tasarıma optimizasyon yapılması gerektiği belirlenmiştir.

### **Aşama 3: Nihai Deneyler.**

#### ***NaOH aktivatörü ile üretilen alkali-aktive edilmiş hamurların deneysel çalışmaları.***

Bu çalışmada ön dökümleri gerçekleştirilen ve yüksek dayanım elde edilen hamur serilerinden Ç/T oranları değiştirilerek 50x50x50 cm boyutunda tekrar hamurlar üretilmiştir. Hamur karışım prosesi ön dökümle aynı tutulmuştur. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranları ağırlıkça 1/3, 2/3, 1/4, 4/9 ve 5/9 olarak belirlenmiştir. Karışım sırası, süresi ve sıcaklığı da en yüksek basınç dayanımı oluşturan ön dökümlerle aynıdır. Taze hamurlar üzerinde öncelikle yayılma tablası deneyleri gerçekleştirilmiş ve sertleşmiş hamurlar üzerinde 2, 28 ve 90 gün yaşlarında TS EN 1097’ye göre su emme ve TS EN 196-1’e göre basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler ön dökümlerdeki gibi yapılmış ve sonuçları Bölüm 4’te tartışılmıştır. BBT ile dökülen hamurların karışım tasarımı Tablo 10’da, BYT ile dökülen hamurların karışım tasarımı Tablo 11’de verilmiştir.

#### ***Yayılma Tablası Deneyi.***

Deney ASTM C230’a göre gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde ilk olarak yayılma sehpası yağlanmış ve üzerine kesik koni şekilli bakır kap koyulmuştur. Bakır kabın yüksekliği 5 cm,

taban çapı 10 ve üst çapı 7 cm'dir. Hamurlar kıvamlarına göre tek ya da iki seferde bakır kap içerisine doldurulmuştur. İki kademe doldurulan hamurlar üzerine tokmakla 25 defa vurulmuş ve yerleşmesi sağlanmıştır. Hamur yerleştirildikten sonra bakır kap kaldırılmış ve ters çevrilerek hamurun yanına bırakılıp çökme miktarı ölçülmüştür. Ardından sehpanın alt tarafındaki kol 25 defa çevrilmiş ve hamurun birbirine dik iki tarafından yayılma değerleri okunup ortalaması alınmıştır. Yayılma ve çökme miktarları Bölüm 4'te tartışılmıştır.

#### *Su Emme Deneyi.*

Bu deneyde üretilen hamurlar 24 saat su içerisinde bırakılmıştır. 24 saatin sonunda hamurlar sudan çıkarılmış ve yüzeyleri bir kuru bezle kurutulduktan sonra tartılmıştır (A1). Ardından suyun içinde ağırlıkları tartılmış (A2) ve son olarak 105 °C sıcaklıkta etüvde 24 saat bekletilmiştir. Kurutulmuş hamurların ağırlıkları (A0) alınıp su emme oranları Eşitlik 4'e göre, görünür porozite Eşitlik 5'e göre ve kuru birim hacim ağırlık Eşitlik 6'ya göre hesaplanmıştır. Sonuçlar Bölüm 4'te tartışılmıştır.

$$W (\%) = \frac{A1 - A0}{A0} \times 100 \quad (\text{Eşitlik 4})$$

$$P_g: \delta \times W \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$BHA = \frac{A0}{A1 - A2} \quad (\text{Eşitlik 6})$$

W: Su emme oranı

A0: Etüv kurusu ağırlığı

A1: Suyu doymuş kuru yüzey ağırlığı

A2: Su içerisindeki ağırlığı

P<sub>g</sub>: Görünür porozite

δ: Özgül Ağırlık

Deneysel çalışmalarda üretilen hamurların karışım tasarımlarında yüksek basınç dayanımı elde edebilmek amacıyla bileşen oranları deneme üretimleri de dikkate alınarak planlanmıştır. Planlamada NaOH üretimlerinin ilk iki yüksek NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranına sahip tasarımda (2/3 ve 5/9) çözeltilerde ilave su kullanılmıştır. Bunun sebebi hem priz süresini döküm süresince kontrol etmek hem de işlenebilirliği optimum düzeyde tutmak içindir. Karışımda MT olmayan %100 BBT ile gerçekleştirilen üretimlerde hiçbir oranda su katkısı yapılmamıştır. Böylece en yüksek dayanım limitleri elde edilmeye çalışılmıştır. ÇT oranı tüm hamur üretimlerinde 1,10 olarak sabit tutulmuştur.

Tablo 10. NaOH Aktivatörlü BBT İle Üretilen Hamurların Karışım Tasarımları

Ref. No	Toplam katı hacimce		NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ağırlıkça)	Bileşen oranları (ağırlıkça)					NaOH (M)
	BBT	MT		BBT	BT	NaOH	NaSi	Su	
BNA1a	0,5	0,5	2/3	0,22	0,25	0,15	0,33	0,05	16,5
BNA2b	0,5	0,5	5/9	0,22	0,25	0,13	0,34	0,05	14,0
BNA3c	0,5	0,5	4/9	0,22	0,25	0,12	0,40	0,00	15,1
BNA4d	0,5	0,5	1/3	0,22	0,25	0,10	0,42	0,00	11,5
BNA5e	0,5	0,5	1/4	0,22	0,25	0,08	0,45	0,00	8,2
BNB1a	0,55	0,45	2/3	0,25	0,23	0,15	0,33	0,05	16,5
BNB2b	0,55	0,45	5/9	0,25	0,23	0,13	0,35	0,05	14,0
BNB3c	0,55	0,45	4/9	0,25	0,23	0,12	0,40	0,00	15,1
BNB4d	0,55	0,45	1/3	0,25	0,23	0,10	0,42	0,00	11,5
BNB5c	0,55	0,45	1/4	0,25	0,23	0,08	0,45	0,00	8,2
BNC1a	0,6	0,4	2/3	0,27	0,20	0,15	0,33	0,05	16,5
BNC2b	0,6	0,4	5/9	0,27	0,20	0,13	0,34	0,05	14,0
BNC3c	0,6	0,4	4/9	0,27	0,20	0,12	0,40	0,00	15,1
BNC4d	0,6	0,4	1/3	0,27	0,20	0,10	0,42	0,00	11,5
BNC5e	0,6	0,4	1/4	0,27	0,20	0,08	0,45	0,00	8,2
BND6a	1	0	2/3	0,48	0,00	0,16	0,36	0,00	22,1
BND7b	1	0	5/9	0,48	0,00	0,14	0,38	0,00	18,5
BND3c	1	0	4/9	0,48	0,00	0,12	0,40	0,00	15,1
BND4d	1	0	1/3	0,48	0,00	0,10	0,42	0,00	11,5
BND5e	1	0	1/4	0,48	0,00	0,08	0,45	0,00	8,2

Tablo 10 ve Tablo 11'deki referans kodlamalarında baştaki harf olan B: BBT'yi, Y: BYT'yi, ikinci kodlama harfi N: NaOH aktivatörünü, üçüncü kodlama harfi A, B, C ve D harfleri sırasıyla BBT:MT oranlarını (A: %50:%50, B: %55:%45, C: %60:%40 ve D: %100:%0 bağlayıcı oranlarını) göstermektedir. Dördüncü kodlama 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 rakamları molariteyi (1: 16,5 M, 2: 14 M, 3: 15,1 M, 4: 11,5 M, 5: 8,2 M, 6:22,1 M ve 7: 18,5 M) belirtmektedir. Beşinci kodlama notasyonu a, b, c, d ve e harfleri ise NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranını belirtmektedir ve bunlar sırasıyla 0,66, 0,55, 0,45, 0,35 ve 0,25 değerlerini göstermektedir. BYT ile üretilen hamurlarda da sadece 1 ve 2 rakamı farklı olarak 22,1 ve 18,1 M derişimi göstermektedir. BYT ile üretilen hamurlardan C ve D serisinde 7 ve 9 rakamları ise sırasıyla 0,7 ve 0,9 Ç/T oranlarını göstermektedir

Tablo 11. NaOH Aktivatörlü BYT İle Üretilen Hamurların Karışım Tasarımları

Ref. No	Toplam katı hacimce		NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ağırlıkça)	Bileşen oranları (ağırlıkça)					NaOH (M)	Ç/T
	BYT	MT		BYT	MT	NaOH	NaSi	Su		
YNA1a	0,5	0,5	0,66	0,13	0,13	0,12	0,39	0,23	22,1	1,1
YNA2b	0,5	0,5	0,55	0,13	0,13	0,10	0,40	0,24	18,5	1,1
YNA3c	0,5	0,5	0,45	0,13	0,13	0,08	0,41	0,25	15,1	1,1
YNA4d	0,5	0,5	0,35	0,12	0,12	0,07	0,43	0,26	11,5	1,1
YNA5e	0,5	0,5	0,25	0,12	0,12	0,05	0,44	0,26	8,2	1,1
YNB1a	0,55	0,45	0,66	0,15	0,12	0,12	0,39	0,23	22,1	1,1
YNB2b	0,55	0,45	0,55	0,14	0,12	0,10	0,40	0,24	18,5	1,1
YNB3c	0,55	0,45	0,45	0,14	0,12	0,08	0,41	0,25	15,1	1,1
YNB4d	0,55	0,45	0,35	0,14	0,11	0,07	0,43	0,26	11,5	1,1
YNB5e	0,55	0,45	0,25	0,14	0,11	0,05	0,44	0,26	8,2	1,1
YNC1a	0,6	0,4	0,66	0,16	0,11	0,12	0,39	0,23	22,1	1,1
YNC2b	0,6	0,4	0,55	0,16	0,10	0,10	0,40	0,24	18,5	1,1
YNC3c	0,6	0,4	0,45	0,15	0,10	0,08	0,41	0,25	15,1	1,1
YNC4d_9	0,6	0,4	0,35	0,17	0,12	0,06	0,40	0,24	11,5	0,9
YNC4d_7	0,6	0,4	0,35	0,21	0,14	0,06	0,37	0,22	11,5	0,7
YNC5e	0,6	0,4	0,25	0,15	0,10	0,05	0,44	0,26	8,2	1,1
YND1a_7	1	0	0,66	0,37	0,00	0,10	0,33	0,20	22,1	0,7
YND2b_9	1	0	0,55	0,30	0,00	0,09	0,38	0,23	18,5	0,9
YND2b_7	1	0	0,55	0,36	0,00	0,09	0,35	0,21	18,5	0,7
YND3c_7	1	0	0,45	0,35	0,00	0,07	0,36	0,22	15,1	0,7
YND4d_7	1	0	0,35	0,34	0,00	0,06	0,37	0,22	11,5	0,7

**Ca(OH)<sub>2</sub> (söndürülmüş kireç) aktivatörü ile üretilen alkali-aktive edilmiş hamurların deneysel çalışmaları.**

***Hamurların hazırlanması ve taze hamur deneyleri.***

Çalışmanın bu aşamasında NaOH yerine Ca(OH)<sub>2</sub> (söndürülmüş kireç) kullanılmıştır. Karışım tasarımı mümkün olduğunca NaOH ile hazırlanmış hamurların tasarımları ile aynı tutulmaya çalışılmıştır. Ancak söndürülmüş kireç Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içerisinde çözünmediğinden dolayı karışım prosesi buna göre bir miktar revize edilmiştir.

Tablo 12. Kireçli BBT İle Üretilen Hamurların Malzeme Karışım Miktarları

Ref. No	Toplam katı hacimce			Bileşen oranları (ağırlıkça)				Ç/T
	BBT	MT	Ca(OH) <sub>2</sub>	BBT	MT	Ca(OH) <sub>2</sub>	NaSi	
BCA1	0,5	0,2	0,30	0,14	0,06	0,21	0,58	1,40
BCA2	0,5	0,2	0,30	0,15	0,07	0,22	0,57	1,30
BCA3	0,5	0,2	0,30	0,16	0,07	0,23	0,54	1,20
BCA4	0,5	0,2	0,30	0,16	0,07	0,24	0,52	1,10
BCA5	0,5	0,2	0,30	0,17	0,08	0,25	0,50	1,00
BCB2	0,55	0,15	0,30	0,17	0,05	0,22	0,56	1,30
BCB3	0,55	0,15	0,30	0,17	0,05	0,23	0,54	1,20
BCB4	0,55	0,15	0,30	0,18	0,06	0,24	0,52	1,10
BCB5	0,55	0,15	0,30	0,19	0,06	0,25	0,50	1,00
BCB6	0,55	0,15	0,30	0,20	0,06	0,26	0,47	0,90
BCC2	0,6	0,1	0,30	0,18	0,03	0,22	0,57	1,30
BCC3	0,6	0,1	0,30	0,19	0,04	0,23	0,55	1,20
BCC4	0,6	0,1	0,30	0,20	0,04	0,24	0,52	1,10
BCC5	0,6	0,1	0,30	0,21	0,04	0,25	0,50	1,00
BCC6	0,6	0,1	0,30	0,22	0,04	0,26	0,47	0,90
BCD1	0,5	-	0,50	0,21	0,00	0,21	0,58	1,40
BCD2	0,5	-	0,50	0,22	0,00	0,22	0,56	1,30
BCD3	0,5	-	0,50	0,23	0,00	0,23	0,55	1,20
BCD4	0,5	-	0,50	0,24	0,00	0,24	0,52	1,10
BCD5	0,5	-	0,50	0,25	0,00	0,25	0,50	1,00

Kodlamaya göre; Y: BYT, C:Ca(OH)<sub>2</sub>, A, B, C ve D harfleri sırasıyla BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranlarını göstermektedir. Sırasıyla A 0,5:0,2:0,3 oranını, B 0,55:0,15:0,30 oranını, C 0,6:0,1:0,3 oranını ve D 0,5:0:0,5 oranını simgelemektedir. Harflerin yanındaki 1,2,3,4,5 ve 6 rakamları ise sırasıyla 1,40, 1,30, 1,20, 1,10, 1,0 ve 0,9 Ç/T oranlarını göstermektedir.

Karışım prosesi şöyle gerçekleştirilmiştir: öncelikle BT+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> bir dakika boyunca mikserde düşük hızda karıştırılmıştır. Ardından mikser indirilmiş ve kaşık yardımıyla karışım alt üst edilmiştir. Ardından MT eklenmiş ve 30 s daha tüm hamur birlikte karıştırılmıştır. Sonrasında hamur karışımı tekrar kaşık yardımıyla alt üst edilmiş ve Ca(OH)<sub>2</sub> karışıma ilave edilmiştir. Ca(OH)<sub>2</sub> karışıma ilave edildikten sonra 1 dk daha karıştırma işlemi

sürdürülmüştür. Bu sırada hamurun kıvamına göre karışımın son süreci zaman zaman değiştirilmiştir. Hazırlanan karışım hemen vicat halkasına ve kalıplara yerleştirilmiştir. TS EN 196-3'e göre standart priz deneyi uygulanmıştır.

Tablo 13. Kireçli BYT İle Üretilen Hamurların Malzeme Karışım Miktarları

Ref. No	Toplam katı hacimce			Bileşen oranları (ağırlıkça)				Ç/T
	BYT	MT	Ca(OH) <sub>2</sub>	BYT	MT	Ca(OH) <sub>2</sub>	NaSi	
YCA1	0,5	0,2	0,30	0,15	0,06	0,21	0,58	1,40
YCA2	0,5	0,2	0,30	0,15	0,06	0,22	0,56	1,30
YCA3	0,5	0,2	0,30	0,16	0,07	0,23	0,55	1,20
YCA4	0,5	0,2	0,30	0,17	0,07	0,24	0,52	1,10
YCA5	0,5	0,2	0,30	0,18	0,07	0,25	0,50	1,00
YCB2	0,55	0,15	0,30	0,17	0,05	0,22	0,56	1,30
YCB3	0,55	0,15	0,30	0,18	0,05	0,23	0,55	1,20
YCB4	0,55	0,15	0,30	0,19	0,05	0,24	0,52	1,10
YCB5	0,55	0,15	0,30	0,20	0,05	0,25	0,50	1,00
YCB6	0,55	0,15	0,30	0,21	0,05	0,26	0,48	0,90
YCC2	0,6	0,1	0,30	0,19	0,03	0,22	0,57	1,30
YCC3	0,6	0,1	0,30	0,19	0,03	0,23	0,55	1,20
YCC4	0,6	0,1	0,30	0,20	0,03	0,24	0,52	1,10
YCC5	0,6	0,1	0,30	0,21	0,03	0,25	0,50	1,00
YCC6	0,6	0,1	0,30	0,22	0,03	0,26	0,48	0,90
YCD1	0,5		0,50	0,21	0,00	0,21	0,58	1,40
YCD2	0,5		0,50	0,22	0,00	0,22	0,56	1,30
YCD3	0,5		0,50	0,23	0,00	0,23	0,54	1,20
YCD4	0,5		0,50	0,24	0,00	0,24	0,52	1,10
YCD5	0,5		0,50	0,25	0,00	0,25	0,50	1,00

Karışım tasarımlarının planlanmasında şu öngörüler uygulanmıştır:

- İlk olarak BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> miktarı belirlenmiştir. Buna göre 6 farklı tasarım oluşturulmuştur. BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranları; 0,5:0,2:0,3, 0,55:0,15:0,30, 0,6:0,1:0,30, 0,5:0:0,5 olarak belirlenmiştir.

- Aynı zamanda ağırlıkça Ç/T oranları da çalışılmıştır. Buna göre Ç/T oranları 1,40, 1,30, 1,20, 1,10, 1,0 ve 0,9 oranlarında belirlenmiştir.
- Aynı zamanda hamurların kuru ve nemli ortamlarda davranışları da incelenmiştir.

Bu hamurlar üzerinde yayılma tablası deneyi ve TS EN 196-3'e göre priz süresi tayini yapılmıştır. Bu deneyler NaOH aktivatörü ile yapılan deneylerle aynıdır. 2, 28 ve 90 gün yaşlarında da TS EN 196-1'e göre basınç dayanımı testi ve TS EN 196-3'e göre su emme deneyi uygulanmıştır. NaOH aktivatörü ile dökülen hamurlara uygulandığı gibi burada da aynı şekilde yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir.

BBT ile dökülen hamurların karışım miktarları Tablo 12'de ve BYT ile dökülen hamurların Tablo 13'te verilmiştir. Tablodaki kodlamaya göre B: BBT, C:Ca(OH)<sub>2</sub> A, B, C ve D harfleri sırasıyla BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranlarını göstermektedir. Sırasıyla A 0,5:0,2:0,3 oranını, B 0,55:0,15:0,30 oranını, C 0,6:0,1:0,3 oranını ve D 0,5:0:0,5 oranını simgelemektedir. Harflerin yanındaki 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 rakamları ise sırasıyla 1,40, 1,30, 1,20, 1,10, 1,0 ve 0,9 Ç/T oranlarını göstermektedir.

#### **Mikroskobik ve minerolojik analizler.**

##### ***Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi.***

Bu çalışmada üretilen hamurlar 90 gün yaşında 105 °C etüvde yaklaşık olarak 4 saat kurutulduktan sonra morfolojilerini görüntülemek için Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Taramalı Elektron Mikroskopu (FEI Nova NanoSEM 450-1.2 nm çözünürlüğe sahip) ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analizleri yapılacak olan hamurların görüntü alınacak yüzeylerinin temiz, düz ve gözenekli olmasına dikkat edilmiştir. Numunelerin üst yüzeyleri Au-Pd ile 5.05 nm kalınlığında kaplama yapıldıktan sonra analizleri gerçekleştirilmiştir. (EK 4)

##### ***X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi.***

Bu çalışmadan elde edilen hamurlar 90 gün yaşında 105 °C etüvde yaklaşık olarak 4 saat kurutulduktan sonra morfolojilerini görüntülemek için Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan XRD (Bruker D8 Discover) cihazı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### BULGULAR VE YORUM

Bölüm 3'te anlatılan deneysel çalışmalara ait  $\text{Ca(OH)}_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$  aktivatörlü farklı çözelti/toz malzeme (Ç/T) oranlarında üretilen hamur numunelerin taze ve sertleşmiş haldeki fiziksel ve mekanik deney sonuçları alt başlıklarla sunulmuştur.

Çalışmalarda standart kıvam tayini deneyi planlamalarda olmasına rağmen gerçekleştirilememiştir. Bunun sebebi, bazı hamurların çok akışkan olması ya da hızlı bir şekilde katılaşmaya başlamasından kaynaklanmaktadır. Çoğu hamurun priz başlangıç süreleri çok kısa olmuş ya da priz başlangıcı geç olsa bile aşırı kohezif yapıdan dolayı işlenebilirlik yeterince olamamıştır. Bundan dolayı bazı hamurlar mikserde karışımları tamamlanamamış, tamamlansa bile kalıba yerleştirme işlemleri için standart prosedür işletilememiştir. Dolayısıyla hamurlar üzerinde standart kıvam tayini TS EN 196-3'e göre yapılamamıştır. Bunun yerine izafi bir ölçüm sistemi geliştirilmiş olup 1 – 5 arasında sayısal değerler üretilerek akışkanlığın hiç olmadığı hamurlara “1” değeri ile akışkanlığın en üst limitine “5” değeri tanımlanarak tüm hamurların kıvam özellikleri görsel olarak yapılmıştır. Akış parametresi vizkozite özelliğinin belirlenmesini de gerektirmektedir. Dolayısıyla deneysel planlamada march hunisi kullanılarak viskozite ile ilgili bilgiler edinilmesi düşünülmüştür. Ancak üretilen hamurların akışkanlık değerleri çok hızlı azalmakta olup belli bir süre sabitliğini koruyamamaktadır. March hunisinin hacmi dikkate alındığında hangi süre aralığındaki viskozite değerinin hesaplanması gerektiği fenomeni bu deneyin yapılabilirliğini engellemiştir. Bu sebeple bu yöntemin de uygulanması mümkün olamamıştır.

Deneysel çalışmada üretilen hamurlar içerisinde Beyaz Bayburt Taşı (BBT) ve Yeşil Bayburt Taşı (BYT) temel alümina silikat kaynağı ve bağlayıcı olarak, Mermer tozu (MT) dolgu ve aynı zamanda dayanım artırıcı CaO kaynağı olarak, NaOH (kostik),  $\text{Na}_2\text{SiO}_{3(\text{aq})}$  (cam suyu) ve  $\text{Ca(OH)}_2$  (söndürülmüş teknik kireç) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, çalışma ön deneme ve nihai deneysel çalışmalar olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Ön deneme çalışmalarında hamurlar üzerinde öncelikle etki parametreleri çalışılmış olup, ardından el edilen optimum tasarıma bağlı olarak priz başlangıcı ve bitiş sürelerinin belirlenmesi, basınç dayanımı deneyleri ile su emme (su direnci testi) deneyleri



uygulanmıştır. Nihai deneylerde belli oranlar doğrultusunda 2 farklı tuf ile 4 farklı karışım tasarımına bağlı olarak 5 farklı NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranında iki farklı aktivatörle üretilen sertleşmiş hamurlar üzerinde basınç dayanımı ve su emme deney sonuçları alt başlıklarda tartışılmıştır.

Ön denemelerde gerçekleştirilen etki parametrelerine ilişkin deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

### **Çözelti sıcaklığı ve oranı**

İki farklı metot kullanılarak BBT ile üretilen hamurların çözelti sıcaklığı ve oranı etkisine ilişkin deney sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14' göre, 80 °C olan çözeltiyle yapılan üretimlerde hamurların dayanımlarının düşük olduğu gözlenmiştir. Çözelti karıştırıldıkça sıcaklığının artmasından dolayı hamur karışım viskozitesi azalmış ve böylece işlenebilirlik artmıştır. Bundan dolayı bazı hamurların priz süresi uzamıştır. Ancak çözelti sıcaklığıyla Ç/T oranındaki ters orantı, işlenebilirlik ve priz sürelerini de etkileyen önemli bir parametredir. Dolayısıyla, deneysel çalışmada 80 °C sıcaklıktaki çözeltiyle gerçekleştirilen üretimlerde özellikle Ç/T: 0,6 oranının altında üretim yapılamamıştır. Ç/T: 0,6'dan daha düşük oranlardaki karışımlarda yukarıda anlatıldığı gibi viskoziteye artışı olmasına rağmen toz malzemenin ıslatılmasını sağlayan çözelti miktarı yeterli seviyede olmamasından dolayı ani katılaşma sonucu karışım sırasında priz gerçekleşmiştir. Bundan dolayı bu seriler N/A işaretlemesiyle tanımlanmıştır. Bu ifade uygulanamaz olarak kısaltmalarda belirtilmiştir. Ayrıca, benzer şekilde 20 °C sıcaklıktaki üretimlerde de yüksek NaOH molaritesine sahip (çözeltideki tüm su dikkate alındığında 11 M'den büyük) çözeltinin o sıcaklıkta katılaşmasından dolayı yine 1. proste üretim yapılamamış ancak 2. proste özellikle Ç/T: 0,5'in üstündeki hamurlar üretilebilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Ç/T: 0,5'in üstündeki hamurlar toz malzemeyi ıslatacak yeterlikte çözelti bulunmamasından dolayı ve yine belli bölgelerde gerçekleşen ani katılaşmadan dolayı üretilenmemiştir.

Tablo 14'te en yüksek priz sonu süreleri ikinci döküm prosesinde alınmıştır. En uzun priz süresi 186 dk ile 50 °C ve Ç/T: 0,7 oranındaki B207 hamurundan alınmıştır. 80 °C'de reaksiyonlar çok hızlı gerçekleşmiş ve ikinci proses ile dökülen C serisi yerleştirilememiştir. Birinci proste de C serisinden yalnızca 4 üretim gerçekleştirilebilmiştir. Ancak C106 hamuru kalıba yerleştirilememiştir.

Tablo 14. Taze ve Sertleşmiş Hamurların Deney Sonuçları

Ç/T	Çözelti Sıcaklığı (°C)	Ref.	Priz sonu (dk)	Basınç Dayanımı (MPa)			Ref.	Priz sonu (dk)	Basınç Dayanımı (MPa)		
				2 gün	7 gün	28 gün			2 gün	7 gün	28 gün
0,9	20	A109	N/A	N/A	N/A	N/A	A209	59	5,85	11,54	7,12
0,8		A108	N/A	N/A	N/A	N/A	A208	94	8,33	6,36	6,46
0,7		A107	N/A	N/A	N/A	N/A	A207	132	4,22	6,80	6,44
0,6		A106	N/A	N/A	N/A	N/A	A206	157	2,19	2,94	1,60
0,5		A105	N/A	N/A	N/A	N/A	A205	N/A	N/A	N/A	N/A
0,4		A104	N/A	N/A	N/A	N/A	A204	N/A	N/A	N/A	N/A
0,3		A103	N/A	N/A	N/A	N/A	A203	N/A	N/A	N/A	N/A
0,9	50	B109	23	N/A	N/A	N/A	B209	24	14,10	15,91	6,29
0,8		B108	20	16,37	20,39	23,28	B208	39	11,13	7,21	7,53
0,7		B107	10	18,07	21,77	22,91	B207	186	11,57	4,66	2,57
0,6		B106	15	18,12	27,23	30,63	B206	36	3,97	8,89	10,02
0,5		B105	20	17,73	25,07	27,59	B205	30	2,94	6,84	9,12
0,4		B104	N/A	N/A	N/A	N/A	B204	55	2,36	6,25	8,65
0,3		B103	N/A	N/A	N/A	N/A	B203	N/A	N/A	N/A	N/A
0,9	80	C109	15	9,79	14,82	14,63	C209	51	N/A	N/A	N/A
0,8		C108	39	11,13	16,72	13,22	C208	84	N/A	N/A	N/A
0,7		C107	33	13,57	15,97	12,62	C207	76	N/A	N/A	N/A
0,6		C106	29	N/A	N/A	N/A	C206	34	N/A	N/A	N/A
0,5		C105	N/A	N/A	N/A	N/A	C205	N/A	N/A	N/A	N/A
0,4		C104	N/A	N/A	N/A	N/A	C204	N/A	N/A	N/A	N/A
0,3		C103	N/A	N/A	N/A	N/A	C203	N/A	N/A	N/A	N/A

Çalışmadan çıkarılan bir diğer sonuç 50 °C ve altında dökülen hamurların dayanımlarının daha yüksek olduğudur. Ancak çözelti soğutulduğunda karışım ile priz alma süreleri kısalmıştır. Çözeltinin karışım sırasında sıcaklığının artmasından dolayı hamurun sıcaklığı da artmıştır. Belli bir sıcaklıkta olan çözeltinin sıcaklığının artması neticesinde vizkozite düşmüş ve işlenebilirlik artmıştır. Sıcaklığın yetersiz olduğu ve kıvamın katı olduğu bazı hamurlar yerleştiremeden mikserde prizine başlamış ve prizini tamamlamıştır. Ayrıca sıcaklığın yanında Ç/T oranı da etkili olmuştur. Ç/T oranı arttıkça dayanımda düşüşler gerçekleşmiştir. Yani silikat oranı azaldıkça basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Ç/T oranı azaldıkça dayanımda artış sağlanmış fakat işlenebilirlik oldukça azalmıştır.

### Etüv-Kür

Hamurlar üzerinde sıcaklık ve kür koşullarının belirlenmesi için yapılan çalışmanın basınç dayanımı sonuçları aşağıda Tablo 15'te verilmiştir

Tablo 15. Etiv-Kür Çalışması Basınç Dayanımı Sonuçları

A ortamında kürlenener (MPa)	B ortamında kürlenener (MPa)	C ortamında kürlenener (MPa)	D ortamında kürlenener (MPa)	E ortamında kürlenener (MPa)
Aa011 7,00	Ba011 10,20	Ca011 5,30	Da011 9,60	Ea011 13,20
Aa012 6,30	Ba012 10,50	Ca012 5,50	Da012 10,50	Ea012 12,10
Ab011 10,70	Bb011 16,20	Cb011 0,00	Db011 11,40	Eb011 0,00
Ab012 10,40	Bb012 15,90	Cb012 1,70	Db012 8,70	Eb012 0,00
Ac011 8,60	Bc011 15,60	Cc011 0,00	Dc011 0,00	Ec011 0,00
Ac012 7,40	Bc012 16,80	Cc012 0,00	Dc012 0,00	Ec012 0,00
Ab211 10,10	Bb211 10,60	Cb211 0,00	Db211 1,60	Eb211 11,50
Ab212 9,30	Bb212 9,00	Cb212 0,00	Db212 13,00	Eb212 12,90
Ab221 17,00	Bb221 15,40	Cb221 0,00	Db221 12,10	Eb221 0,00
Ab222 16,70	Bb222 13,70	Cb222 0,00	Db222 7,30	Eb222 0,00
Ac211 6,70	Bc211 8,90	Cc211 0,00	Dc211 0,00	Ec211 0,00
Ac212 6,70	Bc212 8,50	Cc212 0,00	Dc212 0,00	Ec212 0,00
Ac221 16,40	Bc221 16,70	Cc221 0,00	Dc221 8,00	Ec221 0,00
Ac222 11,80	Bc222 16,90	Cc222 0,00	Dc222 16,50	Ec222 0,00
Ac711 7,9	Bc711 8,20	Cc711 0,00	Dc711 0,00	Ec711 0,00
Ac712 8	Bc712 10,10	Cc712 0,00	Dc712 0,00	Ec712 0,00
Ac721 7,6	Bc721 16	Cc721 0,00	Dc721 0,00	Ec721 0,00
Ac722 10,9	Bc722 22	Cc722 0,00	Dc722 0,00	Ec722 0,00

Yapılan üretimlerde ortam sıcaklığının numunelerin priz süresini etkilediği gözlemlenmiştir. Sıcaklık arttıkça priz süresi uzamış ve priz alan numunelerde dahi 24 saat sonrasında kuruma rötresi gözlemlenmiştir. Ortam nemi ise numuneler üzerinde en etkin parametre kabul edilmiştir. Üretimlerde ortam neminin de etkisini anlayabilmek için farklı kür koşulları denenmiştir ve bu hamurların %60'tan daha fazla olan nem ortamında bozulmaya başladığı görülmüştür. Sıcaklık ve bağıl nem, alkali aktive edilmiş bağlayıcılardaki kuruma büzülme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu, ortam sıcaklığında düşük bağıl nem altında buharlaşabilen göreceli olarak yüksek miktarda bağa katılmamış sudan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, buharlaşmadan dolayı aşırı su kaybı kuruma büzülmesine neden olmaktadır (Mastali, Kinnunen, Dalvand, Firouz, & Illikainen, 2018).

Nem etkisinden ve sıcaklıktan dolayı numunelerde karbonatlaşma en fazla karşılaşılan sorun haline gelmiştir. Bakharev (2005), 100 °C' den yüksek küreme sıcaklıklarının

kullanılmasının jeopolimerin granül yapısının parçalanmasına, jelin büzülmesine ve yarı kristalli bir forma dönüşme eksikliğine yol açtığını bildirmiştir. Aynı zamanda priz süreleri ve dayanımlar da olumsuz etkilenmiştir. Ön dökümler esnasında laboratuvar sıcaklığı ve nemi yaklaşık olarak  $20\pm 5$  °C ve  $\%30\pm 5$  olarak ölçülmüştür.

Tabloye göre en iyi dayanım sonuçları B ortamında kürlenmiş hamurlarda görülmüştür. E ortamında kürlenmiş hamurlar 24 saat sonunda tamamen parçalanmış ve dayanım alınamamıştır. Aynı hamurlardan bir seri daha üretilmiş ve yeni oluşturulan E serisi 80 °C etüvde bekletilmiştir. 80 °C etüvde bekleyen hamurlardan 28 günde dayanım alınamamıştır. C ortamında bırakılan hamurlar 2 günden sonra ufalanmaya başlamış ve 7 gün yaşında dayanım alınamamıştır. Buna göre tamamen aynı ortamda kürlenmiş hamurlar için;

- 2 gün sonunda; sonuçlara göre en yüksek erken dayanım E serisinden alınmış ve Ea011 ve Ea012 hamurlarının dayanımları sırasıyla 13,2 ve 12,1 MPa olarak ölçülmüştür.
- En düşük dayanımlar C serisinden (%90 nemli) alınmıştır.
- 7 gün sonunda en yüksek dayanım B serisinden alınmıştır. Bb011 ve Bb012 hamurlarının dayanımları sırasıyla 16,2 ve 15,9 MPa olarak ölçülmüştür.
- E serisi etüvde parçalanmış ve dayanım alınamamıştır.
- C serisi çok fazla su emerek şişmiş ve dayanım alınamamıştır.
- Hamurlarda 7. Günü sonunda 2 gün yaşına göre dayanım artışları A, B ve D serileri için sırasıyla %58,64, %55,07 ve %4,48 oranlarında olmuştur.
- 28 gün sonunda A serisinde %24,17 oranında dayanımda düşüş yaşanmıştır.
- B serisinde ise dayanımda değişim gözlemlenmemiştir.

Hamurlardan 2 gün kürlenip ardından ortamı değiştirilenler için;

- 7 gün yaşında A, B, D ve E serilerinden basınç dayanımı alınabilmiştir.
- Tüm hamurlarda kuru ortama geçişte dayanım kaybı yaşanmıştır.
- Nemli ortama geçişte hamurların tamamında dayanım artışı görülmüştür.
- Dayanım artışları A, B ve D hamurları için sırasıyla %73,71, %48,47 ve %32,88 oranlarında gerçekleşmiştir.
- E serisinde 2 gün kürlenip ardından kuru ortama alınan hamurdan dayanım elde edilirken, nemli ortama alınan hamurdan dayanım alınamamıştır.
- 2 gün kürede bırakılıp ardından kuru ortama alınan hamurlar arasında en yüksek dayanım E serisinden alınırken, nemli ortama alınan hamurlar arasında ise A serisinden alınmıştır. A ve E serisi için en yüksek dayanımlar sırasıyla 17 ve 12,9 olarak ölçülmüştür.
- E serisinde çok fazla rötre olmasına rağmen dayanım alındıktan sonra paramparça olduğu görülmüştür. Hamurun dayanımı ise 12,9 MPa olarak ölçülmüştür.

Hamurlardan 7 gün kürlenip ortamı değiştirilenler için;

- 28 gün yaşında A ve B serilerinden dayanım alınabilmiştir.
- En yüksek dayanım B serisinden alınmıştır. Bc722 hamurunun dayanımı 28 gün sonunda 22 MPa olarak ölçülmüştür.
- D serisinde 2 gün kürlenip ve nemli ortama alınan hamurdan 28 gün yaşında dayanım alınırken, kuru ortama alınandan ise dayanım ölçülemediği görülmüştür.
- Kuru ortamda bırakılan hamurlarda dayanım kaybı görülürken nemli ortamda bırakılan hamurlarda dayanım artışı görülmüştür.
- Dayanım artışları A ve B serileri için sırasıyla %16,15 ve %107,7 oranlarında gerçekleşmiştir.

Nihai sonuçlarda hamurlarda en yüksek dayanım B serisinden alınmıştır. Hamurlar üzerinde nemli ortamdaki kuru ortama geçişte ve yüksek nem (%90) oranındaki ortamlarda dayanım kaybı görülürken kuru ortamdaki nemli ortama geçişte dayanım artışı gözlemlenmiştir. Buhar küresinde bırakılan hamurlardan hiç dayanım alınmazken 80 °C etüvde bırakılan hamurlardan 7 güne kadar dayanım alınabilmiştir. Ancak sıcak ve kuru ortamda bırakılan hamurlarda aşırı rötre ve çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.

### **Karışım sırasında suyun rolü**

Bu çalışmada su 3 farklı şekilde karışıma eklenmiştir. İlki doğrudan istenilen ağırlıkta tartılmış ve silikat+NaOH+su eklenerek dökümler gerçekleştirilmiştir. Ancak soğuyan çözeltinin aniden kristalleşebilmesi sonucu çözelti karışım şekli değiştirildiğinden son dökümlerde bu yöntem kullanılmamıştır. İkincisi Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yerine su kullanımı yönünde olmuştur. Buna göre Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yerine %0, 10, 20 ve 30 oranlarında su kullanılan numunelerde en uygun priz süreleri dikkate alınarak eklenecek su miktarları belirlenmiştir. Hazırlanan hamurlarda %30 su ikamesi dayanımı düşürdüğü ve priz sürelerini çok uzattığı belirlenmiştir. Suyun akıcılığa ve işlenebilirliğe de etkisi pozitif yönde olmuştur. Genellikle yüksek su oranı akıcılığa yol açmaktadır. Nadoushan ve Ramezaniapour'a (2016) göre 2.1, 2.33 ve 3.13 modüllü Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün su içerikleri sırasıyla %60, %52 ve %58'dir. Dolayısıyla 2.1 modüllü Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün maksimum işlenebilirlik sağlamaktadır. Alkali çözeltinin molaritesindeki artış ile su içeriği azalmakta ve daha yüksek viskoziteye yol açmaktadır. Fakat silikat oranının artması da dayanımı olumsuz etkilediğinden ve silikatın da içerisindeki su miktarından dolayı silikat yerine su eklenmesiyle de döküm denenmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yerine su eklenen numunelerin dayanımının doğrudan su katılan numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, suyun çözücülük özelliğinin silikatlı çözeltiden daha yüksek olmasına

bağlantılandırılabilir. Üçüncü ve son yöntem ise su ve NaOH ile istenilen molaritede çözelti hazırlayıp deney şemasındaki ağırlık tartılarak hamur hazırlanması olmuştur. Bu yöntemle dayanımlar daha da artmıştır. Bu çalışmanın detayları ve sonuçları molarite etkisi başlığı altında tartışılmıştır. Yapılan ön dökümlerde karışım sırası değişiminin hamur özelliklerine etkileri şöyledir:

- Çözeltiye ilk olarak MT eklendiğinde, reaksiyonlar çok hızlı gerçekleşmiş ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH} + \text{su}$  çözeltisiyle MT ani katılaşmış ve işlenememiştir.
- $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{su}$  karıştırılıp önce BT ardından MT ve en son olarak da NaOH pelet halinde atılmış, ancak bu defa da NaOH tam olarak eriyemeden hamur mikserde katılaşmıştır. Bu da dayanım kaybına neden olmuştur.
- Sırasıyla  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , BT, MT ve daha sonrasında ise sulu çözeltide NaOH birlikte katılmış, ancak dayanımları düşürdüğü için bu yöntem de kullanılamamıştır.

## **Molarite**

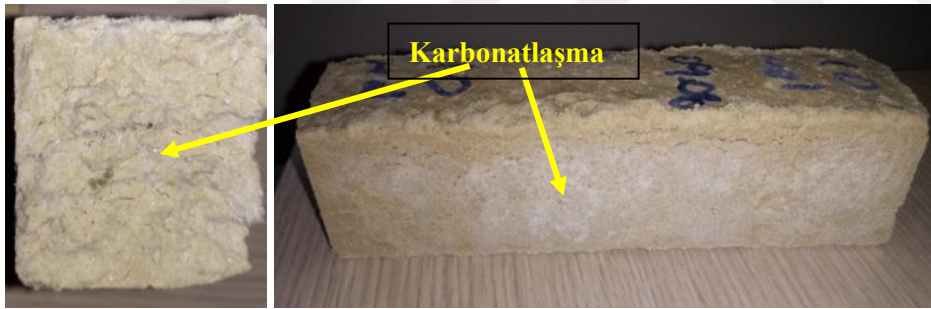
Literatürde molaritenin net olarak nasıl hesaplandığı anlaşılmamaktadır. Bu çalışmada  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'ün içindeki su hesaplara dahil edilerek molarite hesaplanmıştır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'ün içerisindeki su hesaba katılmadan molaritenin 40 M derişime kadar çıktığı görülmüştür. Su eklendiğinde çözelti seyreltilerek molarite düşürülebilmektedir. Çalışmada farklı mollerde 10 M, 15 M ve 20 M üretimler yapılmış ve en yüksek dayanımı veren moldeki çözeltiyle nihai üretimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çözeltinin hazırlanmasından sonra molarite yükseldikçe ve çözelti soğudukça gerçekleşen kristalleşmeden dolayı 25 M'den sonrası dökülememiştir. Basınç ve eğilme dayanımı testleri sonuçları aşağıda Tablo 16'da verilmiştir. 10 M çözeltili hamurdan 2 gün yaşında eğilme dayanımı ve basınç dayanımı ile 28 gün yaşında basınç dayanımı alınamamıştır.

15 M ve 20 M derişim çözeltili hamurların eğilme dayanımları 2 gün yaşında sırasıyla 2,50 ve 4,70 MPa'dır. 28 gün yaşında 10M, 15M ve 20 M hamurların eğilme dayanımları sırasıyla 0,90, 4,50 ve 6,50 MPa'dır. 2 gün yaşında en yüksek basınç dayanımları 15 M ve 20 M hamurlar için sırasıyla 8,50 ve 20,80; 28 gün yaşında ise sırasıyla 14,7 ve 31,7 MPa olarak ölçülmüştür. 15 M hamurun 2 gün eğilme dayanımı 20 M hamura göre %88, 28 günde ise %44 daha düşük olmuştur. Basınç dayanımı ise 2 günde %141 ve 28 günde %87 daha düşük olmuştur. Dayanımın düşük olmasının sebebi büzülme ve çiçeklenmeden kaynaklanmaktadır. Çalışmada 10 M ve 15 M ile elde edilen hamurun yapısında çok fazla tuz oluşumu gözlemlenmiştir. Alkali katyonlar (Na, K) yapılarda çözünen formlarda bulunurlar. Ayrıca zeolitlerin kristal yapılarına göre daha zayıf bağlanmaktadır. Bu da çiçeklenme oluşumu

açısından potansiyel bir tehlikeyi temsil etmektedir (Skvara, 2007). Çalışmalar düşük alkali aktivasyon oranlarının alüminosilikat malzemelerin aktivasyon süreçlerinde gecikmelere yol açtığını, yüksek konsantrasyonlarda çiçeklenme problemi oluşturduğunu ve kırılabilir malzemeler ile düşük mekanik mukavemetlere neden olduğunu göstermektedir (Nourredine, Kerdal, Nouria, & Rachida, 2018). Çiçeklenme; bağlayıcıda karbonat kristallerinin oluşmasına dolayısıyla da mikroyapıda hasara neden olmaktadır. Bu da dayanım kaybına yol açmaktadır. Araştırma sonuçları alkali aktive edilmiş uçucu kül, cüruf ve benzeri malzemelerin düşük nem oranlarında daha yoğun çiçeklenmeye ve büzülme oranına sahip olduğunu göstermektedir ( Mastali vd., 2018).

Tablo 16. Molarite Çalışması Basınç Dayanımı Sonuçları

No	Ref. No	Molarite	Basınç Dayanımı (MPa)		Eğilme Dayanımı (MPa)	
			2 gün	28 gün	2 gün	28 gün
106	M1	10	0	0	0	0,90
107	M2	15	8,5	14,5	2,5	4,5
108	M3	20	20,5	31,7	4,70	6,5



Şekil 13. 10 M derişimle üretilen hamurun a) iç kısmında b) dış yüzeyinde oluşan çiçeklenme



Şekil 14. 15 M derişimle üretilen hamurun dış yüzeyinde oluşan çiçeklenme

20 M derişime sahip çözelti ile hazırlanan hamurlarda da çiçeklenme olduğu görülmüştür. Ancak 10 ve 15 M derime sahip hamurlardan daha az çiçeklenme ve rötre

oluşumuna rastlanmıştır. Yüksek kalsiyum içeriği ve yüksek pH değeri olan bir bileşimde N-A-S-H jeli üzerinde C-A-S-H jeli oluşması beklenmektedir (Mastali *vd.*, 2018). N-A-S-H jellerinde gözlenen kompozisyon ve yapısal değişiklikler malzemenin mukavemetini önemli ölçüde etkilememektedir. Bununla birlikte N-A-S-H jelinin (N,C)-A-S-H jeline değişmesi Na<sup>+</sup> iyonlarının bağlayıcı matrinden çiçeklenme şeklinde sızmasını kolaylaştırmaktadır. Alkali aktivasyon işlemi sırasında alkalilerin ana rolü öncül çözümler için yüksek pH koşulları oluşturmak ve yeni jeller oluşturulduktan sonra nanoyapı içerisinde zayıf yapıda kalan bağları yeni oluşturulan jel yapısı ile dengelemektir. Bu yüzden kireçtaşının bulunması, yeni oluşan jelin bileşimini etkilemekte ve daha fazla miktarda serbest alkali ile sonuçlanmaktadır. Bu da çiçeklenme oluşumunu arttırmaktadır (Huseien, Ismail, Khalid, Hussin, & Miraz, 2018). Burada da yüksek pH değerinden dolayı C-A-S-H jeli oluştuğu ve dayanımın bu yüzden arttığı düşünülmektedir.

### **Ön deneme deneylerinden elde edilen fiziksel özelliklere ait bulgular**

Taze hamurlar üzerinde gerçekleştirilen kıvam, priz başlangıcı ile bitiş sürelerinin belirlenmesi sonuçları bu bölümde tartışılmıştır. Her bir aktivatör için ayrı ayrı başlıklar halinde bulgular verilmiş olup tartışma kısmı bölüm içinde yapılmıştır.

#### **NaOH aktivatörü ile üretilen hamurların taze haldeki deney bulguları.**

##### ***BBT ile üretilen hamurların kıvam, priz başlangıcı ve bitiş süreleri:***

BBT ile üretilen hamurların priz başlangıcı ve bitiş süreleri ile görsel kıvam tayinleri Tablo 17’de verilmiştir. Bu Tabloda priz süreleri zaman sınırlaması konularak “<” sembolü ile tanımlanmıştır. Priz deneyleri sırasında Vicat halkasının içindeki hamurun her bir bölgesi homojen katılaşma davranışı göstermemiştir. Plastik olan vicat halkasının yan ve üst kısımlarında hızlı katılaşmanın olduğu, ancak hamurun diğer noktalarında bu durumun gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple birkaç noktadan başlangıç ve bitiş priz süreleri ölçüldüğünde sapmalar olduğu anlaşılmış ve bundan dolayı priz başlangıcı ve bitiş için tek bir süre tanım yapılamamıştır. Bu sebeple ölçülen priz başlangıcı süresi için en fazla 5’lik ve priz bitiş süresi için en fazla 10’luk dakika birimleri halinde (<t) ifadesi kullanılarak Tablo 17’de belirtilmiştir.

Tablo 17’ye göre aşağıdaki bulgular ve değerlendirmeler yapılabilir:

- Tüm serilerde priz başlangıcı ve bitiş sürelerinin NaOH molaritesine, toplam çözelti/katı madde oranına ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranına doğrudan bağlı olmadığı belirlenmiştir.



- Ancak tüm serilerde suyun  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yerine kullanılarak  $\text{Ç/T}$ 'nin artışına,  $\text{Ç/T}$  oranı sabit tutulsa dahi ikame edildiği aktivatör oranına bağlı olarak priz başlangıcı ve bitiş sürelerinin etkilendiği belirlenmiştir. Tüm hamur serilerinde BBT oranına ve  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranına bakılmaksızın,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yerine su ikamesi yapıldığında  $\text{Ç/T}$  oranı arttıkça hamurların kıvamı daha katılaşmıştır. Priz başlangıcı sürelerinde önemli oranda değişiklik olmazken, priz bitiş süreleri uzamıştır. Bu davranış aktivatör azalması sonucunda artan çözelti oranı ile katı alümina silikat tanelerinin arasına giren ve taneleri uzaklaştıran sıvı formun jelleşme reaksiyonlarını olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir. Bu durum tüm bağlayıcı yapılarda benzer davranış göstermektedir. Ancak hamurlarda BBT oranı arttıkça su ikamesiyle artan çözelti oranına bağlı olarak priz başlangıcı ve bitiş sürelerinde önemli artışlar olmuştur. Örneğin, hamurlarda MT oranı azaldıkça priz başlangıcı süreleri <5 dk'dan <180 dk'ya kadar, priz bitiş süreleri <10 dk'dan <270 dk'ya kadar uzamıştır. Böylece MT'den gelen  $\text{CaO}$ 'nun erken reaksiyonları tetiklediği, silikat çözeltisi ile erken reaksiyona girerek C-S-H yapılarının ani şekilde üretilmesine sebep olduğu anlaşılmıştır. Bu oluşuma bir kanıt olarak MT'nin hamurun karışımı sırasında topaklaşması gösterilebilir.
- $\text{Ç/T}$  oranı sabit olup aktivatör yerine kullanılan su oranı arttıkça kıvam katılaşmış, yine priz başlangıcı sürelerinde MT oranı azaldıkça priz başlangıcı uzamış, ancak MT oranı hacimce %45 ve %50'de önemli değişiklik olmadığı belirlenmiştir. Hamur karışımı içinde MT oranı azaldıkça priz sonu sürelerinin önemli oranda uzadığı belirlenmiştir. Burada kıvamın katılaşmasının sebebinin  $\text{NaOH}$  oranındaki (yüzey etkin kimyasal, surfactan) azalmadan kaynaklandığı, priz başlangıcındaki ve bitişindeki sürelerin önemli oranda MT'den etkilendiği ve bunun da sebebinin C-S-H ürünündeki yoğunluktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Deneysel çalışmaların  $50 \pm 5$  °C sıcaklığa sahip çözeltilerle gerçekleştirildiği düşünülürse, sıcaklık etkisinin priz başlangıcı sürelerini önemli derecede etkilediği ve hamur soğuma sürelerinin katılma süreleri ile bağıntılı olduğu da belirlenmiştir.



A



B



C



D



E

Şekil 15. Kıvam tayinin belirlenmesinde kullanılan görsel akıcılığın tanımlanması A:1, B:2, C:3, D:4, E:5

Tablo 17. BBT ile üretilen ön deneme hamurlarının priz süreleri ve kıvam deneyi sonuçları

NaOH / Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Ç/T	Molarite	Ref. No	Priz başı (dk)	Priz sonu (dk)	Kıvam	Ref. No	Priz başı (dk)	Priz sonu (dk)	Kıvam
0,66	1,3	16,9	B5aN1	<5	<10	2	B8aN1	<5	<20	2
0,66	1,2	13,7	B5aN2	<5	<10	3	B8aN2	<20	<40	3
0,66	1,1	11,4	B5aN3	<10	<100	4	B8aN3	<30	<90	4
0,66	1,1	16,5	B5aN4	<5	<20	3	B8aN4	<10	<20	2
0,66	1,1	12,6	B5aN5	<10	<40	3	B8aN5	<10	<30	3
0,55	1,3	11,7	B5bN1	<5	<40	3	B8bN1	<30	<40	3
0,55	1,2	14,3	B5bN2	<5	<20	3	B8bN2	<10	<20	2
0,55	1,1	18,5	B5bN3	<5	<10	2	B8bN3	<5	<10	2
0,55	1,1	13,7	B5bN4	<5	<10	1	B8bN4	<10	<10	2
0,55	1,1	10,6	B5bN5	<10	<60	2	B8bN5	<30	<50	3
0,45	1,3	9,8	B5cN1	<10	<30	4	B8cN1	<30	<60	3
0,45	1,2	11,9	B5cN2	<5	<20	1	B8cN2	<20	<30	3
0,45	1,1	15,1	B5cN3	<5	<20	2	B8cN3	<5	<10	2
0,45	1,1	11,6	B5cN4	<10	<20	1	B8cN4	<10	<20	2
0,45	1,1	9,1	B5cN5	<10	<30	3	B8cN5	<60	<160	4
0,66	1,3	16,9	B6aN1	<10	<30	4	B1aN1	<30	<50	3
0,66	1,2	13,7	B6aN2	<10	<30	4	B1aN2	<30	<40	3
0,66	1,1	11,4	B6aN3	<20	<70	5	B1aN3	<100	<350	5
0,66	1,1	16,5	B6aN4	<10	<20	3	B1aN4	<20	<30	3
0,66	1,1	12,6	B6aN5	<10	<20	2	B1aN5	<60	<160	4
0,55	1,3	11,7	B6bN1	<10	<20	3	B1bN1	<30	<70	3
0,55	1,2	14,3	B6bN2	<10	<10	3	B1bN2	<10	<40	3
0,55	1,1	18,5	B6bN3	<5	<10	4	B1bN3	<10	<20	2
0,55	1,1	13,7	B6bN4	<5	<10	2	B1bN4	<5	<20	2
0,55	1,1	10,6	B6bN5	<5	<20	2	B1bN5	<40	<290	5
0,45	1,3	9,8	B6cN1	<10	<30	3	B1cN1	>60	>300	5
0,45	1,2	11,9	B6cN2	<5	<10	2	B1cN2	<20	<50	3
0,45	1,1	15,1	B6cN3	<5	<10	1	B1cN3	<5	<30	2
0,45	1,1	11,6	B6cN4	<5	<10	1	B1cN4	<50	<140	4
0,45	1,1	9,1	B6cN5	<10	<50	3	B1cN5	<60	>300	5

- BBT oranı %100 olan hamurlardan; B1cN1 ve B1cN5 hamurları priz almamıştır. Hamurlar çok akıcı kıvamda olmuş ve yüksek oranda su kullanılan hamurların bir kısmı priz almazken bir kısmının da priz başlama ve bitiş süreleri 24 saatin üstüne çıkmıştır.
- Katılma süresi 10 dk'nın altında başlayan hamurların işlenebilirlikleri oldukça düşük olmakta ve karışım süresi ile kalıba yerleştirme süreleri yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple üretilen hamurlarda yüksek oranda gözeneklilik olacağı ve bu sebeple mekanik mukavemetlerin olumsuz etkileneceği düşünülmüştür. Bu sebeple üretilen ön deneme hamurlarından elde edilen priz süreleri verileri doğrultusunda işlenebilirliği yüksek olabilecek ve katılma süresi 10 dk – 20 dk arasında başlayan hamurlar nihai üretimlerde kullanılması planlanmıştır.

Kıvam tayininde kullanılan izafi tanımlamalar Şekil 15'te verildiği gibi şekilsel olarak yapılmıştır. Taze hamurların kıvamları yayılma miktarlarına göre değerlendirilmiştir. Şekil 15'te A en katı kıvam (:1), B katı kıvam (:2), C akıcılığa geçiş (:3), D akıcı kıvam (:4) ve E en akıcı olan kıvam (:5) tanımlamakta kullanılmaktadır.

***BYT ile üretilen hamurların kıvam, priz başlangıcı ve bitişi süreleri.***

BYT ile üretilen hamurların kıvam, priz başlangıcı ve bitişi süreleri ile görsel kıvam tayinleri Tablo 18'de gösterilmiştir. Tablo 18'e göre kıvamı en katı seriler 22,1 M ve 18,5 M derişim ile üretilenlerdir. Ayrıca BBT çalışmalarında etkin olan parametreler bu çalışmada da önemini sürdürmüştür. MT oranı artıp BYT oranı azaldıkça priz süreleri kısalmıştır. Bu çalışmada sıvı form oranı arttığı için NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı azaldıkça molarite düşmekte ve akıcılık artmaktadır. Akıcılık arttıkça işlenebilirlik kolaylaşmaktadır. Düşük molaritenin viskozitenin azalmasını sağlayan önemli bir parametre olduğu ve bundan dolayı işlenebilirliği artırdığı literatürde belirtilmiştir (Huseien *vd.*, 2018). Akıcılığı etkileyen bir diğer parametre ise Ç/T oranıdır. Ç/T oranı arttıkça akıcılık (kıvam) artmakta ve malzeme kolaylıkla yerleştirilmektedir. Çözelti miktarının artması priz süresini geciktirmektedir. BYT ile üretilen hamurların priz süreleri incelendiğinde önemli bir değişkenlik oluşturan bir parametre göze çarpmaktadır. Bu parametre NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının 0,45 olduğu serilerde priz süreleri sürekliliği bozmaktadır. Priz sürelerinin daha kısa olduğu dikkat çekmektedir. Bu özel karışım oranlarının molarite değerlerine bakıldığında bu değer 15,1 M NaOH derişiminin olduğu anlaşılmaktadır. Tüm serilerde oluşan bu davranışın sebebinin hamurun kimyasal içeriğinin reaksiyon giren ve çıkanlara oranının eşitlendiği yada buna yaklaştığı stekiometrik oran olarak bilinen spesifik değer yakalanması ile açıklanabilir. Ayrıca yine literatürde NaOH molaritesinin 12 – 16 arasında olduğu değerlerde en yüksek basınç mukavemet değerlerinin elde edildiği de bilinmektedir. Ön denemelerde BYT miktarı arttıkça priz süresinin uzadığı görülmektedir. Karışım prosesleri değiştirilip MT önce döküldüğünde reaksiyon çok hızlı gerçekleşmekte ve hamur henüz mikserdeyken katılaşmaktadır. Yüksek Ca içeriği alkali aktive edilmiş malzemelerin priz süresini etkilediği bilinmektedir. Bu denemeden Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+NaOH çözeltisinin CaO ile çok hızlı reaksiyonlara sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada Ç/T ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranları ile molarite gibi parametrelerin priz süreleri üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak BBT'den farklı olarak BYT çalışmasında %100 BYT ile dökülen hamurların priz sürelerinin daha kısa olduğu ve basınç dayanımı deneylerinin yapılabildiği görülmüştür. Bu farkın BBT ve BYT'nin kimyasal yapılarından kaynaklandığı düşünülmektedir. BBT'nin yapısındaki CaO miktarı %4 iken BYT'nin yapısındaki CaO miktarı %13 mertebelerindedir. Bu oran BYT ile dökülen hamurlarda C-S-H

jelinin oluşmasını kolaylaştırmakta ve bununla birlikte hem sertleşme hem de dayanım artışı görülmektedir.

Tablo 18. *BYT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının Priz Süreleri Ve Kıvam Deneyi Sonuçları*

Ref. No	NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH (M)	Ç/T	Kıvam	Priz başlangıcı (dk)	Priz bitişi (dk)
YAaN1	0,66	22,1	1,10	3	<5	<15
YAbN2	0,55	18,5	1,10	2	<5	<10
YAcN3	0,45	15,1	1,10	3	<5	<10
YAdN4	0,35	11,5	1,10	3	<10	<25
YAcN5	0,25	8,2	1,00	5	<20	<50
YBaN1	0,66	22,1	1,10	2	<5	<15
YBbN2	0,55	18,5	1,10	3	<10	<25
YBcN3	0,45	15,1	1,10	2	<5	<15
YBdN4	0,35	11,5	1,10	3	<15	<35
YBeN5	0,25	9,2	1,10	5	<30	<80
YCaN1	0,66	22,1	1,10	2	<5	<50
YCbN2	0,55	18,5	1,10	3	<10	<35
YCcN3	0,45	15,1	1,10	2	<10	<20
YCdN4	0,35	11,5	1,10	4	<15	<35
YDaN1	0,66	22,1	1,10	3	<10	<60
YDbN2	0,55	18,5	1,10	3	<15	<50
YDcN3	0,45	15,1	1,10	2	<10	<30
YDdN4	0,35	11,5	1,10	4	<50	<100
YFaN1	0,66	22,1	1,10	5	<70	<80
YFbN2a	0,55	18,5	1,10	4	<30	<50
YFbN2b	0,55	18,5	0,90	5	<200	-
YFbN2c	0,55	18,5	0,70	4	<50	<140
YFcN3	0,45	15,1	1,10	4	<20	<30
YFdN4	0,35	11,5	1,10	5	<90	<100

Ön deneylerden elde bulgulara göre şu çıkarımlar yapılabilir:

- %100 BYT ile üretilen hamurlar daha kısa sürede prizlerini tamamlamışlardır. Molarite ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının düşmesi, priz sürelerinin önemli oranda atmasına sebep olmuştur.
- Karışımlardaki BBT oranı arttıkça priz süreleri uzamıştır.
- En kısa prize başlama süresi <5 dk ile MT oranı hacimce %60 olan ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,66 ve 0,55 oranlarına sahip serilerde ölçülmüştür. Bu serilerin molaritesi diğerlerine göre en yüksektir ve molaritedeki artışın priz sürelerini kısaltması davranışı mevcut literatürde belirtilmiştir.

- Su katkısı ile üretilen hamurlarda, %10 su katkısının priz süreleri üzerinde etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.
- BYT ile üretilen hamurlarda da molarite, Ç/T ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranlarının etkili olduğu ve priz sürelerinin molarite ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranları ile ters, Ç/T oranı ile doğru orantılı değiştiği gözlemlenmiştir. Ham maddelerdeki yüksek kalsiyum içeriğinin alkali aktive edilmiş malzemelerin priz sürelerini etkilediği bilinmektedir. Jeopolimer karışımlarının priz süresi sodyum silikat aktivatörünün oranı ile de kontrol edilebilmektedir. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O molar oranı ne kadar yüksekse priz süresi o kadar düşük olmaktadır (Tchakoute, Elimbi, Yanne, & Djangang, 2013).

### **NaOH aktivatörü kullanılarak üretilen sertleşmiş hamurların ön deney bulguları.**

#### ***BBT ile üretilen hamurların basınç dayanımı bulgularının değerlendirilmesi:***

Tablo 19’da BBT ile ön denemeleri yapılan hamurların basınç dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri 2’şer numune ile gerçekleştirilmiş ve aritmetik ortalamaları alınarak Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 19’da verilen BBT ile üretilen ön deneme hamurlarının basınç dayanımı deney sonuçlarına göre:

- Priz süresi aşırı kısa (<5 dk) olan hamurlar işlenebilirliklerini çok çabuk kaybettiklerinden dolayı yerleştirilememiş ve bundan dolayı dayanım alınamamıştır.
- En yüksek basınç dayanımları, 2 gün için 14,9 MPa ve 28 gün için 27,05 MPa olarak katı maddenin hacimce %50’si BBT içeren 0,7 Ç/T oranına sahip, 12 mol NaOH derişimli, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 0.45 olan hamurda ölçülmüştür. En düşük dayanımlar ise 16 – 22 M arasındaki hamurlardan elde edilmiştir. Bu hamurların NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranları 0,66 - 0,55’tir.
- 2 günlük en yüksek basınç dayanımını veren hamurların genellikle NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0.35 - 0.45, 9 – 14 molarite ve Ç/T: 0,70-1,10’dur.
- Toplam 62 seri hamurun %14’ü 2 günlük basınç dayanımı 10 MPa’ın üzerinde, %8’i 28 günlük basınç dayanımı 20 MPa’ın üzerinde çıkmıştır. Erken ve geç dayanımları sırasıyla 10 MPa ve 20 MPa üzerinde olan hamurların yukarıda belirtilen parametrelerin etkisinde yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- Ç/T oranı azaldıkça hamurlarda dayanım artışı görülmüştür.

Tablo 19. BBT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

NaOH/ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Ç/T	M	Ref. No	2 gün Bas. Day. (MPa)	28 gün Bas. Day. (MPa)	Ref. No	2 gün Bas. Day. (MPa)	28 gün Bas. Day. (MPa)
0,66	1,3	17	<b>BBaN1</b>	0,5	1,0	<b>BFaN1</b>	1,5	6,3
0,66	1,2	14	<b>BBaN2</b>	2,2	7,7	<b>BFaN2</b>	1,3	5,7
0,66	1,1	11,4	<b>BBaN3</b>	3,0	8,0	<b>BFaN3</b>	3,4	15,4
0,66	1,1	16	<b>BBaN4</b>	2,5	5,5	<b>BFaN4</b>	2,8	12,2
0,66	1,1	13	<b>BBaN5</b>	2,2	6,7	<b>BFaN5</b>	1,4	4,2
0,55	1,3	12	<b>BBbN1</b>	4,0	10,4	<b>BFbN1</b>	4,2	4,5
0,55	1,2	14	<b>BBbN2</b>	6,1	14,5	<b>BFbN2</b>	4,4	4,7
0,55	1,1	18	<b>BBbN3</b>	1,6	3,0	<b>BFbN3</b>	4,3	4,1
0,55	1,1	14	<b>BBbN4</b>	8,3	16,4	<b>BFbN4</b>	5,7	4,5
0,55	1,1	11	<b>BBbN5</b>	8,8	14,4	<b>BFbN5</b>	5,1	6,2
0,45	1,3	10	<b>BBcN1</b>	5,5	10,8	<b>BFcN1</b>	4,2	6,0
0,45	1,2	12	<b>BBcN2</b>	10,6	14,4	<b>BFcN2</b>	5,0	3,0
0,45	1,1	12	<b>BBcN2a</b>	13,0	17,2	<b>BFcN2a</b>	0,0	2,6
0,45	1,1	15	<b>BBcN3</b>	2,3	13,2	<b>BFcN3</b>	2,8	5,4
0,45	1,1	12	<b>BBcN4</b>	10,4	15,5	<b>BFcN4</b>	4,3	7,0
0,45	0,7	12	<b>BBcN4a</b>	14,9	27,0	<b>BFcN4a</b>	4,8	9,2
0,45	1,1	9	<b>BBcN5</b>	8,1	13,2	<b>BFcN4</b>	3,8	5,6
0,35	1,2	9	<b>BBdN1</b>	6,2	14,9			
0,35	1,1	9	<b>BBdN1a</b>	9,0	16,0			
0,35	1,1	9	<b>BBdN2</b>	10,8	16,5			
0,35	1,0	9	<b>BBdN2a</b>	11,6	22,9			
0,35	1,1	7	<b>BBdN3</b>	3,0	10,3			
0,66	1,3	16,9	<b>BDAa1</b>	2,0	3,8			
0,66	1,2	13,7	<b>BDAa2</b>	2,1	5,7			
0,66	1,1	11,4	<b>BDAa3</b>	6,0	7,2			
0,66	1,1	16,5	<b>BDAa4</b>	1,8	4,3			
0,66	1,1	12,6	<b>BDAa5</b>	2,0	5,4			
0,55	1,3	11,7	<b>BDbN1</b>	7,4	16,7			
0,55	1,2	14,3	<b>BDbN2</b>	7,1	16,9			
0,55	1,1	18,5	<b>BDbN3</b>	5,2	13,4			
0,55	1,1	13,7	<b>BDbN4</b>	9,1	21,0			
0,55	1,1	10,6	<b>BDbN5</b>	8,0	14,6			
0,45	1,3	9,8	<b>BDcN1</b>	8,0	14,5			
0,45	1,2	11,9	<b>BDcN2</b>	11,2	14,6			
0,45	1,1	11,9	<b>BDcN2a</b>	12,0	18,7			
0,45	1,1	15,1	<b>BDcN3</b>	11,7	17,6			
0,45	1,1	11,6	<b>BDcN4</b>	11,6	18,3			
0,45	0,7	11,6	<b>BDcN4a</b>	11,6	15,5			
0,45	1,1	9,1	<b>BDcN5</b>	10,2	14,3			
0,35	1,2	9	<b>BDdN1</b>	6,5	19,7			
0,35	1,1	9	<b>BDdN1a</b>	9,0	23,8			
0,35	1,1	9	<b>BDdN1b</b>	10,3	19,5			
0,35	1,0	9	<b>BDdN1c</b>	11,9	24,4			
0,35	1,1	7	<b>BDdN2</b>	13,5	19,4			

Hamur bileşenlerindeki BBT'nin hacimce oranı kompozitlerin basınç dayanımlarının farklı olmasına sebep olmaktadır. Bunun sebebi literatürde kimyasal yapı ile açıklanmaktadır. Alkali hamurlarda alkali aktivatörler ve katı alüminasilikat içeren maddelerin reaksiyonu

sonucunda C-(A)-S-H ile N-(A)-S-H jellerinin oluştuğu bilinmektedir. Bu bileşenlerin çimentoda olduğu gibi basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği literatürde vurgulanmıştır. BBT'nin oluşumu sırasında kimyasal ve mineralojik bileşiklerin heterojen yapıda olması sebebiyle; oluşan C-S-H yapısının da buna bağlı olarak hamur içerisinde heterojen dağılımından dolayı hamurların basınç dayanımları oldukça farklı ölçülmüştür. Konuyla ilgili detay mikroyapı incelemelerinde açıklanacaktır.

***BYT ile üretilen hamurların basınç dayanımı bulgularının değerlendirilmesi:***

Tablo 20'de BYT ile ön denemeleri yapılan hamurların basınç dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri 2'şer numune ile gerçekleştirilmiş ve aritmetik ortalamaları alınarak verilmiştir.

Tablo 20'de verilen BYT ile üretilen ön deneme hamurlarının basınç dayanımı deney sonuçlarına göre:

- Bu dökümlerde en yüksek 2 günlük dayanım sonucu YDdN4 hamurunda 14,5 MPa olarak ölçülmüştür. Hamurun NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 0,35 ve BYT:MT oranı katı kısmın hacmince 0,6:0,4, molaritesi 11,5'tir.
- Toplam 24 seri hamurun %17'si 2 günlük basınç dayanımı 10 MPa'nın üzerinde elde edilmiştir. Bunlar Ç/T oranları düşük olan hamur serilerinde gözlemlenmiştir.
- YF serisi içinde dayanım alınamayan numuneler test sırasında ezilmiştir. Numuneler incelendiğinde numune dışının katılaşmış olduğu ancak iç kısmının nemli ve ıslak olduğu gözlenmiştir. Bu davranış %100 BBT'li hamur numunelerde de benzer olduğu gözlenmiştir. Hamurların birçoğunun 2 gün yaşında basınç dayanımı testi sırasında iç kısımlarının yaş olduğu görülmüştür. Buna ilaveten çelik kalıbın çeperlerine değen taze hamurlarda hızlı katılaşmanın olması, bu davranışa sebep olan mekanizmanın ısı iletimi ile ilgili olduğu düşünülmüştür. Kalıp çeperlerindeki ısı iletiminin hızlı olması, 50 °C sıcaklıktaki çözeltinin ani bir şekilde oda sıcaklığına düşmesi sebebiyle çözeltinin katılaşması ve bundan dolayı ani prizinin gerçekleştiği de düşünülmüştür. Bir başka katılaşma mekanizması öngörüsünde şu açıklama yapılabilir: malzemenin dış kısmının katılaşması, ancak iç kısmının tamamen katılaşmamasının sebebinin reaksiyon ürünlerinin ihtiyacı olan bir gaz molekülünün (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> gibi) yeterince dış kısımdan penetre olamaması ya da dış kabuğun geçirimsizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Tablo 20. *BYT İle Üretilen Ön Deneme Hamurlarının 2 Günlük Basınç Dayanımı Deney Sonuçları*

Ref. No	Toplam katı madde oranı (Hacimce)		NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Ç/T	NaOH (M)	Basınç day. (MPa)
	BYT	MT				
YAaN1	0,4	0,6	0,66	1,10	22,1	3,9
YAbN2	0,4	0,6	0,55	1,10	18,5	0
YAcN3	0,4	0,6	0,45	1,10	15,1	6,9
YAdN4	0,4	0,6	0,35	1,10	11,5	12,2
YAeN5	0,4	0,6	0,25	1,10	8,2	10,2
YBaN1	0,5	0,5	0,66	1,10	22,1	0
YBbN2	0,5	0,5	0,55	1,10	18,5	5,8
YBcN3	0,5	0,5	0,45	1,10	15,1	6,1
YBdN4	0,5	0,5	0,35	1,10	11,5	13,2
YBeN5	0,5	0,5	0,25	1,10	8,2	9,5
YCaN1	0,55	0,45	0,66	1,10	22,1	3,7
YCbN2	0,55	0,45	0,55	1,10	18,5	6,8
YCcN3	0,55	0,45	0,45	1,10	15,1	5,3
YCdN4	0,55	0,45	0,35	1,10	11,5	7,9
YDaN1	0,6	0,4	0,66	1,10	22,1	5,2
YDbN2	0,6	0,4	0,55	1,10	18,5	4,9
YDcN3	0,6	0,4	0,45	1,10	15,1	5,5
YDdN4	0,6	0,4	0,35	1,10	11,5	14,5
YFaN1	1	0	0,66	1,10	22,1	0
YFbN2a	1	0	0,55	1,10	18,5	8,6
YFbN2b	1	0	0,55	0,90	18,5	0
YFbN2c	1	0	0,55	0,70	18,5	0
YFcN3	1	0	0,45	1,10	15,1	5,2
YFdN4	1	0	0,35	1,10	11,5	2,6

- BBT ile BYT hamurları benzer davranış göstermiştir. Her ikisinde de en yüksek dayanımlar 11 M ve 0,35-0,45 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranında ölçülmüştür.
- Ç/T oranları azaldıkça dayanımlar artmıştır.
- %100 BYT ile üretilen hamurların BBT' ile üretilen 2 gün yaşındaki hamurlara göre daha yüksek basınç dayanımı verdiği görülmektedir. Bunun nedeninin BYT'nin kimyasal yapısına bağlı olduğu söylenebilir. BYT'nin içerisindeki CaO miktarı BBT'den daha yüksek olduğu için hem daha çabuk sertleşme görülmekte hem de dayanım alınabilmektedir. Bu yaklaşım puzolanik davranış ile de açıklanabilir.

## Nihai Hamur Üretimlerinde Fiziksel Özelliklere ait Deney Sonuçları

**NaOH aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz süreleri, kıvam ve yayılma bulgularının değerlendirilmesi.**

### ***BBT ile üretilen taze hamurların deney bulguları:***

BBT kullanılarak NaOH aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz başlangıcı ve bitişi süreleri, izafi kıvam ölçümleri, yayılma ve çökme test bulguları Tablo 21’de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda görsel izleme kayıtlarında bazı önemli parametrelerin katılma süresini etkilediği gözlenmiştir. Bu kapsamda yapılan deneylerde plastik vicat halkası içerisindeki hamurun priz başlangıcı ve bitişi sürelerinin metal kalıptakine göre daha uzun sürdüğü gözlenmiştir. Bazı hamurların orta noktası, kenarları ya da üst kısmı priz almış diğer kısımları ise priz almamıştır. Bu durumda hamurların priz süreleri net olarak belirlenemediği için ön deneme çalışmalarına benzer bir yaklaşımla priz süreleri priz başlangıcı için bir üst 5’lik düzene, priz sonu için bir üst 10’luk düzene göre Tablo 21’de gösterilmiştir. Bazı üretimlerde priz başlangıcı sürelerinin <5 dk için  $\pm 1$  dk, <10 dk için  $\pm 3$  dk değiştiği gözlenmiştir. Bu farklılığın hammaddenin bileşenlerinin heterojen yapıya sahip olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Üretimlerin farklı olmaması için sıcaklık, karışım metodu, karışım süresi, bileşenlerin karışıma eklenme sırası gibi parametreler aynı tutulmuş ve tüm dökümler  $50 \pm 5$  °C çözelti sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 21’e göre priz süreleri için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

➤ En uzun priz süreleri katı kısmın hacmince %100 BBT’li ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 0,25 olan hamurda olduğu gözlenmiştir. Bu hamur serisinde NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 0,45 altında olan üretimlerin priz süreleri 24 saatin üstüne çıkmıştır. Bu sebeple Tablo 21’de N/A ifadesi ile priz süreleri tanımlanmıştır. Bu grup hamurlardan dayanım da alınamamıştır. Bu hamurun priz süresinin uzaması sadece alümina silikat yapıları ve reaktivitesi düşük olan BBT’nin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, molarite ile NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranlarının düşük olmasından da kaynaklanmaktadır. Bir sonraki günde bile hamurların priz almadıkları görülmüştür. Buna ilaveten 10 saati aşan priz başlangıcı ve bitişi verileri ölçüm dışı bırakılmıştır. Çünkü çimento standardında da olduğu gibi 10 saatin üstünde priz sonlanması uygun görülmemektedir. Priz süresi aşırı geç olan hamurlarda erken ve geç dayanımların da oldukça düşük olduğu gözlenmiştir.

Tablo 21. BBT İle Üretilen NaOH Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları

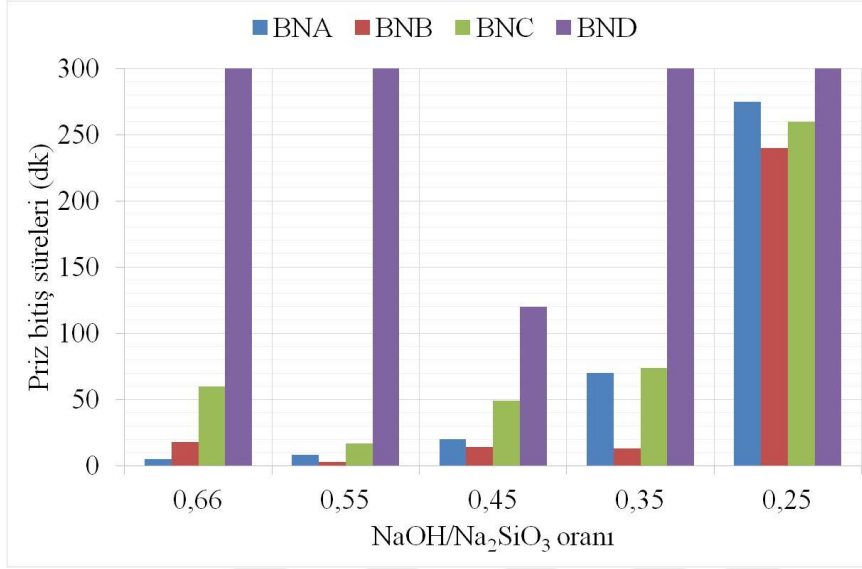
Ref. No	NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH (M)	Kıvam	Priz başlangıcı (dk)	Priz bitışı (dk)	Yayılma ve Çökme (cm)					
						1 - 2 dk		5 dk		10 dk	
						Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma
BNA1a	0,66	22,1	4	<10	<20	5	22,4	0	0	0	0
BNA2b	0,55	18,5	5	<10	<20	0,2	10	0	0	0	0
BNA3c	0,45	15,1	5	<15	<40	0	0	0	0	0	0
BNA4d	0,35	11,5	5	<30	<110	5	19	0	0	0	0
BNA5e	0,25	8,2	5	<120	<280	5	22,4	5	22,4	5	22,4
BNB1a	0,66	22,1	4	<10	<30	5	22,4	2,8	11,6	0	0
BNB2b	0,55	18,5	4	<10	<30	2,8	13	0	0	0	0
BNB3c	0,45	15,1	4	<20	<40	0	0	0	0	0	0
BNB4d	0,35	11,5	5	<20	<40	5	22,4	0	0	0	0
BNB5e	0,25	8,2	5	<100	<250	5	22,4	5	22,4	5	22,4
BNC1a	0,66	22,1	5	<40	<110	0	10,8	0	0	0	0
BNC2b	0,55	18,5	4	<30	<50	0	0	0	0	0	0
BNC3c	0,45	15,1	4	<30	<80	4	13,1	0	0	0	0
BNC4d	0,35	11,5	5	<50	<130	5	21,5	0	0	0	0
BNC5e	0,25	8,2	5	<120	<300	5	22,4	5	22,4	5	22,4
BND6a	0,66	22,1	3	N/A	N/A	5	22,4	0	15,5	0	0
BND7b	0,55	18,5	4	<200	N/A	0	10,5	0	0	0	0
BND3c	0,45	18,5	3	<300	N/A	5	22,4	5	22,4	5	22,4
BND4d	0,35	15,1	3	N/A	N/A	5	22,4	5	22,4	5	22,4
BND5e	0,25	11,5	3	N/A	N/A	5	22,4	5	22,4	5	22,4

➤ BNA5e, BNB5e, BNC5e ve BND5e hamurları molaritesi 8,2 ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranları 0,25 olan hamurlardır. Bu hamurların priz sürelerinin diğerlerine göre çok uzun olduğu gözlenmiştir. Sadece BND3c ve BND7b hamurları priz almıştır. Ancak bu serilerin bile priz bitiş süreleri 10 saatin üstüne çıktığı için kayıt alınamamıştır. Öndökümlerde olduğu gibi nihai dökümlerde de molaritesi, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı düşük ve BBT miktarı fazla olan hamurların priz süreleri uzun sürmüştür.

➤ En düşük priz süresi 3 dk ile BNB2b hamurunda (katı kısmın hacmince %55 BBT, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,55) ölçülmüştür. Benzer şekilde diğer serilerde de en düşük priz süreleri NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,55 oranında ölçülmüştür.

➤ NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı azaldıkça priz sürelerinde uzama gerçekleşmiştir. Tablo 21’de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 16’da histogram diyagramı ile verilmiştir.

Jeopolimer karışımlarının priz süreleri sodyum silikat aktivatörünün oranıyla da kontrol edilebilmektedir.  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  molar oranı ne kadar yüksek olursa priz süresi o kadar kısa olmaktadır (Tchakoute, Elimbi, Yanne, & Djangang, 2013). ancak bu çalışmada  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranının spesifik bir değerinin priz sürelerinin değişiminde çok daha önemli olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, çalışmada ölçülen en kısa priz başlangıcı ve bitiş süresinin  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ : 0,55 oranında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 16. BBT ile üretilen NaOH aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$  arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı

Tablo 21'e göre priz süreleri için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

- $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ : 0,25 oranına sahip tüm hamurların yüksek akışkanlığa sahip olduğu ve 10 dk sonunda bile işlenebilirlik kaybına uğramadığı gözlemlenmiştir. Ancak molaritesi yüksek ve priz süreleri kısa olan hamurların neredeyse 2 dk sonra bile işlenebilirliklerinin oldukça düştüğü gözlemlenmiştir.
- $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı düştükçe hamurların akıcılıkları arttığı için yaklaşık olarak tablanın çapı kadar yayılmışlardır.
- Aşırı kohezif yapıya sahip olan BNA3c, BNB3c, BNC3b gibi hamurların üzerinden çökme değerleri ölçülemedi. Deney sırasında hamurun doldurulduğu bakır kap kaldırıldığında, hamur kaba yapışmakta ve böylece çökme değil aksine bakır kap çekildiğinde uzama gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bu deneyin alkali aktive edilmiş hamurlar üzerinde sağlıklı sonuç vermediği düşünülmektedir.
- BNA4d, BNA4d gibi hamurların priz süreleri uzun olsa da 5dk sonrası işlenebilirlikleri oldukça düşmektedir.

Hamurların buldukları kalıbın özelliğine göre farklı davranış göstermelerinden dolayı priz süreleri, yayılma ve çökme değerleri etkilenmektedir. Elde edilen bu bulgulara göre yayılma değeri molariteden, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranından ve BBT miktarından etkilenmektedir. Literatürde molaritenin akış üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile yapılan bir çalışmada da alkali solüsyonun molaritesinin artmasıyla akıcılığın azaldığı belirtilmektedir (Nadoushan & Ramezianpour, 2016).

***BYT ile üretilen taze hamurların deney bulguları:***

BYT kullanılarak NaOH aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz başlangıcı ve bitiş süreleri, izafi kıvam ölçümleri, yayılma ve çökme test bulguları Tablo 22’de verilmiştir.

Tablo 22’ye göre priz süreleri için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

BYT ile üretilen hamurların priz süreleri BBT ile üretilen hamurlardan daha kısadır. Bu durum BYT’nin kimyasal yapısı ile ilişkilidir. BYT içerisinde prizin hızlanmasını sağlayacak CaO miktarının BBT’den daha fazla olması priz sürelerini kısaltmaktadır. Literatürde alkali aktive edilmiş malzemelerde özellikle sodyum silikat ile birlikte CaO kullanılmasının veya miktarının artmasının priz süresini hızlandırdığı belirtilmektedir (Chindaprasirt, Phoo-ngernkham, Hanjitsuwan, Horpibulsuk, Poowancum, & Injorhor, 2018). Ancak bu çalışmada ilk 3 seride katı kısmın hacmince %5’lik fark olmasına rağmen priz süreleri arasında çok büyük farklar görülmemiştir. Benzer olarak BBT ve BYT kullanılarak 8,2M, Ç/T: 1,10 ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 0,25 oranları ile dökülen hamurların priz sürelerinin oldukça uzun olduğu görülmüştür.

Tablo 22’ye göre yayılma ve çökme ölçümleri için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

BYT ile üretilen hamurların büyük bir çoğunluğunun ilk 2 dk içerisinde yaklaşık olarak tabla çapı kadar yayıldıkları ve tamamen çöktükleri gözlenmiştir. YNA1a, YNB2a hamurlarının bakır kabın içerisine yerleştirilmeden katılaştığı görülmüş ve dolayısıyla yayılma ölçülememiştir. 5 dk’dan sonra hamurlarda yayılma miktarının azalmaya başladığı ve bazı hamurların çok çabuk katılaştığı görülmüştür. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> katı madde oranının azalmasıyla alkali aktivatörün molaritesinin düştüğü ve karışımın viskozitenin azalmasıyla birlikte jeopolimerizasyon olayının yavaşladığı bilinmektedir. Böylece işlenebilirliğin arttığı bilinmektedir.

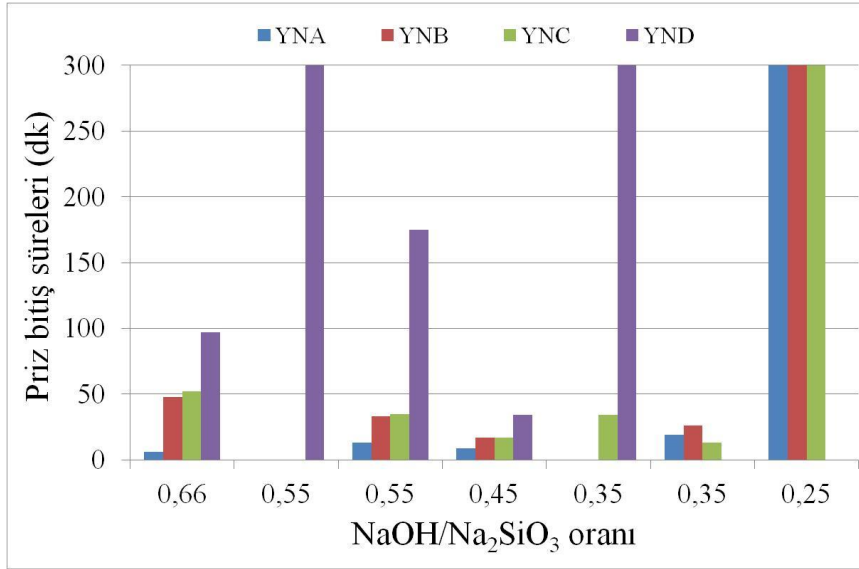
Tablo 22. *BYT İle Üretilen NaOH Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları*

Ref. No	NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ağırlıkça)	NaOH (M)	Kıvam	Priz baş (dk)	Priz sonu (dk)	Yayılma ve Çökme (cm)					
						1 - 2 dk		5 dk		10 dk	
						Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma
YNA1a	0,66	22,1	3	<10	<20	1	10,5	0	0	0	0
YNA2b	0,55	18,5	4	<10	<30	5	22,4	5	22,4	0	10,2
YNA3c	0,45	15,1	3	<10	<20	5	10	0	0	0	0
YNA4d	0,35	11,5	5	<20	<40	5	22,4	1,2	23,5	0	10,3
YNA5e	0,25	8,2	5	>60	N/A	5	22,4	5	22,4	5	22,4
YNB1a	0,66	22,1	3	<10	<60	1	10,5	0	0	0	0
YNB2b	0,55	18,5	4	<10	<50	5	22,4	5	22,4	0	0
YNB3c	0,45	15,1	3	<10	<30	3	10	0	0	0	0
YNB4d	0,35	11,5	5	<20	<50	5	22,4	0	0	0	0
YNB5e	0,25	8,2	5	>60	N/A	5	22,4	5	22,4	5	22,4
YNC1a	0,66	22,1	3	<10	<70	5	22,4	1	12,4	0	0
YNC2b	0,55	18,5	4	<20	<60	5	22,4	0	13,9	0	0
YNC3c	0,45	15,1	4	<10	<30	5	22,4	5	22,4	5	22,4
YNC4d_9	0,35	11,5	3	<20	<60	5	22	1	10,5	0	0
YNC4d_7	0,35	11,5	3	<10	<30	5	22,4	12	0	0	0
YNC5e	0,25	8,2	5	>60	N/A	5	22,4	5	22,4	5	22,4
YND1a_7	0,66	22,1	3	<30	<130	5	17,2	1,2	12,2	0	10,3
YND2b_9	0,55	18,5	4	>60	>360	5	22,4	5	22,4	0	0
YND2b_7	0,55	18,5	5	<60	<180	5	22,4	5	22,4	1,8	20,8
YND3c_7	0,45	15,1	4	<20	<60	5	22,4	5	22,4	0	14,5
YND4d_7	0,35	11,5	4	>60	N/A	5	22,4	5	22,4	1,5	18,5

BYT ile üretilen hamurlarda NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının düşük olması priz süresini oldukça uzatmış ve hatta bazı hamurlarda katılaşmanın gerçekleşmediği gözlenmiştir. Buna bağlı olarak 1 saate kadar yapılan yayılma ve çökme ölçümlerinde bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Hamurların yayılmaları, kıvamları ve priz süreleri doğru orantılı olsa bile bazı hamurların Özellikle D serisindeki yüksek kohezif yapıda olması sebebiyle çökme ölçülememiştir. Tablo 22’de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 17’de histogram diyagramı ile verilmiştir.

Genel olarak BBT ve BYT kullanılarak üretilen hamurların priz süresi sonuçlarına göre;

- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> miktarı azaldıkça priz süresi uzamaktadır.
- Ç/T oranı arttıkça priz süresi uzamaktadır.
- Molarite ile priz süresi ters orantılıdır.
- BT miktarı arttıkça hamurların priz sürelerinde uzama meydana gelmiştir.



Şekil 17. BYT ile üretilen NaOH aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı

### **Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz süreleri, kıvam ve yayılma bulgularının değerlendirilmesi.**

#### ***BBT ile üretilen taze hamurların deney bulguları:***

BBT kullanılarak Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz başlangıcı ve bitiş süreleri, izafi kıvam ölçümleri, yayılma ve çökme test bulguları Tablo 23'te verilmiştir.

Tablo 23'e göre priz süreleri için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

BBT ile üretilen Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörlü taze hamurların priz süreleri NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlardan daha kısadır. Literatürde yapılan çalışmalarda yüksek kalsiyum içerikli malzemelerin priz süresini etkilediği belirlenmiştir. Literatürde yapılan bir çalışmanın sonucuna göre CaO kullanılması priz süresini hızlandırmıştır ( Chindaprasirt, & Rattanasak, 2019). En uzun priz bitiş süresi 62 dk ile BCC2 hamuru olmuştur. Bu hamurda priz süresinin uzun sürmesinin sebebi Ç/T oranının yüksek olmasından dolayıdır. Ayrıca içerisindeki BBT oranının %60 olması priz süresinin uzamasına neden olmuştur. Kireç miktarı %30 olan BBT ile üretilmiş hamurlar içerisinde en uzun priz süreleri %60 BBT kullanılarak üretilen hamurlarda ölçülmüştür. Bunun sebebi MT'nin karışım içinde oranının azalması ile alümina

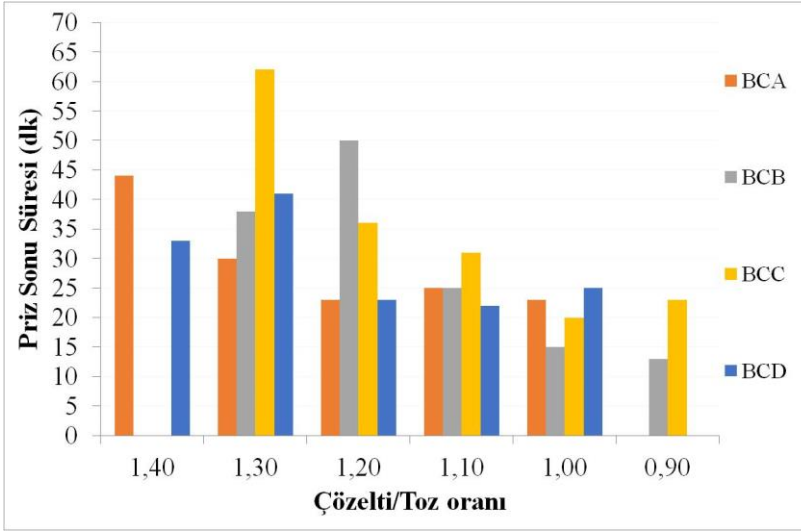
silikat kaynağı olan BBT'nin miktarındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Kireç miktarı arttıkça hamurlarda priz sonu süreleri kısalsa da büyük farklılıklar oluşmamıştır. En uzun priz süreleri en yüksek Ç/T oranlarında ölçülmüştür. Priz bitiş süreleri tüm hamurlarda en az 20 dk olduğu gözlenmiştir. Ayrıca MT oranı azalıp BBT oranı arttıkça priz süreleri uzamıştır.

Tablo 23. BBT İle Üretilen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları

Ref. No	Ç/T	Kıvam		Priz baş (dk)	Priz sonu (dk)	Yayılma ve Çökme					
		Döküm anı	Döküm sonu			1 - 2 dk		5 dk		10 dk	
						Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma
BCA1	1,40	4	2	<10	<50	5	22,4	0	0	0	0
BCA2	1,30	4	3	<10	<30	5	22,4	0	0	0	0
BCA3	1,20	3	2	<5	<30	5	22,4	0	10,5	0	0
BCA4	1,10	3	2	<10	<30	0	10,7	0	0	0	0
BCA5	1,00	3	2	<5	<30	0	0	0	0	0	0
BCB2	1,30	5	4	<10	<40	0	10,5	0	0	0	0
BCB3	1,20	4	3	<10	<50	0	11	0	0	0	0
BCB4	1,10	3	2	<10	<30	0	10,5	0	0	0	0
BCB5	1,00	3	2	<5	<20	0	0	0	0	0	0
BCB6	0,90	2	2	<5	<20	0	0	0	0	0	0
BCC2	1,30	5	4	<10	<60	5	22,4	0	10,5	0	0
BCC3	1,20	4	3	<5	<40	4	18	0	0	0	0
BCC4	1,10	4	3	<10	<30	0	11	0	0	0	0
BCC5	1,00	3	2	<10	<20	0	0	0	0	0	0
BCC6	0,90	2	1	<10	<30	0	0	0	0	0	0
BCD1	1,40	5	4	<20	<40	5	22,4	0	11	0	0
BCD2	1,30	4	2	<10	<40	5	22,4	0	10,5	0	0
BCD3	1,20	4	2	<5	<30	3	11,5	0	0	0	0
BCD4	1,10	3	2	<10	<30	0	0	0	0	0	0
BCD5	1,00	3	2	<5	<30	0	0	0	0	0	0

BBT ile üretilen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörlü taze hamurlarda sadece Ç/T ve BBT:MT: $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oranları etkili olmuştur. Tablo 23'te verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 18'de histogram diyagramı ile verilmiştir.





Şekil 18. BBT ile üretilen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile Ç/T oranı arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı

Tablo 23'e göre kıvam, yayılma ve çökme ölçümleri için aşağıdaki değerlendirme yapılabilir:

Tablo 23'e göre hamurların ilk 2 dk'dan sonra yayılma ve çökme değerlerinde azalmalar meydana geldiği ve bazı hamur serilerinin tamamen akıcılığını kaybettiği gözlemlenmiştir. Ç/T oranı azaldıkça hamurların kıvamlarında katılaşma ve daha çabuk işlenebilirlik kaybı gözlemlenmiştir. Bu durumda hızlı sertleşen malzemelerden yayılma ve çökme değeri alınamamaktadır. Tablo 23'te verilen değerleri karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 18'de histogram diyagramı ile verilmiştir.

#### ***BYT ile üretilen taze hamurların deney bulguları:***

BYT kullanılarak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörü ile üretilen taze hamurların priz başlangıcı ve bitiş süreleri, izafi kıvam ölçümleri, yayılma ve çökme test bulguları Tablo 24'te verilmiştir.

Tablo 24'e göre priz süreleri için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

BYT ile üretilen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörlü taze hamurların priz süreleri BBT'li hamurlara benzer davranış göstermiştir. En uzun priz süresi YCD1 hamurunda (BBT:MT: $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oranı 0,5:0:0,5) 65 dk olarak ölçülmüştür. Priz sürelerinin uzun olmasında en etkin parametrenin Ç/T oranı olduğu görülmüştür. Bu seri hamurlarda priz bitiş süresi uzun gibi görünse de, işlenebilirlik yaklaşık 5 dk içerisinde tamamen kaybolmuştur. Hamurlar mikserdeyken katılaşmaya başlamış ve birçok hamur bir anda akıcılığını tamamen kaybetmiştir.

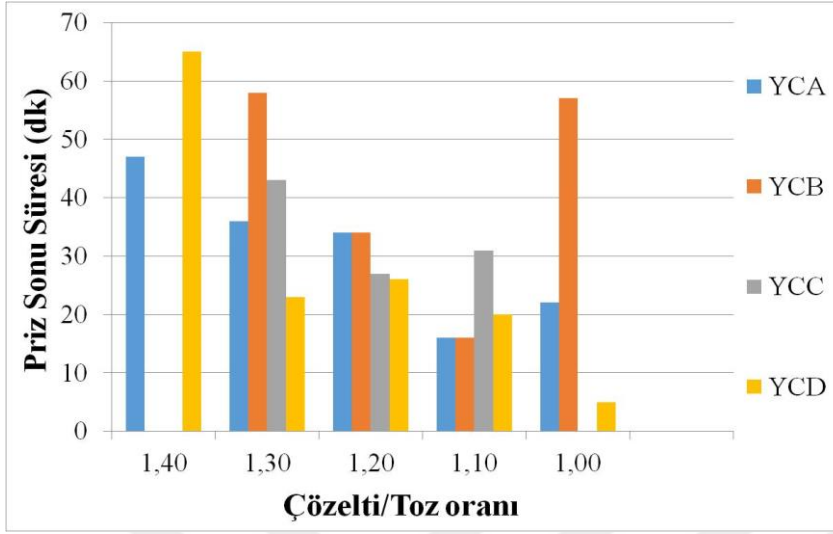
Tablo 24. *BYT İle Üretilen Ca(OH)<sub>2</sub> Aktivatörlü Taze Hamurların Deney Sonuçları*

Ref. No	Ç/T	Kıvam				Yayılma ve Çökme					
		Döküm anı	Döküm sonu	Priz baş (dk)	Priz sonu (dk)	1 - 2 dk		5 dk		10 dk	
						Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma	Çökme	Yayılma
YCA1	1,40	5	4	8	47	0	0	0	0	0	0
YCA2	1,30	4	3	8	36	0	10,5	0	0	0	0
YCA3	1,20	3	2	7	34	4,5	18	0	0	0	0
YCA4	1,10	3	2	7	16	0	10	0	0	0	0
YCA5	1,00	2	1	5	22	0	0	0	0	0	0
YCB2	1,30	5	5	6	58	0	10,8	0	0	0	0
YCB3	1,20	5	4	8	34	1,2	11,5	0	0	0	0
YCB4	1,10	4	3	9	16	0	11,5	0	0	0	0
YCB5	1,00	3	1	5	57	0	10,6	0	0	0	0
YCB6	0,90	2	1	4	45	0	0	0	0	0	0
YCC2	1,30	4	3	8	43	5	22,4	0	10,2	0	0
YCC3	1,20	4	3	5	27	2	12,5	0	0	0	0
YCC4	1,10	2	1	4	31	0	0	0	0	0	0
YCC5	1,00	1	1	5	23	0	0	0	0	0	0
YCC6	0,90	1	1	4	45	0	0	0	0	0	0
YCD1	1,40	4	2	5	65	5	22,4	0	0	0	0
YCD2	1,30	3	2	4	23	5	22,4	0	10,3	0	0
YCD3	1,20	3	2	6	26	0	10,6	0	0	0	0
YCD4	1,10	3	2	5	20	0	10,9	0	0	0	0
YCD5	1,00	3	2	5	5	0	0	0	0	0	0

Tablo 24'e göre kıvam, yayılma ve çökme ölçümleri için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

Tablo 24'e göre hamurların ilk 2 dk'dan sonra yayılma ve çökme değerlerinde azalmalar meydana geldiği ve bazı hamur serilerinin tamamen akıcılığını kaybettiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan NaOH ile üretilen hamurlarla karşılaştırıldığında işlenebilirliğin çok daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ç/T oranı azaldıkça hamurların kıvamlarında katılaşma ve daha çabuk işlenebilirlik kaybı gözlemlenmiştir. Bu durumda hızlı sertleşen malzemelerden yayılma ve çökme değeri alınamamaktadır. Tablo 24'te verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 19'da histogram diyagramı ile

verilmiştir. Taze hamurlar üzerinde gerçekleştirilen deneylerin neticesinde elde edilen nitel ve nicel gözlemler Tablo 25 ve 26’da özetlenmiştir.



Şekil 19. BYT ile üretilen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörlü taze hamurların priz bitiş süreleri ile Ç/T oranı arasındaki ilişkinin karşılaştırma histogramı

Tablo 25. Priz Süresi Tayin Etme Sonuçlarının Karşılaştırılması

<b>Priz Süresi Tayin Etme</b>			
<b>NaOH</b>		<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	
<b>BBT</b>	<b>BYT</b>	<b>BBT</b>	<b>BYT</b>
En uzun priz başlangıcı süresi <b>24 &lt; dk.</b>	En uzun priz başlangıcı süresi <b>60 &lt; dk.</b>	En uzun priz başlangıcı süresi <b>17 dk.</b>	En uzun priz başlangıcı süresi <b>9 dk.</b>
En uzun priz sonu süresi <b>24 sa&lt;</b>	En uzun priz sonu süresi <b>24 sa&lt;</b>	En uzun priz sonu süresi <b>62 dk.</b>	En uzun priz sonu süresi <b>65 dk.</b>
En kısa priz başlangıç süresi <b>3 dk</b>	En kısa priz başlangıç süresi <b>3 dk</b>	En kısa priz başlangıç süresi <b>4 dk.</b>	
En kısa priz bitiş süresi <b>3 dk</b>	En kısa priz bitiş süresi <b>6 dk</b>	En kısa priz bitiş süresi <b>13 dk.</b>	En kısa priz bitiş süresi <b>5 dk</b>
Molarite düştükçe priz süresi uzuyor.		Ç/T oranı arttıkça priz süresi uzuyor	
NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> oranı düştükçe priz süresi uzuyor.		BT oranı arttıkça priz süresi uzuyor.	
% 100 BBT ile dökülen hamurlar 24 saat içinde priz almadı.	% 100 BBT ile dökülen hamurlar priz aldı (ancak uzun sürüyor).	Ç/T oranı arttıkça priz süresi uzuyor. Kireç miktarı arttıkça priz başlangıç süresi kısalmış.	
Karışımdaki BT oranı arttıkça priz süresi uzuyor.			
En kısa priz sonu süresinin <b>NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,55</b>	En kısa priz sonu süresinin <b>NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,45</b>	BBT priz başlangıcı süresini etkiliyor.	BYT'nin priz başlangıcı süresini etkiliyor, ancak priz sonu süresini etkilemiyor.
En kısa prize başlama süresi <b>NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,55</b>	En kısa prize başlama süresi <b>NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,66</b>		
Priz başlangıcı ve bitiş süresi davranışları benzer.			
Etkin parametreler ortak.		Kireç aktivatörü priz sürelerini kısaltmış	
% 100 BYT ile üretilen bazı hamurlar katılaşıırken, % 100 BBT ile üretilen hamurlar katılaşmıyor.		BBT ile üretilen hamurlarda kireç miktarı priz bitiş süresini kısaltırken BYT ile üretilen hamurlarda priz süresini etkilemiyor.	
MT oranı priz süreleri, kıvam ve yayılma özelliklerini eşit oranda etkiliyor.			
BBT ve BYT miktarının artması ile her iki aktivatörde de priz süreleri uzuyor.			
En düşük priz başlangıç ve priz sonu süreleri her iki aktivatör için de birbirine çok yakın, sebebi <b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>			

Tablo 26. Yayılma Tablası Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

<b>Yayılma Tablası Deneyi</b>			
<b>NaOH</b>		<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	
<b>BBT</b>	<b>BYT</b>	<b>BBT</b>	<b>BYT</b>
Molarite düştükçe yayılma miktarı artıyor.		Ç/T oranı düştükçe çökme ve yayılma azalıyor.	
NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> oranı düştükçe yayılma ve çökme değeri artıyor.		Kireç miktarı arttıkça yayılma ve çökme azalıyor.	
En az yayılma miktarı	En az yayılma miktarı	<b>5 dk.</b> Sonunda tüm hamurların çökme ve yayılması olmadı.	
<b>NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,55-0,45</b> oranlarında görüldü.	<b>NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,45</b> oranında görüldü.		
İlk <b>5</b> dakikadan sonra birçok hamurun çökme ve yayılma <b>alınmadı.</b>	İlk <b>5</b> dakikadan sonra birçok hamurun çökme ve yayılma <b>alınabildi.</b>	<b>Çabuk</b> katılaşma görülüyor. Katılaşma olsa bile priz tamamlanmıyor ve devam ediyor.	<b>Ani</b> katılaşma görülüyor. Katılaşma olsa bile priz tamamlanmıyor ve devam ediyor.
		İşlenebilirlikte <b>çabuk</b> düşüş var.	İşlenebilirlikte <b>ani</b> düşüş var.
<b>NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25 ve 8,2 M</b> <b>15 dk</b> sonunda bile en yüksek çökme ve yayılma değerini verdi.		Priz süresi geç bitse bile işlenebilirlik <b>5 dk</b> sonunda her iki bağlayıcı için tamamen bitiyor.	
Hızlı kristallenme (donma) görülürken	İşlenebilirliği daha uzun sürdü. ani kristallenme (donma) görüldü.	Ç/T oranı en etkin parametrelerden biridir.	
		Kireç miktarının artması yayılma ve çökmeyi neredeyse 0'a çekiyor.	
Yayılma ve çökme değerleri NaOH aktivatörü için daha anlamlı.			
İşlenebilirlik NaOH aktivatörü için daha ideal.			
Her iki aktivatörde BBT ile dökülen hamurlarda hızlı katılaşma varken BYT ile dökülen hamurlarda ani katılaşma var.			

## Nihai Hamur Üretimlerinde Mekanik Özelliklere Ait Deney Sonuçları

NaOH aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirmeleri.

*BBT ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları:*

BBT ile üretilen sertleşmiş hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı deney sonuçları ile birim hacim ağırlık (BHA) ölçümleri Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 27. BBT İle Üretilen Naoh Aktivatörlü Hamurların Basınç Dayanımı Deneyi Ve Birim Hacim Ağırlık (BHA) Ölçüm Sonuçları

Kod	n	2 gün		28 gün		90 gün	
		MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>
BNA1a	2	3,83	1,86	6,80	1,80	10,10	1,77
BNA2b	2	5,87	1,89	13,30	1,88	13,30	1,72
BNA3c	2	10,50	1,94	19,00	1,84	19,80	1,75
BNA4d	2	15,80	1,91	21,20	1,80	20,25	1,73
BNA5e	2	14,67	1,87	12,65	1,70	6,60	1,74
BNB1a	2	5,53	1,88	12,90	1,82	16,50	1,76
BNB2b	2	10,07	1,91	18,20	1,86	14,05	1,75
BNB3c	2	15,33	1,94	22,50	1,86	22,80	1,79
BNB4d	2	10,43	1,88	23,05	1,81	19,95	1,79
BNB5e	2	10,53	1,84	16,55	1,73	6,40	1,56
BNC1a	2	3,27	1,88	8,75	1,83	11,30	1,77
BNC2b	2	6,23	1,88	15,45	1,83	18,30	1,79
BNC3c	2	12,17	1,89	21,05	1,85	19,70	1,77
BNC4d	2	11,87	1,85	19,10	1,75	18,95	1,67
BNC5e	2	11,07	1,87	14,20	1,71	6,55	1,55
BND6a	2	0,00	0	0,00	0	0,00	0
BND7b	2	3,47	1,90	7,25	1,84	14,30	1,84
BND3c	2	1,13	1,90	4,35	1,83	4,80	1,81
BND4d	2	0,00	0	0,00	0	0,00	0
BND5e	2	0,00	0	0,00	0	0,00	0

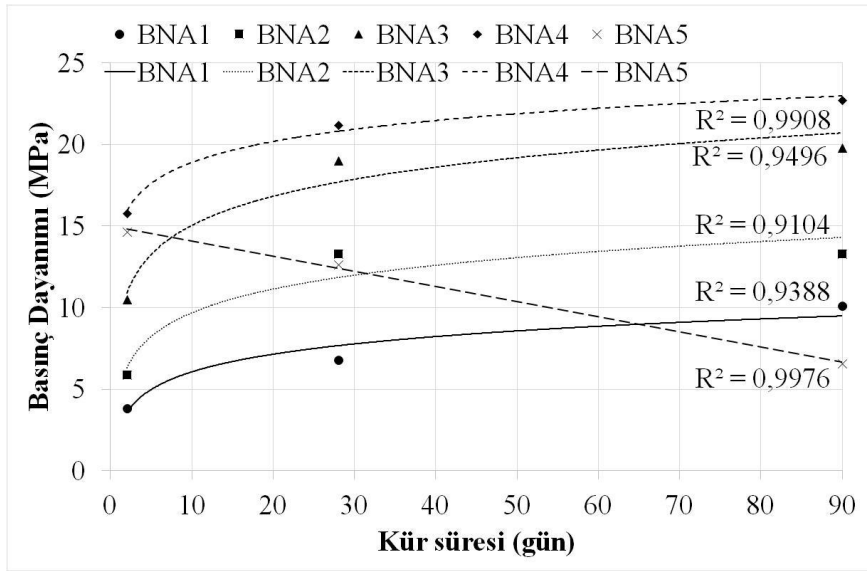
Tablo 27 ile ilgili genel değerlendirme:

- BBT oranı arttıkça dayanımda düşüş gerçekleşmiştir.
- %100 BBT ile hazırlanan hamurlardan sadece 2 seri priz almış ve dayanım ölçülebilmıştır.
- En yüksek erken dayanımların BBT:MT oranı 0,55:0,45'tir.
- Dayanımlardaki farklılık molariteden, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranından ve katı madde miktarından kaynaklanmaktadır.

Hamurların Ç/T oranlarının eşit tutulması ile Ç/T'nin etkisi ortadan kaldırılmıştır. Burada asıl amaç molarite ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> etkisinin görülmesidir. Tablo 27'de 2, 28 ve 90 gün yaşlarına ilişkin basınç dayanımları sonuçları en az 2 numunenin aritmetik ortalamasıdır. Ön denemelerde Ç/T oranı 0,70'e kadar çekilebilmiştir. Ancak bu şekilde priz süresi oldukça kısalmış ve işlenebilirlik çok azalmıştır. Dolayısıyla nihai üretimlerde hem işlenebilirliğin hem de priz süresinin yeterli olması için 1,10 Ç/T oranına göre tasarım yapılmıştır. Tek parametre Ç/T oranı olmadığı için aynı anda döküm anı sıcaklığı, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı, katı madde miktarı ve molarite kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada priz süresinin işlenebilirlik için ideal olması hedeflenmiş ve hamur üretimleri buna göre gerçekleştirilmiştir. En düşük basınç dayanımları ise ön dökümlerdeki gibi yüksek molarite ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranlarından alınmıştır. Bu hamurlar hem çabuk katılaşmakta hem de kalıba yerleştirilebilecek işlenebilirliğe sahip değillerdir. Tablo 27'de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 20'de korelasyon diyagramı ile verilmiştir.

Şekil 20'ye göre BBT:MT oranı 0,5:0,5 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

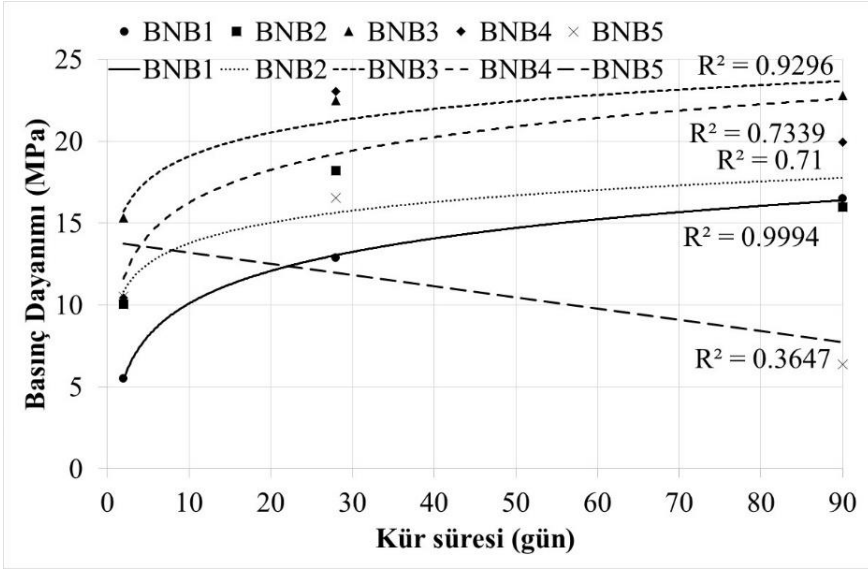
- Erken basınç dayanımı en yüksek ve en düşük olan hamurlar sırasıyla BNA4d ve BNA1a hamurlarıdır. Basınç dayanımları sırasıyla 15,80 ve 3,83 MPa olarak ölçülmüştür.
- Geç basınç dayanımı en yüksek ve en düşük olan hamurlar sırasıyla BNA4d ve BNA5e hamurlarıdır. Dayanımları 20,25 ve 6,60 MPa olarak ölçülmüştür.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25-0,45 oranı için en yüksek erken basınç dayanımı 15,80 MPa olarak elde edilmiştir. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,66 oranı için en düşük erken basınç dayanımı 3,83 MPa olarak elde edilmiştir.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,35-0,45 oranı için en yüksek geç basınç dayanımı 20,25 MPa olarak elde edilmiştir. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25 oranı için en düşük geç basınç dayanımı 6,60 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 20. BBT:MT oranı katı madde hacmince 0,5:0,5 olan hamurların basınç dayanımlarının korelasyon eğrileri

- En düşük dayanımlı hamurlar molaritesi en yüksek olan hamurlardır.
- 28 günlük basınç dayanımları, 2 günlük basınç dayanımına göre BNA1a, BNA2b, BNA3c, BNA4d ve BNA5e hamurları için sırasıyla %77,55, %126,58, %80,95, %34,18 ve %-13,77 gelişim göstermiştir. Dayanım kaybı sadece BNA5e hamurunda yaşanmıştır. Bu hamurun NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının ve molaritesinin düşük olmasından dolayı dayanım kaybettiği düşünülmüştür.
- 90 günlük basınç dayanımları, 28 günlük basınç dayanımına göre BNA1a, BNA2b, BNA3c, BNA4d ve BNA5e hamurları için sırasıyla %48,52, %0, -%31,05, -%4,48 ve -%47,82 gelişim göstermiştir.
- BNA4d hamurunda dayanım belirli bir noktaya kadar artmış ardından azalmaya başlamıştır. Sodyum tuzuna bağlı olarak SEM+EDS analizlerinde de görüldüğü üzere aşırı tuzlanmış yüzey ve gözenek yapıları dayanımların düşmesine temel sebep olarak gösterilmiştir.
- BNA3c, BNA4d ve BNA5e hamurlarında 28 günden sonra dayanım kaybı yaşanmıştır.
- En yüksek dayanım kaybı BNA5e hamurunda gerçekleşmiştir. Bu hamurdaki dayanım kaybının sebebi molariteye bağlıdır. Düşük molariteye sahip hamurların nihai dayanımlarının düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca bu hamur en çok genleşme ve tozuma yapan hamurdur.



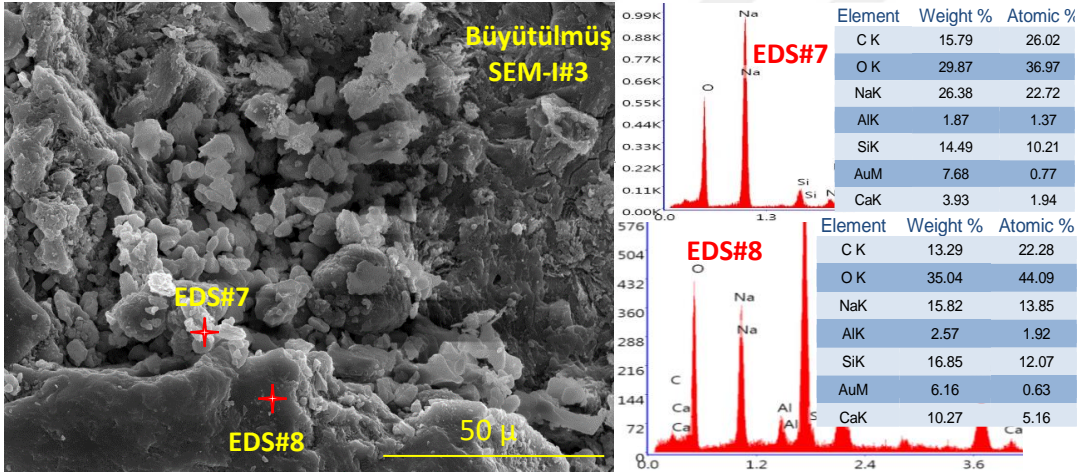
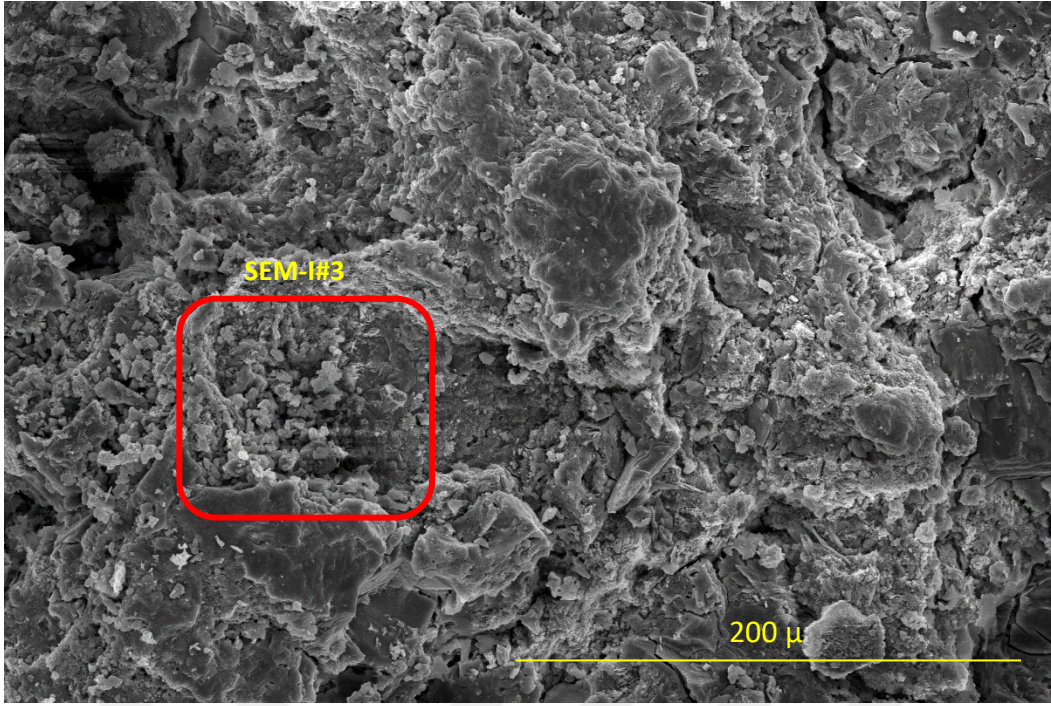


Şekil 21. BBT:MT oranı katı madde hacmince 0,55:0,45 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

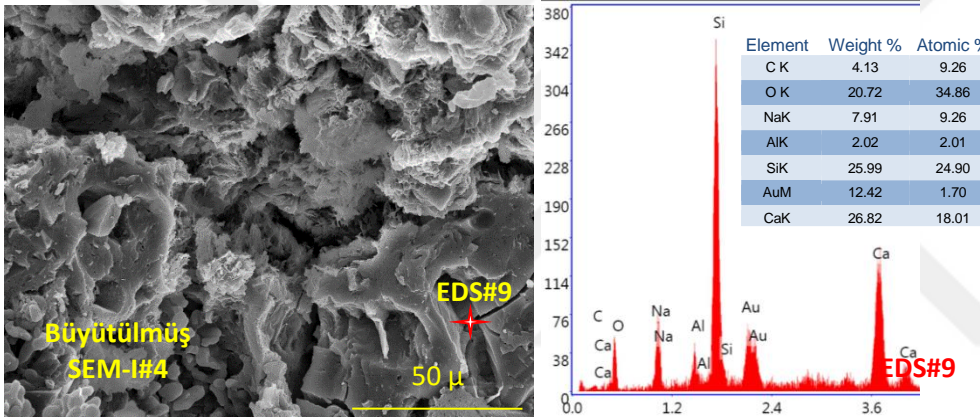
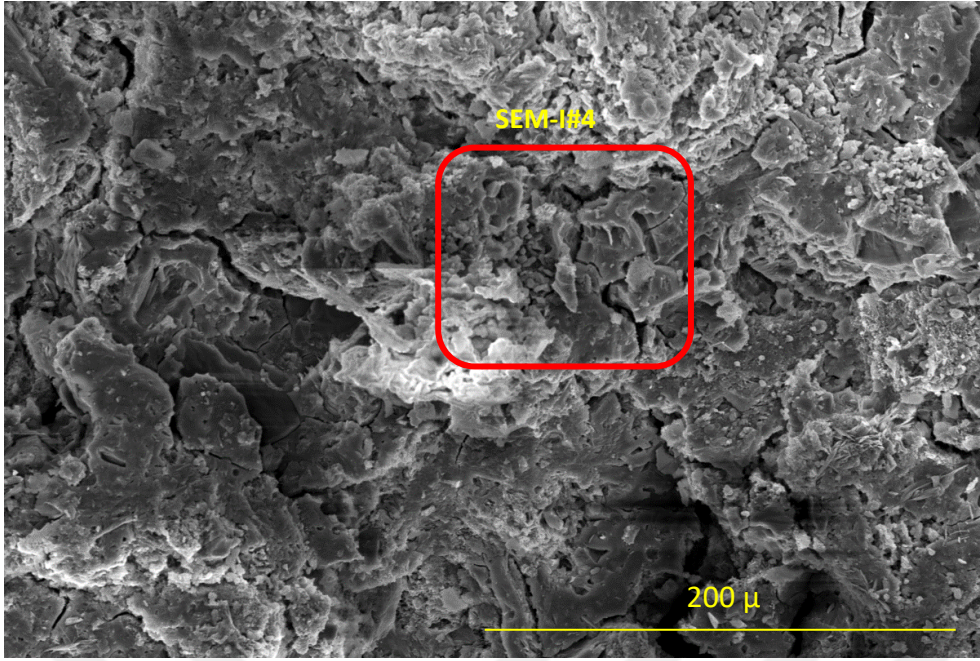
Tablo 27'de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 21'de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 21'e göre BBT:MT oranı 0,55:0,45 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı için en yüksek erken dayanım 0,45 oranından alınmıştır. En düşük erken dayanım ise 0,66 oranına sahip hamurdan alınmıştır.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 0,35-0,45 oranı en yüksek geç dayanım aralığıdır. En düşük geç dayanımlar ise 0,25 oranında ölçülmüştür.
- 28 günlük basınç dayanımları, 2 günlük basınç dayanımına göre BNB1a, BNB2b, BNB3c, BNB4d ve BNB5e hamurları için sırasıyla %133,27, %80,73, %46,77, %121 ve %57,17 gelişim göstermiştir.
- 90 günlük basınç dayanımları, 28 günlük basınç dayanımına göre BNB1a, BNB2b, BNB3c, BNB4d ve BNB5e hamurları için sırasıyla %27,91, -%22,80, %1,33, -%13,45 ve -%61,33 olarak ölçülmüştür.
- BNB2b, BNB4d ve BNA5e hamurlarında 28 günden sonra dayanım kaybı yaşanmıştır. Basınç dayanımları molarite ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı ile ilişkilendirilmektedir.
- Erken basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek ve en düşük dayanımlı hamurlar sırasıyla BNB3c ve BNB1a hamurlarıdır. Dayanım değerleri sırasıyla 15,33 ve 5,53 MPa olarak ölçülmüştür.

➤ 90 gün yaşında basınç dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla BNB3c ve BNB5e hamurlarıdır. Dayanımları sırasıyla 22,80 ve 6,40 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 22 ve 23'te en yüksek dayanıma sahip hamurdan elde edilen SEM görüntüleri ile EDS analizleri verilmiştir. Bu görüntü ve analizlere göre basınç dayanımının yüksek olmasının en önemli göstergesi yüzeydeki rijit izotropik amorf yapının yoğunluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu rijit yapılar üzerinden oluşturulan elemental analize göre (EDS#8) Ca-Si-Na oranının atomik yüzdelere göre bu molekül  $n(\text{Na}_2\text{O}).m(\text{CaO}).t(\text{SiO}_2).z(\text{H}_2\text{O})$  olarak yazılabilir. Burada asıl jeopolimer yapısı N-S-H olup bu yapıya CaO'nun dahil olmasıyla birlikte dayanım artışı gerçekleşmiştir. SEM görüntüleri ayrıntı olarak incelendiğinde dayanım düşüklüğünün temel sebebi olarak NaO tuzunun CO<sub>2</sub> ile karbonatlaşarak molekülden uzaklaşması ile oluşan özellikle SEM görüntülerinde yüzeyde ve gözenek kısımlarındaki Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> oluşumu sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Bunu destekleyecek görüntü ve analizler Şekil 24 ve Şekil 25'te verilmiştir. SEM görüntülerinde özellikle yüzey ve gözeneklerde tuz oluşumlarının yüksek oranda olması rijit amorf ve dayanım artırıcı mikro yapıların önüne geçmiştir. Belki de bu rijit amorf yapılar bozularak (NaO karbonatlaşması sonrasında molekülden ayrılarak) N-S-H ya da N-S-(C)-H yapısının dağılmasına sebep olmuştur bundan dolayı en düşük dayanımlar özellikle NaO tuzunun yoğunlaştığı hamurlarda gerçekleşmiştir. Örneğin, Şekil 25'te EDS#13 elemental analizinde sodyum atomu ağırlıkça %22, silis atomu ağırlıkça %4 ve kalsiyum atomu ağırlıkça %1 oranlarında verilmiştir. Elemental analizi oluşturulan yapı incelendiğinde yapının anizotropik, levhasal ve parçalı bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. Bu yapı bozulmuş ya da sitekiometrik oranların yetersiz olduğu bir yapıyı göstermektedir. Bu sebeple bu tip yapıların da yoğunlukta olduğu hamurlar düşük dayanım sergilemiştir.

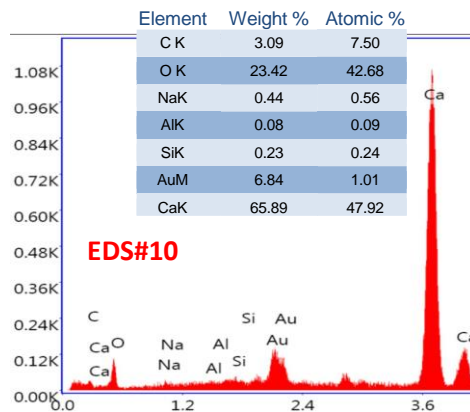
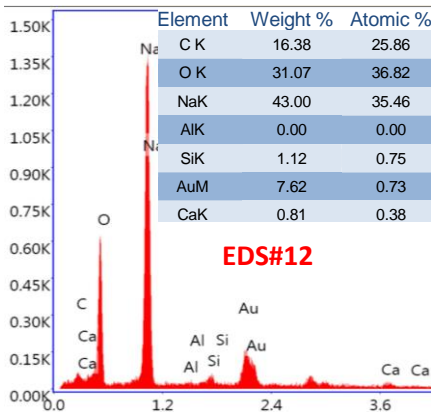
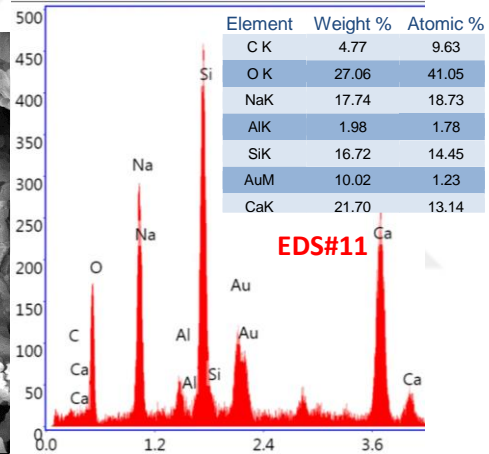
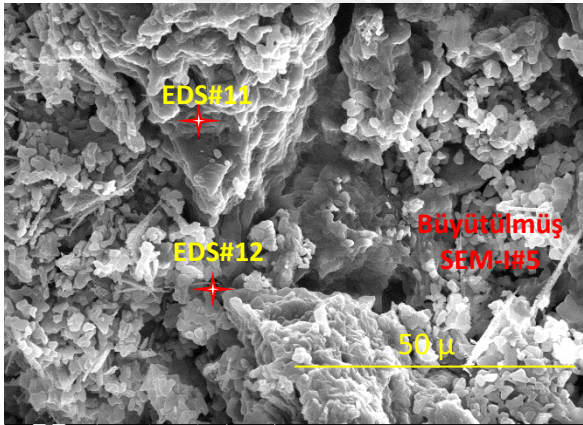
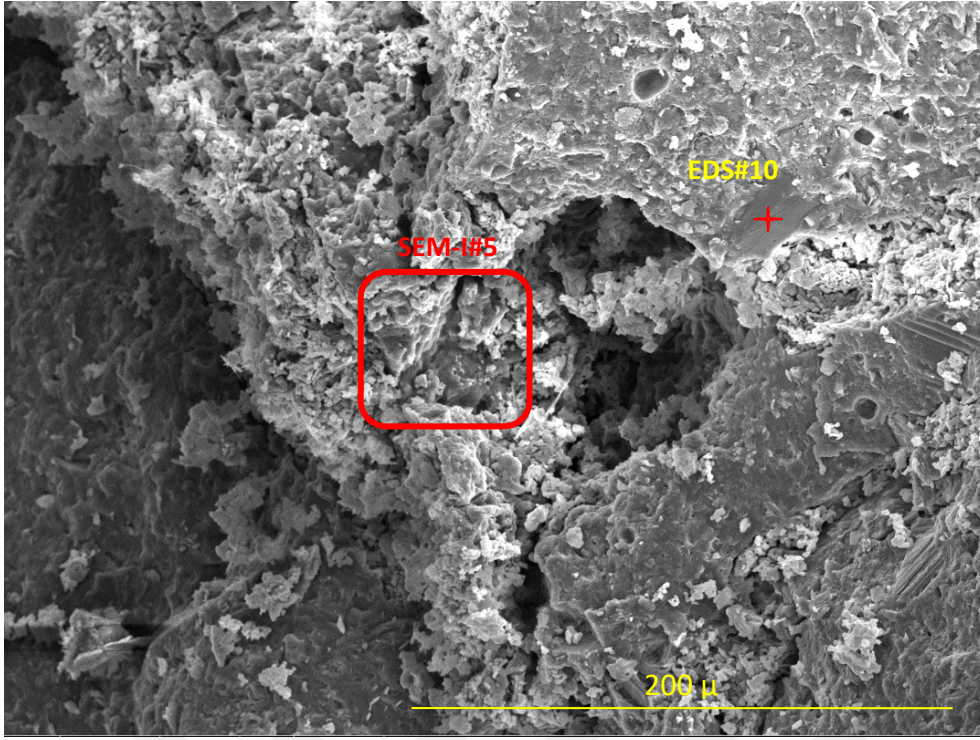


Şekil 22. Katı maddenin hacmince %55:%45 BBT:MT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.45 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 22,8 MPa/90 gün)

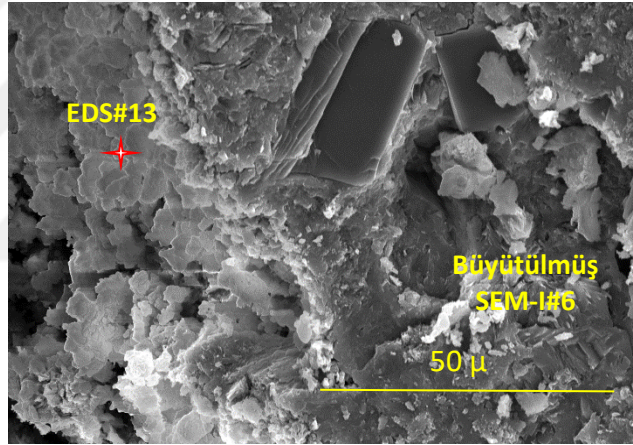
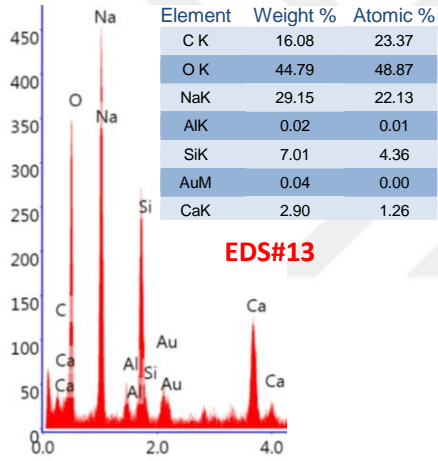
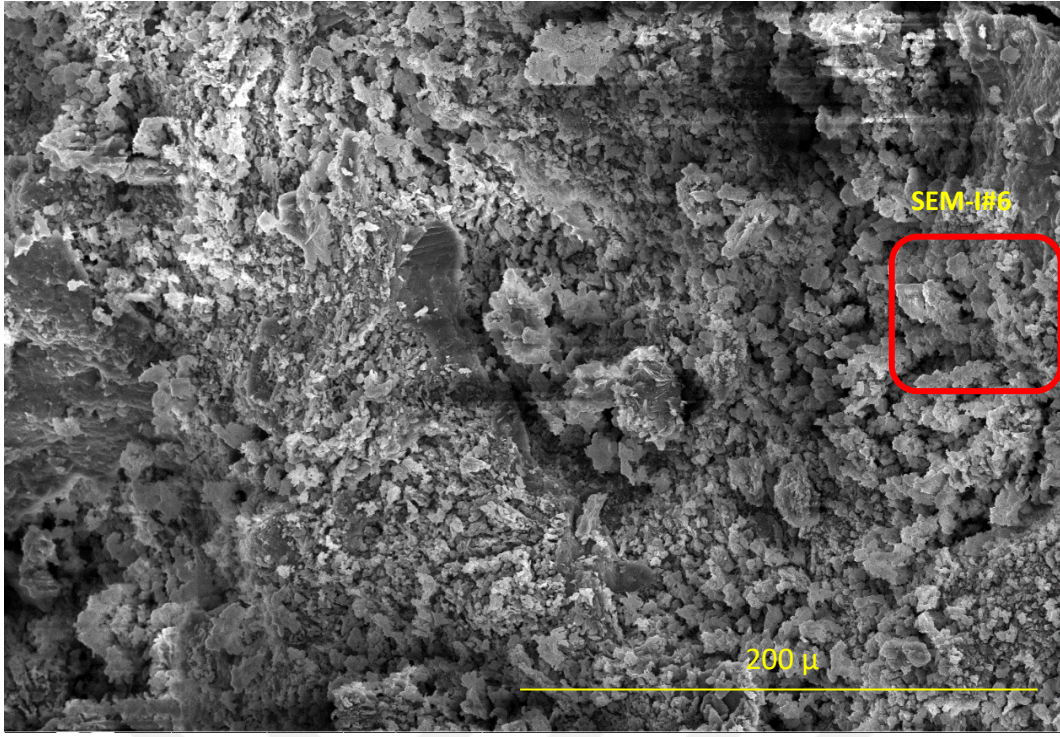


Şekil 23. Katı maddenin hacmince %55:%45 BBT:MT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.45 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 22,8 MPa/90 gün)

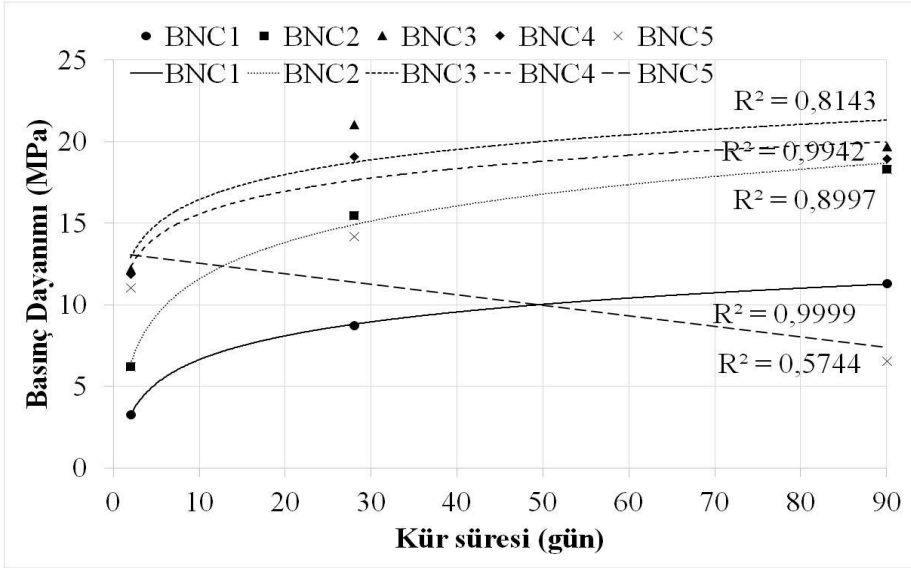
EDS#7 ve #8'deki elementlerin atomik yüzdelere bakıldığında Al oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir. EDS#7'de Na taneciği ve Na-O yapısı görülmektedir. BT'nin yapısından ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisinden gelen Si'nin N-S-H ve C-S-H yapısı oluşturması beklenmektedir. EDS#8'deki rijit kısımda Na, O ve Si oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda da yapıda N-S-H bağının kurulduğu ve dayanımın bu yüzden yüksek çıktığı tahmin edilmektedir. Şekil 23'te ise çatlakın bulunduğu alandan EDS alınmıştır. EDS'de Ca ve Si oranının yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda da yapıda C-S-H jelinin oluşması beklenmektedir. Nitekim yapıda Ca miktarı arttıkça rötre çatlaklarının oluşumu artmaktadır. Bu da çatlakın Ca kaynaklı olduğunu göstermektedir.



Şekil 24. Katı maddenin hacmince %60:%40 BBT:MT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.25 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 6,55 MPa/90 gün)



Şekil 25. Katı maddenin hacmince %60:%40 BBT:MT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.25 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 6,55 MPa/90 gün)



Şekil 26. BBT:MT oranı katı madde hacmince 0,6:0,4 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

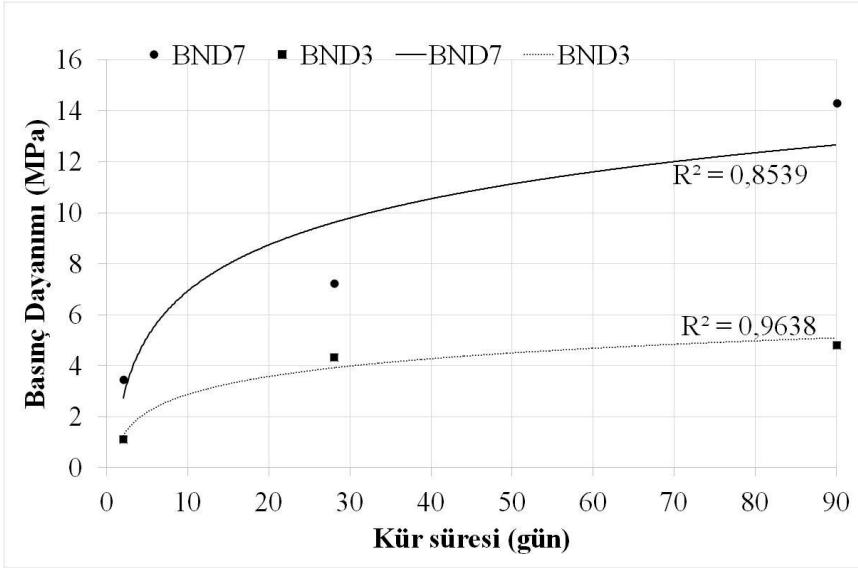
Tablo 27'de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 26'da korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 26'ya göre BBT:MT oranı 0,60:0,40 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken basınç dayanımı sonucu en yüksek ve en düşük olan hamurlar BNC3c ve BNC1a hamurlarıdır. Basınç dayanımları sırasıyla 12,17 ve 3,27 MPa olarak ölçülmüştür.
- Geç basınç dayanımı en yüksek ve en düşük olan hamurlar BNC3c ve BNC5e hamurlarıdır. Dayanımları sırasıyla 19,75 ve 6,55 MPa olarak ölçülmüştür.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25-0,45 oranı için en yüksek erken basınç dayanımı 12,17 MPa. En düşük erken dayanım ise NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,55-0,66 oranı için 3,27 MPa'dır.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,35-0,55 oranı için en yüksek geç dayanım 19,70 MPa, En düşük geç dayanım ise NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25 oranında 6,55 MPa'dır.
- 28 günlük basınç dayanımları, 2 günlük basınç dayanımına göre BNC1a, BNC2b, BNC3c, BNC4d ve BNC5e hamurları için sırasıyla %167,58, %148, %72,97, %60,91 ve %28,27 gelişim göstermiştir.
- BNC3c, BNC4d ve BNC5e hamurlarında 28 günden sonra dayanım kaybı yaşanmıştır.
- 90 günlük basınç dayanımları, 28 günlük basınç dayanımına göre BNC1a, BNC2b, BNC3c, BNC4d ve BNC5e hamurları için sırasıyla %29,14, %18,45, -%6,41, -%0,78 ve -%53,87 gelişim göstermiştir.
- Basınç dayanımlarına bakıldığında BNC3c hamuru en yüksek dayanım vermesine rağmen 90 günlük basınç dayanımı düşmektedir.

- En yüksek dayanım kaybı BNc5e hamurunda gerçekleşmiştir.
- Şekil 24'te genel olarak yapının içerisinde oluşan tuzların bağ yapılarını olumsuz etkileyip hamurun formunu bozduğunu söylemek mümkündür. EDS#10'da hamur içerisinde bağa katılmamış MT taneciklerinin olduğu ve yapıya katılmadığını göstermektedir. EDS#11'de Ca, Na ve Si oranları birbirine yakın çıkmış ve rijit bir yapı oluşturulmuştur. EDS#12'de ise rijit yapıların etrafının NaO tuzlarının sardığı görülmektedir. Bu da rijit plakanın büyümesini engellemekte ve dayanımı olumsuz etkilemektedir.
- Şekil 25'te ise yapının neredeyse tamamını kaplayan Na-O bağlarının oluştuğu tahmin edilmektedir. Oluşan bu yapı oldukça zayıftır ve rijit plakaların çevrelerini sararak polimerleşmeyi engellemektedir. Böylece N-S-H ve C-S-H yapıları oluşmamakta dayanım düşmektedir.

Dayanımı düşen hamurların dayanım kaybının sebebi öncelikli molariteye, sonrasında NaO içeren yapıların zamanla nem ve karbonatlaşma etkisiyle bağı bozarak toplam bağlayıcı yapının alterasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu yapılar SEM görüntülerinde belirtilmiş olup aynı zamanda EDS analizleriyle gösterilmiştir. Serbest Na atomlarının miktarlarına bağlı olarak SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi dayanım kaybeden hamur serilerinde rijit yapılar tozlaşmış görüntüye bürünmekte, Na atomunun oranı %25'in üstüne çıkmakta ve aşırı poroz ve anizotropik yapı gözlenmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde en yüksek dayanımları veren hamurlarda rijit yapı ve kompasite oldukça fazla oranda bulunmaktadır. Bazı gözeneklerde NaO tuzlaşması görünse bile yapının büyük bir bölümü rijit, amorf ve izotrop görülmüştür. Düşük molariteye sahip hamurların nihai dayanımlarının düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca bu hamur C serisi içinde en çok genleşme ve tozuma yapan hamurdur.



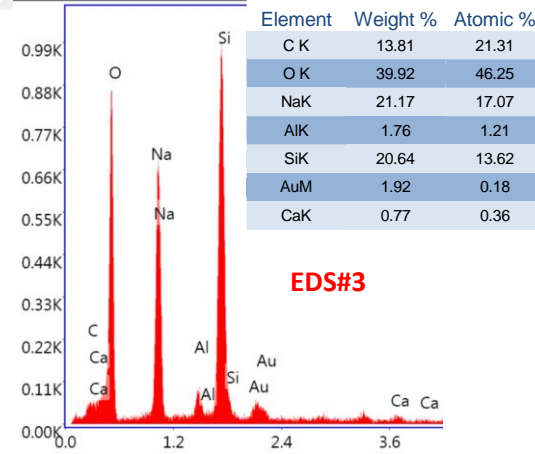
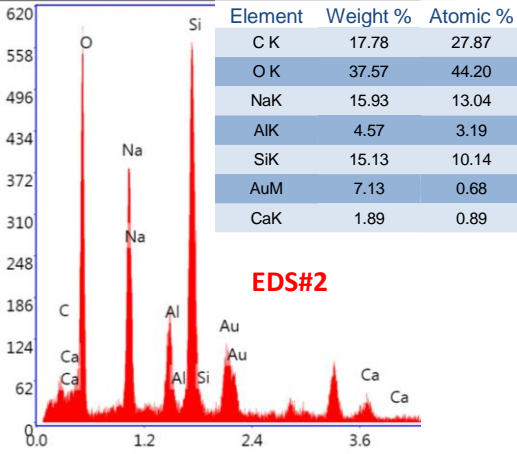
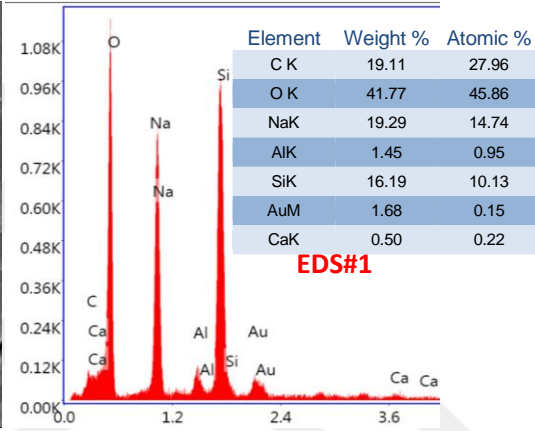
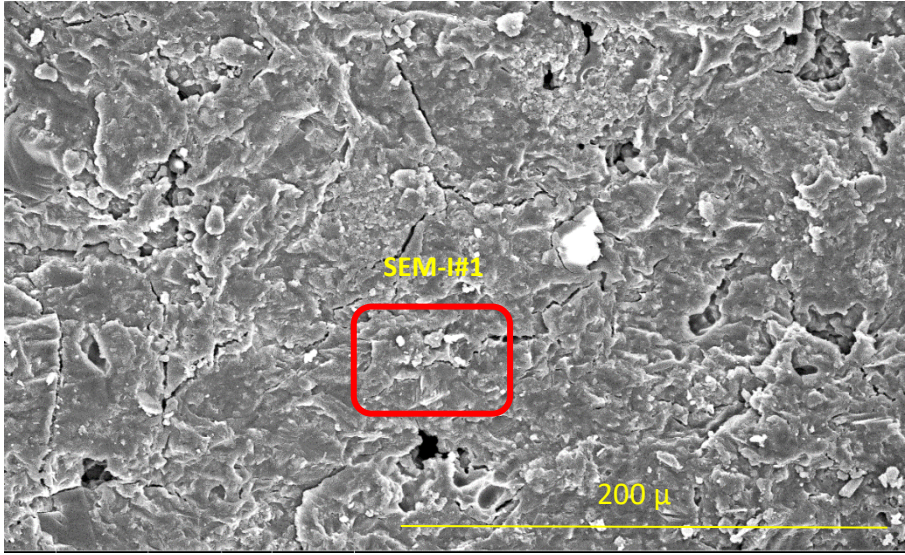


Şekil 27. Katı madde hacmince %100 BBT ile hazırlanan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

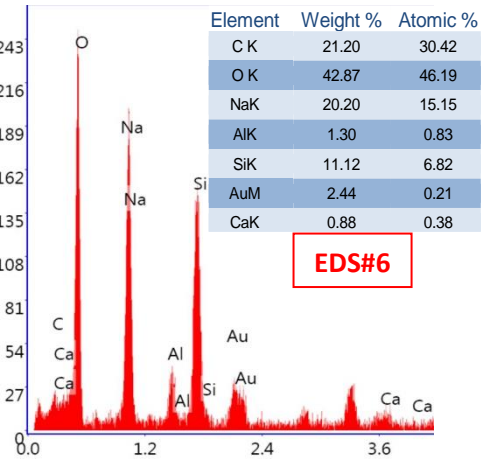
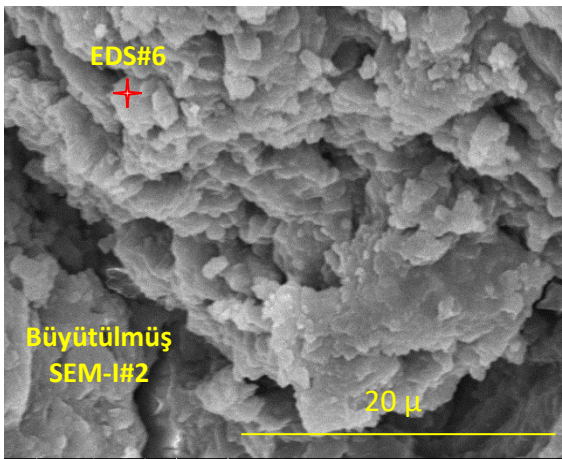
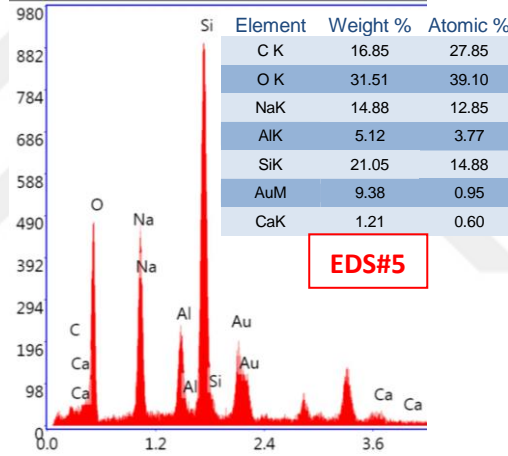
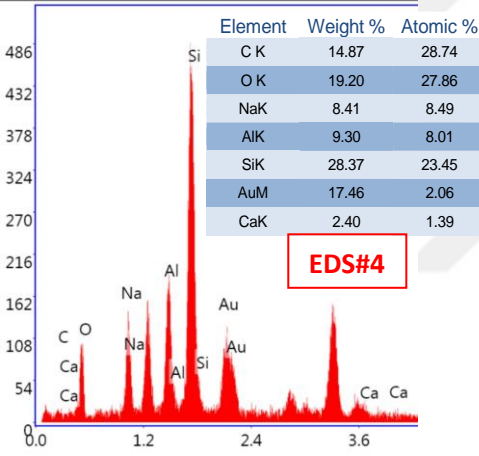
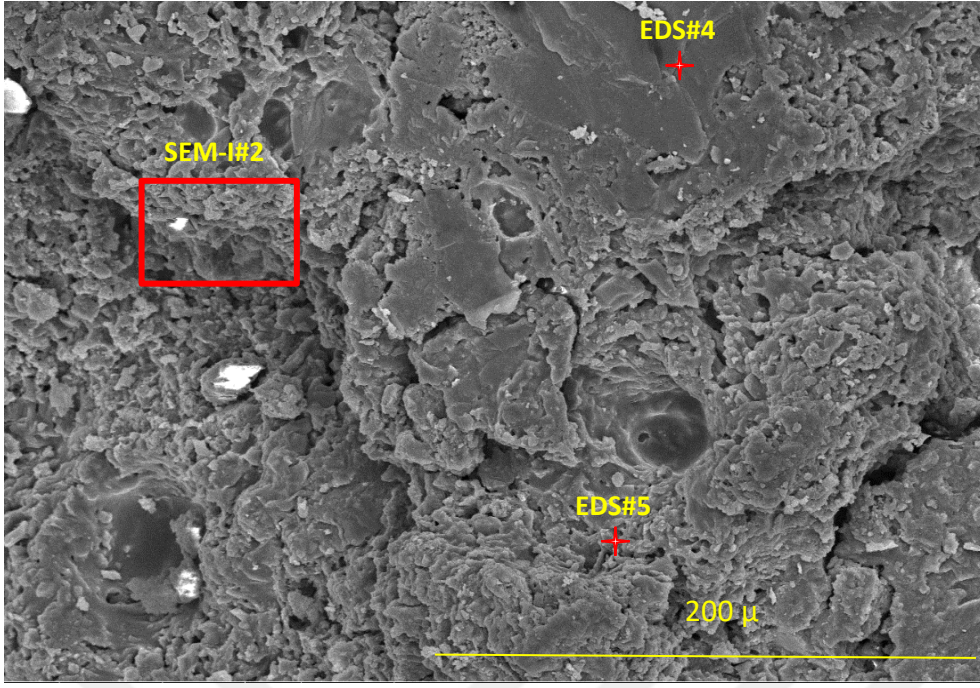
Tablo 27’de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 27’de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 27’ye göre BBT:MT oranı 1:0 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Üretilen 5 serinin 3’ünde 24 saat içinde katılmanın olmaması ve sonraki süreçte katılan hamurların kalıptan çıkarıldıklarında içlerinin hali hazırda ıslak ve katılmamış olmasından dolayı hamurların kübik formları bozulmuştur. Bu sebeple bu hamur serilerinden hiçbir dayanım elde edilememiştir.
- Erken dayanımları en yüksek ve en düşük BND7b ve BND3c hamurları için sırasıyla 3,47 ve 1,13 MPa’dır.
- 90 gün yaşında en yüksek ve en düşük basınç dayanımları sırasıyla BND7b ve BND3c hamurları için 14,30 ve 4,80 MPa’dır., BND3c hamurunun erken dayanımı diğer hamurlara göre oldukça düşüktür.
- 28 günlük basınç dayanımları, 2 günlük basınç dayanımına göre dayanım artışı BND7b ve BND3c hamurları için sırasıyla %108,93 ve %284,96 olarak gelişim göstermiştir.
- 90 günlük basınç dayanımları, 28 günlük basınç dayanımına göre BND7b ve BND3c hamurları için sırasıyla %97,24 ve %10,34 olarak gelişim göstermiştir.
- Hamurlarda erken dayanımın gelişmemesinin nedeni CaO miktarının oldukça düşük olmasıdır. EDS#1, #2 ve #3’de de görüldüğü gibi Ca miktarı oldukça düşüktür ve C-S-H yapısı bu durumda oluşması beklenmemektedir. Bu da hem priz almalarını engellemekte ya da geciktirmekte hem de basınç dayanımlarını düşürmektedir.

- Şekil 28’de rijit yapıların EDS#1 ve EDS#3’te atomik yüzdelere bakıldığında Na ve Si oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Hamur içerisinde rijit yapının oluşması için Na ve Si arasında bağ oluşması beklenmektedir.
- Şekil 29’da ise dayanımı düşük olan %100 BBT ile üretilen hamurun SEM görüntüsü verilmiştir. Burada da yapı içerisinde rijit kısımların daha az ve katmanlaşmanın çok olduğu görülmektedir. Şekil 28’de yapı içerisinde Si oranı her EDS noktasında birbirine yakinken Şekil 29’de ise bu durum biraz daha farklıdır.
- EDS#4’te en yüksek Si ve en düşük Na oranı görülmektedir. 200µ boyutundaki SEM görüntüsünde de EDS#4’te rijit bir yapı oluştuğu görülmektedir. Ancak diğer EDS analizlerinde ise Si miktarı düşmekte ve Na oranı artmaktadır. Bu durumda da yapı bozulmakta ve tuz oluşumu gerçekleşmektedir. Bu da yapının formunu bozmakta, su emmeyi arttırmakta ve dayanımı düşürmektedir.
- Şekil 28’de olduğu gibi Şekil 29’daki EDS analizlerinde Ca oranı oldukça düşüktür. Yapı içerisinde C-S-H oluşması beklenmemektedir ve dolayısıyla dayanımlar diğer serilere göre daha düşük olmaktadır. Ca miktarı arttıkça priz sürelerinde kısalma, dayanımda artış ve suya karşı direnç de artmaktadır. Ancak Ca miktarının da belirli oranlardan sonra yapı içerisinde rötre çatlaklarına neden olduğu bilinmektedir.



Şekil 28. Katı maddenin hacmince %100 BBT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.55 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 14,3 MPa/90 gün)



Şekil 29. Katı maddenin hacmince %100 BBT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.45 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 4,8 MPa/90 gün)

➤ Genel olarak çıkarılacak sonuca göre Si miktarı artıp Na miktarı azaldıkça hamurda rijit kısımların oluşması beklenmekte ve görülmektedir (Şekil 29-EDS#4). Yapı içerisinde Ca olmaması ya da çok eser miktarda bulunması da dayanımın diğer serilere göre daha düşük olmasına neden olmaktadır.

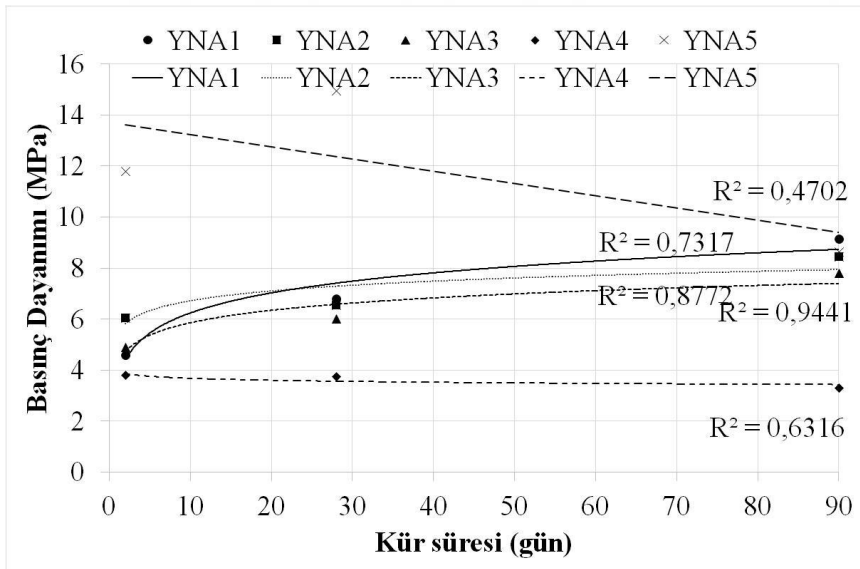
***BYT ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları:***

BYT ile üretilen sertleşmiş hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı deney sonuçları ile birim hacim ağırlık (BHA) ölçümleri Tablo 28’de verilmiştir.

Tablo 28. *BYT İle Üretilen NaOH Aktivatörlü Hamurların Basınç Dayanımı Deneyi ve Birim Hacim Ağırlık (BHA) Ölçüm Sonuçları*

Kod	n	2 gün		28 gün		90 gün	
		MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>
YNA1a	2	4,60	1,91	6,80	1,96	9,15	1,87
YNA2b	2	6,05	2,02	6,50	1,99	8,45	1,91
YNA3c	2	4,90	1,87	6,00	1,86	7,80	1,81
YNA4d	2	3,80	1,89	3,75	1,81	3,30	1,68
YNA5e	2	11,80	1,87	14,95	1,79	8,65	1,67
YNB1a	2	4,80	2,00	11,65	1,91	15,05	1,87
YNB2b	2	7,20	1,91	7,90	1,91	7,70	1,86
YNB3c	2	4,75	1,89	7,00	1,86	8,00	1,82
YNB4d	2	6,50	1,87	6,80	1,83	3,30	1,62
YNB5e	2	7,85	1,84	7,05	1,63	3,50	1,52
YNC1a	2	3,15	1,84	5,70	1,81	8,40	1,80
YNC2b	2	3,75	1,98	8,55	1,93	11,70	1,86
YNC3c	2	5,85	1,92	9,45	1,84	10,70	1,79
YNC4d_9	2	8,45	1,92	13,35	1,87	6,35	1,71
YNC4d_7	2	18,65	1,98	19,10	1,87	21,00	1,79
YNC5e	2	2,80	1,75	2,35	1,55	2,45	1,46
YND1a_7	2	3,10	1,98	12,15	1,95	35,10	1,95
YND2b_9	2	1,70	1,94	14,00	1,94	22,95	1,90
YND2b_7	2	4,40	1,99	19,65	2,01	37,80	1,94
YND3c_7	2	5,75	1,96	12,75	1,97	25,10	1,92
YND4d_7	2	1,20	0	2,15	1,95	8,90	1,88

Buna göre en yüksek 2 günlük basınç dayanımı değeri C serisinde YNC4d\_7 hamurunda 18,65 MPa, en yüksek 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değeri YND2b\_7 hamurunda 19,65 MPa ve 37,80 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük dayanımlı hamurlar molaritesi en yüksek olan hamurlardır. Tablo 28’de verilen 2, 28 ve 90 gün basınç dayanımları ortalama sonuçlardır. Ortalama sonuçlar 2 hamur üzerinden hesaplanmıştır. Ön döküm deney sonuçlarında da görüldüğü gibi çözelti miktarı arttıkça dayanım kaybı da artmaktadır. En ideal priz süresi ve işlenebilirlik 1,10 Ç/T oranına sahip hamurlarda görülmüştür. Ancak dayanımları 0,70 ve 0,90 Ç/T oranına sahip hamurlardan daha düşük olmaktadır. Tek parametre Ç/T oranı olmadığı için aynı anda döküm anı sıcaklığı, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı, katı madde miktarı ve molarite kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada priz süresinin işlenebilirlik için ideal olması hedeflenmiş ve dökümler buna göre gerçekleştirilmiştir. En düşük basınç dayanımları ise ön dökümlerdeki gibi yüksek molarite ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranlarından alınmıştır. Bu hamurlar hem çabuk katılaşmakta hem de kalıba yerleştirilebilecek işlenebilirliğe sahip değildir. Bunun nedeninin yüksek molaritenin yaklaşık olarak 18 ve üstü olması ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının 0,55-0,66 aralığında olmasıdır. BYT ile dökülen hamurlarda BBT’den farklı olarak hepsinin priz aldığı görülmüştür. En yüksek dayanımlara da %100 BYT kullanılarak dökülen hamur serilerinde ulaşılmıştır.

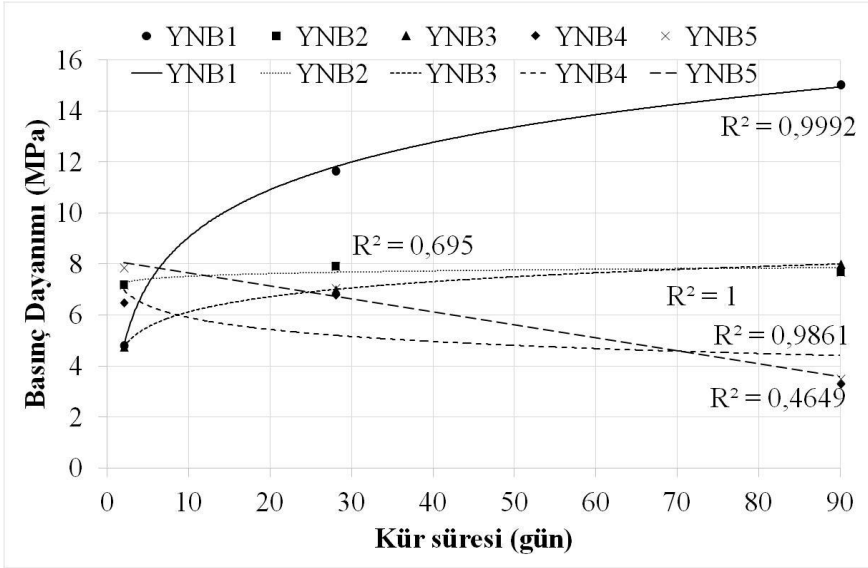


Şekil 30. BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,5:0,5 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

Tablo 28’de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 30’da korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 30’a göre BYT:MT oranı katı madde

hacmince 0,5:0,5 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken dayanımı en yüksek ve en düşük olan hamurlar sırasıyla YNA5e ve YNA4d olmuştur. Basınç dayanımları sırasıyla 11,80 ve 3,80 MPa olarak ölçülmüştür.
- 90 gün yaşında basınç dayanımı değerleri en yüksek ve en düşük olarak sırasıyla YNA1a ve YNA4d hamurunda ölçülmüştür. Dayanım değerleri sırasıyla 9,15 ve 3,30 MPa olarak ölçülmüştür.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25oranı için en yüksek erken basınç dayanımı 11,80 MPa'dır. En düşük erken dayanımlar ise NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,35-0,66 oranında 3,80 MPa olarak ölçülmüştür.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,66 oranında en yüksek geç dayanım 9,15 MPa'dır. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,35 oranında en düşük geç dayanım 3,30 MPa'dır.
- 28 gün basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YNA1a, YNA2b, YNA3c, YNA4d ve YNA5e hamurları için sırasıyla %47,83, %7,44, %22,45, -%1,32 ve %26,69 olarak gelişim göstermiştir.
- Dayanım kaybı YNA4d hamurunda gerçekleşmiştir. Bu kaybın sebebinin molarite düşüklüğünden kaynaklandığı görülmektedir.
- BYT çalışmasında BBT' den farklı olarak en iyi sonuçlar yaklaşık olarak 18 M ile üretilen hamurlardan alınmıştır.
- 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre YNA1a, YNA2b, YNA3c, YNA4d ve YNA5e hamurları için sırasıyla %34,56, %30, %30, -%12 ve -%42,14 olarak ölçülmüştür.
- YNA4d ve YNA5e hamurlarında dayanım kaybı yaşanmıştır.
- Dayanım kaybı yaşanan hamurların molariteleri 11,5 ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25-0,35'tir.



Şekil 31. BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,55:0,45 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

Tablo 28’de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 31’de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 31’e göre BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,55:0,45 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

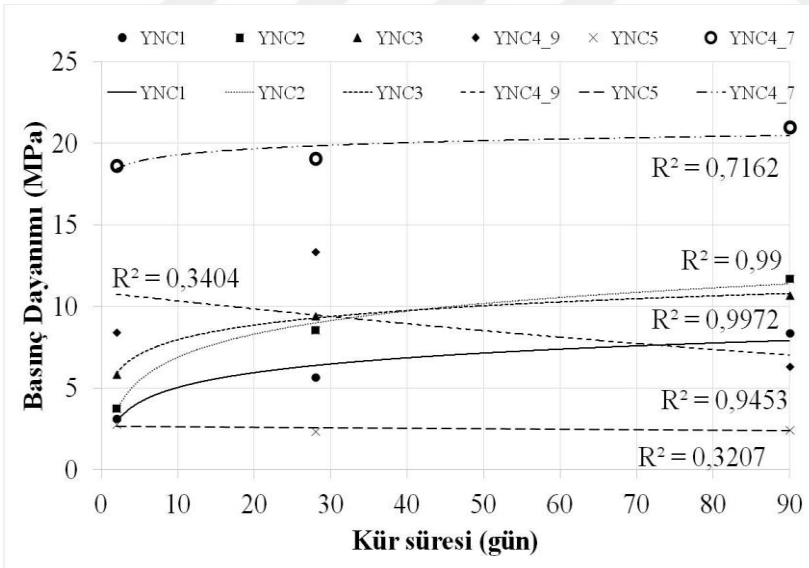
- Erken en yüksek ve düşük basınç dayanımları YNB5e ve YNB3c hamurlarında ölçülmüştür. Dayanım değerleri sırasıyla 7,85 ve 4,75 MPa olarak ölçülmüştür.
- 90 gün yaşında basınç dayanımı en yüksek ve en düşük olan hamurlar sırasıyla YNB1a ve YNB4d hamurlarıdır. Basınç dayanımları sırasıyla 15,05 ve 3,30 MPa olarak ölçülmüştür.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25 oranında en yüksek erken dayanım 7,85 MPa’dır. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,45-0,66 oranında en düşük erken dayanımlar 4,75 MPa’dır.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,66 oranında en yüksek geç dayanım 15,05 MPa, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25-0,35 oranında en düşük geç dayanım 3,30 MPa’dır.
- 28 gün basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YNB1a, YNB2b, YNB3c, YNB4d ve YNB5e hamurları için sırasıyla %142,71, %9,72, %47,37, %4,62 ve -%10,19 olarak gelişim göstermiştir.
- Basınç dayanımında yalnızca YNB5e hamurunda kayıp yaşanmıştır.
- 90 gün yaşında basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre YNB1a, YNB2b, YNB3c, YNB4d ve YNB5e hamurları için sırasıyla %29,18, -%2,53, %14,29, -%51,47 ve -%50,35 gelişim göstermiştir.
- En çok dayanım kaybı YNB4d ve YNB5e hamurlarında yaşanmıştır. Bu hamurların molariteleri ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranları düşüktür.



- En çok dayanım artışı ise YNB1a hamurunda gerçekleşmiştir. Bu hamurun molaritesi 22,1 ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 0,66'dır. BYT üzerinde molarite ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının artması olumlu etki göstermektedir.

Tablo 28'de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 32'de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 32'e göre BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,6:0,4 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

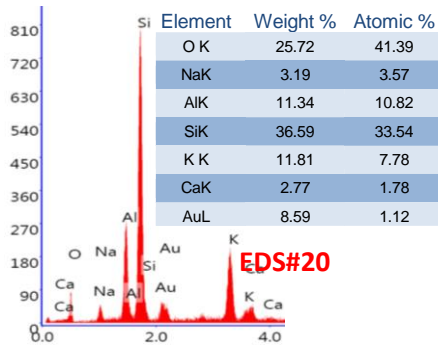
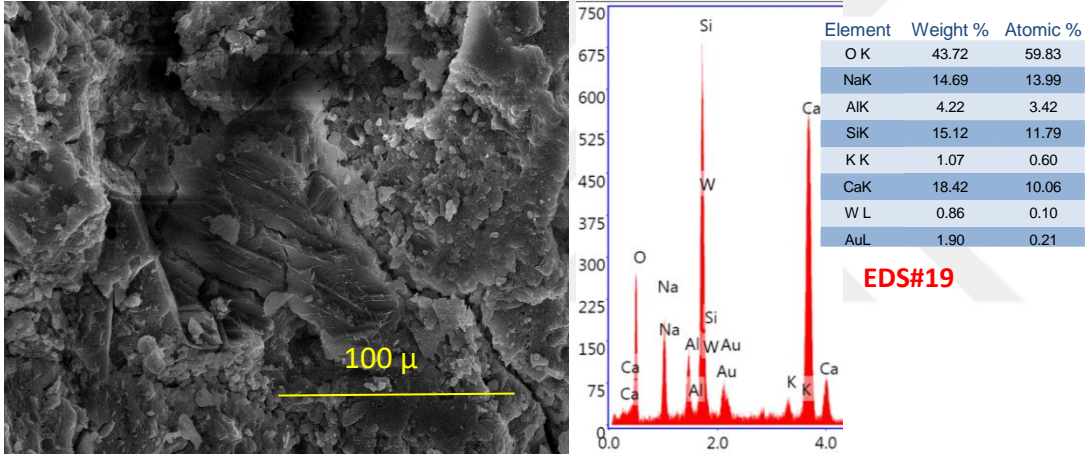
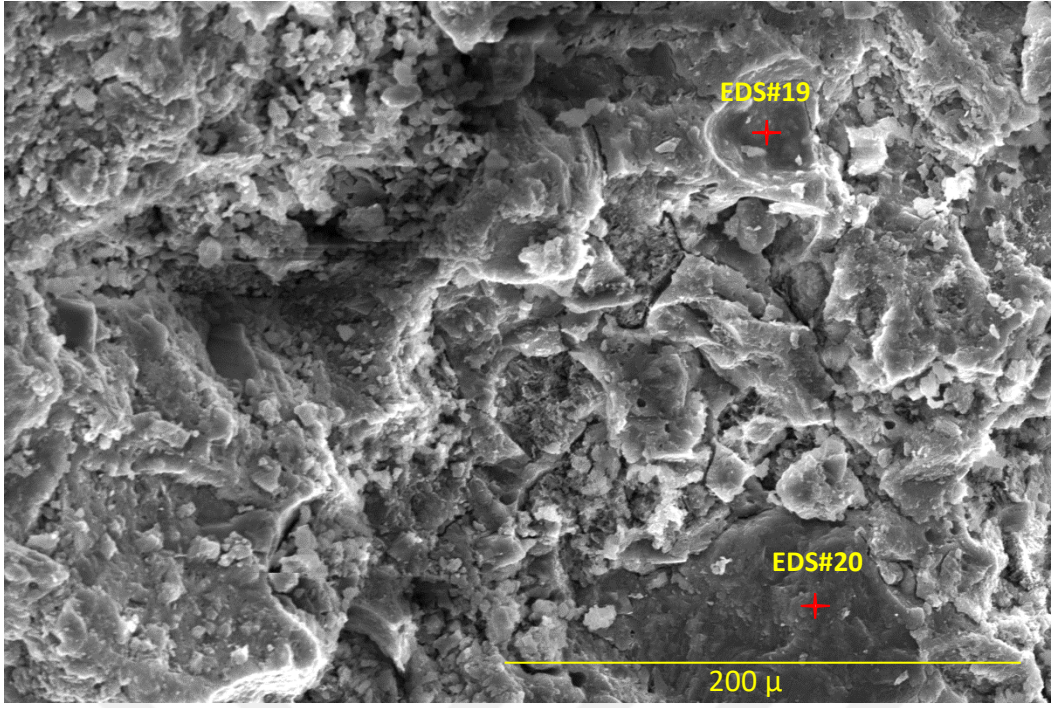
- Erken basınç dayanımı sonuçları en yüksek ve en düşük olan hamurlar sırasıyla YNC4d\_7 ve YNC5e hamurlarından almıştır. Bu hamurların dayanım değerleri sırasıyla 18,60 ve 2,80 MPa olarak ölçülmüştür.
- Geç basınç dayanımları en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla YNC4d\_7 ve YNC5e hamurlarıdır. Bu hamurların dayanım değerleri sırasıyla 21 ve 2,45 MPa olarak ölçülmüştür.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,35 oranında en yüksek erken dayanım 0,7 Ç/T ile dökülen hamurdan 18,65 MPa olarak ölçülmüştür. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,55-0,66 ile 0,25 oranında en düşük erken dayanımlar 3,15 MPa- 2,80 MPa'dır.



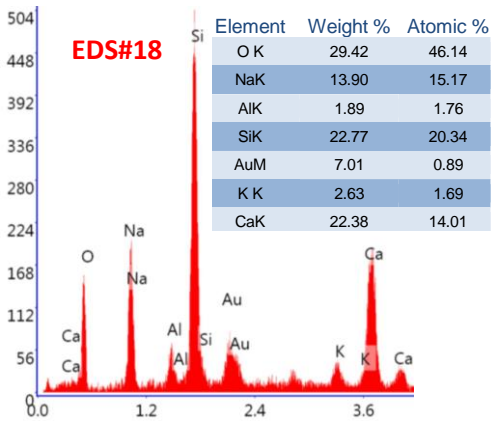
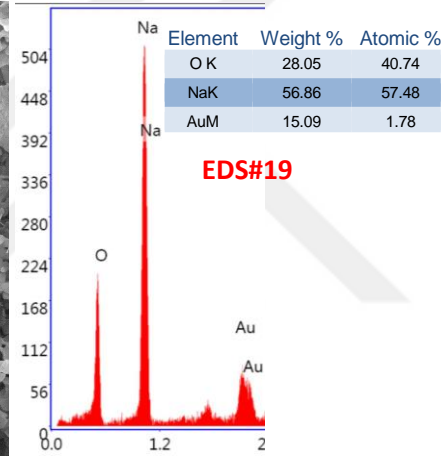
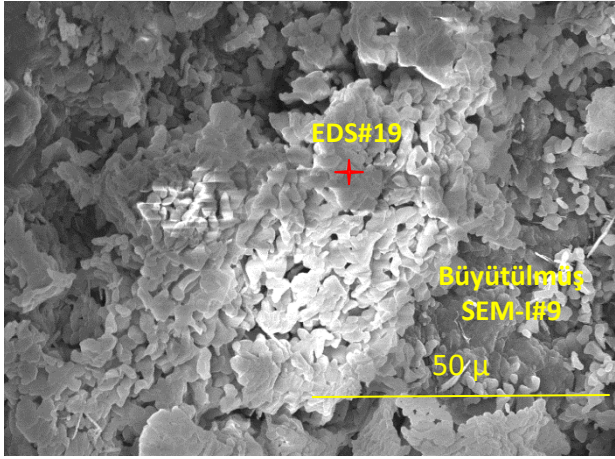
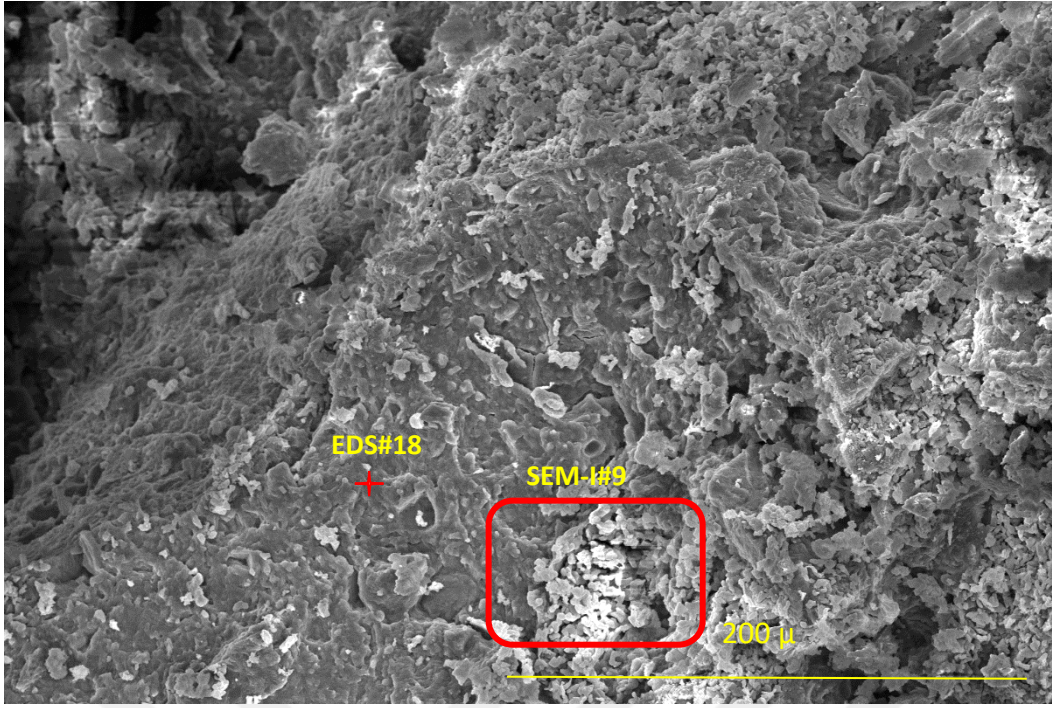
Şekil 32. BYT:MT oranı katı madde hacmince 0,6:0,4 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,35 oranında en yüksek geç dayanım 0,70 Ç/T oranında dökülen hamurdan 21 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük geç dayanımlar ise NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 0,25 oranında 2,45 MPa olarak ölçülmüştür.

- 28 gün yaşında basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YNC1a, YNC2b, YNC3c, YNC4d\_9, YNC4d\_7 ve YNC5e hamurları için sırasıyla %80,95, %128, %61,54, %57,99, %2,41 ve -%16,07 olarak gelişim göstermiştir.
- Dayanım kaybı sadece YNC5e hamurunda gerçekleşmiştir. Bu hamurun dayanımının düşmesi üzerinde molaritenin etkin olduğu düşünülmektedir.
- 90 gün yaşında basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre YNC1a, YNC2b, YNC3c, YNC4d\_9, YNC4d\_7 ve YNC5e hamurları için sırasıyla %47,37, %36,84, %13,23, -%52,43, %9,95 ve %4,26'dır.
- Dayanım kaybı sadece YNC4d\_9 hamurunda gerçekleşmiştir. Bu hamurun dayanım kaybının düşmesinin nedeni molariteye bağlanmıştır. Çünkü tüm serilerde dökülen 11,5M ve 1,10 Ç/T oranına sahip hamurların dayanımları en düşük olmuştur. Bu da 11,5M'nin derişiminin BYT ile üretilen hamurlarda dayanımları düşürdüğünü ve dayanım gelişimleri için yeterli olmadığını göstermektedir.
- Şekil 33'de BYT ile üretilen ve Ç/T oranı 0,7 olan YNC4d\_7 hamurunun SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. EDS#19'da CaO miktarının arttığı görülmektedir. CaO miktarının artması EDS#19'un alındığı bölgede rijit yapı oluşmasına sebep olmuştur. EDS#20'de ise yine rijit bir yapı görülmekte ancak CaO miktarının oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Si miktarının çok ve Na miktarının az olduğu görülmektedir. Benzer olarak Şekil 29'daki gibi Na miktarı azalıp Si miktarının artması rijit yapı oluşturabilmektedir. Bu da N-S-H bağının oluşmasını ve dayanımın artmasını sağlamaktadır.



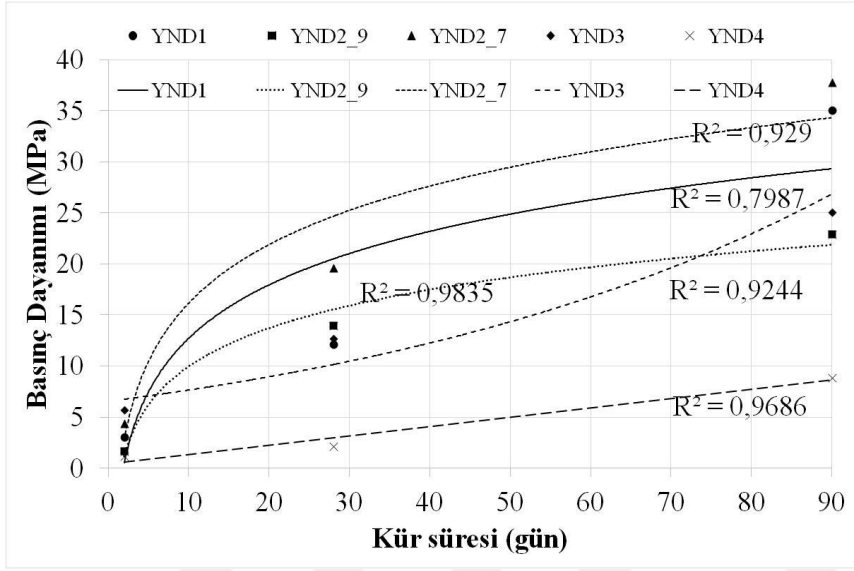
Şekil 33. Katı maddenin hacmince %60:%40 BYT:MT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.35 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 21,00 MPa/90 gün)



Şekil 34. Katı maddenin hacmince %60:%40 BYT:MT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.25 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 2,45 MPa/90 gün)

- Şekil 34'de ise nihai dayanımı en düşük olan YNC5e hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. YNC5e hamurunda dayanımın gelişmemesi ve yüzey dökülmelerinin

gerçekleşmesi, genişlemenin olması NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının 0,25 olması ile ilişkilendirilebilmektedir. SEM görüntülerinde de yapının içerisinde rijit tabakalarda CaO miktarının yüksek olduğu görülmektedir. Ancak rijit tabakaların üzerinde EDS#19'da görüldüğü gibi Na yapılarının tabakaların etrafını sarması, Ca bağlarının oluşumunu engellemiştir. Bu da dayanımın düşmesine sebep olmuştur. EDS#19'da Na oranının yüksek olduğu ve tuz oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 35. %100 BYT ile üretilen hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

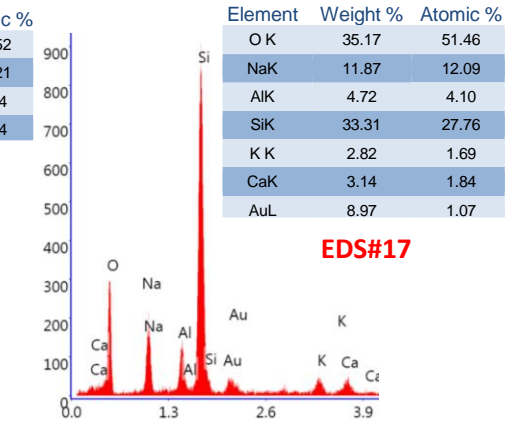
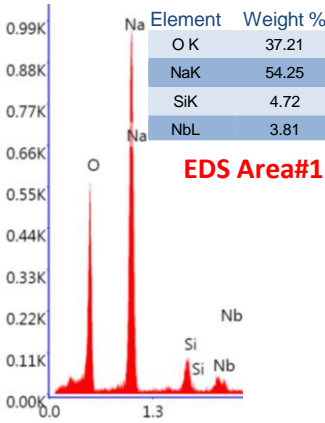
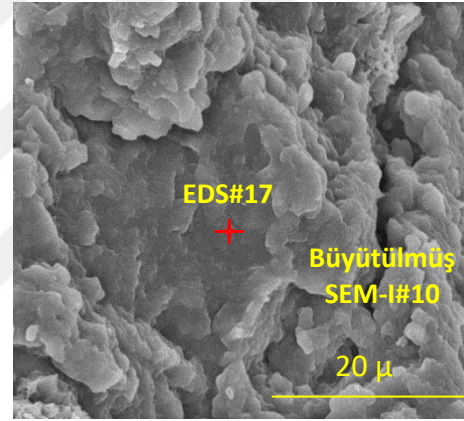
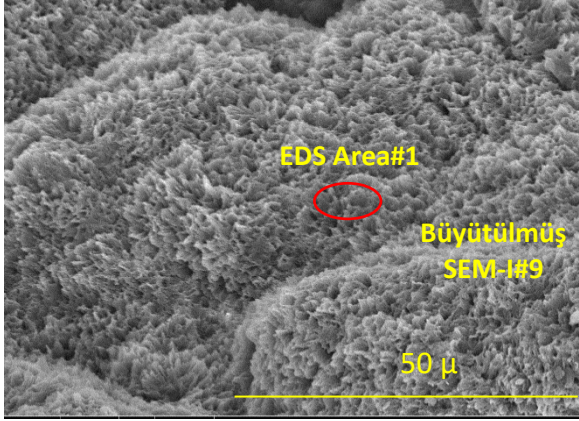
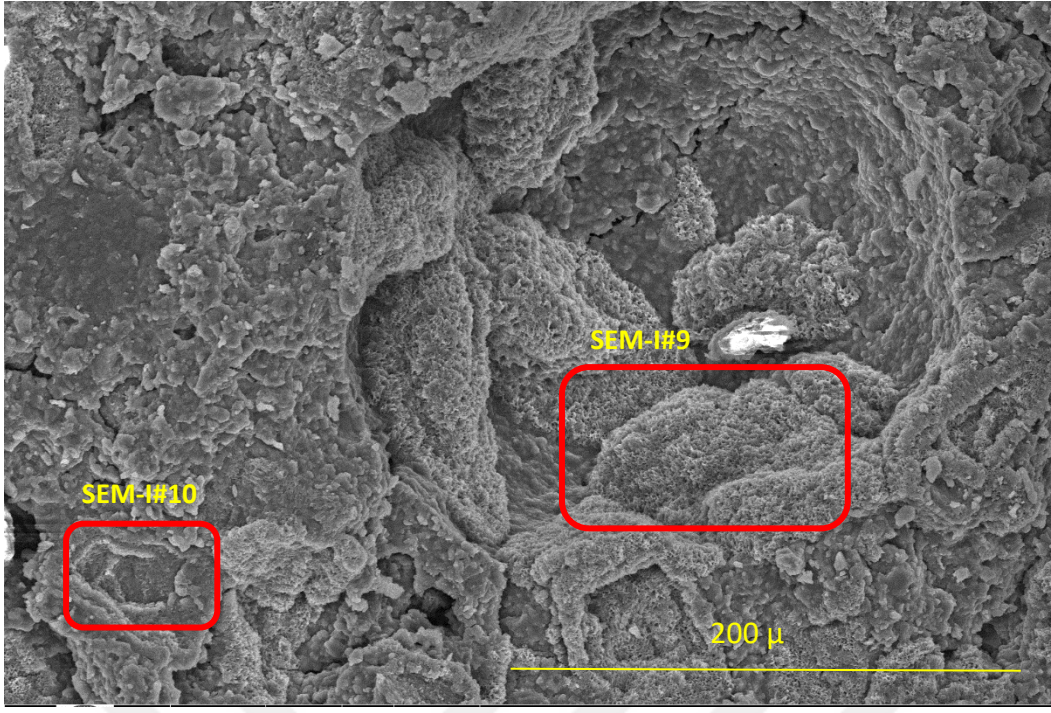
Tablo 28'de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 35'te korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 35'e göre BYT:MT oranı katı madde hacmince 1:0 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- En yüksek basınç dayanımı sonuçları bu seriden alınmıştır.
- Erken en yüksek ve en düşük dayanım sonuçları YND3c\_7 ve YND4d\_7 hamurlarından sırasıyla 5,75 ve 1,20 MPa olarak ölçülmüştür.
- 90 gün yaşında basınç dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar YND2b\_7 ve YND4d\_7 hamurlarıdır. Dayanım değerleri sırasıyla 37,8 ve 8,9 MPa'dır.
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,45-0,55 oranında en yüksek erken dayanım 5,75 MPa'dır. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 0,55 oranında dökülen hamurun Ç/T oranı 0,70'tir. En düşük erken dayanımlar NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> :0,35 ve 0,55 oranlarında alınmıştır. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,55 ile dökülen hamurun Ç/T oranı 0,9'dur.

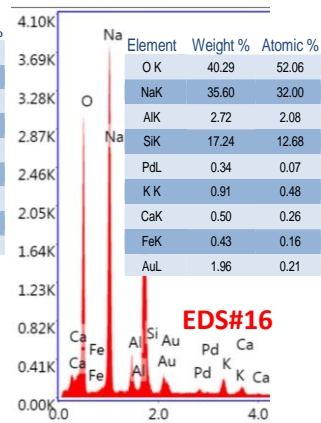
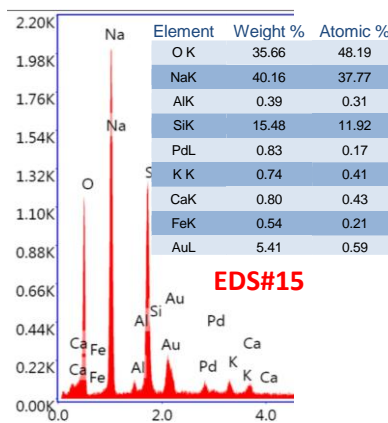
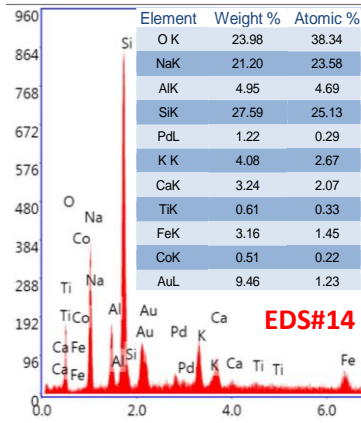
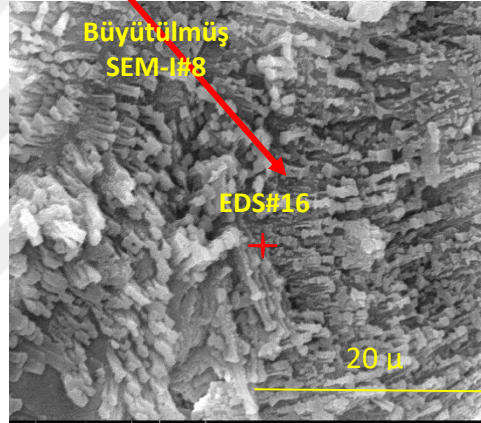
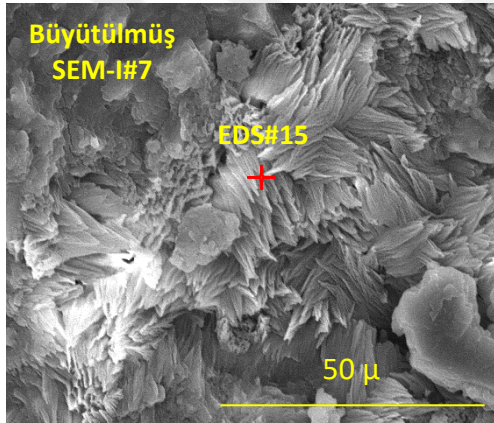
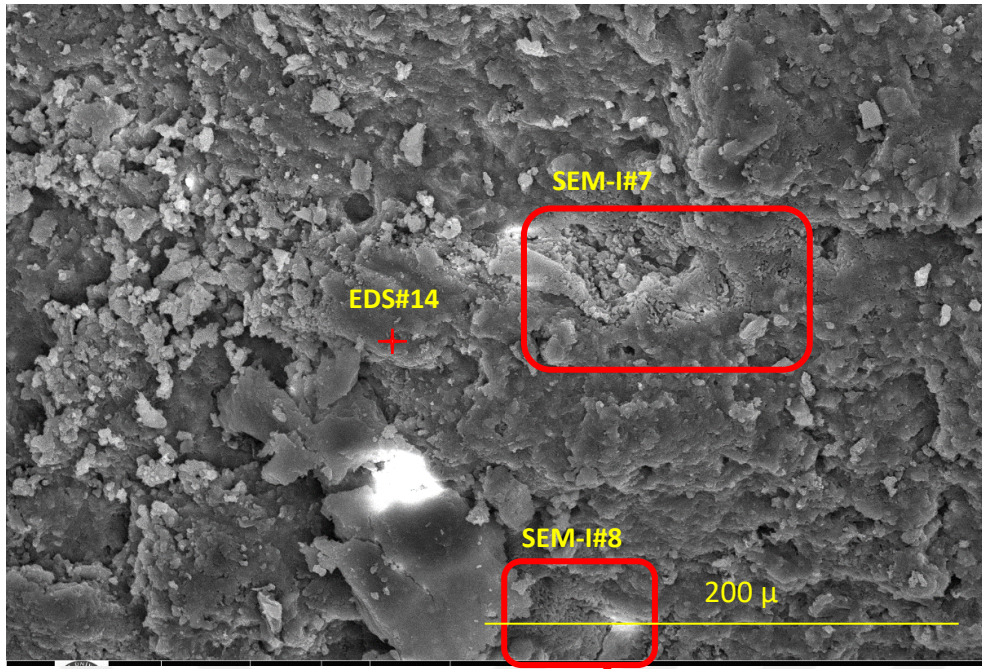
- NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,55-0,66 ve Ç/T :0,7 olan hamurdan en yüksek geç dayanım 37,80 MPa olarak ölçülmüştür. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,35 oranında en düşük geç dayanım 8,90 MPa olarak ölçülmüştür.
- Ç/T oranı arttıkça dayanım düşmüştür.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YND1a\_7, YND2b\_9, YND2b\_7, YND3c\_7 ve YND4d\_7 hamurları için sırasıyla %291,94, %723,53, %346,59, %121,74 ve %79,17 olarak gelişim göstermiştir.
- En yüksek dayanım artışı D serisinde gözlemlenmiştir.
- 90 günlük basınç dayanımları 28 güne göre YND1a\_7, YND2b\_9, YND2b\_7, YND3c\_7 ve YND4d\_7 hamurları için sırasıyla %188,89, %63,93, %92,37, %96,86 ve %313,95 olarak gelişim göstermiştir.

Tablo 28’de NaOH aktivatörü ile dökülen hamurların karşılaştırması yapılmış ve çalışma özetlenmiştir. Şekil 36’da %100 BYT ile üretilen en yüksek dayanıma sahip hamurun, Şekil 37’de de %100 BYT ile üretilen dayanımı en düşük hamurun SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Buna göre;

- EDS Area#1’de Na oranının yüksek ve Si oranının düşük olduğu görülmektedir. Şekil 36’te EDS alınan noktada da tuz oluşumunun çok yoğun olduğu anlaşılmaktadır. Bu da hamur içerisinde Na ve Si miktarının homojen dağılmadığını göstermektedir. N-S-H bağlarının oluşmadığı yerlerde de Na tuz oluşumuna sebep olmaktadır. EDS#17’de ise bu durumun tam tersi olduğu görülmektedir. Yüksek dayanımlı hamurlarda ya da hamurlar içerisinde oluşan rijit yapılarda Na oranı genellikle Si oranından daha düşük olmaktadır.
- Şekil 37’deki EDS14# haricindeki diğer EDS analizlerinde Na oranının Si oranından daha yüksek olduğu ve Na tuzlarının oluştuğu görülmektedir. Bu da yapının bozulmasını, çözünmesini ve dayanımın düşmesini sağlamaktadır.
- Tuz oluşumu su emme değerlerini de etkilemektedir. Şekil 36’daki hamurun su emme değeri en küçükken Şekil 37’deki hamurun en yüksektir (Tablo 35).



Şekil 36. Katı maddenin hacmince %100 BYT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.45 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 37,8 MPa/90 gün)



Şekil 37. Katı maddenin hacmince %100 BYT içerikli NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0.25 oranlı NaOH aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en düşük dayanım: 8,9 MPa/90 gün)



Tablo 29. NaOH Aktivatörü İle Dökülen Hamurların Karşılaştırılması

<b>Basınç Dayanımı Testi (NaOH)</b>		
<b>BBT</b>	<b>BYT</b>	
<b>1,10 Ç/T</b>	<b>1,10 Ç/T</b>	<b>0,7 Ç/T</b>
2 gün en yüksek dayanım: <b>15,80 MPa</b>	2 gün en yüksek dayanım: <b>11,80 MPa</b>	2 gün en yüksek dayanım: <b>18,65 MPa</b>
2 gün en düşük dayanım: <b>3,27 MPa</b>	2 gün en düşük dayanım: <b>3,15 MPa</b>	2 gün en düşük dayanım: <b>1,20 MPa</b>
28 gün en yüksek dayanım: <b>23,05 MPa</b>	28 gün en yüksek dayanım: <b>11,65 MPa</b>	28 gün en yüksek dayanım: <b>19,65 MPa</b>
28 gün en düşük dayanım: <b>4,35 MPa</b>	28 gün en düşük dayanım: <b>2,35 MPa</b>	28 gün en düşük dayanım: <b>2,15 MPa</b>
90 gün en yüksek dayanım: <b>22,80 MPa</b>	90 gün en yüksek dayanım: <b>15,65 MPa</b>	90 gün en yüksek dayanım: <b>37,80 MPa</b>
90 gün en düşük dayanım: <b>4,80 MPa</b>	90 gün en düşük dayanım: <b>2,45 MPa</b>	90 gün en düşük dayanım: <b>8,90 MPa</b>
2 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>0,25 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı ve 8,2M</b>	2 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>0,25-0,35 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve 8,2-11,5M</b>	
28 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>0,25-0,45 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve 8,2M</b>	28 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>0,25-0,35 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve 8,2-11,5M</b>	
28 gün yaşından sonra dayanım artışı: <b>16,5M ve 0,66 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı</b>	28 gün yaşından sonra dayanım artışı: <b>18-22,1M ve 0,55-0,65 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı</b>	
En yüksek basınç dayanımı aralığı: <b>0,35-0,45 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı</b>	En yüksek basınç dayanımı aralığı: <b>0,55-0,66 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı</b>	
En yüksek basınç dayanımı aralığı (M): <b>11,5-15,1M</b>	En yüksek basınç dayanımı aralığı (M): <b>18-22,1M</b>	
En düşük geç basınç dayanımları: <b>8,2M ve 0,25 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	En düşük geç basınç dayanımları: <b>8,2M ve 0,25 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	
En yüksek geç basınç dayanımı bağlayıcı oranı: <b>0,55:0,45 BBT:MT</b>	En yüksek basınç dayanımı bağlayıcı oranı: <b>%100 BYT</b>	
0,25 NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> oranında ve 8,2M dökülen hamurlarda pürüzlülük, yüzeylerde dökülme ve genleşme olduğu gözlenmiştir.		
1,10 Ç/T oranı ile dökülen hamurlarda en yüksek dayanım sonuçlarının alındığı bağlayıcı oranı 0,55:0,45 BT:MT		
%100 BBT ile dökülen hamurlarda dayanım çok düşükken %100 BYT ile dökülen hamurlarda dayanımlar en yüksek.		
Molarite arttıkça (15,1M) BBT ile üretilen hamurlarda dayanımı azalırken BYT ile üretilen hamurlarda nihai dayanımlar artıyor.		
1,10 Ç/T ile dökülen hamurların basınç dayanımları BYT ile dökülen hamurlara göre daha yüksektir.		

**Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirmeleri.**

***BBT ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları:***

BBT ile üretilen sertleşmiş hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı deney sonuçları ile birim hacim ağırlık (BHA) ölçümleri Tablo 30'da verilmiştir.

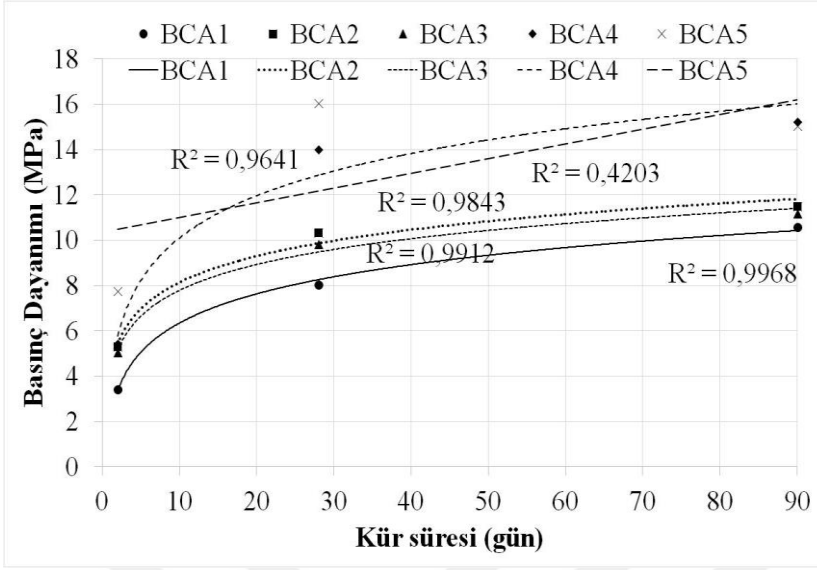
Tablo 30. Ca(OH)<sub>2</sub> Aktivatörü ve BBT İle Hazırlanan Hamurların Basınç Dayanımı Sonuçları

Kod	Ç/T	n	2 gün		28 gün		90 gün	
			MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>
BCA1	1,40	2	3,43	1,66	8,02	1,62	10,59	1,64
BCA2	1,30	2	5,30	1,69	10,33	1,62	11,50	1,63
BCA3	1,20	2	5,04	1,74	9,80	1,64	11,16	1,65
BCA4	1,10	2	5,40	1,71	14,00	1,69	15,22	1,67
BCA5	1,00	2	7,76	1,72	16,00	1,70	15,05	1,71
BCB2	1,30	2	5,92	1,67	8,47	1,62	11,49	1,62
BCB3	1,20	2	5,73	1,67	9,49	1,62	11,34	1,72
BCB4	1,10	2	8,15	1,67	13,02	1,64	12,06	1,65
BCB5	1,00	2	10,38	1,69	15,30	1,65	18,42	1,68
BCB6	0,9	2	12,53	1,72	12,36	1,71	19,55	1,71
BCC2	1,30	2	6,30	1,68	10,82	1,59	12,78	1,61
BCC3	1,20	2	5,22	1,67	10,97	1,60	15,08	1,63
BCC4	1,10	2	9,44	1,7	13,75	1,69	17,54	1,64
BCC5	1,00	2	8,75	1,72	18,29	1,73	19,65	1,69
BCC6	0,90	2	12,48	1,72	15,10	1,66	18,41	1,68
BCD1	1,40	2	4,50	1,61	9,60	1,54	10,08	1,56
BCD2	1,30	2	6,17	1,63	10,95	1,54	14,49	1,58
BCD3	1,20	2	5,84	1,65	12,57	1,57	14,22	1,59
BCD4	1,10	2	7,51	1,64	14,11	1,56	13,01	1,58
BCD5	1,00	2	6,64	1,65	14,62	1,59	9,27	1,56

Tablo 30'da verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 38'de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 38'egöre BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0,2:0,3 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla BCA5 ve BCA1 hamurları olmuştur. Hamurların dayanımları sırasıyla 7,76 ve 3,43 MPa'dır.
- Geç dayanımları en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla BCA4 ve BCA1 hamurlarıdır. Dayanımları sırasıyla 15,22 ve 10,59 MPa olarak ölçülmüştür.

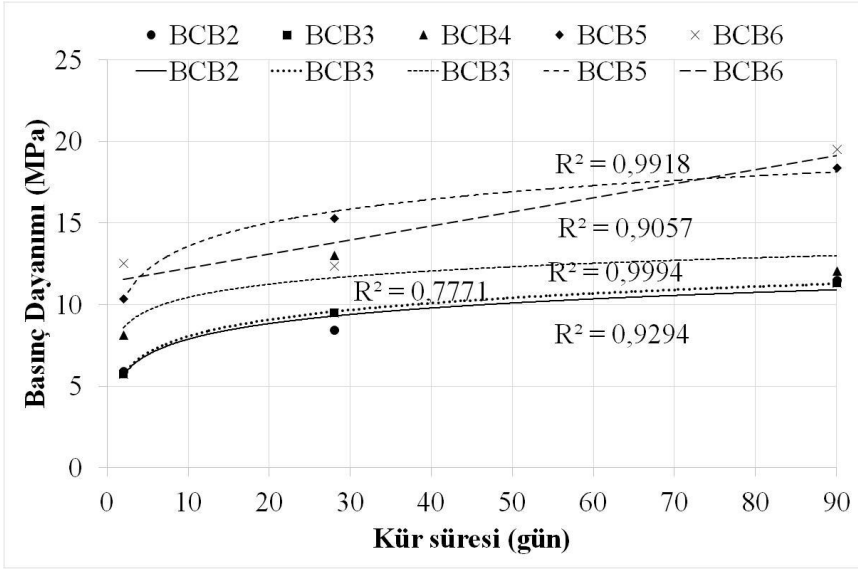
- Hamurların Ç/T oranı azaldıkça dayanımlarında artış görülmüştür.



Şekil 38. BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0,2:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

- Hamurlar döküldükten hemen sonra rötre yapmaya başladıkları için üzerlerine nemli bezler serilmiş ve kalıptan çıkarıldıktan sonra %99 neme sahip iklimlendirme kabine alınmışlardır.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre BCA1, BCA2, BCA3, BCA4 ve BCA5 hamurlarında sırasıyla %133,82, %94,91, %94,44, %159,26 ve %106,19 olarak gelişim göstermiştir.
- 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre BCA1, BCA2, BCA3, BCA4 ve BCA5 hamurları için sırasıyla %32,04, %11,33, %13,88, %8,71 ve -%5,94 olarak gelişim göstermiştir.
- NaOH ile üretilen seride daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir.
- Erken dayanım sonuçları katı madde hacmince %50 BBT ve NaOH aktivatörü kullanılarak üretilen hamurlara göre daha düşük olmuştur.
- En yüksek erken dayanım Ca(OH)<sub>2</sub> ile üretilen hamurlarda 7,76 MPa iken NaOH ile üretilen hamurlarda 15,80 MPa'dır.
- En düşük erken dayanımlar ise NaOH ile üretilen hamurlarda 3,83 MPa, Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurlarda 3,43 MPa'dır.
- 90 gün yaşında en yüksek dayanım NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda 20,25 MPa iken Ca(OH)<sub>2</sub> ile üretilen seride 15,22 MPa'dır.

- 90 gün yaşında basınç dayanımı en düşük NaOH aktivatörü ile üretilen hamurun basınç dayanımı 6,60 MPa iken  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile üretilen hamurlarda 10,59 MPa'dır.



Şekil 39. BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,55:0,15:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

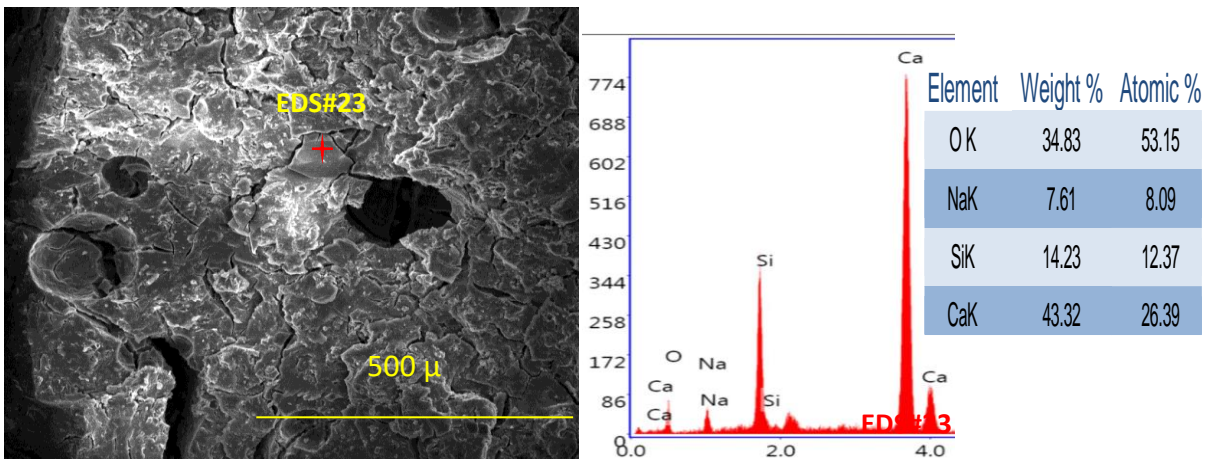
Tablo 30'da verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 39'da korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 39'a göre BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,55:0,15:0,3 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar BCB6 ve BCB3 hamurlarıdır. Dayanımları sırasıyla 12,53 ve 5,73 MPa olarak ölçülmüştür.
- Geç dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar BCB6 ve BCB3 hamurları olmuştur. Dayanımları sırasıyla 19,55 ve 11,34 MPa'dır.
- Ç/T oranı azaldıkça dayanımlar artmıştır.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre BCB2, BCB3, BCB4, BCB5 ve BCB6 hamurlarında sırasıyla %43,07, %65,62, %59,75, %47,40 ve -%1,36 olarak gelişim göstermiştir.
- 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre BCB2, BCB3, BCB4, BCB5 ve BCB6 hamurları için sırasıyla %35,66, %19,49, -%7,37, %20,39 ve %58,17 olarak gelişim göstermiştir. En yüksek erken dayanım bu seriden alınmıştır.
- Erken dayanım sonuçları katı madde hacmince %55 BBT ve NaOH aktivatörü kullanılarak üretilen hamurlara göre daha düşük olmuştur.

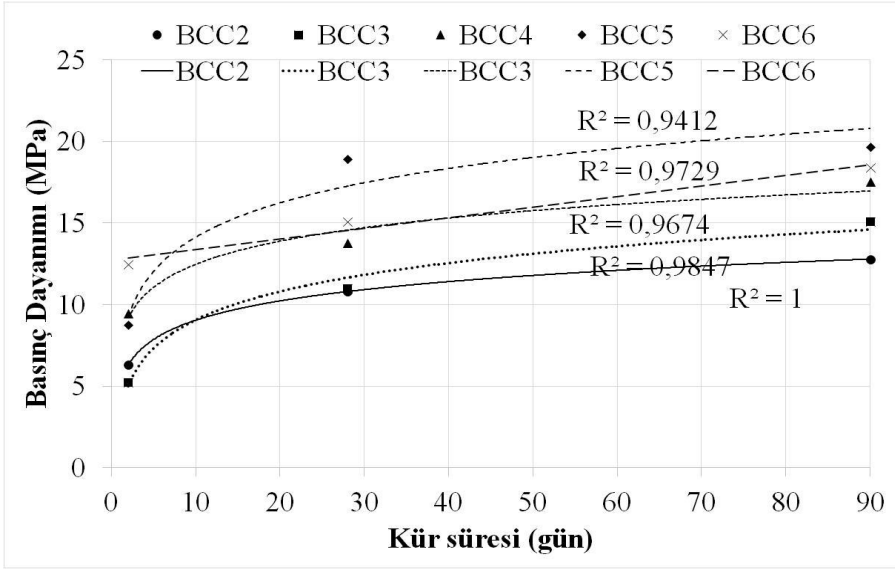
- En yüksek erken dayanım  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile üretilen hamurlarda 12,53 MPa iken NaOH ile üretilen hamurlarda 15,33 MPa'dır.
- En düşük erken dayanımlar ise NaOH ile üretilen hamurlarda 5,33 MPa,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörü ile üretilen hamurlarda 5,73 MPa'dır.
- 90 gün yaşında en yüksek dayanım NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda 22,80 MPa iken  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile üretilen seride 19,55 MPa'dır.
- 90 gün yaşında basınç dayanımı en düşük NaOH aktivatörü ile üretilen hamurun basınç dayanımı 6,40 MPa iken  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile üretilen hamurlarda 11,34 MPa'dır.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörü ile üretilen hamurların tamamında yapı içerisinde rötre çatlakları ile gözenekler gözlenmiştir. Literatürde Connie Ng, Alengaram, Wong, Mo, Jumaat ve Ramesh, 2018'de yapmış oldukları bir çalışmada çözünme ve polikondensasyon süreci boyunca jeopolimer hamur içerisinde hapsolan hava kabarcıklarını büyük kılcal gözeneklerle bağdaştırmaktadır. Gözlenen büyük gözeneklerin dayanımı düşürdüğünü belirtmişlerdir (Ng vd., 2018). Bu çalışmada da yapı içerisinde büyük gözeneklerin olduğu gözlenmiş ve dayanımın bu nedenle gelişemediği anlaşılmıştır.

Şekil 40'te verilen SEM görüntüsünde verilen EDS#23'e göre yapıdaki atomların yüzdelere göre  $n(\text{NaO}).m(\text{SiO}_2).t(\text{CaO})$  molekülünün olduğu söylenebilmektedir. Bu durumda yapıda CaO'nun daha fazla Na ve Si atomunu bağladığı ve dayanımın bundan dolayı arttığı düşünülmektedir. Yapıdaki molekülde CaO ve  $\text{SiO}_2$  miktarı arttıkça dayanımın arttığı görülmektedir.



Şekil 40. Katı maddenin hacince %55:%15:%30 BBT:MT: $\text{Ca}(\text{OH})_2$  içerikli Ç/T: 0,9 oranlı  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 19,55 MPa/90 gün)

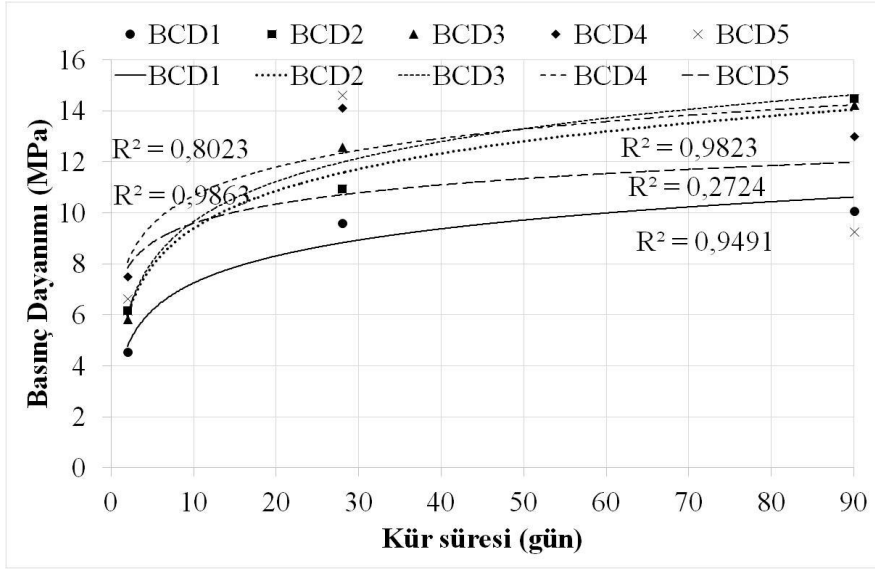


Şekil 41. BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,6:0,1:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

Tablo 30'da verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 41'de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 41'e göre BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,6:0,1:0,3 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar BCC6 ve BCC3 hamurlarıdır. Dayanımları sırasıyla 12,48 ve 5,22 MPa'dır.
- Geç dayanımları en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla BCC5 ve BCC3 hamurlarıdır. Dayanımları sırasıyla 19,65 ve 15,08 MPa olmuştur.
- Ç/T oranı azaldıkça erken dayanımlar pek değişmese de geç dayanımlarda artış gerçekleşmiştir.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre BCC2, BCC3, BCC4, BCC5 ve BCC6 hamurlarında sırasıyla %71,75, %110,15, %45,66, %109,03 ve %20,99 olarak gelişim göstermiştir.
- 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre BCC2, BCC3, BCC4, BCC5 ve BCC6 hamurlarında sırasıyla %18,11, %37,47, %27,56, %7,44 ve %21,92 olarak gelişim göstermiştir. Hamurlarda dayanım kaybı görülmemiştir.
- En yüksek geç dayanımlar bu seriden alınmıştır.
- En yüksek erken dayanım Ca(OH)<sub>2</sub> ile üretilen hamurlarda 12,48 MPa iken NaOH ile üretilen hamurlarda 12,17 MPa'dır.
- En düşük erken dayanımlar ise NaOH ile üretilen hamurlarda 3,27 MPa, Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurlarda 5,22 MPa'dır.

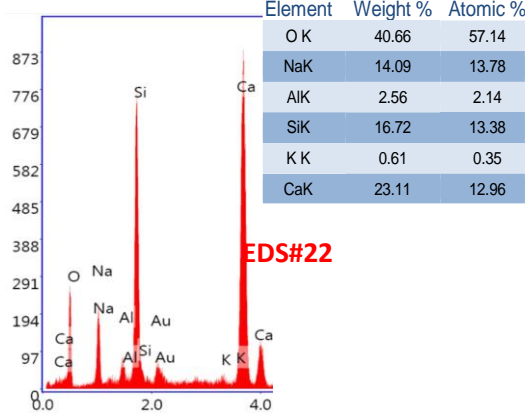
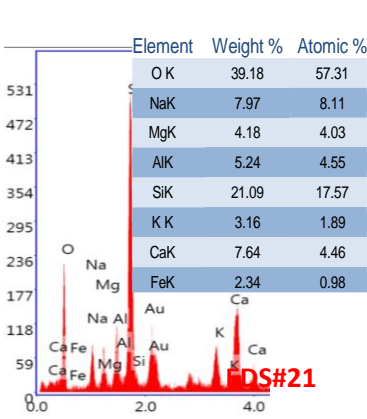
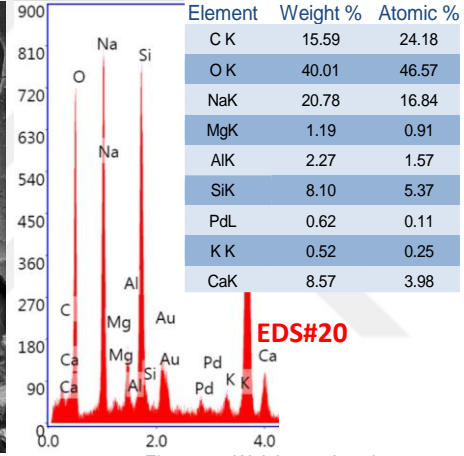
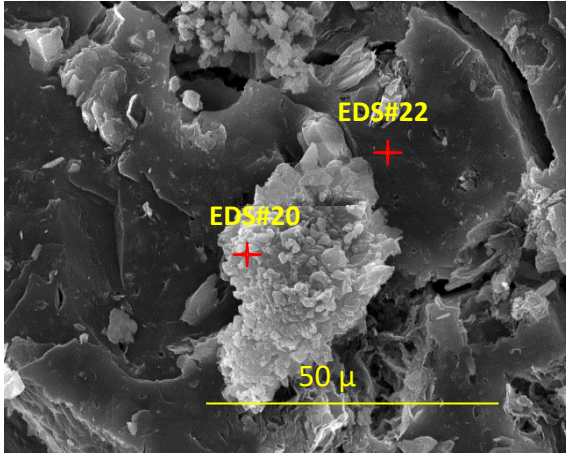
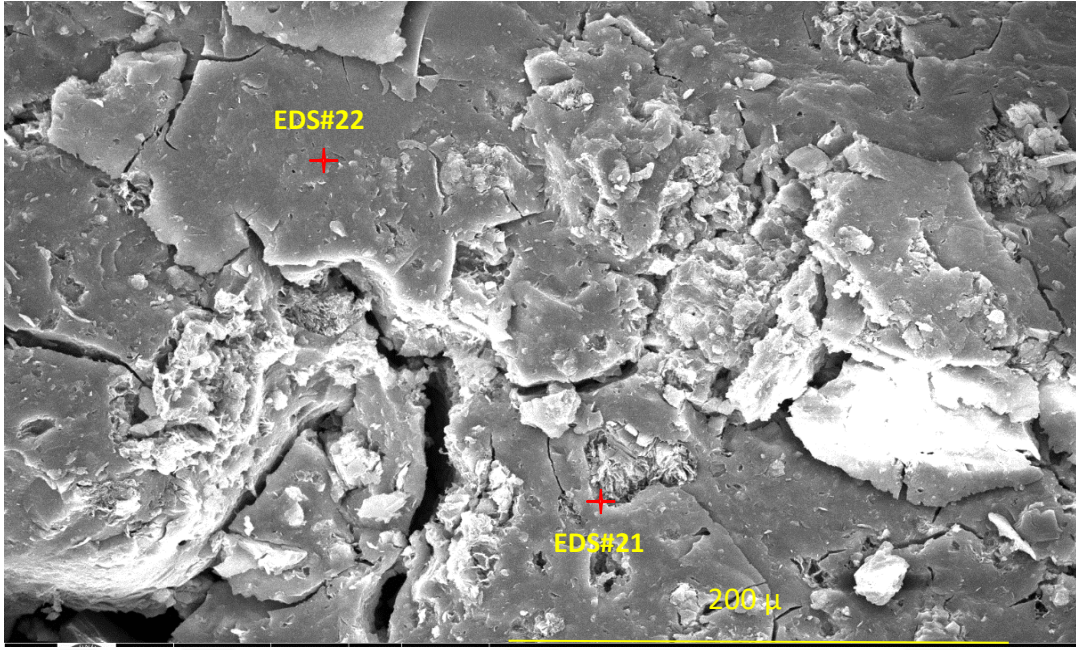
- 90 gün yaşında en yüksek dayanım NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda 19,70 MPa İken  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile üretilen seride 19,65 MPa'dır.
- 90 gün yaşında basınç dayanımı en düşük NaOH aktivatörü ile üretilen hamurun basınç dayanımı 6,55 MPa iken  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile üretilen hamurlarda 12,78 MPa'dır.
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörü ile üretilen hamurlarda en yüksek geç dayanımlar bu seride alınmıştır.



Şekil 42. BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0:0,5 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

Tablo 30'da verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 42'de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 42'ye göre BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0:0,5 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla BCD4 ve BCD1 hamurlarından alınmıştır. Dayanımları sırasıyla 7,51 ve 4,50 MPa olarak ölçülmüştür.
- Geç dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla BCD2 ve BCD5 hamurları olmuştur. Dayanımları sırasıyla 14,49 ve 9,27 MPa olarak ölçülmüştür.
- MT olmadığından dolayı dayanımların yükselmediği düşünülmektedir.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre BCD1, BCD2, BCD3, BCD4 ve BCD5 hamurları için sırasıyla %113,33, %77,47, %115,24, %87,88 ve %120,18 olarak gelişim göstermiştir.
- En çok rötre bu seride görülmüş ve BCD5 hamuru çok fazla rötre yapmıştır.



Şekil 43. Katı maddenin hacmince %50:%50 BBT içerikli Ç/T: 1,3 oranlı Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 14,49 MPa/90 gün)

- 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre BCD1, BCD2, BCD3, BCD4 ve BCD5 hamurları için sırasıyla %5, %32,33, %13,13, -%7,79, -%36,59 olarak gelişim göstermiştir.



➤ BCD4 ve BCD5 hamurlarında dayanımda önemli düşüşler gözlenmiştir. Bunun sebebi rötre çatlaklarından kaynaklanmaktadır.

Şekil 43'te verilen SEM görüntülerinde yapı içerisinde çok fazla rötre çatlağının oluştuğu gözlenmiştir. Bu çatlaklar dayanımı düşürmekte ve rijit yapıyı olumsuz etkilemektedir. EDS#20'de oluşan molekül yapısının tuz olduğu görülmektedir. Bu yapıdaki Ca, Na ve Si oranlarının birbirine yakın olması seri içerisinde dayanımı artırsa da bağdaki Na miktarının fazla olması dayanımın EDS#23'te (19,55 MPa) analizi yapılan hamura göre daha düşük olmasına sebep olmuştur. EDS#22'de ise oluşan molekülün  $n(\text{Na}_2\text{O}).m(\text{CaO}).t(\text{SiO}_2).z(\text{H}_2\text{O})$  olduğu söylenebilir. Si miktarının Ca'dan fazla olması rijit yapının bozulmasına sebep olmuş ve dayanımı etkilemiştir.

***BYT ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları:***

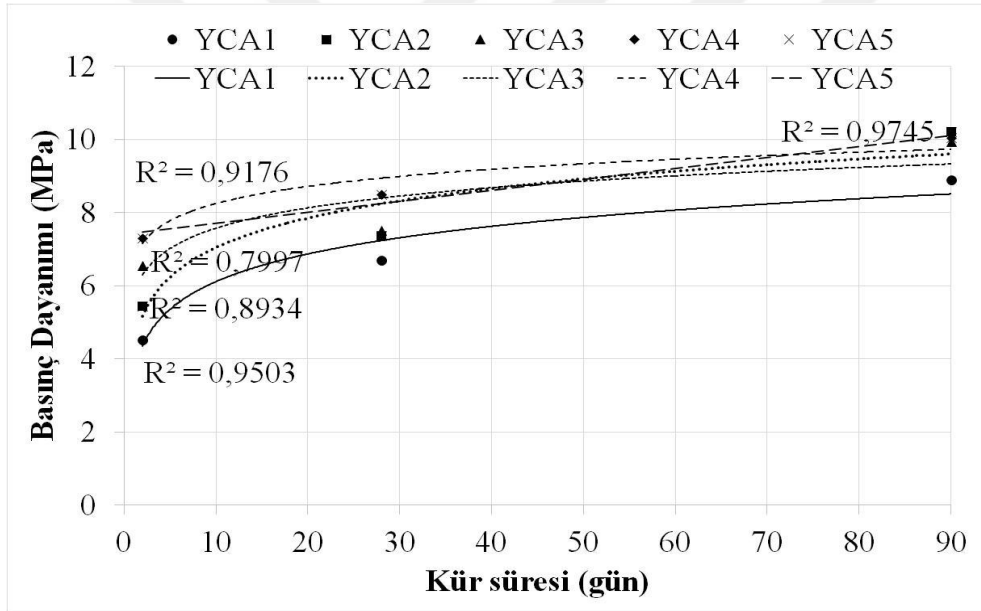
Tablo 31'de BYT ile dökülen hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşında basınç dayanımı ve BHA sonuçları verilmiştir.

Tablo 31.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aktivatörü ve BYT ile üretilen hamurların basınç dayanımı sonuçları

Kod	Ç/T	n	2 gün		28 gün		90 gün	
			MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	kg/dm <sup>3</sup>
YCA1	1,40	2	4,53	1,65	6,69	1,66	8,89	1,67
YCA2	1,30	2	5,44	1,68	7,36	1,66	10,22	1,69
YCA3	1,20	2	6,56	1,68	7,52	1,68	9,94	1,71
YCA4	1,10	2	5,74	1,67	7,75	1,65	10,42	1,68
YCA5	1,00	2	7,30	1,74	8,50	1,70	10,04	1,77
YCB2	1,30	2	5,10	1,69	8,49	1,64	10,26	1,66
YCB3	1,20	2	6,17	1,74	8,71	1,68	9,51	1,69
YCB4	1,10	2	9,01	1,74	8,96	1,67	9,55	1,67
YCB5	1,00	2	3,28	1,62	2,57	1,64	7,75	1,67
YCC2	1,30	2	4,40	1,72	6,23	1,70	8,72	1,72
YCC3	1,20	2	5,33	1,72	6,00	1,66	7,97	1,69
YCC4	1,10	2	3,87	1,60	6,61	1,64	6,72	1,61
YCD1	1,40	2	3,29	1,61	4,17	1,57	5,08	1,61
YCD2	1,30	2	3,28	1,61	5,02	1,58	6,68	1,63
YCD3	1,20	2	5,71	1,68	7,55	1,66	9,44	1,75
YCD4	1,10	2	6,32	1,69	7,75	1,66	10,95	1,71
YCD5	1,00	2	5,01	1,73	7,62	1,69	11,37	1,73

Tablo 31’de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 44’te korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 44’e göre BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0,2:0,3 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımları deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

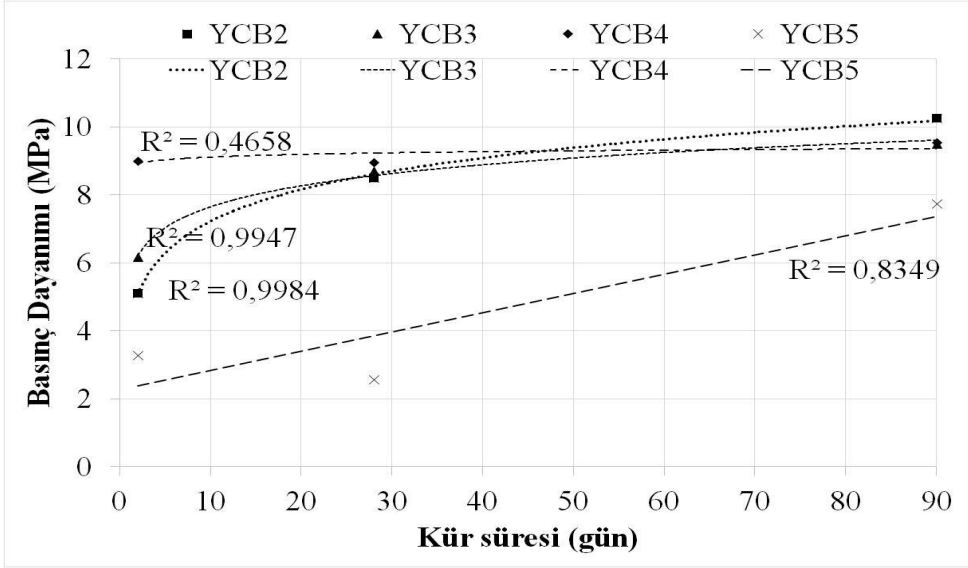
- En yüksek ve en düşük erken dayanımlar sırasıyla YCA5 ve YCA1 hamurlarından lmlmştir. Basınç dayanımları sırasıyla 7,30 ve 4,53 MPa’dır.
- 90 gün yaşında en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla YCA4 ve YCA1 hamurları olmuştur. Hamurların dayanımları sırasıyla 10,42 ve 8,89 MPa olarak lmlmştir.
- /T oranı azaldıkça dayanım artışı gerçekleşmiştir.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YCA1, YCA2, YCA3, YCA4 ve YCA5 hamurları için sırasıyla %47,68, %35,29, %14,63, %35,02, %16,44 olarak gelişim göstermiştir.



Şekil 44. BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0,2:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

- 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre YCA1, YCA2, YCA3, YCA4 ve YCA5 hamurları için sırasıyla %32,88, %38,86, %32,18, %34,45 ve %18,12 olarak gelişim göstermiştir.
- Bu seride dayanım kaybı gerçekleşen hamur olmamıştır. Nemde tüm hamurlar dayanımlarını arttırmıştır.
- En yüksek erken dayanım Ca(OH)<sub>2</sub> ile üretilen hamurlarda 7,30 MPa iken NaOH ile üretilen hamurlarda 11,80 MPa’dır.

- En düşük erken dayanımlar ise NaOH ile üretilen hamurlarda 3,80 MPa, Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurlarda 4,53 MPa'dır.
- 90 gün yaşında en yüksek dayanım NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda 9,15 MPa iken Ca(OH)<sub>2</sub> ile üretilen seride 10,42 MPa'dır.
- 90 gün yaşında basınç dayanımı en düşük NaOH aktivatörü ile üretilen hamurun basınç dayanımı 3,30 MPa iken Ca(OH)<sub>2</sub> ile üretilen hamurlarda 8,89 MPa'dır.



Şekil 45. BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,55:0,15:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

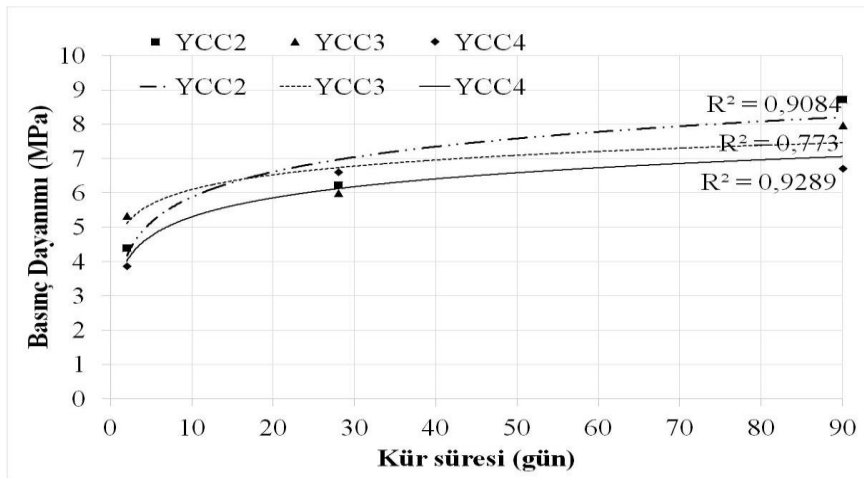
Tablo 31'de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 45'te korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 45'e göre BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,55:0,15:0,3 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken dayanımı en yüksek ve en geç hamurlar sırasıyla YCB4 ve YCB5 hamurlarıdır. Bu hamurların dayanımları sırasıyla 9,01 ve 3,28 MPa'dır.
- 90 gün yaşında basınç dayanımları en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla YCB2 ve YCB5 hamurları olmuştur. Hamurların dayanımları sırasıyla 10,26 ve 7,75 MPa olarak ölçülmüştür.
- Hamurların Ç/T oranı azaldıkça dayanımları artmıştır. Ancak işlenebilirliği düştüğü için yerleştirilememiş ve dayanım Ç/T oranı 1,0 olan hamurun dayanımı oldukça düşük ölçülmüştür. (YC12 hamuru)

- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YCB2, YCB3, YCB4 ve YCB5 hamurları için sırasıyla %66,47, %41,17, -%0,56 ve -%21,65 olarak gelişim göstermiştir.
- 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre YCB2, YCB3, YCB4 ve YCB5 hamurları için sırasıyla %20,85, %9,18, %6,58 ve %201,56 olarak ölçülmüştür.
- En yüksek dayanım gelişimi YCB5 hamurunda görülmüştür. Ancak bu hamurun yerleştirilmesi oldukça zor olmuş ve tokmak yardımıyla kalıba yerleştirilmiştir.
- En yüksek erken dayanım  $\text{Ca(OH)}_2$  ile üretilen hamurlarda 9,01 MPa iken NaOH ile üretilen hamurlarda 7,85 MPa'dır.
- En düşük erken dayanımlar ise NaOH ile üretilen hamurlarda 4,75 MPa,  $\text{Ca(OH)}_2$  aktivatörü ile üretilen hamurlarda 3,28 MPa'dır.
- 90 gün yaşında en yüksek dayanım NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda 15,05 MPa iken  $\text{Ca(OH)}_2$  ile üretilen seride 10,26 MPa'dır.
- 90 gün yaşında basınç dayanımı en düşük NaOH aktivatörü ile üretilen hamurun basınç dayanımı 3,30 MPa iken  $\text{Ca(OH)}_2$  ile üretilen hamurlarda 7,75 MPa'dır.

Tablo 31'de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 46'da korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 46'ya göre BYT:MT: $\text{Ca(OH)}_2$  oranı katı madde hacmince 0,6:0,1:0,3 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

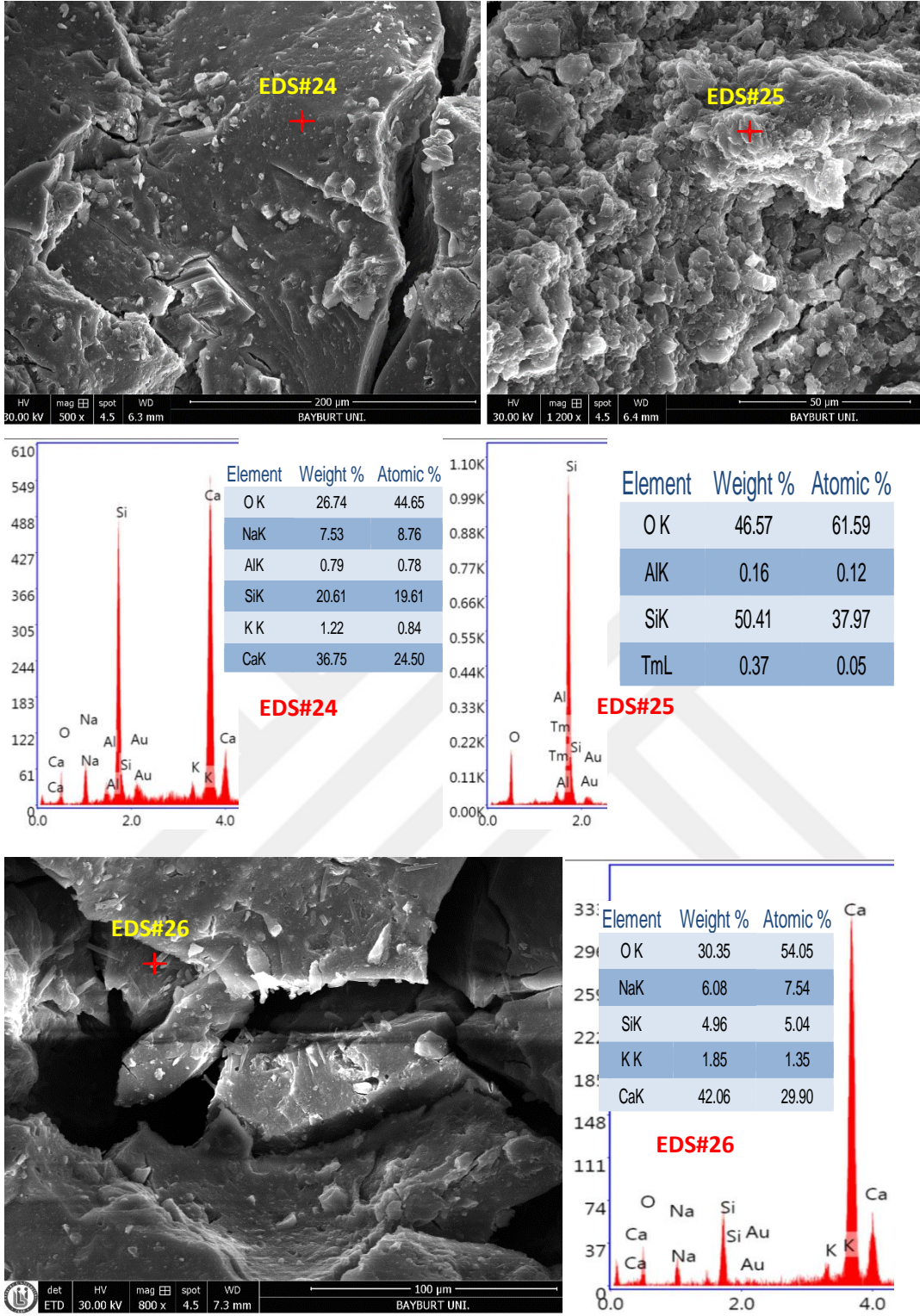
- Bu seride sadece 3 üretim gerçekleştirilebilmiştir.
- Erken dayanımları en yüksek ve en düşük hamurlar YCC3 ve YCC4 hamurlarıdır. Bu hamurların dayanımları sırasıyla 5,33 ve 3,87 MPa'dır.



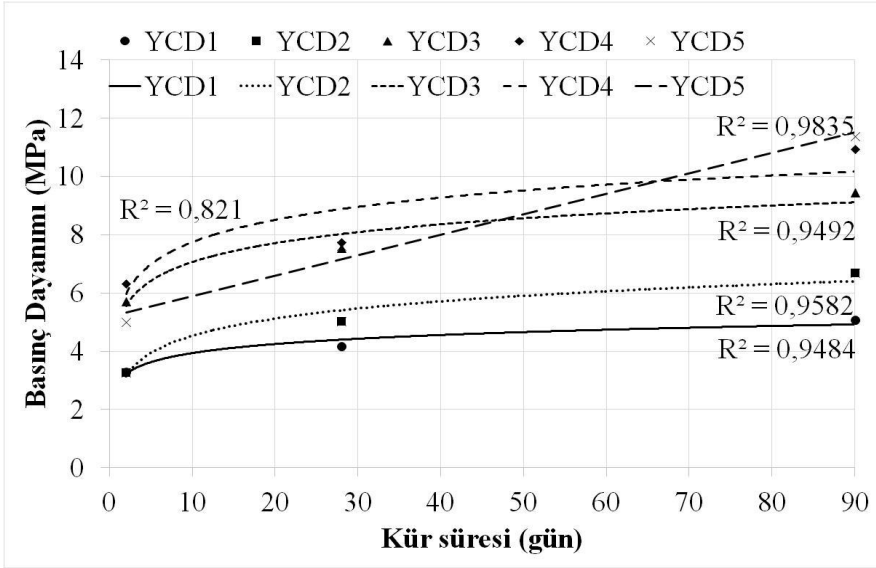
Şekil 46. BYT:MT: $\text{Ca(OH)}_2$  oranı katı madde hacmince 0,6:0,1:0,3 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

- Geç dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar YCC3 ve YCC4 hamurlarıdır. Bu hamurların dayanımları sırasıyla 8,72 ve 6,72 MPa'dır.
- Hamurların /T oranlarının azalması işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YCC2, YCC3 ve YCC4 hamurları için sırasıyla %41,59, %12,57 ve %70,80 olarak gelişim göstermiştir.
- 90 gün yaşında basınç dayanımları 28 günlük dayanıma göre YCC2, YCC3 ve YCC4 hamurları için sırasıyla %39,97, %32,83 ve %1,66 olarak gelişim göstermiştir.

şekil 47'de SEM görüntüleri ile EDS analizi sonuçları verilmiştir. EDS#24'te rijit bir yapı oluştuğu gözlenmiş ve atomik yüzde olarak Ca ve Si'nin yüksek olduğu görülmektedir. Hamurun içindeki rijit yapının artması dayanımı da artırmaktadır. Burada asıl jeopolimer yapısının C-S-H yapısı olduğu ve yapıdaki CaO miktarının artmasıyla da rijit yapının oluştuğu tahmin edilmektedir. EDS#23'teki en yüksek dayanımlı (19,55 MPa) hamurda da (Ca %26) oluşan yapıda ise daha fazla Ca (%29) ve daha az Si miktarının olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yapıda Ca ve Si miktarının artması dayanımı artırmaktadır.



Şekil 47. Katı maddenin hacmince %50:%50 BYT:Ca(OH)<sub>2</sub> içerikli Ç/T: 1,0 oranlı Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörlü AAH'dan SEM+EDS analizleri (en yüksek dayanım: 11,37 MPa/90 gün)



Şekil 48. BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0:0,5 olan hamurların basınç dayanımı korelasyon eğrileri

Tablo 31’de verilen değerler karşılaştırmanın daha verimli olabilmesi amacıyla Şekil 48’de korelasyon diyagramı ile verilmiştir. Şekil 48’e göre BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı katı madde hacmince 0,5:0:0,5 olan hamurların 2, 28 ve 90 gün yaşındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Erken dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar YCD4 ve YCD2 hamurlarıdır. Basınç dayanımları sırasıyla 6,32 ve 3,28 MPa’dır.
- Geç dayanımlara bakıldığında dayanımı en yüksek ve en düşük hamurlar sırasıyla YCD5 ve YCD1 hamurlarıdır. Hamurların dayanımları sırasıyla 11,37 ve 5,08 MPa’dır.
- Ç/T oranı azaldıkça dayanımda artış görülmüştür. Ancak işlenebilirlik düştüğü için hamurlar yerleştirilememiş ve erken dayanımda kayıp yaşanmıştır.
- 28 günlük basınç dayanımları 2 günlük basınç dayanımlarına göre YCD1, YCD2, YCD3, YCD4 ve YCD5 hamurları için sırasıyla %26,75, %53,05, %32,22, %22,63 ve %52,1 olarak gelişim göstermiştir.
- Hamurlarda dayanım kaybı yaşanmamıştır. Ancak Ç/T oranının düşmesiyle işlenebilirlik azalmış ve yerleştirilemeyen hamurlarda dayanım kaybı yaşanmıştır.
- 90 gün yaşında basınç dayanımları 28 günlük dayanıma göre değişim sırasıyla %21,82, %33,07, %25,03, %41,29 ve %49,21 olarak ölçülmüştür.

Tablo 32’de Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile dökülen hamurların karşılaştırması, Tablo 33’te ise iki farklı aktivatör ile dökülen hamurların karşılaştırılması yapılarak çalışmalar

özetlenmiştir. Tablo 34’te ise çalışmada döküm anında ve döküm sonrasında ortaya çıkan avantaj ve dezavantajlar sıralanmıştır.

Tablo 32.  $Ca(OH)_2$  Aktivatörü İle Dökülen Hamurların Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması

<b>Basınç Dayanımı Testi (<math>Ca(OH)_2</math>)</b>	
<b>BBT</b>	<b>BYT</b>
2 gün en yüksek dayanım: <b>12,53 MPa</b>	2 gün en yüksek dayanım: <b>9,01 MPa</b>
2 gün en düşük dayanım: <b>3,43 MPa</b>	2 gün en düşük dayanım: <b>3,28 MPa</b>
28 gün en yüksek dayanım: <b>18,29 MPa</b>	28 gün en yüksek dayanım: <b>8,96 MPa</b>
28 gün en düşük dayanım: <b>8,02 MPa</b>	28 gün en düşük dayanım: <b>2,57 MPa (iyi yerleşmemiş)</b>
90 gün en yüksek dayanım: <b>19,65 MPa</b>	90 gün en yüksek dayanım: <b>11,37 MPa</b>
90 gün en düşük dayanım: <b>9,27 MPa</b>	90 gün en düşük dayanım: <b>5,07 MPa</b>
2 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>Yok</b>	2 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>Yok</b>
28 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>Yok</b>	28 gün yaşından sonra dayanım kaybı: <b>Yok</b>
28 gün yaşından sonra dayanım artışı: <b>Tamamı</b>	28 gün yaşından sonra dayanım artışı: <b>Tamamı</b>
En yüksek geç basınç dayanımı Ç/T aralığı: <b>0,9-1,0 Ç/T</b>	En yüksek basınç dayanımı Ç/T aralığı: <b>MT ile dökülen hamurlarda 1,30 Ç/T oranı MT olmadan dökülen hamurlarda 1,0 Ç/T</b>
En yüksek basınç dayanım hacimce katı madde: <b>0,6:0,1:0,3 BBT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub></b>	En yüksek basınç dayanım hacimce katı madde: <b>0,5:0,2:0,3 BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub></b>
Dayanım kaybeden hamur neredeyse yok.	
BYT arttıkça hamurların dayanımı düşmüş, BBT arttıkça dayanım artışı gerçekleşmiştir.	
Ç/T parametresi her iki hamur dökümlerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir.	
BYT ile dökülen hamurların işlenmesi daha zor olmuş ve yerleştirilemeyen hamurlar olmuştur.	



Tablo 33.  $Ca(OH)_2$  Ve  $NaOH$  Aktivatörü İle Dökülen Hamurların Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması

<b>Basınç Dayanımı Testi</b>	
<b>NaOH</b>	<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>
Ç/T etkin	Ç/T etkin
Erken dayanım en yüksek <b>18,65 MPa</b> (% 100 BYT-0,7 Ç/T oranı)	Erken dayanım en yüksek <b>12,53 MPa</b> (0,55:0,15:0,30 BBT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> - 0,9 Ç/T oranı)
Geç dayanım en yüksek <b>37,80 MPa</b> (% 100 BYT-0,7 Ç/T oranı)	Geç dayanım en yüksek <b>19,65 MPa</b> (0,60:0,10:0,30 BBT:MT:Ca(OH) <sub>2</sub> - 1,0 Ç/T oranı)
<b>Nihai sonuçlarda Dayanım kaybı var</b>	<b>Nihai sonuçlarda Dayanım artışı var</b>
Molarite, BBT ve BYT için farklı sonuç veriyor.	Ç/T BBT ve BYT için farklı sonuç veriyor.
NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> oranı etkin	MT miktarı etkin
Çözelti sıcaklığı etkin ve BT oranı etkin	BT oranı etkin
Molaritenin düşmesi dayanımı olumsuz etkiliyor	Ç/T'nin düşmesi dayanımı olumsuz etkiliyor
Hamurlar için etüv kürü olumsuz	Hamurlar için ortam kürü ve etüv olumsuz
Hamurlar için <b>ortam nemi olumsuz</b>	<b>Nemli ortam olumlu</b>
<b>Rötre oluşumu çok değil</b>	<b>Rötre oluşumu ortamda çok fazla</b>
İşlenebilirlik Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörüne göre daha iyi.	İşlenebilirlik oldukça düşük
Çözelti miktarı arttıkça dayanım kaybediyor	Karıştırma süresinde katılaşma var
Karıştırma prosesi ve sırası önemli	Karıştırma prosesi ve sırası önemli
BT oranı arttıkça dayanımlar düşüyor	Dayanım daha çok CaO miktarına bağlı
BBT ile dökülen hamurların erken ve nihai dayanım ortalaması daha yüksek.	
% 100 BYT daha iyi çalışıyor	BBT kireçle daha etkin

Tablo 34. NaOH Ve Ca(OH)<sub>2</sub> Aktivatörlerinin Üretim Esnasında Ve Sonrasındaki Davranışlarının Karşılaştırılması

	NaOH		Ca(OH) <sub>2</sub>	
	Avantaj	Dezavantaj	Avantaj	Dezavantaj
<b>Üretim anı</b>	İşlenebilirlik kolay.	Çözelti sıcaklığı çok yüksek.	Çözelti sıcaklığının yükselmesi problemi ve soğutma işlemi yok.	İşlenebilirlik çok zor.
	Priz almaya başlaması ile rötre davranışı çok az.	Çözeltiyi soğutmak zaman alıyor.	Sürekli karıştırma işlemine ihtiyaç yok.	Priz almaya başlaması ile rötre gelişimi hemen başlıyor.
	Karıştırma prosesinin uygulanması kolay.	Çözeltinin aniden kristalleşme problemi var.	Hamurları döküm anında etkileyen parametre sayısı daha az.	Karıştırma süresinin eşit uygulanması çok zor.
	Toplu döküme müsaade edecek kadar zaman var.	Çözeltinin kristalleşmesini önlemek için sürekli karıştırmak gerekiyor. Bu da çözelti sıcaklığını artırıyor.		Toplu döküme müsaade edecek zaman yok
		Priz sürelerini belirlemek Vicat halkasında yetersiz.		
		Dökümü etkileyen parametre sayısı çok fazla		
<b>Üretim sonrası</b>	Rötre davranışı çok az.	Kalıp sökümü ve temizliği zor	Kalıp sökümü ve temizliği kolay.	Rötre davranışı çok fazla.
	Dayanım değerleri Ca(OH) <sub>2</sub> aktivatörüne göre daha yüksek.	Suya karşı dirençsiz yapı	Neredeyse tüm hamurlarda dayanım artışı var.	Dayanım değerleri NaOH aktivatörüne göre daha düşük.
	Döküm sonrası hamurları etkileyen parametre sayısı daha az.	Dayanım kaybı var ve dayanım gelişimi belirli hamurlarda var	Döküm sonrası hamurları etkileyen tek parametre ortam nemi.	Hamurlar normal koşullarda rötre yapıyor ve nemli ortam ihtiyacı var.

Genel olarak SEM görüntülerinde NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda tuz oluşumu fazla iken  $\text{Ca(OH)}_2$  ile üretilen hamurlarda da rötre oluşumu fazladır. Tuz oluşumu yapıdaki molariteye ve NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranına bağlıken rötre oluşumu da yapıdaki CaO oranına bağlıdır. Yapıda Ca ve Si oranlarının birbirine yaklaştığı durumlarda dayanımın arttığı görülmektedir. Ancak C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin oluşması mümkün olmamıştır. Yapılarda Al miktarı oldukça düşüktür ya da hiç yoktur. Dolayısıyla bu jellerin oluşmaması dayanımı olumsuz etkilemektedir. Öncelikli olarak yapılarda C-S-H ve N-S-H yapısının oluşması beklenmektedir. Yani dayanım gelişimi genel olarak C-S-H ve N-S-H jelleri ile ifade edilebilmektedir.

NaOH aktivatörü ile üretilen tüm hamurlar arasında BYT ile üretilen hamurların erken ve geç dayanımlarının BBT ile üretilen hamurlardan daha yüksek olduğu gözlenmiştir. BYT ile üretilen hamurların MT ile birlikte üretilmeleri dayanımı düşürmüştür. MT ve BBT ile üretilen hamurların daha yüksek dayanım sonuçları verdiği gözlenmiştir. BYT katı madde hacmince %100 üretildiğinde daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir. Dayanımın MT ile düşmesinin nedeninin CaO miktarı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.  $\text{Ca(OH)}_2$  aktivatörü ile yapılan çalışmalarda BYT ile dökülen hamurların dayanımlarının BBT ile dökülen hamurların dayanımlarından daha düşük olduğu gözlenmiştir. Literatürde (Chindaprasirt *vd.*, 2018) CaO'nun dayanım gelişimini azalttığı bilgisi yer almaktadır. Bu çalışmada da NaOH ile üretilen hamurların basınç dayanımının daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak NaOH aktivatörü ile dökülen hamurlarda nihai üretimlerde dayanım kaybı görülürken  $\text{Ca(OH)}_2$  aktivatörü ile üretilen hamurların nemli ortamda bekletilmesiyle neredeyse tamamının dayanım kazandığı görülmektedir. Hem deney sırasında hem de sonrasında yapılan gözlemlere göre  $\text{Ca(OH)}_2$  aktivatörü BBT ile üretilen hamurlar için olumlu sonuçlar verirken NaOH aktivatörü ise BYT ile dökülen hamurlarda daha etkili sonuçlar vermektedir. Tüm üretimlere bakıldığında en yüksek basınç dayanımı NaOH aktivatörü ve katı madde hacmince %100 BYT ile üretilen hamurdan 37,80 MPa olarak ölçülmüştür. Bu hamurun yayılma değerinin ve çökme değerinin işlenebilirlik ile yerleştirme için uygun ve suya karşı direncinin olması, BYT ile NaOH aktivatörünün uyumlu olduğunu göstermektedir. BBT'de ise CaO eksikliği  $\text{Ca(OH)}_2$  aktivatörü ile giderilmektedir. Dolayısıyla dayanım gelişimleri  $\text{Ca(OH)}_2$  aktivatörü ile daha yüksek olmaktadır.

**NaOH aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların su emme deney sonuçları ve değerlendirmeleri.**

***BBT ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları:***

Tüm hamurlar hem ön üretimlerde hem de nihai dökümlerde su içerisinde dağılmış ve su emme deneyi yapılamamıştır. SEM görüntülerinde de açıklandığı gibi yapı içerisinde yoğun tuz oluşumu gözlemlenmiş ve yapıda oluşan iyonik bağdan dolayı hamurun suda tamamen dağıldığı gözlenmiştir.

***BYT ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları:***

%100 BYT kullanılarak üretilen hamurlarda su emme direnci oluşmuştur. YND1a\_7 hamurunun 2 ve 28 günde, YND4d\_7 hamurunun da 2 günde su emme deneyleri yapılamamıştır.

Tablo 35. NaOH Aktivatörü Ve BYT İle Üretilen Hamurların Su Emme Deneyi Sonuçları

Kod	Kuru özgül ağırlık			Su emme (%)			Görünür porozite (%)		
	2 gün	28 gün	90 gün	2 gün	28 gün	90 gün	2 gün	28 gün	90 gün
YND1a_7	N/A	N/A	1,32	N/A	N/A	31,74	N/A	N/A	41,83
YND2b_9	1,31	1,21	1,28	32,99	39,15	31,63	43,08	47,48	40,35
YND2b_7	1,37	1,35	1,38	29,58	30,35	26,03	40,48	40,97	35,97
YND3c_7	1,36	1,19	1,39	29,65	47,61	27,63	40,28	56,62	38,50
YND4d_7	N/A	1,36	1,30	N/A	29,65	32,24	N/A	N/A	42,04

Tablo 35'e göre;

- Hamurların 28 gün yaşında su emme yüzdelerinin en yüksek olduğu gözlenmiştir.
- 2 gün yaşına göre 28 günde su emme yüzdelerindeki artış YND2b\_9, YND2b\_7 ve YND3c\_7 hamurları için sırasıyla; %%18,66, %2,61 ve %60,56 olarak ölçülmüştür.
- 90 gün yaşında su emme yüzdelerindeki değişim 28 güne göre YND2b\_9, YND2b\_7, YND3c\_7 ve YND4d\_7 hamurları için sırasıyla -%19,19, -%14,23, -%41,96 ve %8,72 olarak gelişim göstermiştir.
- 0,55 NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve 0,70 Ç/T oranı ile dökülen YND2b\_7 hamuru en az su emen hamur olmuştur. Bu hamurun aynı zamanda nihai basınç dayanımı değeri de en yüksektir.

**Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen sertleşmiş hamurların basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirmeleri.**

Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurlarda laboratuvar koşullarında rötre oluşumu gözlenmiştir. Hamurlarda derin rötre çatlaklarının oluşması, hamurların parça kaybetmesi ve formunun bozulması gibi sebeplerden dolayı 28 günlük su emme deneyleri gerçekleştirilmemiştir. 90 gün yaşlarında tüm hamurların su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyde hamurlar su içerisinde formlarını korumuşlardır. Ancak 105 °C etüvde bekletilen hamurların aşırı rötre yapmalarından dolayı parçalandıkları gözlenmiştir.

Tablo 36. 90 Gün Yaşında Ca(OH)<sub>2</sub> Aktivatörü ve BBT ve BYT İle Üretilen Hamurların Su Emme Deneyi Sonuçları

Kod	Kuru özgül ağırlık		Su Emme deneyi (%)		Görünür porozite (%)	
	BBT	BYT	BBT	BYT	BBT	BYT
CA1	0,92	0,98	63,87	56,62	58,92	55,68
CA2	0,95	0,95	61,68	62,88	58,38	59,63
CA3	0,96	1,00	59,17	55,48	56,75	55,57
CA4	1,01	1,07	54,93	46,16	55,62	49,46
CA5	1,02	1,08	55,47	47,28	56,78	51,30
CB2	0,95	0,96	62,15	61,09	59,08	58,50
CB3	0,97	0,99	59,58	56,05	58,02	55,71
CB4	1,03	0,91	53,19	51,63	54,82	47,15
CB5	1,03	1,29	54,16	45,54	55,60	58,64
CB6	1,08	N/A	47,81	N/A	51,78	N/A
CC2	0,97	0,99	59,58	55,94	57,63	55,49
CC3	1,02	0,96	53,28	61,38	54,42	59,16
CC4	1,02	1,02	54,3	50,86	55,40	51,84
CC5	1,05	N/A	51,15	N/A	53,91	N/A
CC6	1,07	N/A	48,28	N/A	51,58	N/A
CD1	0,95	0,92	59,58	57,99	56,46	53,06
CD2	0,95	0,99	60,92	55,58	57,91	54,88
CD3	0,97	0,98	57,59	59,05	56,06	57,98
CD4	1,01	1,03	53,73	54,01	54,10	55,62
CD5	1,06	1,06	47,62	49,37	50,61	52,49

Tablo 36'ya göre;

- Hamurların Ç/T oranı azaldıkça su emme miktarları da azalmıştır. En yüksek su emme miktarı % 63,87 olarak BBT ile üretilen hamurda ölçülmüştür.
- Genel olarak Ç/T oranı azaldıkça hamurlarda su emme oranlarının azaldığı görülmüştür.
- Rötire çatlaklarından dolayı hamurlar parçalanmış ve formları bozularak parça kaybetmişlerdir.
- Kuru özgül ağırlıkları genel olarak 0,90 ile 1,08 değerleri arasında değişkenlik göstermiştir. En yüksek kuru özgül ağırlık 1,08 olarak hesaplanmıştır.
- Görünür porozite değerleri arasında büyük bir farklılık görülmemiştir. En yüksek görünür porozite değeri % 59,63 değeri ile BYT ile üretilen hamurda hesaplanmıştır.

### **Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ve X-Işını difraksiyonu (XRD) analizi sonuçları**

#### **NaOH aktivatörü ile üretilen hamurların SEM analizi sonuçları.**

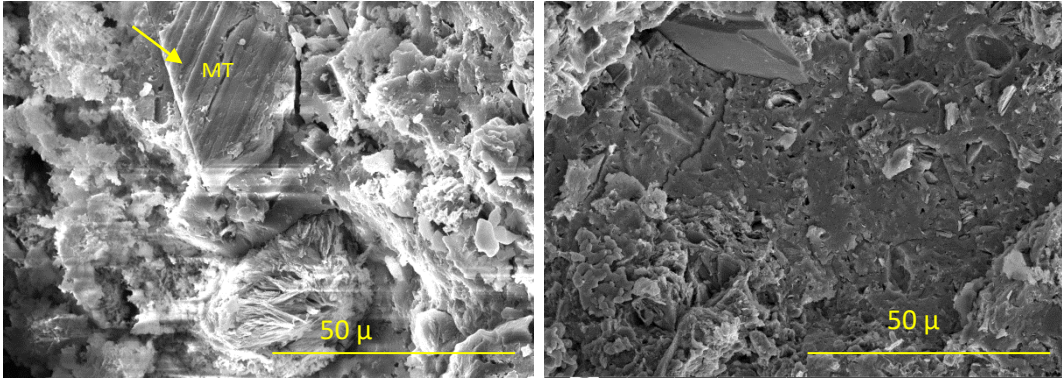
##### ***SEM analizi ve XRD analizi.***

*BBT kullanılarak;*

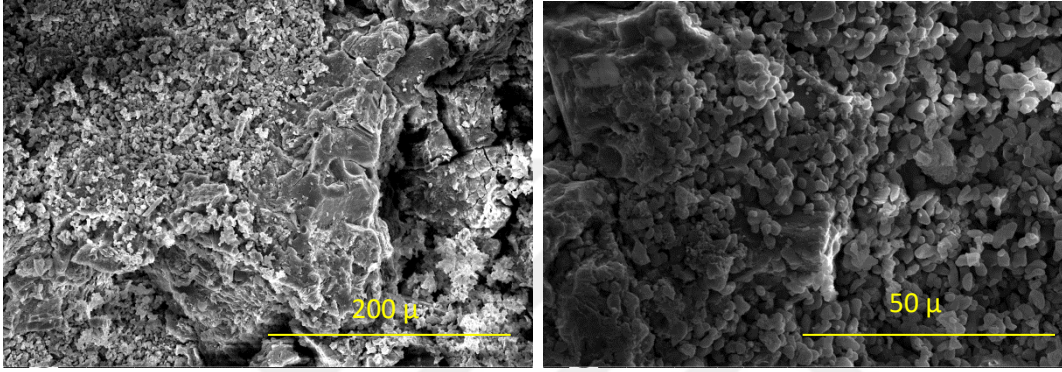
Bu çalışmada da NaOH aktivatörü ile puzolanik yapılı volkanik tüf olan öğütülmüş BBT ve YBT ile üretilen hamurlarda basınç dayanımları sırasıyla en yüksek erken dayanım; 15,80 ve 18,65 MPa iken geç dayanım da sırasıyla 22,80 ve 37,80 MPa olarak ölçülmüştür. SEM görüntüleri aşağıda verilen hamurların bazı noktalarında da EDS alınmıştır. EDS analizleri basınç dayanımı sonuçları ile birlikte tartışılmıştır. Jeopolimerler, alkali bir ortamda silis-alümina jellerinden geosentez ile üretilen inorganik malzemelerdir. Mikroyapıları, kovalent bağlarlar bağlanmış inorganik molekül zincirleri veya ağlarından oluşur. Bu moleküller, birbirleri ile ortak bir oksijen atomunu paylaşan üç boyutlu bir ağda birbirine bağlanan dört yüzlü atomu oluşturan dört oksijen atomuyla birbirine bağlanmış bir silis veya alüminyum atomundan oluşmaktadır. Jeopolimerlerin üretimi için ana hammadde (öncü) bir alümino-silikat materyalidir. Öncül hammaddeler kaolin, zeolit, doğal puzolanlar veya volkanik kül gibi doğal kökenli olabilir ancak aynı zamanda metakaolin, kül, granül yüksek fırın cürufu, kalsine edilmiş cüruf ya da diğer endüstriyel atıklar gibi termal olarak işlenmiş malzemeler de olabilir. Alümino-silikat materyalleri genel olarak aktivatör olarak adlandırılan ikinci bir hammadde, yani alkali çözelti ile aktive edilmelidir. Yaygın aktivatörler sodyum ve potasyum hidroksit, sodyum ve potasyum silikat çözeltileri (cam suyu) ile sodyum karbonattır. Jeopolimerizasyon, alümina ve silikaların, ham maddelerle karıştırılıp

çözünmesiyle başlar. Kimyasal bileşimleri nedeniyle doğal zeolitler, jeopolimerlerin üretimi için olası hammaddeler arasındadır. Zeolitler, kristal ve hidratlanmış alümino-silikatlardır, silis ve alüminyum tetrahedradan ( $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$ ) oluşmakta ve bir oksijen atomu ile bağlanmaktadır (Nikolov, Rostovsky, & Nugteren, 2017). Yapılan çalışmalarda uçucu kül, metakaolin, palm yağı, yüksek fırın cürufu ve atık killer üzerinde alkali aktivatör oranı, molarite ve kür sıcaklığı ile süresinin mikroyapıyı etkilediği görülmüştür (Ng, Alengaram, Wong, Mo, Jumaat, & Ramesh, 2018). Bu çalışmada da NaOH aktivatörü ile puzolanik yapılı volkanik tüf olan öğütülmüş BBT ve BYT ile üretilen hamurlarda basınç dayanımları sırasıyla en yüksek erken dayanım; 15,80 ve 18,65 MPa iken geç dayanım da sırasıyla 22,80 ve 37,80 MPa olarak ölçülmüştür. SEM görüntüleri aşağıda verilen hamurların bazı noktalarında da EDS alınmıştır. EDS sonuçları basınç dayanımları ile birlikte açıklanmıştır. Şekil 49- Şekil 56 BBT ile üretilen hamurların SEM görüntülerini oluşturmaktadır. Buna göre;

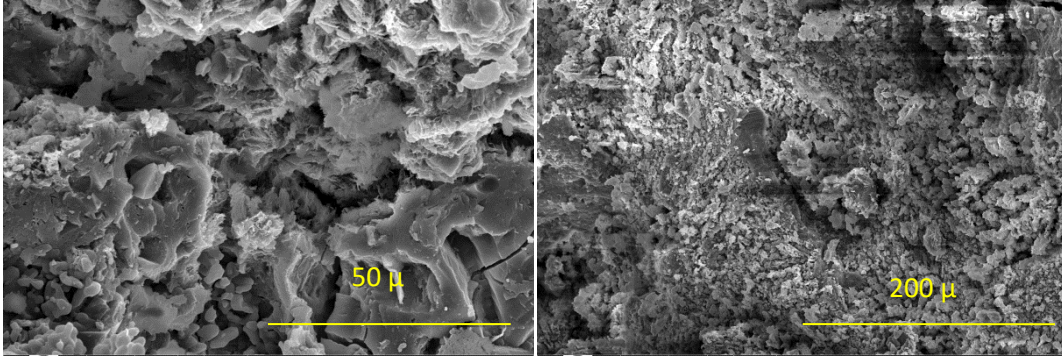
Şekil 49'da BNA4d hamurunun SEM görüntüsü mevcuttur. Resimde hamur içerisinde bağı katılmamış MT taneciklerinin olduğu görülmektedir. Al ve Ca kaynaklarının bu yapının içerisinde eser miktarda bulunmasının dayanımı düşürdüğü tahmin edilmektedir. Ancak yapıda Na-Si asarında bağlar oluşabileceği tahmin edilirken Al ve Ca oranının düşük olmasından dolayı da dayanımın yükselmediği düşünülmektedir. Molaritenin de yüksek olması Na oranının yüksek olmasını ve dayanımın bu yüzden seri içerisinde en yüksek olduğunu göstermektedir. Şekil 51'de serinin en düşük basınç dayanımına sahip hamurunun SEM görüntüsü verilmiştir. Hamurun molaritesi 8,2 M ve NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı 0,25'tir. Hamurda görüntüde küçük ve çok yapıda Na-O yapıları görülmektedir. Na-O yapılarının oluşması yapıdaki rijit ve amorf yapıların oluşmasını engellemiş ve oluşan ufak amorf yapının etrafını sararak yapıyı zayıflatmıştır. Mohammed İbrahim vd. 2019'da yapmış oldukları bir mikroyapı çalışmasında doğal puzolanlar arasında üniform jellerin gelişmediği ve kimyasal reaksiyonların hamur içerisindeki bağlayıcı yapıların kenarları ile alkali çözelti arasında kesildiğini göstermiştir. Dolayısıyla mikroyapı içerisinde geniş çatlaklar ve boşluklar oluşmuştur. Bu çalışmada da yapı içerisinde çatlaklar ve boşluklar görülmüş yapı kenarlarında da Na-Si bağları yerine Na-O ya da Si-O yapıları gelişmiştir. Bunlar yapı içerisinde N-A-S-H oluşumunu engellemiş ve dayanım düşmüştür.



Şekil 49. BNA4d hamurunun SEM analizi

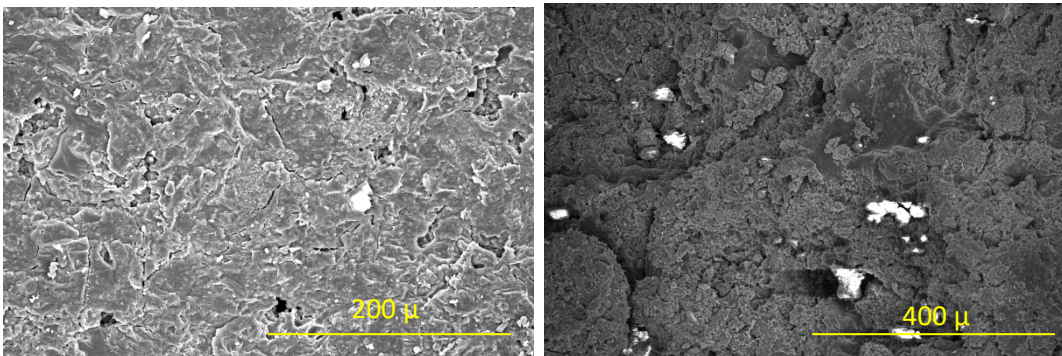


Şekil 50. BNA5e hamurunun SEM analizi



Şekil 51. BNB3c hamurunun SEM analizi

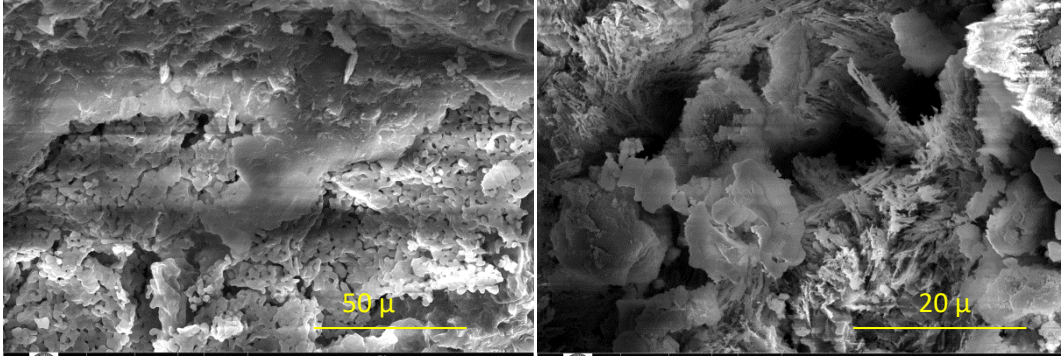
Şekil 52. BNB5e hamurunun SEM analizi



Şekil 53. BNC3c hamurunun SEM analizi

Şekil 54. BNC5e hamurunun SEM analizi



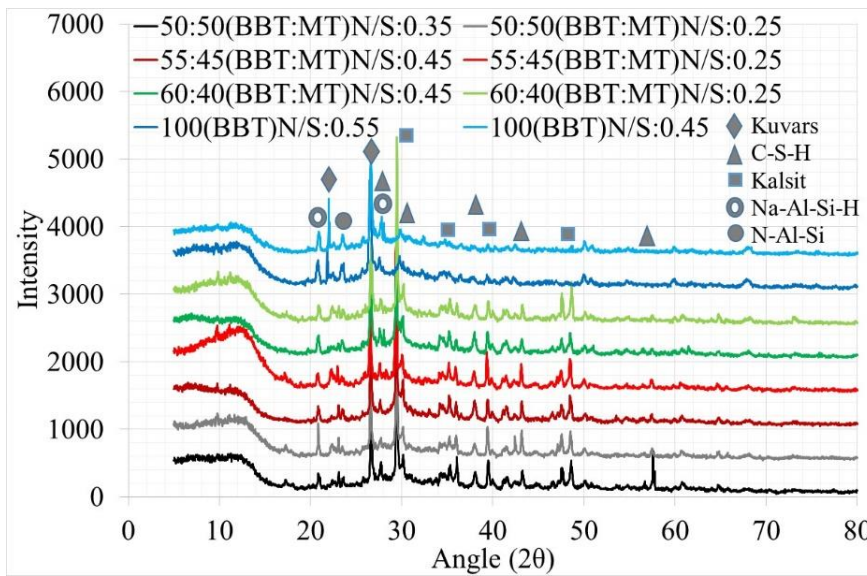


Şekil 55. BND7b hamurunun SEM analizi Şekil 56 . BND3c hamurunun SEM analizi

Bu jelin oluşmamasının diğer bir nedeni de Al eksikliğidir. Şekil 49'deki gibi Ca kaynaklı MT'nin de bazı kısımlarda reaksiyona girmediği görülmektedir. Bu durum da yapıda dayanımı sağlayan kalsiyum silikat hidrat C-S-H jellerinin oluşmasını engellemiştir. 90 günün sonunda da hamurda tozuma ve dökülme olduğu görülmüştür. Bu durum Na-O yapısının oluşup Si ve Ca'nın bağ yapısına katılmayıp fazla Si atomlarının dökülmesine yol açmaktadır. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> miktarı hamurda dayanımı, priz süresini ve kıvamı etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. SEM analizlerine göre NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı düşük olan tüm hamurlarda zayıf Na-O bağları görülmektedir. Bu yapılar bağların çok kırılabilir ve yüzeylerde de döküntü oluşmasına neden olmaktadır. Şekil 51 ve 52'de serilerinin yüksek dayanımlı hamurları görülmektedir. Bu hamurlarda da BNA4d hamuruna benzer yapılar bulunmaktadır. Genel olarak yapılarda Na-Si-O yapıları oluşmuşsa hamurların dayanımları yüksek olmaktadır. Ancak Na-O ya da Si-O yapıları ayrı ayrı oluşmuş ve aynı yapıda Si veya Na birlikte bulunmuyorsa dayanımlar serinin en düşük dayanımları olmuştur. Yapılarda molaritenin ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının düşmesi, Al eksikliği yapı içerisinde N-A-S-H bağlarının oluşmasını engellemiş ve Na-O veya Si-O bağları oluşmuştur. Bu da hamurda BT ve aktivatörlerin bağ yapamadığını göstermektedir. Dolayısıyla yüksek molaritede ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranlarında daha rijit yapılar oluşmaktadır. Şekil 55 ve 56'da ise MT bulunmamakta yapıda %100 BT bulunmaktadır. Şekil 55'te yapının genelinde Na-O ve Na-Si yapıları görülmektedir. Ancak yapıda Na-O bağlarının daha fazla olması bağı zayıflatmıştır. Hamurun molaritesi 18,5 M iken NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı da 0,55'tir. Molaritenin ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının yüksek olması da dayanımı arttırmaktadır. Şekil 56'da ise serideki düşük dayanımlı hamurun SEM görüntüsü verilmiştir. Burada da neredeyse hiç rijit yapı görülmemiştir. Yapıda Si'nin fazlalığı ve molaritenin düşük olması hamurun 90 günde bile içyapısının daha tam olarak kurumadığını göstermiştir. Hamurda MT olmaması Ca-Si

yapılarının neredeyse hiç oluşmamasına neden olmuş ve bundan dolayı dayanımları oldukça düşürmüştür.

XRD analizinden elde edilen sonuçlara göre, BBT ile üretilen NaOH aktivatörlü hamurların hemen hemen hepsinde benzer mineralojik yapılara rastlanılmıştır. Özellikle SEM ve EDS analizlerinde de görülen N-A-S-H, N-S-H, N-S-(C)-H, reaksiyonlara katılmamış kalsit yapıları ve kuvars yapıları gözlenmiştir. Özellikle MT içerikli hamurlarda C-S-H olduğu XRD analizlerindeki piklerde görüntülenmiştir. CaO içerikli ve C-S-H piklerinin yüksek olduğu hamurların dayanımlarının da yüksek olması bu mineralojik yapının basınç dayanımlarını olumlu etkilediğinin bir göstergesidir. Örneğin MT'siz hamurlarda C-S-H pikleri bulunmamaktadır. Katı kısmın hacmince %50 BBT içeren hamurlarda 60° theta açısına yakın bir bölgede C-S-H piki görüntülenmiş olup bu numune en yüksek dayanımı vermiştir. Tüm hamurlarda amorf fazın bulunuyor olması dayanım gelişiminin ileriki süreçte de artabileceğini ya da azalabileceğini göstermektedir. Özellikle katı kısmın hacmince %100 BBT içerikli hamurlarda kuvars piklerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu seri hamurlarda C-S-H yapısının oluşmadığı XRD analizinde de belirlenmiştir. Böylece bu yapının reaksiyonlara girmedeği düşünülebilir. Oysaki MT içerikli hamurlarda kuvars pikleri C-S-H veya N-S-C-H yapılarına dönüştüğü SEM görüntülerinde desteklendiği gibi XRD analizinde de gözlenmiştir.



Şekil 57. BBT ile üretilen NaOH aktivatörlü hamurların XRD analizleri

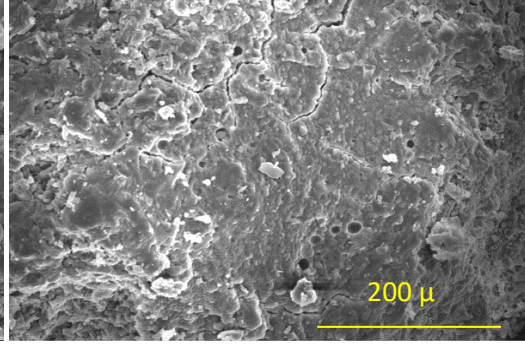
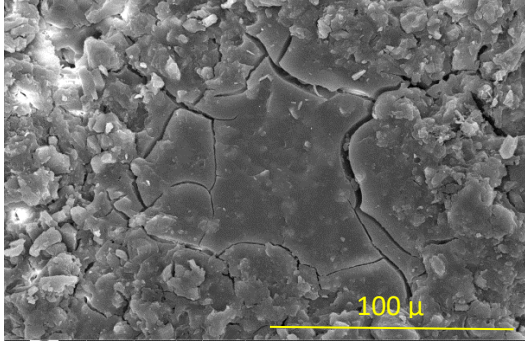
*BYT kullanılarak;*

Hamurların yapılarının BBT ile üretilen hamurlara benzer olduğunu söylemek mümkündür. SEM görüntülerinde geç dayanımları en yüksek ve en düşük hamurlar Şekil 58

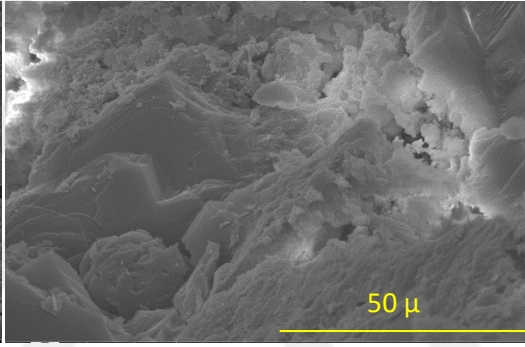
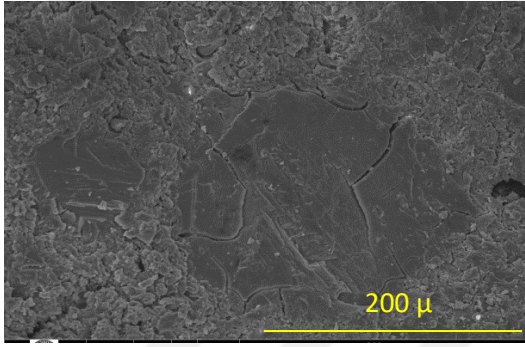
ve 59'da sırasıyla YNA1a ve YNA4d hamurlarını, Şekil 60 ve 61'de sırasıyla YNB1a ve YNB4d hamurlarını, Şekil 62 ve 63'te YNC4d\_7 ve YNC5e hamurlarını göstermektedir. Şekil 64 BYT ile üretilen hamurlar arasında en yüksek dayanıma sahip %100 BYT bağlayıcısıyla üretilen YND2b\_7 hamurunu ve Şekil 65 de %100 BYT ile üretilen hamurlardan en düşük dayanımlı olanı göstermektedir. Geç dayanımları en yüksek ve en düşük hamurların SEM görüntüleri Şekil 58- Şekil 65'te verilmiştir. Buna göre;

Bu serilerden Şekil 58 ve 59'da hamur içerisinde amorf yapılar görülmektedir. Ancak amorf yapıların etrafı kırılmış ve kırılmaya bağlı olarak geniş çatlaklar oluşmuştur. Connie vd. 2018'de yapmış oldukları bir çalışmada metakaolin (MK) kullanarak üretilen jeopolimer çimentolarda da Şekil 58'deki gibi çatlaklar görmüştür. Bu çatlakların oluşmasının dayanım kaybına neden olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada da YNA1a hamurunun molaritesi 22,1 M ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 0,66'dır. Hamurlar arasında genel olarak molaritesi yüksek olanlarda Na-Si bağlarından oluşan rijit yapıların daha çok geliştiğini söylemek mümkündür. Ancak yüksek molariteden dolayı Na miktarının artması da yapıda Na-O ve Na-Si bağlarının daha fazla oluşmasını sağlamaktadır. Zeolitlerin dayanım üzerinde MK gibi maddelerden daha negatif etkili olduğu bilinmektedir. (Ng vd., 2018) Şekil 60'ta YNA4d hamurunun SEM görüntüsü verilmiştir. Hamurun molaritesi 11,5 M ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı da 0,35'tir. Hamur içerisinde büyük gözeneklere ve çok sayıda mikro çatlaklar ile zayıf Na-O bağlarına rastlanmıştır. Ye, Zhang ve Shi, 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada 28 gün yaşında inceledikleri hamurda poroz jel ve geniş gözeneklere rastlamıştır. Bu durumu jeopolimerizasyon işleminin uzun vadeli numuneler üzerindeki büyük gözeneklerin oluşmasına ve jeopolimerizasyonun sürekli olarak devam etmesi sayesinde de gözeneklerin küçük ve hacimce azalma eğiliminde olduğu jellerin üretimini sağladığına bağlamıştır. Bu çalışmadaki incelenen hamurların 90 gün yaşında olmasına rağmen gözeneklerin var olduğu ve gözeneklerin iç kısmında da zayıf Na-O bağlarının geliştiği görülmüştür. Bu durumda jeopolimerizasyon işlemi devam etse bile oluşan bağların zayıf olması dayanımın ilerleyen zamanlarda daha da düşmesine neden olacağını göstermektedir. BYT:MT oranı 0,55:0,45 olan hamurlardan dayanımı en yüksek olan YNB1a hamurunun ve dayanımı en düşük olan YNB4d hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre YNB1a hamurunun mikro yapısı YNA1a hamuruna oldukça benzemektedir. Ancak burada oluşan rijit ve kristal yapıların biraz daha geniş ve büyük olduğu görülmektedir. YNB4d hamurunda ise basınç dayanımı 3,30 MPa olarak ölçülmüştür. Hamurda üst üste yığılmış MA tanecikleri görülmüştür. Döküm sırasında oluşan topaklaşmanın MA'dan kaynaklandığı bilinmekteydi. Bu görüntüde de topaklaşarak üst üste yapışan yapının Ca kaynaklı MA olduğu görülmektedir. Ca'nın herhangi bir

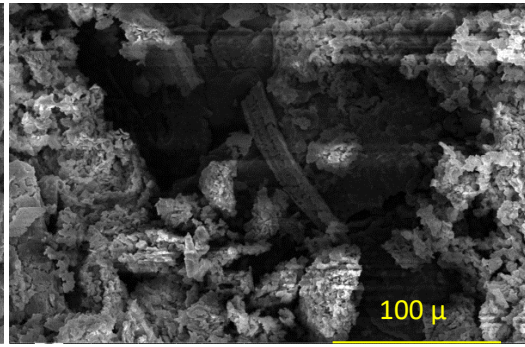
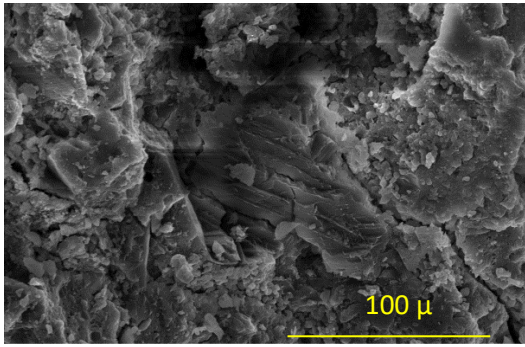
reaksiyona girmemesi de C-A-S-H yapısının oluşmasını engellemekte ve dayanım kaybına neden olduğu düşünülmektedir.



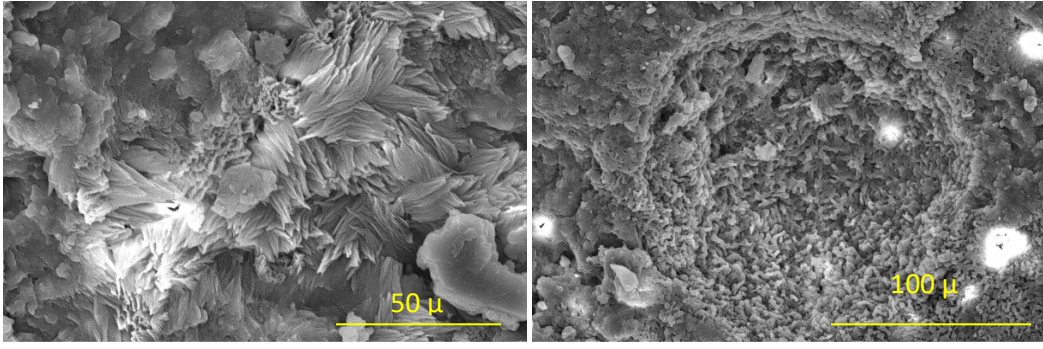
Şekil 58. YNA1a hamurunun SEM analizi Şekil 59. YNA4d hamurunun SEM analizi



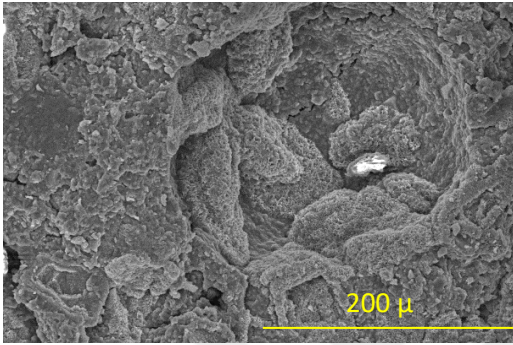
Şekil 60. YNB1a hamurunun SEM analizi Şekil 61. YNB4d hamurunun SEM analizi



Şekil 62. YNC4d\_7 hamurunun SEM analizi Şekil 63. YNC5e hamurunun SEM analizi



Şekil 64. YND2b\_7 hamurunun SEM analizleri

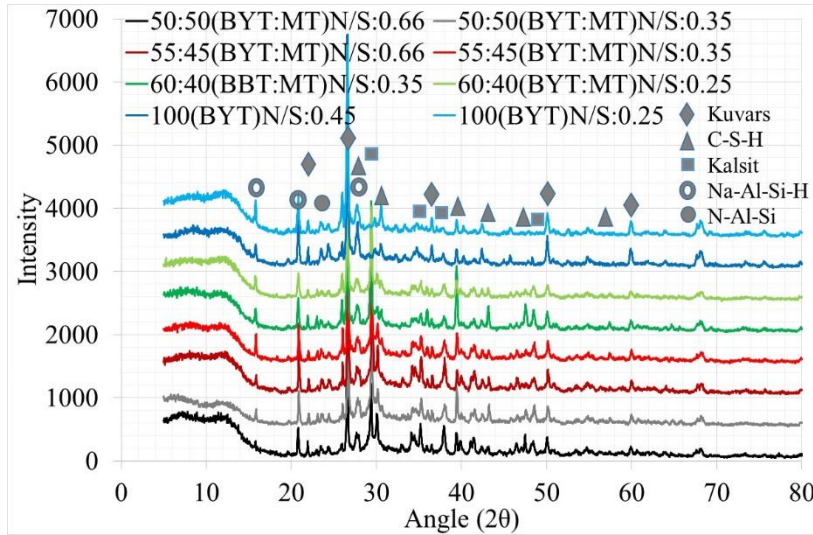


Şekil 65. YND4d\_7 hamurunun SEM analizi

Şekil 62 ve 63'te YNC4d\_7 ve YNC5e hamurlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Bu hamurlarda da benzer yapılar görülmüştür. Çatlakların geniş yer bulduğu ve Ca ile Al yetersizliğinden dolayı C-A-S-H bağlarının oluşmadığı görülmüştür. Şekil 64'te ise BYT ile dökülen tüm hamurlar içerisinde en yüksek dayanımı veren YND2b\_7 hamurunun SEM görüntüleri verilmiştir. Bu hamurun içyapısında diğer tüm hamurlardan farklı olarak daha yoğun bağ yapıları görülmüştür. Oluşan gözeneklerin içerisinde bile N-A-S-H jellerinin daha fazla oluşumu gözlemlenmiştir. Al ilavesinin yapılması dayanımı arttırabileceği tahmin edilmektedir. Şekil 65'te ise YND4d\_7 hamurunun SEM görüntüsü verilmiştir. Burada da yoğun Na-O yapıları dikkat çekmektedir. Ancak bu yapıların birbirleriyle bağ yapılmayarak boşlukların içini doldurmamasının dayanımın yükselmesini engellediği düşünülmektedir.

XRD analizinden elde edilen sonuçlara göre, BYT ile üretilen NaOH aktivatörlü hamurların hemen hemen hepsinde benzer mineralojik yapılara rastlanılmıştır. Özellikle SEM ve EDS analizlerinde de görülen N-A-S-H, N-S-H, N-S-(C)-H, reaksiyonlara katılmamış kalsit yapıları ve kuvars yapıları gözlenmiştir. Özellikle MT içerikli hamurlarda C-S-H olduğu XRD analizlerindeki piklerde görüntülenmiştir. CaO içerikli ve C-S-H piklerinin yüksek olduğu hamurların dayanımlarının da yüksek olması bu mineralojik yapının basınç dayanımlarını olumlu etkilediğinin bir göstergesidir. BYT ile üretilen hamurlarda N-A-S-H yapısının BBT ile üretilen hamurlardan daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Tüm hamurlarda

amorf fazın bulunuyor olması dayanım gelişiminin ileriki süreçte de artabileceğini ya da azalabileceğini göstermektedir. BYT ile üretilen hamurlarda C-S-H yapısının daha çok olduğu BYT'nin kimyasal yapısındaki CaO miktarının BBT'ye göre daha fazla olmasında kaynaklanmaktadır. Kuvars miktarının da yüksek olmasından dolayı bu yapının reaksiyonlara girmediği düşünülebilir. Oysaki MT içerikli hamurlarda kuvars pikleri C-S-H veya N-S-C-H yapılarına dönüştüğü SEM görüntülerinde desteklendiği gibi XRD analizinde de gözlenmiştir.



Şekil 66. NaOH aktivatörü ve BYT ile üretilen hamurların XRD analizleri

### Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurların SEM analizi sonuçları.

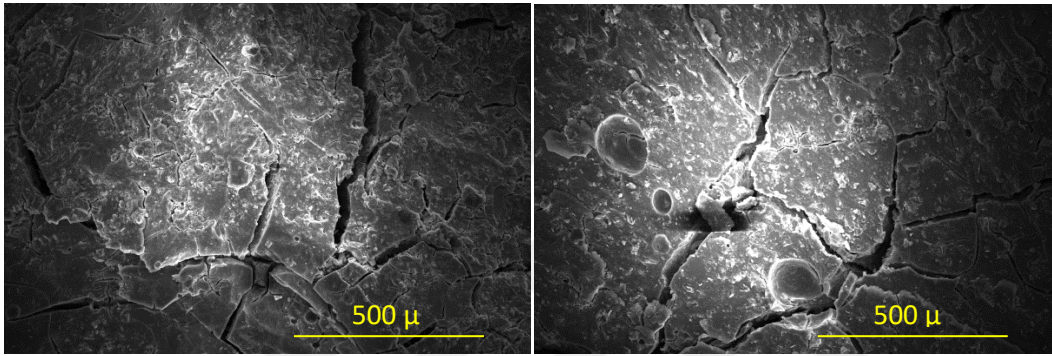
#### *SEM analizi ve XRD analizi.*

Bu bölümde Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurların SEM ve XRD sonuçları tartışılmıştır. Buna göre;

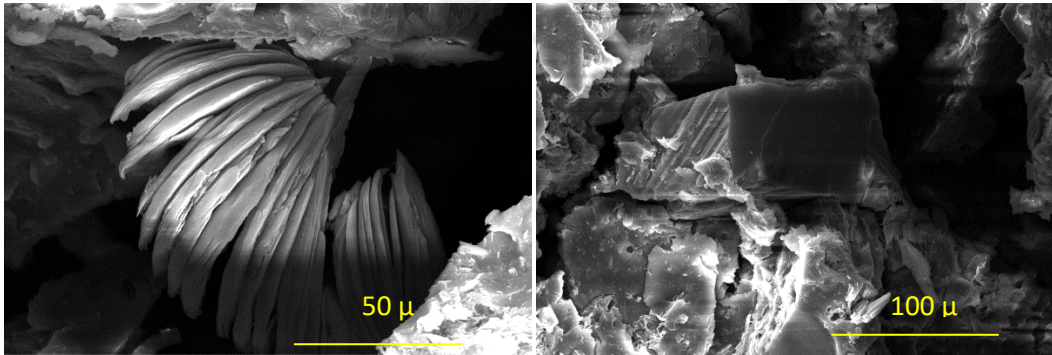
#### ***BBT kullanılarak;***

Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurların hemen hemen hepsinde gözeneklere ve geniş çatlaklara rastlanmıştır. Alınan SEM görüntülerinde çatlakların sadece yapının yüzey kısmında değil oluşan gözeneklerin içerisinde de derin bir şekilde ilerlediği gözlenmiştir. Şekil 67 ve 68'de BBT:MT: Ca(OH)<sub>2</sub> oranı 0,5:0,2:0,3 olan serinin sırasıyla en yüksek ve en düşük dayanımları olan BCA4 ve BCA1 hamurlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Hamurların basınç dayanımları sırasıyla 15,22 ve 10,09 MPa olarak ölçülmüştür. Ç/T oranları sırasıyla 1,4 ve 1,1'dir. Şekil 67'ye göre resimde derin çatlaklar ve küçük boşluklar bulunmaktadır. Yapıya CaO'nun ilave edilmesiyle hamurun iyileşmediği literatürde yer

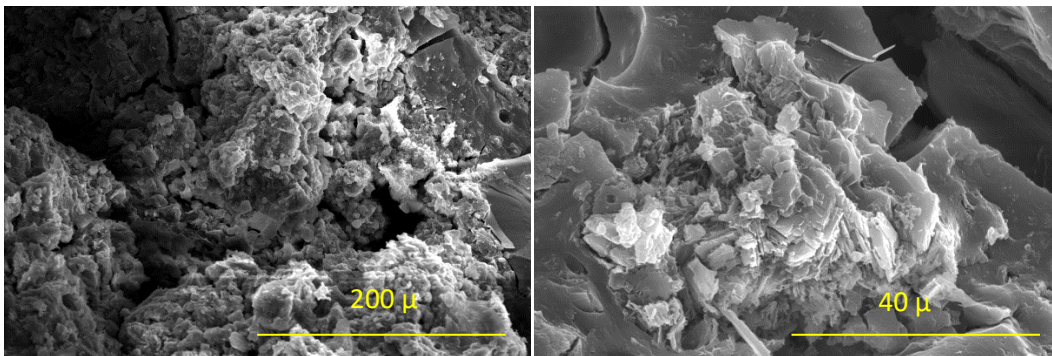
almaktadır. CaO'nun hızlı reaksiyona girmesi, prizi hızlandırmakta ve dayanım gelişimini engellemektedir. Çok hızlı sertleşen çimentoların genellikle dayanım aralıkları 10-15 MPa olduğu bildirilmektedir. Şekil 69 ve 70'te BCB3 ve BCB6 hamurlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Sırasıyla hamurların dayanımları 11,34 ve 19,55 MPa'dır. BCB3 hamurunda birbirine yapışmayan ve reaksiyona girmeyen Si ve Ca görülmüştür. Yapı içerisinde diğer hamurlar gibi çatlaklar, gözenekler ve boşluklar yer almaktadır. BCB6 hamurunda yapı içerisinde birçok yerde düzgün ve pürüzsüz rijit yapılar görülmüştür. Bu yapıların oluşumunda Al oranının yüksek olduğu görülmektedir. Ancak etrafının geniş çatlaklarla kaplanması sonucu dayanım kaybı yaşanmıştır.



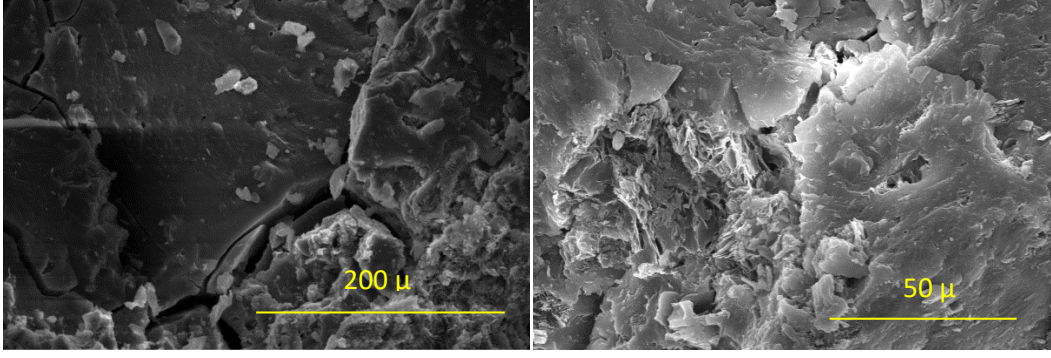
Şekil 67. BCA4 hamuru SEM analizi Şekil 68. BCA1 hamuru SEM analizi



Şekil 69. BCB3 hamuru SEM analizi Şekil 70. BCB6 hamuru SEM analizi



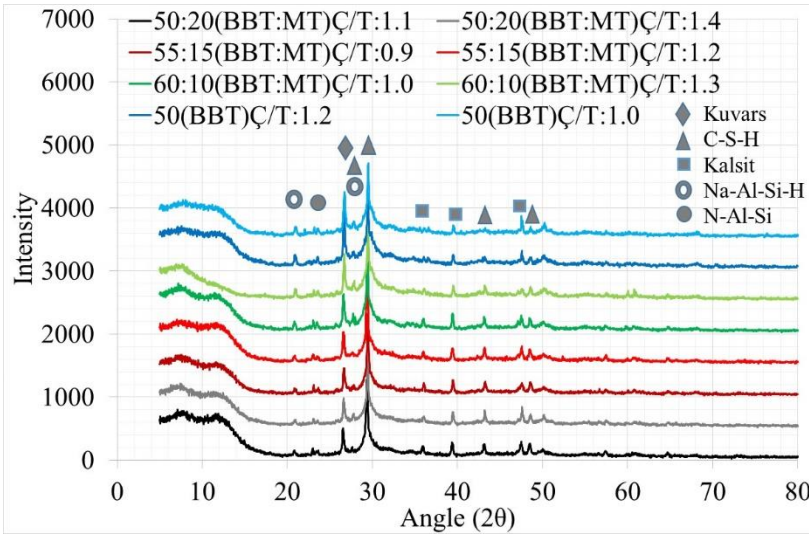
Şekil 71. BCC2 hamuru SEM analizi Şekil 72 . BCC5 hamuru SEM analizi



Şekil 73. BCD3 hamuru SEM analizi Şekil 74. BCD5 hamuru SEM analizi

Şekil 71 ve 72’de sırasıyla BCC2 ve BCC5 hamurlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Hamurların basınç dayanımları sırasıyla 12,78 ve 19,65 MPa’dır. BCC2 hamurunda da çok fazla gözenek ve gözeneklerin iç yapısında bile çatlaklar oluştuğu görülmüştür. Ayrıca yapıda Si kaynaklı BBT’nin bağa katılmadığı ve bu yüzden dayanımın düştüğü tahmin edilmektedir. Rijit kısımların genellikle Ca-Si oranları birbirine yakinken yapının büyük bir çoğunluğunda Si ve Ca’nın bağ yapmadığı görülmektedir. Şekil 73 ve 74’te de BCD3 ve BCD5 hamurlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Hamurların basınç dayanımları sırasıyla 14,22 ve 9,27 MPa’dır. Bu hamurların yapısı da diğer hamurların yapısına benzerlik göstermektedir. Genel olarak tüm yapılara bakıldığında Ca ve Si’nin bağ yaparak düzgün yüzeyli ve gözeneksiz yapı oluşturduğunu söylemek mümkündür. Yapıda serbest bulunan Si atomunun miktarı artıp Ca miktarı azalınca dayanımın düştüğü görülmektedir. Ca ve Si’nin bağ yaparak oluşturduğu C-S-H yapısı ile yüksek dayanımlar elde edilmektedir. Ayrıca burada dayanımı yüksek hamurların bir kısmında C-A-S-H jelinin de geliştiğini söylemek mümkündür.





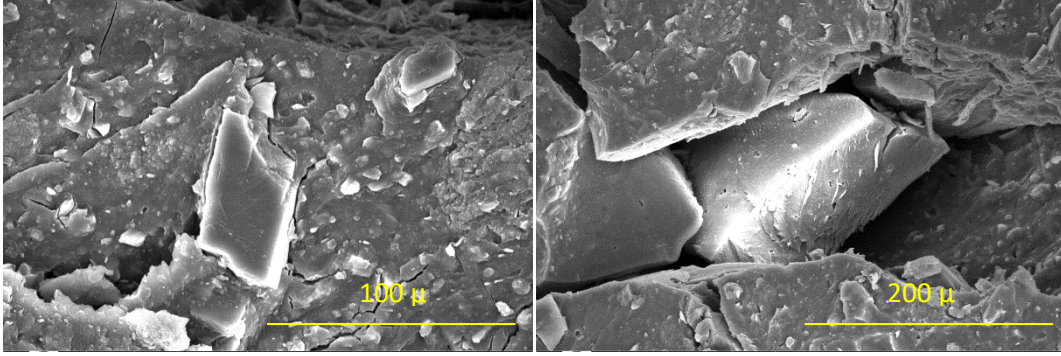
Şekil 75. Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ve BBT ile üretilen hamurların XRD analizleri

XRD analizinden elde edilen sonuçlara göre, BBT ile üretilen Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörlü hamurların hemen hemen hepsinde benzer mineralojik yapılara rastlanılmıştır. Hamurlar içerisinde oluşan yapılar NaOH hamurundan farklı olarak daha çok C-S-H yapısını göstermektedir. Kuvars NaOH ile üretilen hamurlara göre daha eser miktarda bulunmaktadır. Bu da yapı içerisinde bağı katılan bileşenlerin daha fazla olduğunu göstermektedir. Hamurlarda N-A-S-H yapısının oluşumu NaOH hamurlarına göre daha azdır. Özellikle MT içerikli hamurlarda C-S-H olduğu XRD analizlerindeki piklerde görüntülenmiştir. CaO içerikli ve C-S-H piklerinin yüksek olduğu hamurların dayanımlarının da yüksek olması bu mineralojik yapının basınç dayanımlarını olumlu etkilediğinin bir göstergesidir. Tüm hamurlarda amorf fazın bulunuyor olması dayanım gelişiminin ileriki süreçte de artabileceğini ya da azalabileceğini göstermektedir.

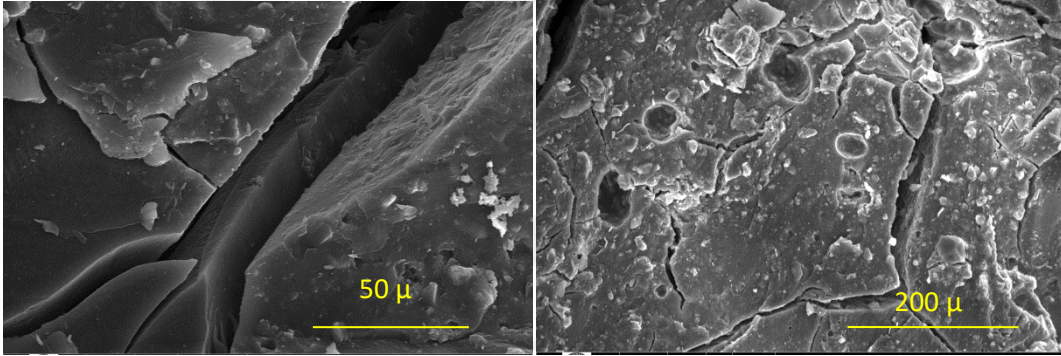
*BYT kullanılarak;*

Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ve BYT bağlayıcısıyla üretilen hamurların SEM görüntüleri Şekil 76-83'te verilmiştir. Görüntülerde BBT ile üretilen hamurlar gibi geniş çatlaklar ve gözenekler oluştuğu görülmüştür. Hamurların basınç dayanımları BBT ile üretilen hamurlara göre daha düşüktür. BBT ile üretilen hamurlarda en yüksek basınç dayanımı 90 gün yaşında BBT:MT: Ca(OH)<sub>2</sub> oranı 0,6:0,1:0,30 olan BCC5 hamurunda 19,65 MPa olarak ölçülürken BYT ile üretilen hamurlarda BYT:MT:Ca(OH)<sub>2</sub> oranı 0,5:0:0,5 olan YCD5 hamurunda 11,37 MPa'dır. Bu farkın hamurların nemli ortamda tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SEM görüntülerinde de geniş çatlaklar ve gözeneklerin oluşması, Ca'nın bağı katılmaması yapının dayanımını etkilemiştir. BYT'nin yapısındaki CaO miktarı yaklaşık

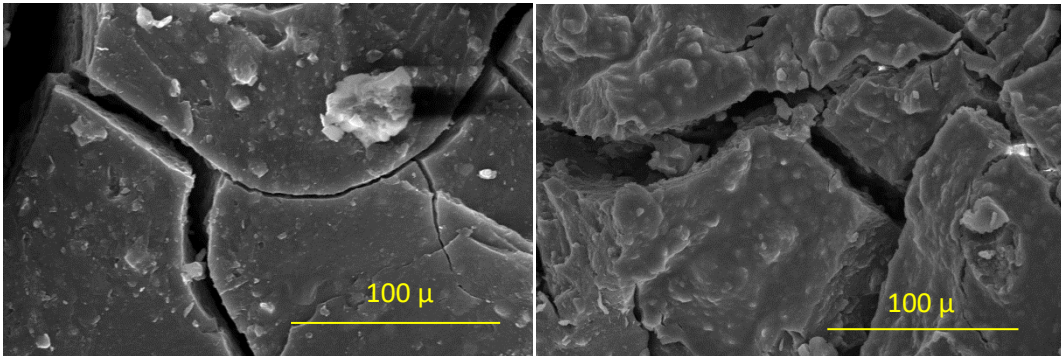
olarak %13 mertebesindeyken BBT'nin yapısında bu miktar %4 kadardır. Dolayısıyla BYT'nin kendi içerisindeki CaO miktarı da daha yüksektir.



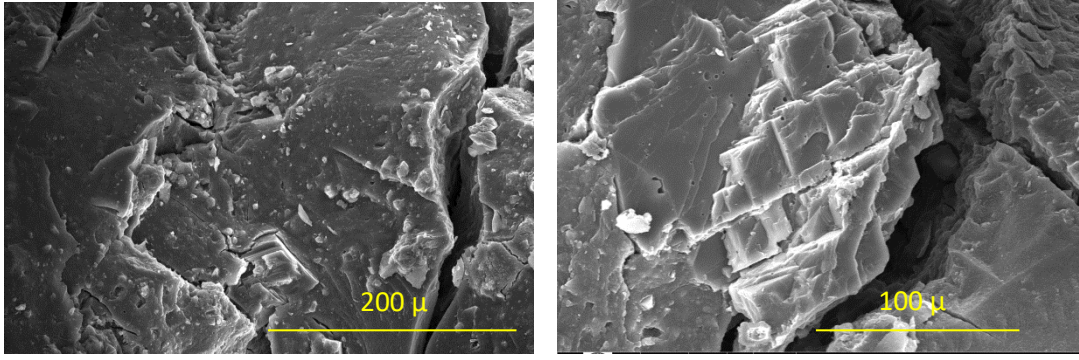
Şekil 76. YCA4 hamuru SEM analizi Şekil 77. YCA1 hamuru SEM analizi



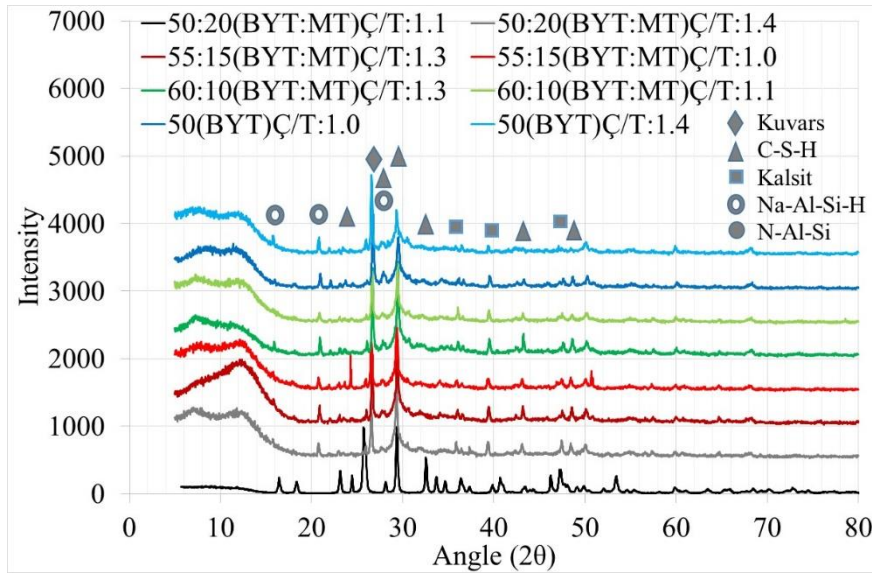
Şekil 78. YCB2 hamuru SEM analizi Şekil 79. YCB5 hamuru SEM analizi



Şekil 80. YCC2 hamuru SEM analizi Şekil 81. YCC4 hamuru SEM analizi



Şekil 82. YCD5 yüksek hamuru SEM analizi Şekil 83. YCD1 hamuru SEM analizi



Şekil 84. Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ve BYT ile üretilen hamurların XRD analizleri

XRD analizinden elde edilen sonuçlara göre, BYT ile üretilen Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörlü hamurların hemen hemen hepsinde benzer mineralojik yapılara rastlanılmıştır. Hamurlar içerisinde oluşan yapılar NaOH hamurundan farklı olarak daha çok C-S-H yapısını göstermektedir. Kuvars miktarı BBT ile üretilen hamurlara göre daha yüksektir. Bu da yapı içerisinde bağa katılmayan bileşenlerin daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu da dayanımın düşmesine sebep olmaktadır. Hamurlarda N-A-S-H yapısının oluşumu NaOH hamurlarına göre daha azken BBT ile üretilen hamurlara göre daha fazladır. Özellikle MT içerikli hamurlarda C-S-H olduğu XRD analizlerindeki piklerde görüntülenmiştir. CaO içerikli ve C-S-H piklerinin yüksek olduğu hamurların dayanımlarının da yüksek olması bu mineralojik yapının basınç dayanımlarını olumlu etkilediğinin bir göstergesidir. Tüm hamurlarda amorf fazın bulunuyor olması dayanım gelişiminin ileriki süreçte de artabileceğini ya da azalabileceğini göstermektedir.

## SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada beyaz ve yeşil volkanik tüflerin fiziksel ve kimyasal analizleriyle puzolanik aktivitelerine bakılmış ve çimento yerine NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörleri ile aktivasyon sağlanıp kullanılabilirliği araştırılmıştır. Standara uygun olarak priz başlangıç ve bitiş süreleri, basınç dayanımı ve su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hamurların 90 gün yaşında SEM ve XRD analizleri yapılmış ve çıkan sonuçlar aşağıda maddelendirilmiştir.

- Türk standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen deneyler neticesinde Bayburt taşının puzolanik olduğu görülmüştür.
- Üretilen tüm hamurlar içinde 90 gün yaşında en yüksek basınç dayanımı 37,8 MPa olarak katı madde hacmince %100 BYT ile üretilen NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,55 ve Ç/T:0,7 olan YND2b\_7 hamurundan ölçülmüştür.
- Üretilen tüm hamurlar içinde 90 gün yaşında en düşük basınç dayanımı 2,45 MPa olarak katı madde hacmince BYT:MT 0,6:0,4 ile üretilen NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:0,25 ve Ç/T:1,1 olan YNC5e hamurundan ölçülmüştür.
- NaOH aktivatörü ve BBT ile üretilen hamurlarda 2 gün yaşında en yüksek dayanım 15,80 MPa, 28 gün yaşında 23,05 MPa ve 90 gün yaşında 22,80 MPa olarak ölçülmüştür. NaOH aktivatörü ve BYT ile üretilen hamurlarda 2 gün yaşında en yüksek dayanım 18,45 MPa, 28 gün yaşında 19,65 MPa ve 90 gün yaşında 37,80 MPa olarak ölçülmüştür.
- Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ve BBT ile üretilen hamurlarda 2 gün yaşında en yüksek dayanım 12,53 MPa, 28 gün yaşında 18,29 MPa ve 90 gün yaşında 19, 55 MPa olarak ölçülmüştür. Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ve YBT ile üretilen hamurlarda 2 gün yaşında en yüksek dayanım 9,01 MPa, 28 gün yaşında 8,96 MPa ve 90 gün yaşında 11,37 MPa olarak ölçülmüştür.
- NaOH aktivatörü ve katı madde hacmince %100 BBT ile üretilen hamurların birçoğu 24 saatin sonunda priz almazken, NaOH aktivatörü ve katı madde hacmince %100 BYT ile üretilen hamurların neredeyse tamamı prizini tamamlamıştır. Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurların tamamı NaOH ile üretilen hamurlara göre daha kısa sürede prize başlayıp prizlerini tamamlamışlardır.

- Priz süresini, işlenebilirliği ve basınç dayanımını etkileyen parametreler molarite, NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile Ç/T oranları, döküm anı sıcaklığı, hamurun yerleştirildiği kabın türü (plastik, metal vb.), ortamın nemi ve sıcaklığı olarak sıralanmıştır. Çalışmada priz süresi ve basınç dayanımını etkileyen parametreler ayrı ayrı değerlendirilmiştir.
- Basınç dayanımları NaOH aktivatörü ile üretilen hamurların Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurlara göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ancak 28 günden sonra NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda dayanım kaybı gözlenirken Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatörü ile üretilen hamurlarda kayıp gözlenmemiştir.
- Hamurlarda porozitenin çok yüksek olduğu gözlenmiştir.
- Mikroanaliz sonuçlarına göre hamurlarda N-(A)-S-H yapısından çok N-C-S-H yapısının olduğu gözlenmiştir.
- Bazı hamurlarda Na'nın tuzlaşması ve rijit yapının bozulması dayanım kaybının en büyük nedeni olmuştur.
- C-S-H ve N-S-H yapılarının oluşmasının dayanımlar üzerinde etkili olduğu XRD analizinde gözlenmiştir.
- NaOH aktivatörü ile üretilen hamurlarda molarite arttıkça priz süresi kısalmış ve işlenebilirlik azalmıştır. Ca(OH)<sub>2</sub> ile üretilen hamurlarda ise prize başlama süresinin kısalmamasından dolayı işlenebilirlik oldukça düşüktür.
- Her iki aktivatör ile üretilen hamurlar için de Ç/T oranı arttıkça hamurların priz sürelerinde uzama meydana gelmiş ve işlenebilirlikleri artmıştır.

## KAYNAKÇA

- Ali, O. A. A. (2016). *Alkali çimento ile birlikte aktifleştirilmiş uçucu kül jeopolimer harcının mekanik özellikleri*. (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri
- Allahverdi, A., Mehrpour, K., & Najafi Kani, E. (2008), Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzolan in production of geopolymer cement, *Ceramics-Silikaty*, 52 (1), 16–23.
- Allahverdi, A., Kani, E.N., & Yazdanipour, M. (2010). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikaty*, 55, 68-78
- Alonso, S. & Palomo A. (2001), Alkaline activation of metakaolin-calcium hydroxide solid mixtures: influence of temperature, activator concentration and metakaolin/Ca(OH)<sub>2</sub> ratio, *Materials Letters* 47, 55–62.
- Arslan, M., Aslan, Z., & Abdurrahman, D. (2005). Bayburt tüflerinin petrografik, petrokimyasal ve petrolojik özellikleri: doğu pontid Güney Zonu’nda kalkalkalen felsik volkanizması. *S.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(1), 50,53,56
- Aykut, C. (2017). *Bayburt taşı atıklarının jeopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir. (Tez no. 458855)
- Bakharev T. (2005). Geopolymeric materials prepared using class f fly ash and elevated temperature curing, *Cement and Concrete Research*, 35, 1224–1232.
- Bektaş, F., Uzal, B., & Turanlı, L. (2003). *Öğütülmüş doğal zeolitin doğal alkali-silika reaksiyonu ve sülfat etkisi ile genişmesinin incelenmesi*. 5. Ulusal Beton Kongresi, IMO İstanbul Şubesi, İstanbul, 403-409
- Belmokhtar, N., Ben Allal, L. & Lamrani, S. (2016). Effect of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH mass ratio on the development of structure of an industrial waste-based geopolymer. *Journal Of Materials And Environmental Science*, 7(2), 390-396
- Bingöl, Ş. (2018). *Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu jeopolimer harçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması*. (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir.(Tez No. 506168)

- Bondar D., Lynsdale C. J., Milestone N. B., Hassani N., & Ramezaniyanpour, A. A. (2011), Effect Of Type, Form, And Dosage Of Activators On Strength Of Alkali-Activated Natural Pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 251–260.
- Chindaprasirt, P., & Rattanasak, U. (2019). Characterization of porous alkali-activated fly ash composite as a solid absorbent. *International Journal Of Greenhouse Gas Control*, 85, 30-35
- Chindaprasirt, P., Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Horpibulsuk, S., Poowancum, A., & Injorhor, B. (2018). Effect of calcium-rich compounds on setting time and strength development of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature, *Case studies in Construction Materials*
- Çiçek, T. (1999) *Kireç ve Kullanımı*. 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir Çevresel Etki Değerlendirmesi. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2009
- Davidovits, J. (2002). *Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications*. Geopolymer Conference, Australia
- Davidovits, J. (2011), *Geopolymer Chemistry and Applications*, Institute Geopolymer,3, Saint-Quentin, France
- Davidovits, J. (2018). Why Alkali-Activated Materials Are Not Geopolymers. *Geopolymer Institute Library*, 25, doi:10.13140/RG.2.234337.25441
- Degryse, P., Elsen, J., & Waelkens, M. (2002). Study of ancient mortars from sagalassos (Turkey) in view of their conservation, *Cement And Concrete Research*, 1457-1463
- Ekinci, E. (2017). *Volkanik tüf kullanılarak üretilen jeopolimer betonların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.502962)
- Fernández-Jiménez, A. (2000). *Cementos de escorias activadas alcalinamante: influencia de las variables y modelización del proceso*. (Ph.D. Thesis). Universidad Autónoma De Madrid.
- Fernández-Jiménez, A., Puertas F., Sobrados, I. & Sanz, J. (2003). Structure of calcium silicate hydrate formed in alkaline activated slag: influence of the type of alkaline activator. *J. Am. Ceram. Soc.* 86, 1389–1394.
- Girgin, S. (2016). *NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı jeopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. ( Tez No. 434910)

- Glukhovsky, V. D. (1994), *Ancient, Modern and Future Concretes*, First International Conference Alkaline Cements And Concretes, Kiev, Ukraine, 1, 1–8.
- Glukhovsky, V. D. (1989). *Ancient, Modern and Future Concretes*. In: Proceedings Of The 2nd International Seminar, Gothenburg, Sweden, 53 – 62
- Görür, E. B. (2015). *Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül jeopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması*. (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 213751)
- Gümüş, A. (2016) *Jeopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 456191)
- Hannus, I., Kiricsi, I., Lentz, P., & Nagy, J. B. (1999). Characterization of alkali ions in the y-type zeolites by multi mas nmr studies. *Colloids And Surfaces A*. 158, 29–34.
- Huseien, G. H., Ismail. M., Khalid, N. H. A., Hussin, M. W., & Miraz, J. (2018). Compressive strength and microstructure of assorted wastes incorporated geopolymer mortars: effect of solution molarity. *Alexandria Engineering Journal*, 57, 3375-3386
- Ibrahim, M., Johari, M. A. M., Rahman, M. K., Maslehuddin, M., & Mohamed, H. D. (2018) Enhancing the engineering properties and microstructure of room temperature cured alkali activated natural pozzolan based concrete utilizing nanosilica. *Construction And Building Materials*, 189, 352-365
- IPCC, Climate Change 2007. *Mitigation. contribution of working group iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, & New York,
- Kaçar, M. (2014, Ocak). *Bayburt taşının üç boyutlu işlenebilmesi için mekanik sistemin ve kontrol yazılımının gerçekleştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, 3, Elazığ.
- Kantarci, F. (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Jeopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 341550)
- Krivenko, P. V. (1994). *Alkaline Cements, First Int. Conf. Alkaline Cements And Concretes*, Kiev, Ukraine, 1, 12–129.



- Krivenko, P. (2017) .*Why Alkaline Activation-60 Years Of The Theory And Practtice Of Alkali-Activated Materials*. Kyiv National University Of Construction And Achitecture, doi:10.4416/JCST2017-00042
- Kudaka. (2014). T. C. Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı TRA1 Düzey 2 Bölgesi Doğaltaş Ve Maden Potansiyeli Raporu. Ankara.
- Li C., Sun H., &Li L. (2010).A Review: The Comparison Between Alkali-Activated Slag (Si+Ca) And Metakaolin (Si+Al) Cements. *Cement and Concrete Research*, 40, 1341–1349.
- Malinowski, R. (1982). Ancient Mortars and Concretes: Aspects of Their Durability. *History of Technology*, 7, 9 – 101
- Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Firouz, M. R., & Illikainen, M. (2018). Drying Shrinkage In Alkali-Activated Binders – A Critical Review. *Construction And Building Materials*, 190, 533-550)
- Nadoushan, M. J., & Ramezaniapour, A. A, (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*,111, 337-347
- Najafi Kani E., & Allahverdi A. (2009).Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan. *J. Mateial Science*. 44, 3088–3097.
- Ng, C., Alengaram, U. J., Wong, L. S., Mo, K. H., Jumaat, M. Z., & Ramesh, S. (2018). A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials*,186, 550-576
- Nikolov, A., Rostovsky, I., & Nugteren, H. (2017). Geopolymer materials based on natural zeolite. *Case Studies In Construction Materials*, 6, 198-205
- Nourredine, G., Kerdal, A. E., Nouria, K., & Rachida, I. (2018). Potential use of activated algerian natural pozzolan powder as a cement replacement material. *European Journal of Environmental And Civil Engineering*, doi:10.1080/19648189.2018.1559241
- Omeed, A., (2016). *Alkali ve çimento ile birlikte aktifleştirilmiş uçucu kül jeopolimer harcının mekanik özellikleri*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 450512)

- Öksüzer, N. (2016). *Farklı inceliklere sahip mermer ve bayburt taşı atıklarının lif donatılı jeopolimer bağlayıcı sistemlerde kullanılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 444948)
- Öksüzer, N., & Tekin, İ. (2016). *Investigation of mechanical properties of geopolymer composite material produced with bayburt stone contained clinoptilolite*. International Congress On Advances In Civil Engineering, Boğaziçi Üniversitesi
- Öksüzer, N., & Tekin, İ. (2016). *Traverten ve tüf bileşenli çimentosuz jeopolimer kompozitlerde çözelti oranının uzun süreli basınç dayanımına etkisi*. International Academic Research Congress. Antalya
- Önenç, A.İ., Altınbaş, A.F., Erkanol, D., & Tulukçe, A.(2005). Bayburt Taşı ve Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeolojisi. *MTA Genel Müdürlüğü Derleme Raporu*
- Özer, C. (2018). *Jeopolimer Harçların Reolojik Davranışı Üzerinde Zeolit Etkisinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.503066)
- Palomo A., Fernández-Jimenez A., & Kovalchuck G. (2005). *Some Key Factors Affecting The Alkali Activation Of fly Ash*. 2nd International Symposium of Non-Traditional Cement And Concrete, Brno, Czech Republic.
- Palomo A., Fernández-Jiménez, A., Kovalchuk, G., Ordoñez, L. M., & Naranjo M. C. (2007). OPC-fly ash cementitious system: study of the gel binders produced during alkaline hydration, *J. Materials Science* 42, 2958–2966.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes a cement for the future, *Cement And Concrete Research*, 1323-1329
- Papayianni, I., & Stefanidou, M. (2005) Strength-porosity relationship in lime-pozzolan mortars. *Construction And Building Materials*, 20, 700-705
- Provis, J. L., & Van Deventer J. S. J. (Eds) (2009), *Geopolymers: Structure, Processing, Properties And Industrial Applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- Provis, J. L., & Van Deventer J. S. J (2014). Alkali-Activated Materials. *State-Of-The-Art Report, RILEM TC 224-AMM*.
- Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J. S., Rico A., & Rodríguez J. (2011). A model for the c-a-s-h gel formed in alkali-activated slag cements. *J. European Ceramic Society*, 31, 2043–2056.

- Rattanasak, U., & Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22, 1073-1078
- Shi C., Krivenko, P. V., & Roy, D. (2006). *Alkali-Activated Cements And Concretes*, Taylor & Francis, London.
- Skvara, F. (2007). Alkali Activated Materials or Geopolymers?. *Ceramics-Silikaty*, 51 (3), 173-177
- Şahin, H. (2018). *Bayburt taşı olarak bilinen tüflerin çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.534524)
- Taban, S., & Şimşek, O. (2008). Zeolitik tuf katkı oranı ve deniz suyunun çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24, 145-153
- Taylor, H. F. W. (1990). *Cement Chemistry*. Academic Press, London.
- Tchakoute, H.K., Elimbi, A., Yanne, E., & Djangang, C.N (2013). Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature, *Cement&Concrete Composites*, 38, 75-81
- Tekin, D. (2014). *Farklı İnceliklerdeki Mineral Katkılı Çimentoların Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.371991)
- Tekin, İ. (2016). 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., & Öner, E. (2017). Bayburt bölgesinde bulunan farklı agrega tipleri ile üretilen geleneksel betonların mekanik mukavemetleri üzerine bir çalışma. *Politeknik Dergisi*, 20(3), 513-518
- Toprak, M. U. (2011). *Termik santral taban küllerinden alkali aktivasyon ile jeopolimer üretilmesi*. (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 285352)
- Torgal, F. P., Labrincha, J. A., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindapasirt, P. (2015) *Handbook Of Alkali-Activated Cements, Mortars And Concretes*. Woodhead Publishing
- 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.
- Wang S. D., & Scrivener K. L. (1995). Hydration products of alkali activated slag cement, *Cement and Concrete Research*, 25, 561–571.
- Yaddollahi, M. M. (2013). *Hasankale pomzasından alkali aktivasyon yöntemiyle jeopolimer çimentosunun üretilebilirliğinin araştırılması*. (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 346689)
- Ye, J., Zhang, W., & Shi, D. (2017). Properties of an aged geopolymer synthesized from calcined ore-dressing tailing of bauxite and slag. *Cement And Concrete Research*, 100, 23-31
- Yılmaz, F. (2015,Ağustos). *Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ve bilgisayarlı tomografi tekniği ile araştırılması*. (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 397321)
- Yonar, Y. (2014). *Jeopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığı*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 365731)
- Zeybek, O. (2009). *Uçucu kül esaslı jeopolimer tuğla üretimi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 246875)

## **EKLER**

İrem DİRİKOLU tarafından deney esnasında ve sonrasında çekilen fotoğraflar

**Ek 1:** Deney Hazırlık Aşamaları

**Ek 2:** Çözelti Hazırlama ve Hamur Üretim Aşamaları

**Ek 3:** Alkali Aktive Edilmiş Hamur Deneyleri

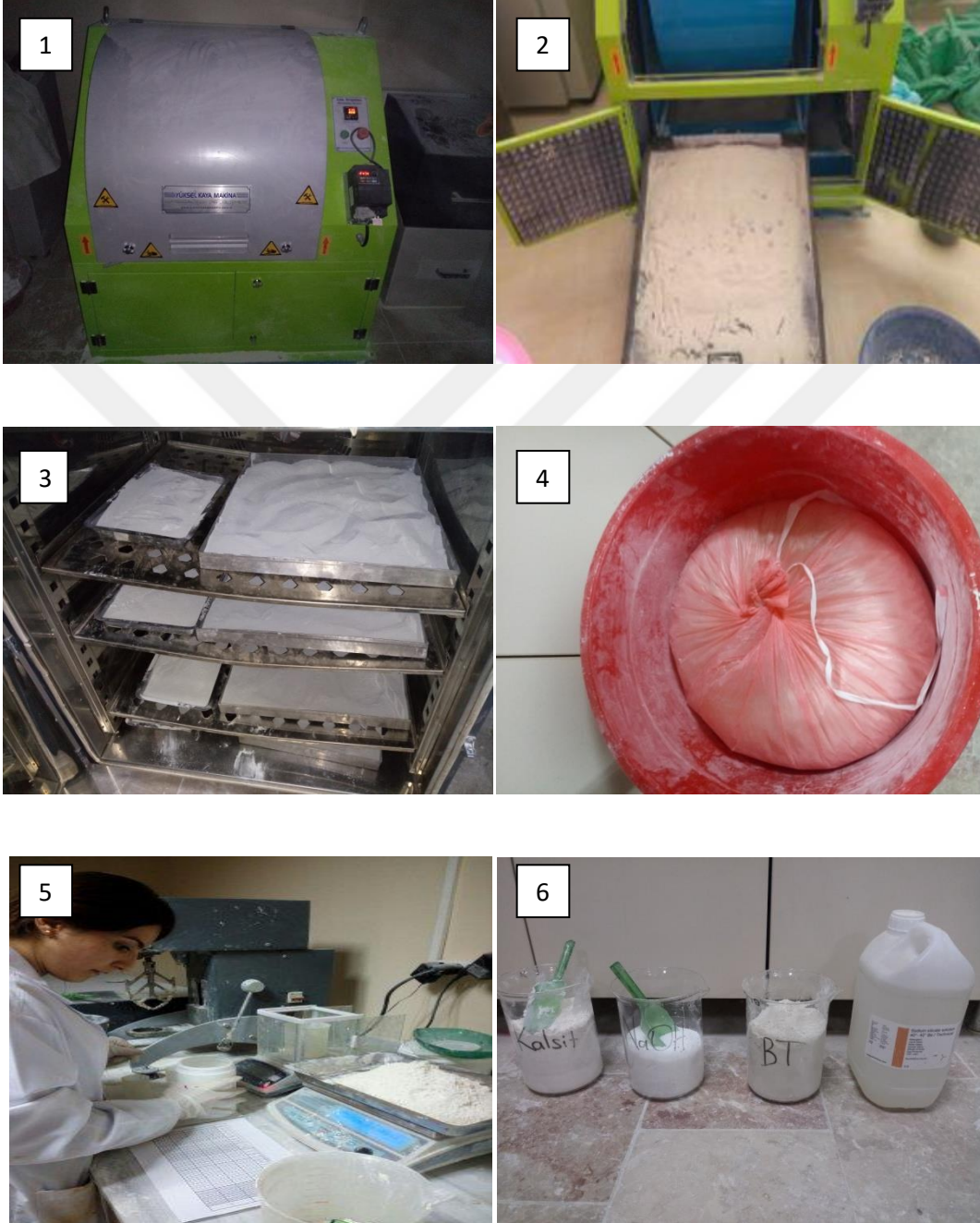
**Ek 4:** Mikroskopik ve Minerolojik Analizler

**Ek 5:** Deney Sonuçlarının Toplanması



## EK 1

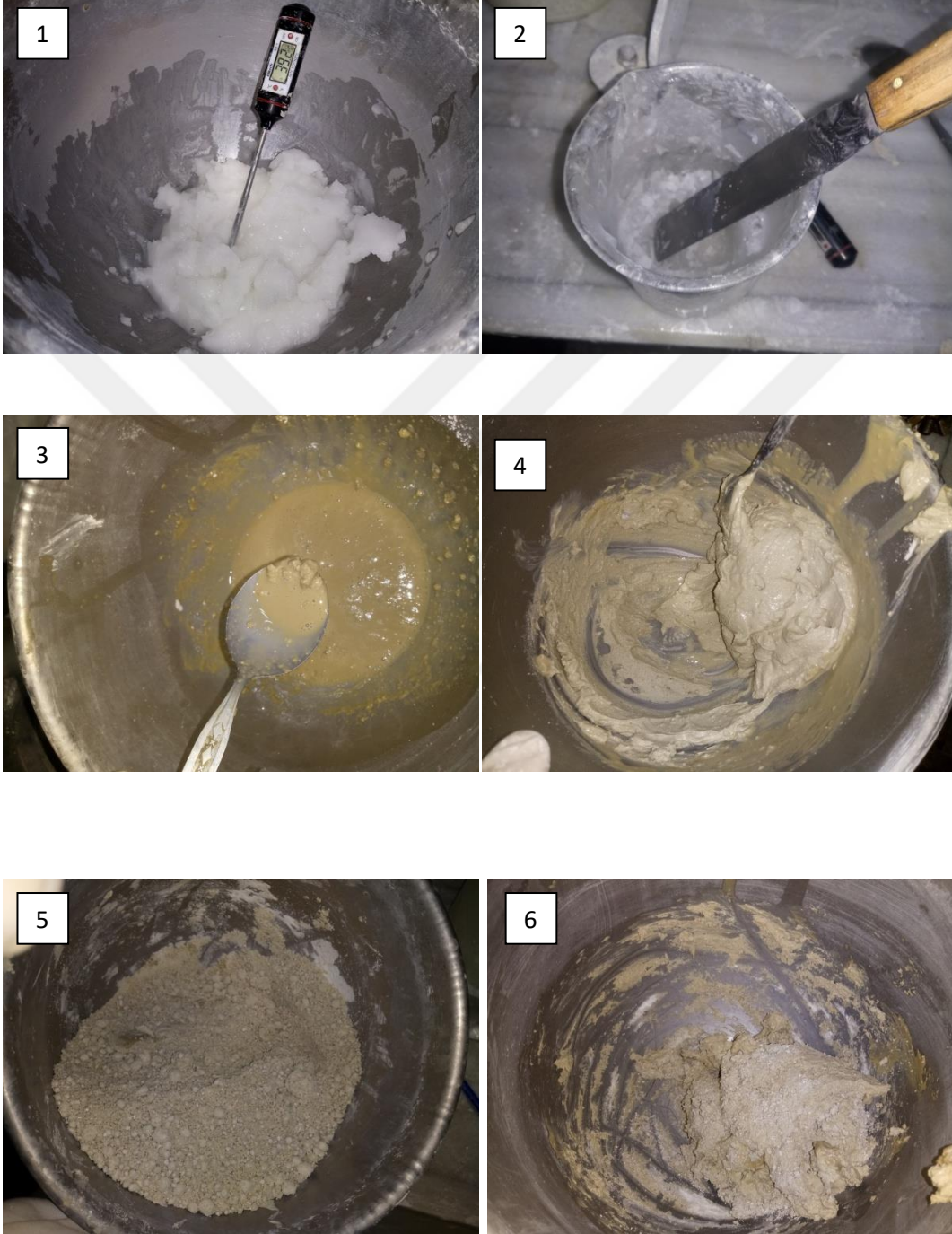
### Ek-1 Deney Hazırlık Aşamaları



Şekil 1.-1:Malzeme Öğütme, 2:Malzeme eleme, 3:Kurutma, 4:Saklama, 5-6:Tartma İşlemleri

## EK 2

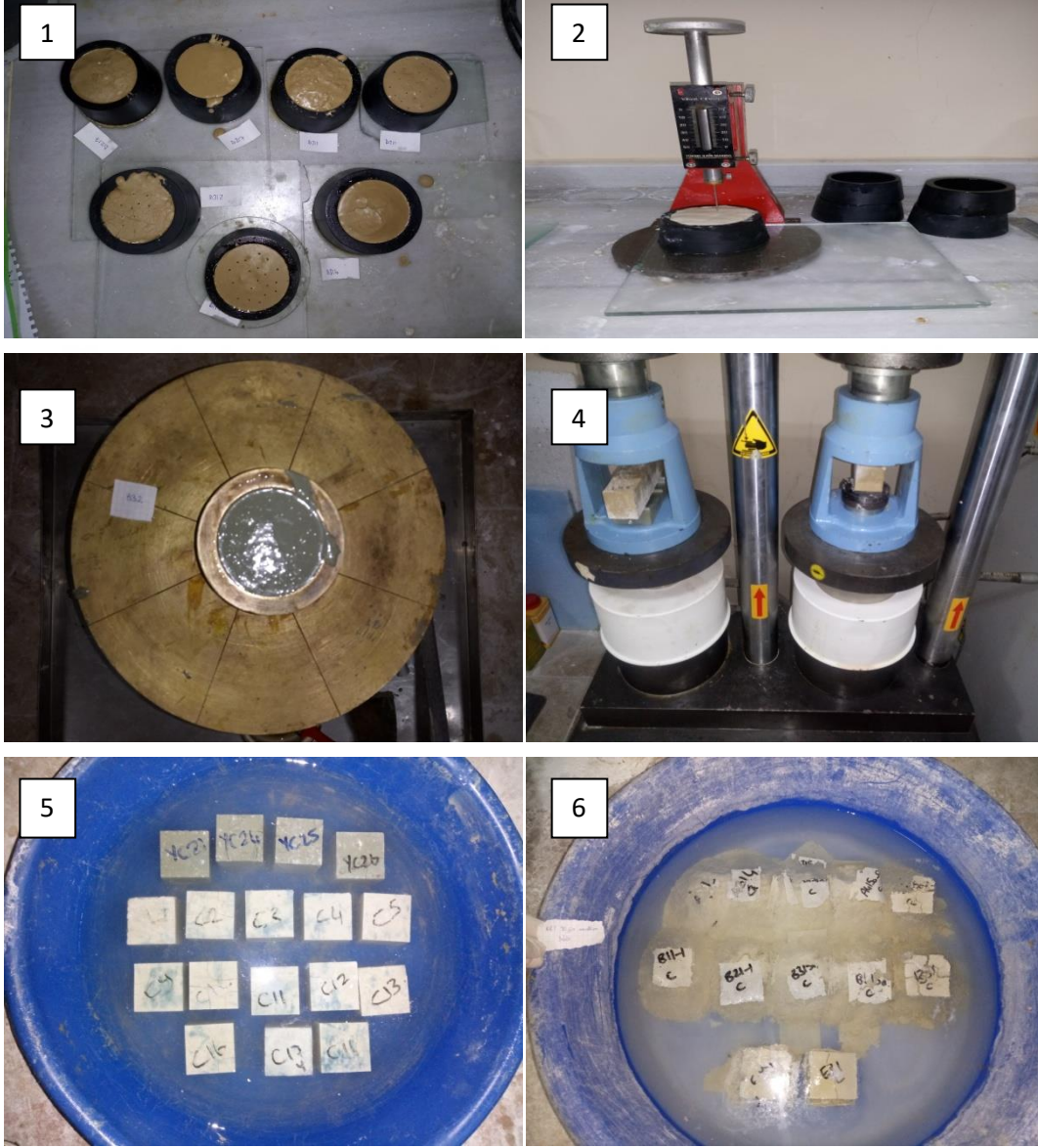
### Ek- 2 Çözelti Hazırlama ve Hamur Üretim Aşamaları



Şekil 2. 1-2:Çözeltinin kristalleşmesi, 3:Hamur üretimi ve topaklaşma, 4:Mikserde katılan hamur, 5-6: Çözeltinin yetersiz olması

## EK 3

### Ek-3 Alkali Aktive Edilmiş Hamur Deneyleri

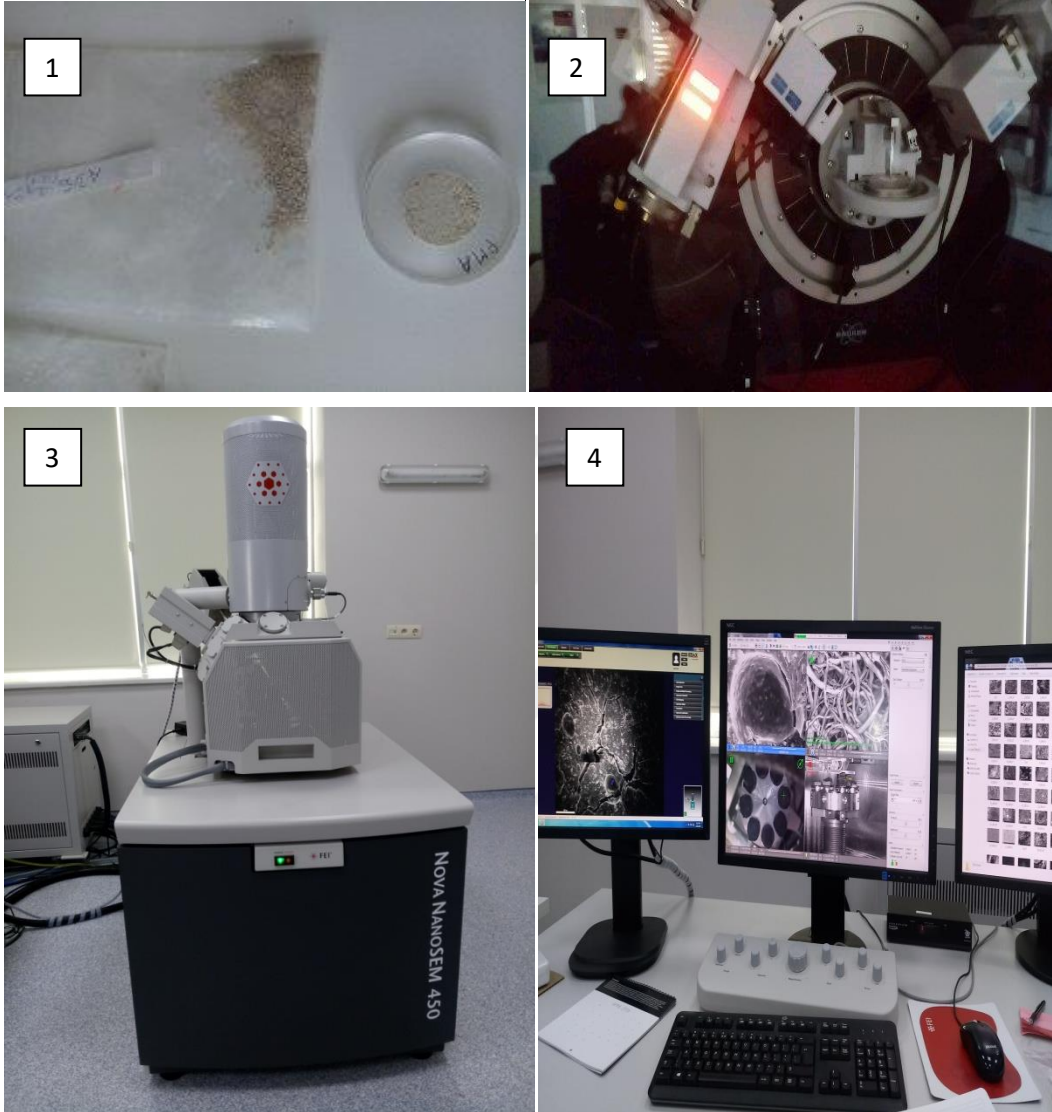


Şekil 3. 1-2: Vicat Cihazı ve Priz deneyi, 3: Yayılma tablası ve çökme, 4: Basınç ve eğilme deneyi, 5:  $\text{Ca(OH)}_2$  aktivatörlü hamurların su emme deneyi, 6:  $\text{NaOH}$  aktivatörlü hamurların su emme deneyi



## EK 4

### Ek-4 Mikroskobik ve Minerolojik Analizler



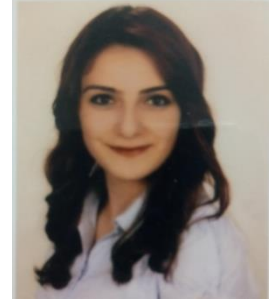
Şekil 4. XRD numunelerinin hazırlanması, 2: XRD analizi, 3: SEM cihazı, 4: SEM+EDS analizi

## EK 5

### Ek-5 Deneý Sonuçlarının Toplanması



Şekil 5. 1:Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatorl BYT hamurlarının su emme deneyi, 2:NaOH aktivatorl BYT hamurlarının etv sonrası durumu, 3: Su emme deneyinin yapılması, 4:Etv sonrası Ca(OH)<sub>2</sub> aktivatorl hamurların rtresi, 4:Tartım işlemi



## ÖZGEÇMİŞ

İrem DİRİKOLU, 1994 yılında Siirt'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Siirt'te yaptı. 2012 senesinde Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliğine başlayıp 2016'da buradan mezun oldu. Aynı sene Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2018'de Bayburt Milli İrade Anadolu Lisesi'nde ücretli öğretmenlik yaptı. 2019 yılında Bayburt Üniversitesi'nde Danışman Hocası Doç. Dr. İlker TEKİN'e ait TÜBİTAK 1001 Projesinde Bursiyer olarak yer aldı.