

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN YANGIN
DAYANIMINA BOR MADEN ATIĞININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan BELTEKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

HAZİRAN 2022

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN YANGIN
DAYANIMINA BOR MADEN ATIĞININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan BELTEKİN
(36193621047)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

HAZİRAN 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalıőmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemededen beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e, çalıőmalarımnda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince benden her türlü desteklerini gösteren aileme, tezin uygulama aşamasında vermiő oldukları maddi ve manevi destekten dolayı İnönü Üniversitesi BAP(FDK-2020-2156) birimine teşekkür ederim.

Oğuzhan BELTEKİN



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Harçların Yangın Dayanımına Bor Maden Atığının Etkisi” başlıklı bu çalışmamın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Oğuzhan BELTEKİN



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ_Toc106785857	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
3. KURAMSAL TEMELLER	10
3.1 Geopolimer	10
3.1.1 Geopolimerin genel özellikleri	11
3.1.2. Geopolimer betonu oluşturan malzemeler.....	12
3.1.2.1. Yüksek fırın cürufu.....	12
3.1.2.2. Alkali aktivatörler.....	13
3.1.3. Geopolimer betonun durabilitesi	13
3.1.3.1. Betonda büzülme	14
3.1.3.2. Aşınma.....	14
3.1.3.3. Yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık	14
3.1.3.4. Alkali-silika reaksiyonu.....	15
3.1.3.5. Asit etkisi	15
3.1.4. Geopolimer betonun dayanımı	15
3.1.4.1. Su miktarı	15
3.1.4.2. Silisyum dioksit-sodyum oksit oranı	16
3.1.4.3. Donma ve çözülme	16
3.1.4.4. Alkali aktivatörler.....	16
3.1.5. Geopolimerlerin çeşitleri	17
3.1.5.1. Camsuyu özlü geopolimer	17
3.1.5.2. Metakaolin tabanlı geopolimer.....	17
3.1.5.3. Kaolin hidrosodalit tabanlı geopolimer	17
3.1.5.4. Kalsiyum tabanlı geopolimer.....	18
3.1.5.5. Uçucu kül tabanlı geopolimer.....	18
3.1.5.6. Kayaç tabanlı geopolimer	18
3.1.5.7. Silika tabanlı geopolimer.....	19
3.1.5.8. Fosfat tabanlı geopolimer	19
3.1.5.9. Organik maden tabanlı geopolimer	19
3.2. Bor Atığı	20
3.2.1. Bor'un tanımı ve atomik özellikleri	20
3.2.2. Bor elementinin fiziksel özellikleri	21
3.2.3. Bor elementinin kimyasal özellikleri.....	21
3.2.4. Ticari öneme sahip bor mineralleri ve özellikleri.....	22
3.2.5. Dünyada bor	24
3.2.6. Dünyada sektörel bor dağılımı	25
3.2.7. Türkiyede bor	26
3.3. Yüksek Fırın Cürufu	26
3.3.1. Yüksek fırın cürufunun özellikleri	26

3.3.2. Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri	27
3.3.3. Yüksek fırın cürufunun taze betona etkileri	27
3.3.3.1. İşlenebilirlik.....	27
3.3.3.2. Terleme	27
3.3.3.3. Hidratasyon ısısı	28
3.3.3.4. Priz süresi	28
3.3.3.5. Hava içeriği.....	28
3.3.4. Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş betona etkileri.....	28
3.3.4.1. İleri yaş basınç dayanımı	28
3.3.4.2. Erken yaş dayanımı	29
3.3.4.3. Çekme dayanımı	29
3.3.4.4. Geçirgenlik	29
3.3.4.5. Rötne ve sünme	29
4. MATERYAL VE YÖNTEM	30
4.1. Bor Atığı	30
4.2. Yüksek fırın curufu.....	31
4.3. Agregası.....	32
4.4. Aktivatör	33
4.5. Karışım suyu.....	34
4.6. Priz Geçiktirici.....	34
4.7. Aletler	34
4.7.1 Elekler.....	34
4.7.2 Çelik Kalıplar	35
4.7.3 Etüv.....	35
4.7.4 Karışım Mikseri.....	36
4.7.5 Beton Basınç Presi.....	36
4.7.6 Eğilme Deney Aleti	37
4.7.7 Yüksek Sıcaklık Fırını	38
4.7.8 Ultrases Geçiş Hızı	38
4.7.9 SEM Cihazı	39
4.7.10 XRD Cihazı	39
4.7.11 Vicat Aleti	40
4.8. Harçların Karışım Oranlarının Belirlenmesi	41
4.8.1. Karışım oranları ve döküm planı	41
4.8.2 Geopolimer Harç Numunelerin Hazırlanması.....	41
4.8.3 Taze Geopolimer harç numuneler üzerinde yapılan deneyler	44
4.8.3.1 Priz süresi tayin deneyi.....	44
4.8.4 Sertleşmiş geopolimer harç numuneler üzerinde yapılan deneyler	44
4.8.4.1 Basınç dayanımı deneyi.....	44
4.8.4.2 Eğilme dayanımı deneyi	45
4.8.4.3 UPV deneyi	46
4.8.4.4 Yüksek sıcaklık deneyi.....	47
4.8.4.5 Mikroyapı analizi-(SEM)	48
4.8.4.6 Mikroyapı analizi (XRD)	49
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	50
5.1. Elek Analizi Sonuçları	50
5.2. Geopolimer Taze Harç Numuneler Üzerinde Uygulanan Deneyler	51
5.2.1. Priz başlangıç ve sona erme deney sonuçları	51
5.3. Sertleşmiş Geopolimer Harç Numuneler Üzerinde Uygulanan Deneyler	53
5.3.1. Basınç dayanımı deney sonuçları	53

5.3.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları	57
5.3.3. UPV geçiş hızı deneyi sonuçları.....	61
5.3.3.1 Basınç ve eğilme dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	65
5.3.4. Yüksek sıcaklık deneyi sonuçları	67
5.3.5. SEM analiz sonuçları.....	70
5.3.5.1 5 M olan numunelerin SEM analizi.....	70
5.3.5.2 10 M olan numunelerin SEM analizi.....	72
5.3.5.3 15 M olan numunelerin SEM analizi.....	73
5.3.6. XRD analiz sonuçları	75
5.3.6.1 5 M olan numunelerin XRD analizi	75
5.3.6.2 10 M olan numunelerin XRD analizi	77
5.3.6.3 15 M olan numunelerin XRD analizi	79
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	89



ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 3.1 : Bor elementinin atomik özellikleri.....	20
Tablo 3.2 : Bor elementinin fiziksel özellikleri	21
Tablo 3.3: Bor elementinin kimyasal özellikleri	22
Tablo 3.4: Bor madeninin geleneksel üründen ileri teknolojik ürüne geçiş skalası.....	23
Tablo 3.5: Ülkelere göre bor rezervi miktarları	25
Tablo 3.6: Dünyada bor tüketiminin sektörel dağılımı	25
Tablo 4.1: Bor atığının kimyasal içeriği	31
Tablo 4.2: Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.	31
Tablo 4.3 : Kullanılan aktivatör bileşenlerinin fiziksel özellikleri.....	33
Tablo 4.4: 5 M, 10 M ve 15 M için hazırlanan karışım serileri	41
Tablo 4.5: UPV deneyi sonuçlarına göre harcın kalite değeri.	47
Tablo 5.1. Granülometri deneyi sonuçları	50
Tablo 5.2. Harç numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri	52
Tablo 5.3. 7 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	54
Tablo 5.4. 28 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	56
Tablo 5.5. 7 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri	58
Tablo 5.6. 28 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri	60
Tablo 5.7. 7 günlük numunelerin ortalama UPV deney verileri mm/ μ s.....	62
Tablo 5.8. 28 günlük numunelerin ortalama UPV deney verileri mm/ μ s.....	64
Tablo 5.9. 10 M 28 günlük numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç deneyi sonuçları.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1:	Puzolanik malzemelerin yapısı	13
Şekil 3.2 :	Deney bünyesinde kullanılan bor atığı	20
Şekil 4.1:	Bor atığı	30
Şekil 4.2:	Deney bünyesinde kullanılan yüksek fırın cürufu	32
Şekil 4.3 :	Çalışma bünyesinde kullanılan agrega ve eleme işlemi	33
Şekil 4.4 :	Karışımların hazırlanma aşamaları	34
Şekil 4.5:	Çalışmada Kullanılan Elekler	35
Şekil 4.6:	Çalışmada Kullanılan Küp ve Kiriş Kalıplar	35
Şekil 4.7:	Etüv	36
Şekil 4.8:	Karışım Mikseri	36
Şekil 4.9 :	Basınç test cihazı	37
Şekil 4.10:	Eğilme Test Cihazı	37
Şekil 4.11:	Yüksek Sıcaklık Fırını	38
Şekil 4.12:	UPV cihazı	38
Şekil 4.13:	SEM cihazı	39
Şekil 4.14:	XRD cihazı	40
Şekil 4.15:	Vicat aleti	40
Şekil 4.16:	Harç numunelerinin kalıba yerleştirilmesi ve kür edilmesi	42
Şekil 4.17:	Çalışmada kullanılan boş numune kalıpları	43
Şekil 4.18:	Kullanılan numunenin kalıplara yerleştirilmesi	43
Şekil 4.19:	Kullanılan numunelerin etüve bırakılması	43
Şekil 4.20:	Vicat aleti kullanılarak priz süresinin belirlenmesi	44
Şekil 4.21:	Basınç test cihazı ve basınç değerlerinin okunması	45
Şekil 4.22:	Eğilme dayanımı test cihazı ve eğilme dayanımı değerlerinin okunması	46
Şekil 4.23 :	UPV deneyinde kullanılan PUND-IT aleti	47
Şekil 4.24 :	Yüksek sıcaklık fırını ve yüksek sıcaklık fırınına numunelerin yerleştirilmesi	48
Şekil 4.25:	Çalışmada kullanılan SEM analiz cihazı	48
Şekil 4.26:	Çalışmada kullanılan XRD analiz cihazı	49
Şekil 5.1:	Deneyler bünyesinde kullanılmış Dmax= 5 mm olan agreganın granülometri eğrisi	51
Şekil 5.2:	5,10 ve 15 M harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları	54
Şekil 5.3:	5, 10 ve 15 M harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımları	56
Şekil 5.4:	5 M, 10 M ve 15 M harç numunelerin 7 günlük eğilme dayanımları	58
Şekil 5.5:	5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük eğilme dayanımları	59
Şekil 5.6:	5 M, 10 M ve 15 M harç numunelerin 7 günlük UPV deney sonuçları	61
Şekil 5.7:	5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük UPV deney sonuçları	63
Şekil 5.8:	5 M, 10 M ve 15 M Harçların 7 Günlük UPV Ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	65
Şekil 5.9:	5 M, 10 M ve 15 M Harçların 28 Günlük UPV Ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	66
Şekil 5.10:	5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük UPV deney sonuçları	66
Şekil 5.11:	5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük UPV deney sonuçları	66
Şekil 5.12:	YFC ve B atığı içeren 10 M harçların 28 günlük basınç dayanımı değerleri ...	67
Şekil 5.13:	Kontrol Numunesi İle Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılan Numuneler Arasındaki İlişki	69

Şekil 5.14: 5 M üretilen harç numunelerin SEM görüntüleri, a) %0 B içeren karışım b) %3 B içeren karışım c) %6 B içeren karışım d) %9 B içeren karışım e) %12 B içeren karışım f) %15 B içeren karışım.....	71
Şekil 5.15: 10 M üretilen harç numunelerin SEM görüntüleri, a) %0 B içeren karışım b) %3 B içeren karışım c) %6 B içeren karışım d) %9 B içeren karışım e) %12 B içeren karışım f) %15 B içeren karışım.....	72
Şekil 5.16: 15 M üretilen harç numunelerin SEM görüntüleri, a) %0 B içeren karışım b) %3 B içeren karışım c) %6 B içeren karışım d) %9 B içeren karışım e) %12 B içeren karışım f) %15 B içeren karışım.....	74
Şekil 5.17: 5 M olarak üretilen %0 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	75
Şekil 5.18: 5 M olarak üretilen %3 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	75
Şekil 5.19: 5 M olarak üretilen %6 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	76
Şekil 5.20: 5 M olarak üretilen %9 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	76
Şekil 5.21: 5 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	76
Şekil 5.22: 5 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	77
Şekil 5.23: 10 M olarak üretilen %0 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	77
Şekil 5.24: 10 M olarak üretilen %3 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	78
Şekil 5.25: 10 M olarak üretilen %6 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	78
Şekil 5.26: 10 M olarak üretilen %9 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	78
Şekil 5.27: 10 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi....	79
Şekil 5.28: 10 M olarak üretilen %15 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi....	79
Şekil 5.29: 15 M olarak üretilen %0 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	80
Şekil 5.30: 15 M olarak üretilen %3 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	80
Şekil 5.31: 15 M olarak üretilen %6 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizleri..	80
Şekil 5.32: 15 M olarak üretilen %9 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi.....	81
Şekil 5.33: 15 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi....	81
Şekil 5.34: 15 M olarak üretilen %15 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi....	81

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Al₂O₃	: Alüminyum oksit
ASTM	: American Society for Testing and Materials
B	: Bor atığı
BAB	: Borlu aktif belit
B₂O₃	: Bor oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
CO₂	: Karbon dioksit
CSH	: Kalsiyum silikat hidrat
MgO	: Magnezyum oksit
Na	: Sodyum
Na₂SiO₃	: Sodyum silikat
NaOH	: Sodyum hidroksit
PÇ	: Portland çimentosu
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiO₂	: Silisyum dioksit
TK	: Tinkal
TS	: Türk standartları
UPV	: Ultrases geçiş hızı
XRD	: X ışını kırınımı
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
Au-Pd	: Altın- Paladyum
Na₂ CO₃	: Sodyum Karbonat
XRF	: X-Işını Floresans
UK	: X-Işını Floresans

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN YANGIN DAYANIMINA BOR MADEN ATIĞININ ETKİSİ Oğuzhan BELTEKİN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

89+XI sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Bu çalışmada Eskişehir Kırka bor madenlerinden elde edilen bor atığı ve Karabük Karçimsa'dan temin edilen yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak üretilen geopolimer harçların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Karışım içerisinde YFC ana malzeme olup bor atığı%0 , %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Çalışma içerisinde aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit birlikte kullanılmıştır.Sodyum hidroksit çözeltisi üç farklı konsantrasyonda (5 mol,10 mol ve 15 mol) hazırlanmıştır. Belli oranlarda bor atığı katkılı ve YFC esaslı geopolimer harçların priz başlangıç, priz bitiş süreleri, basınç dayanımları, eğilme dayanımları, ultrases geçiş hızları(UPV), yüksek sıcaklığa(300°C, 600°C ve 900°C) dayanımları incelenmiştir.Elde edilen sonuçlar mikro yapı (SEM ve XRD) deneyleri ile desteklenmiştir.Kontrol numunelerinin mol konsantrasyonuna ve bor atığı artışına göre 7 ve 28 günlük dayanımlarında meydana gelen değişim irdelenmiştir.

Sonuç olarak mol oranı arttıkça priz başlama ve sona erme süreleri azalmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında en yüksek basınç dayanımı 10 M Sodyum Hidroksit konsantrasyonundan elde edilmiştir. Bor atığı ve YFC kullanılarak elde edilen geopolimer numunelerin farklı oranlarında harç bünyesinde kullanılabileceği görülmüştür. Bor atığı mikrarı arttıkça basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UPV değerleri azalmıştır.Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanım değerleri sıcaklık arttıkça azalmıştır. Bor atığı miktarı arttıkça dayanımda düşüşler gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor atığı, yüksek fırın cürufu, geopolimer harç, alkali aktivatör, yüksek sıcaklık

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECT OF BORON WASTE ON FIRE RESISTANCE OF BLAST FURNACE SLAG-BASED GEOPOLYMER MORTARS

Oğuzhan BELTEKİN

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

89+XI sayfa

2022

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

In this study, some physical and mechanical properties of boron waste obtained from Eskişehir Kırka boron mines and geopolymer mortars produced using blast furnace slag (YFC) supplied from Karabük Karçimsa were examined. YFC is the main material in the mixture and boron waste is used in 0%, 3%, 6%, 9%, 12% and 15% ratios. Sodium silicate and sodium hydroxide were used together as activators in the study. The sodium hydroxide solution is prepared in three different concentrations (5 mol, 10 mol and 15 mole). Socket start, socket end times, compressive strengths, flexural strengths, ultrasound transition rates (UPV), high temperature (300°C, 600°C and 900°C) resistance of boron waste doped and YFC based geopolymer mortars at certain rates were examined. The results obtained were supported by microstructure (SEM and XRD) experiments. The change in the strength of the control numbers in 7 and 28 days according to the mole concentration and boron waste increase was examined.

As a result, as the mole rate increased, the socket start and end times decreased. When the 7 and 28 day compressive strengths are examined, the highest compressive strength is obtained from 10 M Sodium Hydroxide concentration. It has been observed that geopolymer samples obtained using boron waste and YFC can be used in different proportions within the mortar. As the amount of boron waste increased, the pressure resistance, flexural strength and UPV values decreased. The compressive strength values of samples exposed to high temperatures decreased as the temperature increased. As the amount of boron waste increases, decreases in strength have been observed.

Keywords: Boron waste, Blast furnace slag, Geopolymer concrete, Alkaline activator.

1. GİRİŞ

Beton, dünyanın en çok kullanılan inşaat malzemesi olup, yıllık bazda üretimi altı milyar tondan fazladır. Portland çimentosu üretimi, klinker üretimi ve yakma sırasında kireç taşının yakılmasından dolayı küresel antropojenik CO₂ salınımlarının yaklaşık %7'sini oluşturur [1]. Mevcut durumda, geleneksel Portland çimentosu, yıllık 4 milyar ton üretim kapasitesi ve %4'lük büyüme oranıyla dünyanın dört bir yanında önde gelen bir yapı malzemesidir [2]. Bu astronomik üretim miktarı, üretim sürecinde enerji tüketimi ve çevreye salınan yüksek miktarda CO₂ gibi birçok çevresel soruna yol açmaktadır. Geleneksel Portland çimentosuna olan talebin dünya çapında artması nedeniyle, çimento üretimi yakın gelecekte salınacak, çevre kirliliğini arttıran antropojenik CO₂ miktarının yaklaşık %10'unu temsil edebilir [3]. Bu sorunları minimize etmek için çalışmalar doğrudan çimentoya alternatif bir bağlayıcı malzeme kullanımına odaklanmıştır. Bu arayışın bir sonucu olarak, silikat ve alüminat bakımından zengin puzolanik ham maddelerin alkali çözeltiler ile aktive edilmesiyle meydana gelen geopolimerlerin kullanımı önemli bir ilgi odağı haline gelmiştir.

Diğer yandan Portland çimentosuna alternatif olarak geopolimer bağlayıcıların kullanılması da zamanla ortaya çıkmıştır. Alternatif olarak geopolimer bağlayıcıların kullanılmasının başlıca sebepleri ise çevre dostu olması ve yüksek dayanımının olmasıdır. Bu sebeplerden dolayı da mühendislik alanlarında kullanılması ihtiyacı doğmuştur. Genellikle kullanılan geopolimer bağlayıcıların, uçucu kül (UK) temelli geopolimer olduğu görülmüştür [4].

Geopolimer bağlayıcının kullanım alanı oldukça fazladır. Bu sebeple'de bilimsel ve endüstriyel alanlarda geopolimer bağlayıcı kullanılarak çalışmaların yapılması ortaya çıkmıştır. Özellikle yangına dayanıklı olması gereken yerlerde, çimento ve beton üretimlerinde, onarım gerektiren yerlerde kullanımı için kompozit karışımlarda, atık malzemelerin yeniden kullanılması gereken yerlerde kullanılmaktadır [5].

Ülkemizde son on beş yıl göz önüne alındığında bor bileşiği ya da bor içeriğinden oluşan atıklar kullanılarak endüstriyel ve sanayi alanında pek çok farklı çalışma yürütülmüştür. Seramik malzemelerin sırlanması, tuğla üretimi, çimento üretimi hammaddesi olarak kullanılabilirliğine yönelik çalışmalar endüstriyel olarak bir karşılık bulamamıştır. Ülke iç piyasasında kullanılan bor ham maddesi ile elde edilen ürünlerin miktarı %1 - 2 civarındadır. Ancak son birkaç yıla dönüp baktığımızda bu alandaki

ilerlemeler önemli derecede artmaktadır. Bor ürünlerinden elde edilen temizlik ürünleri, el dezenfektanları ve hatta lityum pil üretimine kadar uzanan serüvene sahiptir. Bu süreç göz önüne alındığında bor kaynağından yeteri kadar yarar sağlayamadığımız ortaya çıkmaktadır. Ülke bünyesinde bor türevlerinden oluşturulacak yenilikçi projeler, bu projeleri destekleyecek endüstriyel birikim bir bütün olarak ele alınmalıdır [6].

Örnek olarak; yüksek konsantreli bor katkılı çimento içeren kompozitlerin yangına karşı dayanımı normal Portland çimentosu içeren kompozitler ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çimentodan elde edilen bileşikler; beton, harç, sıva gibi bileşiklerin bor katkısıyla fiziksel özelliklerinde önemli derecede iyileşmeler olmamasına rağmen, yüksek yangın direnci, gama ve nötron ışınlarının emilimi gibi teknolojik avantajlara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle bor bileşiklerinin çimento ve beton bileşiklerinde daha yaygın bir şekilde kullanılması gerektiği öne sürülmüştür [7].

Çeşitli zararlı atıkların doğaya ve dolaylı olarak insan hayatına yaptığı etki ortadadır. Bu etkileri en aza indirmek için yapılan çalışmalarda atıkların zararı minimize edilerek veya çeşitli malzemelerle birlikte kullanılması ve bertaraf edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca atıkların doğada fiziksel olarak bir alan kapladığı da bilinmektedir. Bu sebeple atıkların geri dönüştürülerek kullanımıyla atık zararlarının minimize edilmesi amaçlanmaktadır.

Günümüzde betonun kullanımına sürekli olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Beton kullanımının gerekli olduğu durumlarda beton üretimi ile birlikte çeşitli atıkların da betona ilave olarak kullanılması önemlidir. Beton üretimi için kullanılan atıkların betona olan etkisinin incelenmesi de zorunludur. Betonda kullanılan atıkların betona nasıl bir etki yapacağını bilmesi gerekmektedir. Beton katkı maddeleri ile ilgili açıklanan durumlar ve öne çıkan düşünceler incelendiğinde beton katkı maddeleri olarak kullanılacak atıklardan biride bor atığının betonda kullanılmasıdır. Dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olan ülkemizde bu rezervlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıkların geri dönüşümde değerlendirilerek geopolimer beton bünyesine katılıp harçlar üzerindeki fiziksel ve mekanik etkilerinin incelenmesine bu çalışmada karar verilmiştir.

Böylece bu çalışmada, Türkiye'de bulunan Kırka bor işletmesinden bor üretimi sırasında oluşan bor atığı ile yüksek fırın cürufunun (YFC) belli oranlarda karıştırılarak elde edilecek olan geopolimer harçın bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olan ülkemizde, bor madenlerinin çıkarılması ve işlenmesi sırasında ortaya çıkan atık malzemelerin geopolimer harç bünyesinde yeniden değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Üretilen geopolimer harçların bazı mekanik ve fiziksel özellikleri tespit edilmiş ve yüksek sıcaklığın bor katkılı geopolimer harç üzerindeki etkileri incelenmiştir. YFC esaslı geopolimer harçlara farklı oranlarda (%0, %3, %6, %9, %12 ve %15) bor atığı katılarak oluşturulan numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri ve yüksek sıcaklık performansı araştırılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Bu kapsamda 3 farklı (5 M, 10 M, 15M) molariteye sahip Sodyum Hidroksit (NaOH) kullanılarak 18 farklı karışım elde edilmiştir. Kür süresi olarak 7 ve 28 gün baz alınmıştır.

Üretilen geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV) ve iç yapı özellikleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin yüksek sıcaklık altında (300°C, 600°C ve 900°C) özellikleri tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrasında numunelerden elde edilen verilere bağlı olarak bor atığının etkisi incelenmiştir.

Yaptığımız çalışmada bor atığı kullanma amacımız yüksek eğilme ve basınç dayanımları elde etmeden ziyade sıcaklık artışına bağlı olarak bor atığının nasıl bir etki göstereceğini belirlemek ve önceden yapılan çalışmalarda ultrases geçiş hızına olumlu etki oluşturduğu varsayımından yola çıkarak YFC ile birlikte nasıl sonuçlar vereceği ihtiyacından ötürü tercih edilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Topçu vd. [8], çimento yerine %0, %3, %7, %10 oranlarında tinkal (TK) bor atığı kullanılarak harçların yüksek sıcaklığa karşı dayanımlarını araştırmışlardır. Çalışmada, kullanılacak olan bor atığı öğütülerek betonun bünyesine ilave edilmiştir. Oluşturulan karışımdan elde edilen numuneler 3 saat süreyle 20, 150, 300, 400, 600 ve 900°C sıcaklıklarda tutulmuş ve havada soğutulmuştur. Sıcaklığın artmasıyla doğru orantılı olarak numunelerin basınç dayanımlarının azaldığı belirtilmiştir. 900°C'de CSH yapısının tamamen ortadan kalktığı ve çalışma sonucunda %3 veya daha az oranda bor atığı katkısının yüksek sıcaklığın oluşturduğu zararlı etkileri azaltmak için kullanılmasının uygun olacağını belirtmişlerdir.

Akyıldız [9], bor atığı ve zeolit gibi katkı maddeleri kullanarak betonun dayanımı üzerine etkisini incelemiştir. Bu etkiler hafif beton ve normal beton üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup; elde edilen veriler sonunda, %3 katkının normal betonda 7 günlük basınç dayanım değeri 13.69 MPa iken, hafif agregalı betonda 9.40 MPa değerinde olduğu ortaya çıkmıştır. 56 günlük basınç dayanımı normal betonda 25.73 MPa iken hafif agregalı betonda ise 15.02 MPa olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak betona ilave edilen bor atığının betonun dayanımı üzerindeki pozitif etkileri gözlenmiştir.

Pehlivanoğlu vd. [10], farklı türde çimentoların içerisine borik asit katılarak priz süreleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, betona çimento ağırlığının %0.25-1.00 oranlarında borik asit ilave edilerek kullanmışlardır. Üç farklı çimento türü (Aktif Belit Çimentosu, Portland Çimentosu ve Kalsiyum Alüminatlı Çimento) belirlenmiş ve bunların beton üzerine olan etkileri tayin edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda elde edilen harçların priz süreleri üzerine incelemeler yapılmış, bu incelemeler sonucunda priz sürelerinin ciddi oranda arttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, çimentoya ilave edilen borik asit içeren ve borik asit içermeyen numuneler karşılaştırılıp, uygun kullanım oranları belirlenmiştir.

Kaman vd. [11], yaptıkları çalışmada belli oranlarda bor atığı katılan çimentonun özelliklerini incelemiştir. Bu doğrultuda kullanılacak atıkların mineralojik ve karakteristik özellikleri incelenmiş ve numuneler 600 °C de ısıtılma tabi tutulmuş, bor atığı katkısı %5, %15 ve %25 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. %5 oranında ilave edilen bor atığının diğer oranlara göre daha iyi sonuç verdiği deneyler sonucunda gözlenmiştir.

Çağlar [12], bor atığı kullanarak harman tuğla üretimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bor atığının içinde bulunan bor oksitinin (B_2O_3) geri dönüştürülmesini sağlamak ve harman tuğla üretiminde bu atık maddenin tekrardan kullanılması için araştırma yapmıştır. Harman tuğla içerisine ilave edilen (%2, %4, %6, %8, %10) bor atığı katkılı numuneler üretilmiştir. Elde edilen verilere göre %8 bor atığı kullanımının harman tuğla üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

Kavas vd. [13], bor ilaveli çimentolara pektin ilavesi sonrası fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki değişimleri incelemiştir. Çalışmada pektinin %0.1-1 oranında çimentonun yerine kullanılarak değişen oranlarda iki farklı çimento türü üzerinde (Normal Portland Çimentosu ve Kolemanit Cevheri atığı içeren çimento) olan etkileri incelenmiştir. İki farklı çimento türünden üretilen betonların içerisine %0.1, %0.5 ve %1 oranlarında pektin katılmıştır. Kolemanit cevheri atığı içeren çimento içerisine %0.1 pektin ilavesi ile priz geciktirici, %0.1'den sonraki ilavelerde ise priz hızlandırıcı etkisinin olduğu görülmüştür. Pektin katkılı PÇ 7 günlük basınç dayanımından elde edilen basınç değerleri düşük iken, 28 günlük basınç dayanımından elde edilen basınç değeri yüksek bulunmuştur. Kolemanit Cevheri içeren çimentolu betonlarda 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımlarının her ikisinde de olumlu etki oluşturduğu görülmüştür.

Erdoğan vd. [14], betonun bünyesinde yer alan çimentonun yerine belli oranlarda kolemanit konsantratör atıkları ve farklı oranlarda Karabük cürufunun çimentonun bünyesine katılarak betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu doğrultuda Na_2CO_3 (Sodyum karbonat) kimyasalının betonun bünyesine farklı miktarlarda eklenerek beton üzerindeki fiziksel etkilerini araştırmışlardır. Beton bünyesinde kullanılan kolemanit konsantratör atığı, kula cürufu, alçı taşı ve klinkerin beton içerisindeki kimyasal etkileri XRF(X-Işını Floresans) aleti kullanılarak ölçülmüştür. Mekanik özellikleri üzerine etkileri bulmak için basınç dayanım miktarı, priz süresi, hacim genişmesi ve normal kıvam suyu gibi deneyler uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen bulgular kolemanit konsantratör atığının ve Karabük cürufunun farklı oranlarda çimento bünyesinde kullanılabilirliği saptanmıştır.

Kula vd. [15], bu çalışmada çimento bünyesine farklı atık malzemeler (kolemanit atığı, kömür alt külü ve UK) katılarak betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelemiştir. Bu atık malzemeler betonun bünyesine farklı oranlarda ilave edilmiştir. Betonun fiziksel özellikleri üzerindeki değişiklikleri belirleyebilmek için; priz süresi deneyi, hacim genişleme deneyi ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Uygulama sonucunda elde

edilen veriler standartlarla karşılaştırıp, uygunluğu araştırılmıştır. Bu veriler doğrultusunda çimento bünyesinde %25 oranında uçucu kül ve yatak külü kullanılarak üretilen numunelerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Portland çimentosu yerine %9 oranında kolemanit atığı ilavesi ile elde edilen numuneler basınç testine tabi tutulduğunda portland çimentosu ile üretilen numunelere göre dayanımının daha az olduğu yine de sonuçların Türk Standartlarının eşik değerinin üstünde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde; kolemanit atığı, UK ve kömür alt külünün çimento yerine kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir.

Uğurlu vd. [16], yaptığı bu çalışmada bor elementinin çıkarılması sırasında açığa çıkan kil pestili olarak bilinen atık maddenin çimento bünyesinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kil pestili atığını çimento bünyesinde kullanabilmek için öğütülmüş, Portland çimentosu yerine değişik yüzdeler de hazırlanarak oluşturulan numunelerin bünyesine katılmıştır. Dökülen numuneler üzerinde taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri uygulanarak; kil pestilinin çimento bünyesindeki davranışları ve numuneler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu numuneler ışığında elde edilen veriler beton standartları ile karşılaştırılmıştır. Veriler incelendiğinde boraks içerikli kil pestili atığının taze beton içerisinde priz geciktirici olarak kullanılabileceğine ve beton içerisinde düşük oranlarda kil pestili atığının beton bünyesinde zamanla geçirimsizliği azaltan bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Davraz [17], bor oksit (B_2O_3) içeren taze çimento harcının priz başlangıç ve bitiş süreleri, hidrojen gücü değeri, elektriksel iletimi ve sıcaklık değerleri üzerine etkileri incelemiştir. Doğrudan ve dolaylı yöntemler ile farklı yüzdelerde borik asit (H_3BO_3) kullanılarak oluşturulan sertleşmiş beton numunelerine 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri incelenmiştir. Elde edilen veriler, Portland çimentosu ve Borlu Aktif Belit katkılı çimento örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Beton numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. En yüksek bor oksit (B_2O_3) içeren beton numunesi en yüksek basınç dayanımı değerlerini vermiştir. Elde edilen veriler ışığında, bor oksit (B_2O_3)/çimento oranı göz önüne alındığında taze ve sertleşmiş betonun priz başlangıç ve bitiş süreleri, basınç dayanımları ve 28 günlük eğilme dayanımı karşılaştırıldığında bir farklılık göstermediği belirlenmiştir.

Demir ve Keleş [18], borojips ve konsantratör atığı katkılı beton numuneler üretmişlerdir. Portland çimentosu ve bor atığı içeren çimentoların gama ışınlarına karşı

geçirimsizlik farklılıkları test edilmiştir. Sonuç olarak bor atığı katkısı içeren betonların diğer betonlara göre radyoaktif ışınlar karşısında daha etkin bir koruma sağladığı belirtilmiştir.

Volkman ve Bussolini [20], bor madenin beton bünyesinde kullanıldığında nötronları emerek düşük enerjili gama ışınları yaydığını, bu veriler doğrultusunda radyasyona karşı etkin bir koruma sağladığını, ancak betonun bünyesine katılan bor ilavesi betonun priz süresini oldukça uzattığı ve betonun dayanımını olumsuz bir şekilde etkilediğini belirtmiştir.

Targan vd. [21], çalışmalarında kula cürufu, bentonit ve kolemanit gibi doğal veya yapay atıkların çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Böylece çimento üretiminde hem enerji tasarrufunu hem de atık maddelerin çevreye verebileceği zararlı etkileri gidermeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada kula cürufu ve bentonit ağırlık olarak %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Priz süresi, eğilme dayanımı, hacim genişlemesi, basınç dayanımı gibi parametrelerin incelendiği çalışmada karışımların özelliklerinin Türk Standartlarıyla örtüştüğü ve elde edilen karışımların çimento üretiminde kullanılabilirliği vurgulanmıştır.

Yalçınalp [22], yaptığı çalışmada borik asit atığı kullanarak betonun kalitesini yükseltmeyi ve borun kullanım alanının artırılmasını hedeflemiştir. Hafif betona %3 oranında borik asit eklenerek elde edilen karışımın priz özelliklerini ve basınç dayanımını tespit etmiştir. Bor jips atığından elde edilen alçının hafif beton üretiminde priz hızlandırıcı etkisinin olduğunu belirlemiştir. Ayrıca elde edilen karışımın beton mukavemetine negatif yönde etki etmediğine ve radyoaktif ışınlardan korunmada yeterli emiş kapasitesine sahip olduğuna, böylece çevreye verilen zararın önlenmesinde bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır.

Keskin vd. [23], yaptıkları çalışmada atık bor karışımı içeren asfalt betonların performanslarını değerlendirmişlerdir. Çalışmada 1,18 mm'lik elek altında kalan ince ve filler malzemenin yerine, değişik oranlarda öğütülmüş bor atığı, boraks pentahidrat ve susuz boraks malzemeleri kullanılarak oluşturulan asfalt numunelerin performanslarını değerlendirmişlerdir. Böylece bor atığının yol inşaatına kazandırılması hedeflenmiştir. Yaptıkları deneylerin sonuçlarına göre yukarıda sayılan malzemelerin asfalt ile birlikte kullanımı gerekli şartnameler altında uygun olduğu elde edilmiştir.

Gezmen vd. [24], yaptıkları çalışmada portland çimentosu ile farklı oranlarda kullanılan kolemanit mineralinin ve UK içeren karışımların 7, 28, 56, 90. günlerdeki betonların basınç ve eğilme dayanımlarını incelemiştir. Bu karışımlarda kolemanit

mineralinin oranı %0, %2, %4, %6, %8, %10 ve UK oranı %0, %10, %20, %30 olarak alınmıştır. Bazı karışımların hacim genleşmeleri ve priz süreleri ile karışımların sülfata karşı dayanıklılıkları bulunmuştur. Dayanım sonuçlarına göre kolemanitin çimentoya ağırlık olarak %2 ve %4 oranlarında kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Sülfata dayanıklılık olarak ise kolemanitin kullanılmasıyla dayanıklılığın arttığı savunulmuştur.

Möröydor [25], yaptığı çalışmada pomza, perlit, andezit, keramzit agregalı hafif beton numunelerine borik asit atıklarını ekleyerek beton kalitesini yükseltmeyi amaçlamıştır. Hafif betona %3 oranında borik asit atığı ilave edilerek elde edilen betonun priz başlangıcı, priz sonu, su emme ve basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir. Diğer yandan da atık eklenmemiş betona farklı miktarlarda çelik tel eklenerek beton mukavemetine bu durumun etkisi gözlemlenmiştir. Sonuç olarak priz sürelerinde bor atığı kullanımının pozitif yönde etki ettiği, beton mukavemetinde azalma yönünde bir etkinin olmadığı elde edilmiştir.

Ergi vd. [26], yaptıkları çalışmada çeşitli yerlerden elde ettikleri çinko-bakır atığı, alçı atığı, UK, boraks ürünlerini belirli oranlarda çimentoya ilave etmişlerdir. Böylece betonun mekanik dayanımını tespit etmişlerdir. Basınç dayanımları, %1 bor ve %9 bakır-çinko atığı katkılı çimentoların 2-7-28 günlük basınç dayanımlarına göre en iyi sonuç verdiği görülmüştür. %7 bor ve %3 çinko-bakır atığı ile %5 bor ile %5 çinko-bakır atığının beton ile karışım sonuçlarına göre standart çimentoya göre düşük dayanım sonuçları verdiği belirlenmiştir. Bor ile alçı atığının karıştırılarak elde edilen beton numunesinde basınç dayanımının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu betonların 60 gün için korozyon potansiyelleri ölçülmüştür. Bu karışımların korozyon potansiyellerine pozitif yönde etki ettiği görülmüştür.

Çelik [27], yaptığı çalışmada dört farklı lif çeşidi kullanarak desteklenmiş bor atığı ilaveli metakaolin tabanlı geopolimer harç kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini ve yüksek sıcaklık davranışlarını incelemiştir. Sentetik lif çeşitleri olarak poliolefin lifi, bazalt lifi, modifiye poliamid lifi, polivinil alkol lifi kullanılmıştır. Bu liflerin geopolimer kompozitler üzerindeki davranışlarını incelemek için kullanılmıştır. Metakaolin tabanlı geopolimer harçların üzerlerine eklenecek liflerin etkisini tespit edebilmek için basınç ve eğilme dayanımı, aşınma direnci, tokluk ve yüksek sıcaklığa maruz bırakma deneysel testleri gerçekleştirilmiştir. Geopolimer karışımları, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilmiş metakaolin ve bor atığının bir karışımı ile hazırlanmış ve daha sonra ısıyla kür elde edilmiştir. Deneysel test sonuçları, çeşitli lif türlerinin eklenmesinin, geopolimer kompozitlerin mukavemet özelliklerini iyileştirdiği

belirlenmiştir. Örnek olarak polivinil alkol lifli numunelerin, kontrol numunesine göre %415.58'lik bir eğilme tokluğu artışı sağladığı belirlenmiştir. Aşınma direnci hakkında ise üretilen tüm numuneler'de 2 mm'den daha az bir uzunluk değişimi ve 15 gramdan daha az bir ağırlık kaybı olduğunu ifade etmiştir. Sentetik liflerin kullanımı, metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin dayanım kaybı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı kaybı açısından yüksek sıcaklık davranışını pozitif olarak etkilemiştir. Mikroyapısal analiz, sentetik lifler ve geopolimer arasında yeterli bir bağlanma derecesi olduğunu ortaya koymuştur.

Vural [28], yaptığı çalışmada UK'ün geopolimer kompozit bağlayıcı olarak kullanmıştır. Geopolimer karışımında alkali aktivatörler olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Farklı karışım oranları ve sıcaklıklarında üretilen geopolimer kompozitlerle birim hacim ağırlığı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, porozite testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen geopolimer kompozit malzemelerin en yüksek ve en düşük değerleri sırasıyla birim hacim ağırlığı için 0,91 ve 2,15 g/cm³, su emme için 8,31 ve 26,25, porozite için 17 ve 38,43, eğilme dayanımı için 0,5 ve 11 MPa ve basınç dayanımı için 2,2 ve 77 MPa olarak elde edilmiştir.

Tokay [29], yaptığı çalışmada vermikülit, silis kumu ve UK kullanarak geopolimer karışım üretmiştir. UK'ün aktif edebilmek için çeşitli kimyasal maddeler kullanmıştır. Üretilen karışımlar ile yayılma tablası, su emme, taze ve kuru birim hacim ağırlık, görünen porozite, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, ısı iletkenlik ve mikroyapı analizi (SEM) sonuçları elde edilmiştir. Toplam 36 adet numune üretilmiştir. Sonuç olarak, geopolimer harçların görünen porozite değerleri %30,19-%39,5 arasında değişkenlik göstermiştir. Ayrıca kuru birim hacim ağırlık değerleri 1,19 g/cm³-1,55 g/cm³; ultrases geçiş hızı değerleri 1,84 km/s-3,0 km/s ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri ise 0,373-0,794 W/mK arasında değişmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1 Geopolimer

Doğada bulunan minerallerin bazı deneylerle kimyasal içerikleri ve kristal yapılarının değiştirilmesiyle oluşan yeni inşaat bağlayıcı malzemesi geopolimer olarak isimlendirilmektedir. Geopolimer üretiminde ilk adım, polimerleşme ile başlamaktadır ve alkali ortamda polimerize silikat veya alüminosilikat içeren bileşiklerin, temel olarak UK ve benzeri katkı malzemelerin kullanılmasına dayanır [28].

Geopolimer fikrinin ortaya çıkmasını sağlayan Davidovits, geopolimerleri ilk olarak yer kabuğu yüzeyindeki oluşumlara benzer sentetik mineralleri açıklarken kullanmıştır. Geopolimerler silikoalüminatlara ait polimerlerdir. Bu sebeple de zeolitler ile benzerlik göstermektedir. Aynı zamanda geopolimerler yüksek sıcaklık direncine, ısı kararlılığı, yüksek basınç dayanımına sahiptir. Davidovits 1979 yılında ilk defa alümino-silikatlı malzemeler sınıfını belirlemek için geopolimer ifadesini kullandığı zamanlarda, yeni teknolojilerin geopolimer üretiminin sağlanmasına olan ilgi zamanla artmıştır. Geopolimer son zamanlarda özellikle İnşaat Mühendisliği alanında yeni bir bağlayıcı malzeme olarak kullanılmış ve çevresel olarak sürdürülebilir özelliğe sahip bir malzemedir. Genellikle geopolimerlerin üretimi amaçlanırken, kömürle çalışan elektrik santrallerinin endüstriyel bir yan ürünü olan UK tercih edilmektedir. Geopolimerler UK'lerin yüksek oranda alüminosilikat ve hidroksit içeren alkali bir sıvı ile karıştırılmasıyla oluşturulan puzolanik malzemelerdir. UK geopolimerler yüksek miktarda enerji tüketimini gerçekleştirmez. Yapılan araştırmalarda geopolimerlerin oluşumu esnasında tüketilen enerjinin, Portland çimentosunun enerji gereksiniminden yaklaşık olarak %60 oranda daha az olduğu tespit edilmiştir [28].

Diğer yandan çevresel sera gazı emisyonnu azaltabilmek için Portland çimento yerine geopolimer bağlayıcılar tercih edilmektedir. Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında UK içeren geopolimerlerin performansları, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığının daha iyi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca asite dayanıklılık açısından da geopolimer nispeten düşük kalsiyum içeriğinden dolayı daha dayanıklıdır. Diğer yandan normal Portland çimentoları yüksek yangın dayanımı sağlamaktadır. Ancak betonun dayanımının yüksekliği ile yangına dayanım ters orantılıdır. Geopolimerler ise seramiğe benzer olan özelliklerinden dolayı daha iyi yangın dayanımına sahiptirler [28].

3.1.1 Geopolimerin genel özellikleri

Yapılara olan ihtiyacın sürekli artmasına paralel olarak betona ve doğal olarak çimentoya olan ihtiyaçta sürekli olarak artmaktadır. Portland çimentosuna olan ihtiyacın artmasına bağlı olarak çimentonun üretimi esnasında sera gazlarının doğaya salınımı da söz konusudur. Yapılarda en fazla kullanılan malzemelerin başında Portland çimentosu gelmektedir. Portland çimentosunun doğaya verdiği CO₂ salınımindan dolayı yerine başka bir malzeme bulunması yıllardır önemli bir araştırma konusu olmuştur. Alkalilerle aktif edilmiş alüminosilikatlar bağlayıcılar yapıların yüksek dayanıma sahip olmasının yanında düşük rötre, asit ve yangına dayanım gibi faydalı özellikler gösterebileceği öne sürülmüştür [30].

Son yıllarda çevre bilincindeki artış ile birlikte inşaat alanında da çevresel malzemelerin kullanımına ve bu açıdan geopolimer bağlayıcıların alternatif olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar artmıştır. Geopolimerlerin gövdesini bağlayıcılar ve alkali çözeltiler genelde yüksek fırın cürufu, UK ve metakaolin, alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat ile sodyum hidroksit kullanılmaktadır [31].

Geopolimer üretiminde kullanılan alkali çözeltilerin içinde silika ve alümina içeren bir çok malzeme bulunmaktadır. Bu malzemeler; kaolin, feldispat, stilbit, albit, metakaolin, atık malzemeler, inşaat yapı atıkları, yüksek fırın cürufu, UK olarak sayılabilir. UK içeren geopolimer harç üretiminde miktar olarak %60 oranında UK, %15 oranında alüminyum-silisyum çözeltisi, %25 oranında alkali silikat karışımı kullanılabilir. Geopolimer malzeme üretiminde silika ve alümina kaynağı olarak UKün kullanılması ile alakalı yapılan çalışmaların henüz yetersiz olduğu anlaşılmaktadır [32].

Geopolimer beton üretiminde ortaya çıkan karbon dioksit miktarı normal beton üretiminden %80 oranında daha azdır. Diğer yandan geopolimer betonların aside karşı dirençleri yüksek, büzülme miktarları düşük, basınç dayanımı da daha yüksektir. Bu mekaniksel özellikleri sebebiyle de beton inşaat sektöründe tercih edilen önemli bir yapı malzemesidir [33].

Sonuç olarak geopolimer betonların normal betona göre avantajlarından biri de doğada başta ülkemizde bol miktarda ham madde kaynağının olmasıdır. Herhangi bir puzolanik bileşik ya da kaynak geopolimer karışımının üretimi için yeterlidir. Atık

maddelerin kaynak olarak kullanılabilmesi ile geopolimer betonlar için yeterli miktarda ham madde karşılanabilmektedir [34].

Geopolimer betonu üretmenin diğer bir önemli avantajı ise; basit hazırlama tekniğidir. Alümino-silikat reaktif malzemeleri ile alkali çözeltiler harmanlanıp oda sıcaklığında bekletildiğinde kısa bir sürede yüksek dayanım sağlanabilmektedir [34].

Geopolimer betonun başka bir avantajı ise enerji tasarrufu ve çevre dostu olmasıdır. Geopolimer betonun üretimi için yüksek enerji sarfiyatına gerek yoktur. Normal betonlara göre enerji tüketimi azdır. Karbon dioksit salınımının daha az olması sebebiyle geopolimer beton üretim tekniğinde çevre dostu olma avantajı vardır. Geopolimer betonun bir diğer avantajı ise hacim kararlılığıdır. Normal betona göre %80 daha az büzölmeye sahiptir. Kısa sürede kabul edilebilir basınç dayanımına sahip olması geopolimer betonun başka bir avantajıdır. Ayrıca olumsuz çevre şartlarına daha fazla dayanıklı olması da geopolimer betonların mükemmel durabiliteye sahip olmasını sağlamaktadır [34].

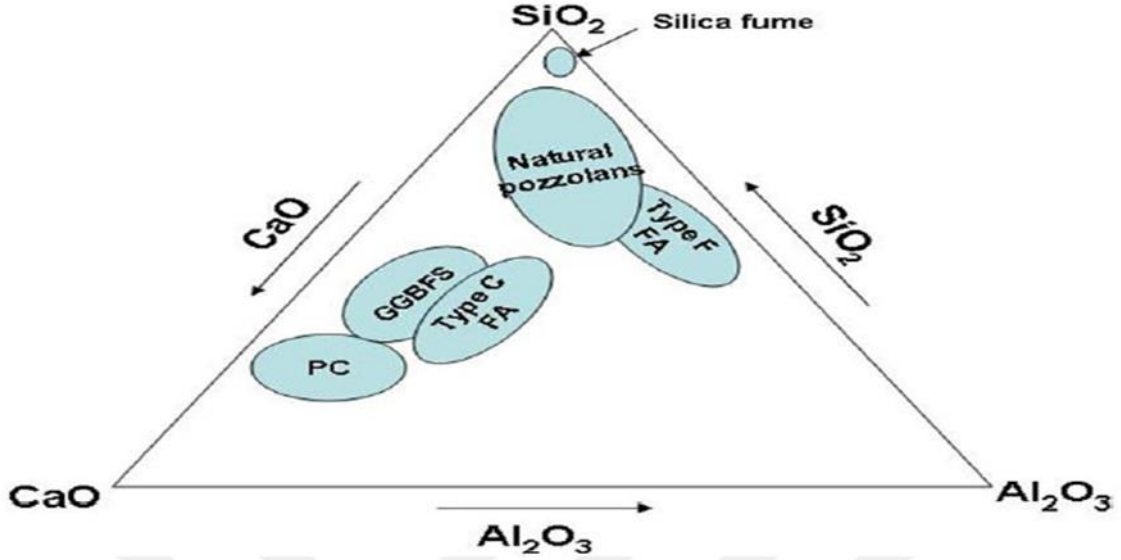
3.1.2. Geopolimer betonu oluşturan malzemeler

3.1.2.1. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu metal ergitme işlemi sonucunda çıkan bir atık malzemedir. İçerik olarak silika ve metal oksit karışımından oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufu beton üretiminde ilave katkı olarak ve çimento üretiminde ise bir yan bileşen olarak kullanılabilir. Normal Portland çimentosunun yerine kullanıldığında bir çok avantajının olduğu bilinmektedir [35].

Yüksek fırın cürufunun içeriğinde %8-%24 oranında alüminyum oksit($Al_2 O_3$), %28- %38 oranında silisyum dioksit (SiO_2) %30-%50 oranında kalsiyum oksit, %1-%18 magnezyum oksit bulunmaktadır. Cürufta yüksek miktarda CaO olması sebebiyle yüksek

dayanım sağlanılabilmekte ve bu özelliği ile portland çimentosuna benzemektedir. Şekil 3.1’de puzolanik malzemelerin kimyasal içerikleri gösterilmektedir [35].



Şekil 3.1. Puzolanik malzemelerin yapısı [35].

3.1.2.2. Alkali aktivatörler

Geopolimer beton için kullanılan aktivatörler; sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum silikat ve potasyum hidroksitlerdir. Yapılan çalışmalarda alkali çözelti ile bağlayıcı arasındaki etkileşimin sodyum hidroksit eklenerek iyileştirildiği tespit edilmiştir [35].

3.1.3. Geopolimer betonun durabilitesi

Fiziksel ve kimyasal değişkenlerden dolayı betonların dayanıklılığında azalmalar görülebilir. Fiziksel olaylara maruz bırakılan betonların yüzeyinde çatlaklar meydana gelebilmekte ve bu çatlaklar sebebiyle betonun geçirimliliği artmaktadır. Diğer bir yandan sürekli olarak zararlı kimyasallara maruz bırakılan betonlarda da benzer sonuçlar görülür ve beton bu etkilerden dolayı geçirimli bir yapıya sahip olur. Bu çatlaklar zamanla büyür ve betonun daha geçirimli olmasına neden olur. Bu da betonun durabilitesinin azalmasına neden olmaktadır. Endüstriyel fabrika atıklarının asit etkisinde kalması durumunda karışımda mevcut atık suyun pH'ı 4 veya daha az olduğu zaman ve aynı zamanda geopolimer betonlara

zarar verebilecek metallere sahip olduğu durumlarda geopolimer beton numunelerinin mukavemeti olumsuz olarak etkilenir. Böylece betonun hizmet süresi düşer [37].

3.1.3.1. Betonda büzülme

Geopolimer betonun daha düşük oranda şekil değiştirmeye sahip olması beklenmektedir. Betonda görülebilen bir diğerk şekil değiştirme de terleme olayı sonucunda betonun içerisindeki suyun buharlaşmasından kaynaklanan şekil değişikliğidir. Bu şekil değiştirmeye büzülme şekil değişikliliği denilmektedir. Başka bir deyişle betonun içerisindeki suyun zamanla azalmasından dolayı betonun hacimsel olarak büzülmesidir. Diğerk bir adı rötre olan büzülme hem taze betonda hemde sertleşmiş betonda olabilir [37].

3.1.3.2. Aşınma

Tekrarlı yükler altında betonun yüzeyleri yıpranarak aşınabilmektedir. Aşınmadan dolayı betonun hizmet süresi ve durabilitesi düşmektedir. Betonun aşınma dayanımının artırılabilmesi için betonun dayanımının yüksek olması ve kullanılan agreganın da darbelere karşı daha dayanıklı olması gerekmektedir. Aşınmayı engellemenin bir diğerk yolu da üretilen betonun içerisindeki boşluk oranının düşürülmesidir. Bunu yapabilmek için UK, cüruf, silis dumanı gibi ince taneli malzemelerin beton üretiminde kullanılması sağlanmalıdır. Bu malzemelerin kullanılması ile betonun aşınmaya karşı dayanımı artacaktır[37].

3.1.3.3. Yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık

Geopolimer betonlarda YFC'nun kullanılması, Portland çimentosuna göre bazı üstünlükler elde edilebilmektedir. Bu üstünlükler; yüksek basınç dayanımı, yüksek sıcaklığa ve kimyasallara karşı dayanıklılıktır. Yüksek sıcaklığa karşı YFC katkılı geopolimer betonun, Portland çimentoya karşı daha avantajlı olmasının sebebi, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında Portland çimentosunda daha fazla çatlakların meydana gelebilmesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda geopolimer betonların basınç dayanımlarını 400 °C'ye kadar korudukları gözlenmiştir. Bunun sebebi ise geopolimer betonların içerisinde kullanılan

alkali aktivatörler ile meydana gelen alümino silikat malzemesinin ısıya karşı daha iyi direnç göstermesidir [38].

3.1.3.4. Alkali-silika reaksiyonu

Portland çimentosu içerisinde bulunan sodyum oksit ve potasyum oksit gibi malzemeler betonun su emme kapasitesini yükseltebilmektedir. Bu nedenle yüksek su emme kapasitesinden dolayı Portland çimentolu betonda alkali-silika reaksiyonları oluşmaktadır.

Yapılan çalışmalar sonucunda geopolimer betonun Portland çimentosuna göre alkali-silika reaksiyonlarına karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir [39].

3.1.3.5. Asit etkisi

Geçirimsizliği yüksek betonlar asitli sular ile temas ettiği zaman betonda genleşme etkisi yapan kimyasal reaksiyonlar meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı betonda dayanıklılık problemleri oluşabilmektedir. Bu problemleri ortadan kaldırmak için betonun geçirimsizliğinin düşük olması gerekmektedir. Ayrıca geçirimsizliğin azaltılabilmesi için betonun yüzeyi bitümlü veya reçineli maddeler kullanılarak kaplanabilir. Betonun asit etkisinde kalmasıyla beton yüzeyinde renk değişimleri meydana gelir. Daha sonra betonda çatlaklar oluşur. Böylece çimento matrisi ve agrega taneleri aşınarak betonda kesit kaybına sebep olur. Betondaki dayanım kayıpları asidin türüne göre değişebilmektedir [40].

3.1.4. Geopolimer betonun dayanımı

Beton için önemli olan parametrelerden biri de basınç dayanımıdır. Geopolimer betonda bulunan polimerizasyon ürünlerindeki artış basınç dayanımının da artmasına neden olmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda oluşan geopolimerizasyon ürünleri sıcaklığın yükselmesiyle doğru orantılıdır. Bu sebeple yüksek sıcaklıklarda beton numunelerin basınç dayanımı artmaktadır [35].

Basınç dayanımını arttıran sebeplerden biri de kullanılan puzolanların tane boyutlarıdır. İnce taneli malzemelerin yüzey alanları daha büyük olduğu için kompozitin reaksiyon hızını da artar ve bu durum geopolimer betonun basınç dayanımını artırmaktadır [35].

3.1.4.1. Su miktarı

Kullanılan karışım suyu miktarı geopolimer betonların basınç dayanımını etkilemektedir. Geopolimer betonların işlenebilirliğini arttırabilmek için betona fazladan su

eklenir. Dolayısıyla betonda su-bağlayıcı oranı artmaktadır. Bu da beton dayanımını azaltmaktadır. Su-bağlayıcı oranı yüksek olan geopolimer betonlarda fazladan eklenen suyla paralel olarak basınç dayanımı da azalmaktadır. Fazla sudan dolayı betonun içerisinde bulunan boşluklarda artmaktadır [41].

3.1.4.2. Silisyum dioksit-sodyum oksit oranı

Geopolimer betonun dayanımını etkileyen parametrelerden biri de silisyumdioksit-sodyum oksit oranıdır. Oluşturulan çözeltide silisyumdioksit-sodyum oksit oranı çözeltide çözünen alkali oranının polimerizasyon oranına etkisi de bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı geopolimer betonun basınç dayanımı da etkilenmektedir [43].

3.1.4.3. Donma ve çözülme

Portland çimento ile üretilen betonlara benzer bir şekilde geopolimer betonda da boşluklarda bulunan su don etkisinde donmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla donan su tekrar erimektedir. Donma sırasında suyun genleşme özelliğinden dolayı boşluklardaki suyun hacmi artmaktadır. Bu durumda betonda donma ve çözülme mekanizması sürekli tekrar edebilmektedir. Bu tekrarın sonucunda beton içerisindeki boşluğun hacmi artmakta, su geçirgenliği artmakta, basınç dayanımının da azalmasına neden olmaktadır [35].

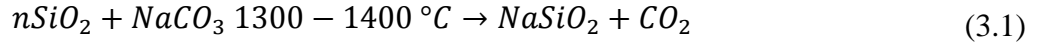
3.1.4.4. Alkali aktivatörler

Sodyum silikat ile sodyum hidroksit birlikte kullanıldığı zaman geopolimer betonun mekaniksel performansı da artmaktadır. Geopolimer betonda bulunan alkali aktivatörlerden betonun basınç dayanımı etkilenmektedir. Benzer şekilde fiziksel ve kimyasal etkilerde betonun durabilitesi etkilenmektedir. Bu nedenle geopolimer beton üretilirken kullanılan alkali aktivatör miktarı önemlidir. Yapılan çalışmalarda sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranının geopolimer betonun basınç dayanımını ve mekanik özelliklerini etkilediği belirtilmiştir [44].

3.1.5. Geopolimerlerin çeşitleri

3.1.5.1. Camsuyu özlü geopolimer

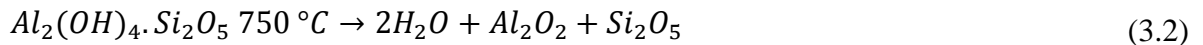
Alkali silikat olarak da tanımlanan, kuartz mineralini oluşturan silikat moleküllerinin alkali tuzlar ile eritilmesi ve suda çözünmesi ile cam suyu oluşturulmaktadır. Bu olay Denklem 3.1’de gösterilmektedir.



Deterjan, diş macunu, yapıştırıcı, korozyon önleyici imalatında kullanılan alkali silikatlar, silika jel, zeolit sentezi gibi malzemeler geopolimer üretiminde kullanılan maddelerdir. Bu malzemeler toz ve sıvı olarak bulunabilmektedir. Sodyum veya potasyum bazlı olması alkali silikatların suda çözünürlüğüne etki etmektedir. Suda çözünürlük geopolimer sentezi için önemlidir. Potasyum bazlı alkali silikatların kullanımı geopolimer betonların özelliklerini iyileştirmektedir [45].

3.1.5.2. Metakaolin tabanlı geopolimer

Kaolin 750 °C’de fırımlandığı zaman dehidratasyona uğramaktadır. Su molekülleri yapıdan uzaklaştığında ise alümina silikat oksitler meydana gelmektedir. Bu maddeye metakaolin denir. Bu Denklem 3.2 ve 3.3’te gösterilmektedir.

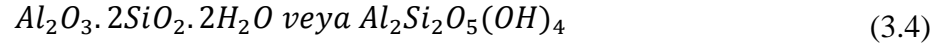


Metakaolin tanecik büyüklüğü kaolin killerinden daha fazladır. Bu durum kil taneciklerinin genleşmesinden dolayıdır [45].

3.1.5.3. Kaolin hidrosodalit tabanlı geopolimer

Alüminyum ve silisyum oksitli bileşiklerin geopolimeri oluşturan bağ yapısına ulaşması için bağ yapma özellikleri iyi bir şekilde sentezlenmelidir. Çünkü kullanılacak malzemenin ne kadar kullanılması gerektiği ve yapılacak ısı işlemler bilinmelidir. Kaolinin

mineral kompozisyonunu elde etmek kolay iken geopolimer sentezi zordur. Kaolin kilinin kimyasal yapısı Denklem 3.4’te gösterilmektedir.



Doğada elde edilen kaolin 3 çeşittir. A tipi kaolinde; %94 kaolin, %6 kuartz ve muskovit bulunmaktadır. B tipi kaolinde; %92 kaolin, %8 montmorillonit, anastaz ve kuartz bulunmaktadır. C tipi kaolinde; %33 kaolin, %66 kuartz muskovit ve profilit bulunmaktadır [45].

3.1.5.4. Kalsiyum tabanlı geopolimer

Kalsiyum esaslı geopolimer alüminyum oksit ve silisyum oksit moleküllerinin reaksiyonu ile meydana gelmektedir. Kalsiyumun suda az çözünmesi sebebiyle geopolimer reaksiyonu düşük hızda oluşmaktadır. Reaksiyon sonucu oluşan ürünün erken dayanımı düşük olmaktadır [45].

3.1.5.5. Uçucu kül tabanlı geopolimer

UK bazlı geopolimerler düşük ısıl iletkenlikli ve hafif olan bir yapı malzemesidir. Bu malzemenin mekanik mukavemet değeri yüksektir [46].

3.1.5.6. Kayaç tabanlı geopolimer

Kil kayaçların geçirimsizliklerinin iyi olması sebebiyle radyoaktif atık depolamada kullanımı gayet uygundur. Radyoaktif atığın depolanmasındaki problem depo edilen yüzeyi delip geçebilme durumudur. Ayrıca Portland çimentolu depo yüzeyleri kolay aşınabilmektedir. Ayrıca portland çimentosunda sızıntılar olarak yer altı sularına karışabilme olayıda söz konusudur. Hatta nükleer santrallerin atıkları da betonun hidrotermal reaksiyonu sebebiyle sürekli ısınma ve nükleer patlamalara neden olmaktadır [45].

Kil kayaçlarının yapısında bulunan feldispatoit ve kuartz yer yüzünde çok fazla bulunan toprak madenlerinde olmasının yanında bu malzemelerin kimyasal potansiyelleri de iyi bilinmemektedir. Farklı türdeki kayaçların asit içerisinde çözünmesiyle bu tip geopolimerler bulunmuştur. Çözünmüş alümino silikat kaynağı kayaçlar daha sonra alkali

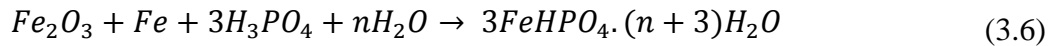
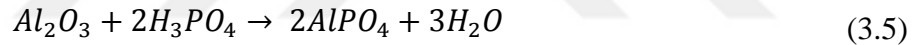
tuz ve silikatın etkisiyle geopolimere dönüşmektedir. Diğer yandan geopolimer beton radyoaktif atıkların ber taraf edilmesi işlemleri için uygun görülmektedir [45].

3.1.5.7. Silika tabanlı geopolimer

Günümüzde silisyum dioksitin kaynağı kuartzın 3-10 µm aralığında öğütülmesi ile elde edilen silis tozu ve çelik üretiminde açığa çıkan silis dumanıdır. Silis tozu seramik yüzey üretiminde kullanılan dolgu malzemesidir. Silis dumanı beton içerisinde puzolan olarak kullanılabilir. Silisyum oksit çok iyi bir puzolan malzemedir. Geopolimer üretiminde silis dumanı kolay bir şekilde aktifleştirilebilir. Silikat ve siloksonatlar içindeki silis partikülleri nano geopolimer üretiminde kullanılmaktadır. Elde edilen geopolimer ile ısı ve yangın dayanımı yüksek olan paslanmaz çelik ve seramik malzemeler üretilebilmektedir [45].

3.1.5.8. Fosfat tabanlı geopolimer

Fosfat tabanlı geopolimer düşük pH'lı ortamda iki veya üç değerlikli metal oksitin ortofosforik asit (H_3PO_4) içinde asit baz reaksiyonlarıyla oluşmaktadır. Denklem 3.5 ve 3.6'da bu reaksiyonlar ifade edilmektedir.



Fosfat esaslı geopolimer diş protezinde kullanılmasına ilave olarak radyoaktif atıkların depolanması içinde de kullanılmaktadır [45].

3.1.5.9. Organik maden tabanlı geopolimer

Organik polimerler ile polisialat geopolimer kullanılarak üç çeşit malzeme elde edilebilmektedir. Hüyük asitin mineraller üzerine yoğunlaşması ile poli organo siloksan ve kerojen elde edilebildiği gibi organik geopolimerleri mineral geopolimerlerle çeşitli işlemler yapılarak organo geopolimerler elde edilir. Organik polimerin inorganik polimere eklenmesi sonucunda malzemenin dayanıklılığı yüksek olmaktadır. Kerojen mikroorganizmaların içerisindeki ölü hücre ve dokuların bozulmasıyla oluşan biopolimerdir. Diğer yandan jeolojik kayaların asitlere karşı olan dayanıklılığı düşüktür. Kerojenin polimerleri içeren ağ yapısı sayesinde asit ve hava şartlarından daha az etkilenen malzemeler üretilebilmektedir [45].

3.2. Bor Atığı

3.2.1. Bor'un tanımı ve atomik özellikleri

Bor ilk kez 4000 yıl önce keşfedilmiş olup doğada bor asidi ve borat olarak bilinen periyodik tabloda B simgesi ile ifade edilen atom numarası 5 olan ametal yapıya sahip 3A grubunda yer almakta olup atom ağırlığı 10.81dir. Yer kürede yaygın olarak boriki kararlı izotop olan (B10 ve B11) olarak bulunmaktadır. B10 izotopunun yer küredeki yüzdesi %19.1-%20.1 arasında değişirken, B11 izotopunun bulunma oranı ise %79.7-%80.9 oranında değişiklik göstermektedir. Şekil 3.2'de deney bünyesinde kullanılan bor atığı malzemesi gösterilmiştir, bor atığına ait atomik özellikler ise Tablo 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Deney bünyesinde kullanılan bor atığı

Tablo 3.1 : Bor elementinin atomik özellikleri.

Özellik	Değer
Atom Çapı	1,17 Å
Atom Hacmi	4,6 cm ³ /mol
Kristal Yapısı	Rombohedral
Elektron Konfigürasyonu	1s ² 2s ² p ¹
İyonik Çapı	0,23 Å
Elektron Sayısı (Yüksüz)	5
Nötron Sayısı	6
Proton Sayısı	5
Valans Elektronları	2s ² p ¹

3.2.2. Bor elementinin fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikleri açısından bakıldığında oksijenle tepkimeye girmesi sonucu oluşan sert yapılı, ısıya dayanıklı, elektriği iyi ileten, gama ve X ışınlarına karşı geçirgenliği düşük seviyededir. Doğada saf halde bulunmayan bu elementi çeşitli metal ve ametal elementler ile birleşerek oluşturmuş şekilde bulabilmek mümkündür. Bu sayede bir çok bor birleşimi endüstriyel olarak farklı birimlerde kullanılmaktadır [47]. Ayrıca Tablo 3.2’de bor elementinin fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2 : Bor elementinin fiziksel özellikleri [47].

Özellik	Değer
Atom Kütlesi	10.811
Kaynama Noktası	4.002°C
Termal Genleşme Katsayısı	0,0000083 cm/cm/°C
Termal	0,274 W/cmK
Yoğunluk	2,34 g/cc
Görünüşü	Sarı-Kahverengi Ametal Kristal
Bulk	320/GPA
Sertlik	Mohs:9.3 / Vickers: 49000MN/m
Füzyon Entalpisi	22,18 kJ/mol
Buharlaşma Isısı	489,7 kJ/mol
Ergime Noktası	2300°C
Molar Hacmi	4,68 cm ³ /mol
Fiziksel Durumu	(20°C&1atm):Katı

3.2.3. Bor elementinin kimyasal özellikleri

Bor elementinin kimyasal özellikleri oluşumuna ve tane çapına bağlıdır. Amorf yapıdaki bor kolay ve ani bir şekilde reaksiyon oluştururken, kristal haldeki bor kolay bir şekilde tepkimeye girmez. Bor yüksek sıcaklık altında su ile tepkimeye girerek borik asit gibi konsantresi yüksek ürünler meydana getirir. Yoğunluk ve sıcaklık değerleri dikkate alındığında yavaş ve patlayıcı özellik gösterir ve temel ürün olarak borik asit ve yan ürünleri oluşur [47]. Tablo 3.3’de bor elementinin kimyasal özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 3.3: Bor elementinin kimyasal özellikleri [47].

Özellik	Değer
Elektrokimyasal Eşdeğer	0.1344 g/amp-hr
Valans Elektron Potansiyeli (-eV)	190
Elektronegativite (Pauling)	2.04
Füzyon Isısı	50.2 kJ/mol
İyonizasyon Potansiyeli	Birinci:8.298 İkinci:25.154 Üçüncü:37.93

3.2.4. Ticari öneme sahip bor mineralleri ve özellikleri

Ticari savaşlar, değişen dünya düzeni, pandeminin etkisiyle birlikte ticaret olarak ön görülen bozulmalar dünya ekonomisini büyük oranda sekteye uğratmıştır.2019 yılında Global Bor pazarına hükmeden ana yüklenicilere bakıldığında Çin %4,9 , ABD %4,9 , Brezilya ise %12,4 oranında ekonomik büyüme kaydetmiştir. Bir diğer önemli bor tüketicisi konumunda bulunan Hindistan ise bu alanda %20,1 oranında ekonomik büyüme kaydetmiştir.

Dünya piyasalarındaki dalgalanmalar ve pandeminin etkisiyle birlikte azalan sanayi üretimi göz önüne alındığında küresel olarak bor pazarında bir önceki yıllar ile kıyaslandığında talep azalışı yaşanmıştır. Özellikle Çin’de ortaya çıkan ve tüm dünyayı etkisi altına alan pandeminin etkileriyle bir önceki yıllara göre azalış göstererek 2020 yılında 2019 ile karşılaştırıldığında %16 oranında bir azalış meydana gelmiştir.

Bor minareli farklı teknikler kullanılarak yenilikçi malzemelere dönüştürülmesiyle birlikte farklı sektörlerde kullanılmaktadır [49]. Bor madeninin geleneksel üründen ileri teknolojik ürüne geçiş skalası Tablo 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Bor madeninin geleneksel üründen ileri teknolojik ürüne geçiş skalası [49].

Ham Maddeler	Ürünler	Nihayi Sektörler
Bor Cevherleri	Kolamit,Tinkal,Üleksit	
Konsantre Bor Ürünleri	Konsantre , Kolemanit , Konsantre Üleksit	Cam,Seramik, Tarım,Demir-Çelik
Rafine Bor Ürünleri	Etibor-48,Borik Asit, Susuz Boraks , Etidot -67, ÇinkoBorat	Cam, Tarım , Seramik , Enerji,Alev Geciktirici
Yüksek Teknolojik Ürünler	Bor Karbür , Bor Nitrür, Ferrobor	Nükleer Sanayi , Elektrik - Elektronik , Bor elyaf , Savunma Sanayi , Mıknatıs

Bor ürünler genel olarak cam, seramik, tarım, temizlik, tekstil, yalıtım, metalurji, sağlık, enerji ve diğer sektörlerde kullanılmaktadır. Cam sanayisinde bor borosilikatli cam,tekstil tipi ve izolasyon içeren cam elyaf üretiminde yoğun olarak kullanılmaktadır. Cam ürünleri bünyesinde bulundurdukları bor sayesinde ısıya ve kimyasallara karşı daha dayanıklı bir yapıya sahip olmaktadır. Bor minerali, diğer sektörlerle karşılaştırıldığında en fazla tüketildiği alan cam sektörüdür [65].

Seramik sanayisinde bor üretilen malzemenin sırlanması ve porselen emayelerinde üretime katılması ile birlikte düşük miktarda seramik karo kompozisyon ürünlerin içeriklerinde de kullanılmaktadır. Seramik bünyesinde bor ve türevlerinin kullanımı ile birlikte üretilen ürünlerin yapısında fiziksel darbelere ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı bir yapı ortaya çıkmaktadır. Seramiğe boyama aşamasında boyanın seramik bünyesini daha iyi tutması ve parlak renkli canlı bir görüntünün elde edilmesine yardımcı olmaktadır [65].

Seramik sanayinde bor kullanımı eski kullanım alanı iken, hali hazırda cam sanayisinden sonra ikinci en büyük pazar payını oluşturmaktadır. Bor tarım sanayisinde bitkilerin alması gereken bazı mineraller içermektedir. Bu mineraller bitkinin gelişim safhasında kök oluşumunda büyük katkı vermektedir. Bor içerikli gübreler kullanıldığında bitkiler topraktan daha verimli bir şekilde su ve mineral alabilmekte bu durum bitkinin gelişiminde önemli bir yapı taşı oluşturmaktadır. Kök gelişimine ilaveten üretilen şekerin yaprak, kök ve meyvelere taşınmasına katkı sağlamaktadır [65].

Tarım ürünlerinde ürün verimliliğini artırılması ve bitkinin gelişimi açısından bor içeren gübrelerin kullanımı önemli bir yer tutmaktadır. Ülkemizde Eti Maden bünyesinde üretilen bor içerikli EtiDot-67 (Disodyum Oktaborat Tetrahidrat) gübresi bulunmaktadır.

EtiDot-67 diğ er bor gbreleriyle kıyaslandığı nda daha fazla bor içeriğine ve yüksek düzeyde çznrlğ e sahiptir [65].

Temizlik sanayinde bor kullanımını hızlı bir geliş im göstermiştir. İlk olarak dünya genelinde etkili olan COVID-19 pandemisinin ortaya çıkmasıyla birlikte el dezenfeksiyonuna olan ihtiyaç artmış bu ihtiyaç doğ rultusunda Borel olarak adlandırılan bor katkılı el dezenfektanı üretilerek hızlı bir şekilde oluş an ihtiyaç karşı lanmıştır. Üretilen bu dezenfektanın muhteviyatında bor, etil alkol , gliserin, aloe vera, ç ay ağ acı yağı ve lavanta yağı iç ermektedir. Piyasada bulunan diğ er dezenfektanlar ile karşı laştırıldığında el kuruması ve el ç atlaması problemine karşı daha etkili çözümler sunmaktadır. Borel elleri mikrop ve bakterilerin etkilerine karşı korurken içeriğ inde bulunan esans yağ ları ile elde güzel bir koku bırakır. Dünya Sağ lık Örgütü %65 st etil alkol iç eren rnlerin COVID-19 virüsüne karşı etkili olduğ unu aç ıklamıştır. Bu bağ lamda bakıldığında Borel bünyesinde %70 ve üzerinde etil alkol barındırmaktadır [48].

Temizlik sanayinde bor iç erikli bir diğ er ürün ise Boron deterjanlarıdır. Boron otomatik ç amasır makinesi kullanılmak üzeri üretilen muhteviyatında Boraks, Soda, Bitkisel Sabun ve Aktif Oksijen kaynağı ham maddeler bulunmaktadır. Boron diğ er emsalleri ile karşı laştırıldığında petrol türevi madde ve fosfat iç ermemektedir. Bor alerjik özellik gösteren parfüm iç ermez, kireç çözücü etkiye sahiptir, ç amasır ları yumuş atma zelliğ ine de sahiptir [48].

Demir Ç elik sanayisinde bor geri dönüş m malzemesi olarak hurda malzemelerin curuf olarak toz haline getirilmesi iş leminde karşı laş ılan zorlukları aş mak için kullanılır. Sıkıştırılarak curuf haline getirilen ç elik malzemenin kompakt olarak dönüş örmeye yardımcı olur. Bor rnleri kullanmak oluş turulan münferit yapıdaki curuf insan sağ lığ ına karşı zarar vermez ve curuf malzemesinin depolanmasını kolaylaş tirarak tasarruf edilmesine yardımcı olur bu durum maliyetlerin azalmasına yardımcı olur [65].

3.2.5. Dünyada bor

Dünyadaki önemli bor yatakları dört ayrı bölgede toplanmaktadır. Dünya genelinde tahmini olarak bilinen bor rezervleri 4,5 milyar ton olarak tahmin edilmektedir. Tablo 3.5’de ülkelere göre bor rezervi miktarları gösterilmiştir. En fazla ülkemizde bor rezervi bulunmaktadır [48].

Tablo 3.5: Ülkelere göre bor rezervi miktarları [50].

Ülkeler	Bor Rezervleri
TÜRKİYE	%73
ABD	%6
RUSYA	%8
KAZAKİSTAN	%1
ÇİN	%3
ŞİLİ	%3
PERU	%2
BOLİVYA	%1
ARJANTİN	%1
SİRBİSTAN	%2

3.2.6. Dünyada sektörel bor dağılımı

2020 yılında dünyada bor tüketimi pandemi ve ekonomik nedenlerden dolayı geçmiş yıllara göre azalış göstererek yıllık bazda 2,65 milyon ton seviyede gerçekleşmiştir. 2020 verileri incelendiğinde sektörel olarak dünya bor tüketiminin %48 cam sanayinde (borosilikat camlar %22, cam yünü %15, cam elyafı %8 TFT-LCD %3), tarımda %15, seramik-frit %15, temizlik ve deterjan sektörlerinde %3 olup bu durum bor tüketim sektörünün %81'ini oluşturmaktadır. Tablo 3.6'da dünyada bor tüketiminin sektörel dağılımı gösterilmektedir [65].

Tablo 3.6: Dünyada bor tüketiminin sektörel dağılımı [50].

Sektörler	Yüzdeler
Cam	%48
Tarım	%15
Seramik	%15
Deterjan	%3
Diğer	%19

3.2.7. Türkiyede bor

Dünyada %73 oran ile en büyük bor rezervine (3,3 milyar ton) sahip olan ülke Türkiye'dir. Dünyada en yüksek oranda rafine bor üretimini gerçekleştiren ülke Türkiye'dir. Türkiye'de bulunan bor yatakları rezerv açısından önemli olmakla birlikte yıllık tüketim yaklaşık 4 milyon Ton (+/-%10) olduğu tahmin edilmekte olup hali hazırda ülkemizin mevcut rezerv kapasitesinin 1.000 yıl yetecek olduğu öngörülmektedir. Türkiye'de hesaplanan değerler göz önüne alındığında yaklaşık olarak 700 yıl tek başına Dünya'nın ihtiyacı olan bor rezervi karşılayacak düzeydedir. Dünya üzerinde bulunan diğer rezervlerde Dünya bor ihtiyacını 300-400 yıl karşılayacağı ön görülmektedir. Türkiye'deki bor yatakları Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Bursa-Kestelek, Balıkesir-Bigadiç'de bulunmaktadır. Ülkemizde üretilen rafine bor ürünlerinin %95'i ihraç edilmektedir. Türkiye ihraç ettiği borun %1 Afrika , %29 Avrupa , %16 Kuzey ve Güney Amerika ,%1 Orta Doğu , %53 Asya bölgelerine göndermektedir [50].

3.3. Yüksek Fırın Cürufu

3.3.1. Yüksek fırın cürufunun özellikleri

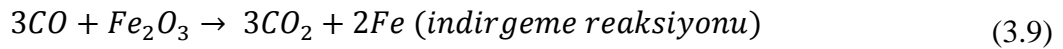
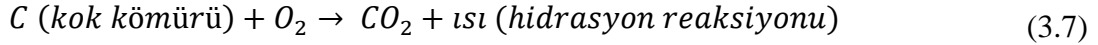
Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik üretim fabrikalarında demirin üretilmesi sırasında ortaya çıkan alternatif bir üründür. Demir ocağından çıkarılan demir madeni saf demir olarak bulunmaktadır. Ocaktan çıkarılan demir cevherinin muhteviyatına bakıldığında demir oksit ile beraberinde alüminyum, kükürt ve demir madeni harici bir çok farklı maden içermektedir. Demiri saf hale getirmek için yüksek sıcaklıklı fırınlar kullanılarak ayrıştırılır. Kireç taşı bu ayrışma sürecini destekleyici bir madde olarak görev alır. Kömür gerekli olan ısının sağlanmasında katalizör görevi üstlenmektedir [51].

Devamlı olarak hammadde takviyesi yapılan yüksek fırınlarda sıcaklık 1500-1600°C sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Bu ısıl işlem sonucu oluşan atık cüruf fırının üst kısmında, saf demir ise fırının alt kısmında ise pik demir olarak toplanmaktadır. Fırında oluşan iki farklı ürün birbirinden ayrı bir şekilde tahliye edilir. YFC tahliye işlemi iki ürünün ayrışma ısısı korunarak yapılıp kalan pik demir üretilecek ürünün durumuna göre soğutma işlemi uygulanarak fırından tahliye edilir [51].

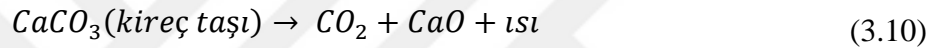
YFC soğutma işlemlerine göre üç ayrı gruba ayrılmakta olup bunlar havada soğutma, gençleştirme, granülasyon olarak sınıflandırılır.

3.3.2. Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Demir ocağından çıkan demir madenin pik demir haline getirmek için demir ocağından çıkarılan madenden demir dışı maddeleri ve demir bünyesinde bulunan oksijeni ayırmak esastır. Bu doğrultuda fırında aşağıda belirtilen reaksiyonlar oluşturulur. Demir oksitten oksijenin ayrılması reaksiyonları Denklem 3.7, 3.8 ve 3.9'da ifade edilmektedir.[52]



Silisin demir cevherinden uzaklaştırılma reaksiyonları ise Denklem 3.10 ve Denklem 3.11'de açıklanmaktadır.



3.3.3. Yüksek fırın cürufunun taze betona etkileri

3.3.3.1. İşlenebilirlik

YFC içeren betonun işlenebilirliğini gözle görülebilir şekilde arttırmaktadır. YFC'nin tane yapısı köşegen yapıda olsa da camsı, pürüzsüz ve düşük özgül ağırlığı ile geleneksel portland çimentolarıyla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar vermektedir [52].

3.3.3.2. Terleme

Terleme beton döküldükten sonra ortaya çıkan hidrasyon ısısayesinde suyun yukarı yönlü hareketidir. Terlemeyi etkileyen etmenler; bağlayıcı maddenin yüzdesi, bağlayıcı maddenin inceliği, ince malzeme bulunma yüzdesi, beton bünyesinde mevcut hava içeriği olarak sayılabilir. Yüksek fırın cürufu katkılı betonlar geleneksel portland çimentosu içeren betonlar ile karşılaştırıldığında hidrasyon reaksiyonu için daha az suya ihtiyaç duymaktadırlar. Bunun sonucu olarak beton bünyesine katılan su oranı azalmakta ve terleme reaksiyonları sonucunda betondaki bozulmalar azalmaktadır [52,53].

3.3.3.3. Hidratasyon ısısı

YFC beton bünyesine katılımı ile oluşturduğu en büyük etki hidratasyon ısısını düşürmesidir. Büyük yapıların (baraj, köprü, gökdelen, vb.) üretim safhalarında kütle beton dökümleri sırasında hidratasyon ısısından kaynaklanan termal (ısı) gerilmeler oluşmaktadır. Sıcak hava koşullarında kütle betonları dökümü sırasında hidratasyon ısısından kaynaklanan betonda yüksek sıcaklık farkları oluşmakta olup bu durum betonda geri dönülemez ısı çatlıklarına sebep olmaktadır. Bu durumlar göz önüne alındığında yüksek fırın cürufu katkılı çimentoların kütle betonlarında kullanımı önemli bir sorunu iyileştirmektedir [52].

3.3.3.4. Priz süresi

YFC katkılı çimentolar geleneksel portland çimentolarına göre hidratasyon ısısı daha düşük olduğundan beton içeriğindeki birleşenler daha yavaş reaksiyona girmekte bu durumda priz süresini arttırmaktadır. Yüksek sıcaklığa sahip ortamlarda beton hızlı priz almakta yüksek fırın cürufu katkılı betonlar ise daha yavaş priz aldığından bu tür havalarda beton dökümüne olanak sağlanmaktadır. Kış aylarında ise bu durumdan dolayı priz süresi geciktiğinden priz süresini kısaltmak için priz hızlandırıcı katkıları beton bünyesinde katılmaktadır [52,53].

3.3.3.5. Hava içeriği

YFC katkılı çimentolar geleneksel portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha yüksek oranda C-S-H jeli oluşturulur. Bundan dolayı betonda geçirimsizlik artmakta, beton bünyesindeki hava oranı düşerek betonun dayanımını arttırmaktadır. Beton bünyesinde belli oranlarda hava boşluğu bulunması gerektiğinde (donma – çözünme vb.) hava sürükleyici katkı maddeleri kullanımına gidilmektedir.

3.3.4. Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş betona etkileri

3.3.4.1. İleri yaş basınç dayanımı

YFC içeren betonlar geleneksel portland çimentolu betonlar ile karşılaştırıldığında 28 günlük basınç dayanımı değerleri artışı 150 güne kadar ulaşabilmesi mümkün olmaktadır. 28 günlük basınç deneylerinde ise geleneksel portland çimentolu betonlar daha iyi sonuçlar vermekte ilerleyen süreçte YFC'li betonlarda önemli dayanım artışı gösterebilmektedir. Bu durumun asıl sebebini yüksek fırın cürufu içeriğinin Portland çimentosu ile su arasında

oluşan reaksiyon sonucu ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ ürünü ile tepkimeye girip betonun dayanımını arttıran C-S-H jelinin oluşumunu sağlamasıdır [52,53].

3.3.4.2. Erken yaş dayanımı

YFC katkılı betonlar geleneksel portland çimentolu betonlar ile karşılaştırıldığında mevcut yapısındaki klinker oranı daha az olduğundan cüruf ile C-S-H bağlarının oluşumu daha geç gerçekleştiğinden erken yaş dayanımı geleneksel portland çimentosuna göre daha düşüktür. Erken yaş dayanımı prefabrike ve tünel kalıp üretim sistemlerinde istenilen bir özelliktir. Bu durumu sağlayabilmek için uygun incelikte cüruf içeriği ve priz hızlandırıcı katkıları kullanılarak aşılabılır [52].

3.3.4.3. Çekme dayanımı

YFC katkılı betonlar geleneksel portland çimentosu ile karşılaştırıldığında çekme dayanımını arttırmaktadır. Bu artış ileri yaş dayanımı ile birlikte artan bir yapı göstermektedir [52,53].

3.3.4.4. Geçirgenlik

YFC katkılı betonlar geleneksel portland çimentosu ile karşılaştırıldığında betonun dayanımını arttıran C-S-H jeli daha yüksek oranda oluşur. Yüksek fırın cürufu içeren çimento su ile oluşturduğu hidratasyon reaksiyonu iki aşamadan oluşmaktadır. Bunun sonucu beton geleneksel portland çimentosu ile oluşan betona göre daha az boşluklu ve daha yoğun bir yapıda olmaktadır. Cüruf katkısı arttıkça bu geçirgenlik daha da azalmaktadır. Bu durum kalsiyum hidroksit ve etrenjit miktarını azaltmaktadır [52,54].

3.3.4.5. Rötire ve sünme

Rötire taze beton bünyesinde bulunan suyun hidratasyon ile birlikte kaybı ve kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan beton kütlelerinin hacimsel olarak değişimi olarak bilinir. Rötrenin beş çeşidi (plastik rötire, termik rötire, bünyesel rötire, otojen rötire ve hidrolik rötire) bulunmaktadır. Rötreyi etkileyen faktörler bağlayıcı malzemenin yapısı, ince malzeme miktarı, su / bağlayıcı oranı ve sıcaklık olarak sıralanmaktadır. Sünme betonun sabit yükler altında deformasyona uğraması durumudur. YFC katkılı betonlar geleneksel portland çimentosu ile karşılaştırıldığında sünme deformasyonu daha düşüktür [53]

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Bor Atığı

Dünyadaki bor rezervinin yaklaşık % 73'ü Türkiye'de bulunmaktadır. Bu bağlamda, rezerv kapasitesi bu denli yüksek olan bir malzemenin üretimi aşamasında açığa çıkan atık malzemelerin değerlendirilmesi sürdürülebilir bir çevre açısından önemlidir. Bu çalışmada, Türkiye'nin en büyük bor üretim tesisi olan Eskişehir Kırka Eti Maden işletmesinden çıkarılan bor atığı tez çalışmasında kullanılan atık borun dekantör santrifüj kili numunesi XRD analizinde Dolomit, Tinkal, az miktarda Smectite bulunmuştur. Atık maddeden ayrıştırılma işleminden sonra bor içeriği kristal haline gelebilmektedir. Bir sonraki aşamada kurutuculara gönderilerek kurutulan bor (Susuz Boraks) satışa hazır hale getirilerek kullanılmıştır. Bu çalışma bünyesinde kullanılan bor atığı Şekil 4.1'de gösterilmiş olup bor atığına ait kimyasal özellikler ise Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Bor atığı

Tablo 4.1: Bor atığının kimyasal içeriği

Dekantör Santrifüj Kili	%
B ₂ O ₃	10,16
SiO ₃	15,38
MgO	17,50
CaO	15,42
Na ₂ O	2,43
Al ₂ O ₃	0,78
SrO	1,15
K ₂ O	0,57
F ₂ O ₃	0,33
SO ₂	0,32

4.2. Yüksek fırın curufu

YFC demir-çelik üretim fabrikalarında demirin üretilmesi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Bu malzeme geopolimer beton üretiminde kullanılarak, demir-çelik üretimi sırasında ortaya çıkan çevreye zararlı ürünlerin çevreye karşı zararlarının azaltılması amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan YFC Karabük’de faaliyet gösteren Karçimsa işletmesinden temin edilmiştir. Temin edilen YFC’nin özgül yüzeyi 3996 cm²/g ve özgül ağırlığı 2.86 g/cm³’tür. Çalışmada kullanılan YFC Şekil 4.2’de gösterilmiştir ve YFC’ye ait kimyasal özellikler ise Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.

Bileşim (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
YFC	32.47	9.94	1.25	32.45	9.31	0.82
Bileşim (%)	S ⁻²	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Cl ⁻
YFC	0.33	0.31	0.85	1.16	3.51	0.015



Şekil 4.2: Deney bünyesinde kullanılan yüksek fırın cürufu

4.3. Agrega

Çalışmada kullanılan agrega DEM mıcır ve kırma taş işletmesinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan agreganın fiziksel özellikleri incelendiğinde, tane boyutu 0-5 mm oluşmakta olup yoğunluk değeri 2.65, su emme yüzdesi ise % 2.6 olarak hesaplanmıştır. Beton bünyesinde bulunan en büyük dane çapı ise 5 mm olarak belirlenmiştir. Agreganın dane dağılım grafiği TS 802 (2009)'da belirtilen standart değerlere göre belirlenmiştir. Deneylede kullanılacak agregalar 0.125, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 6, 8 mm boyutlarına sahip eleklerden geçirilmiştir. Yapılan uygulamalar Şekil 4.3'de gösterilmiş olup granülometri sonuçları araştırma bulguları ve tartışma kısmında ayrıntılı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.3 : Çalışma bünyesinde kullanılan agrega ve eleme işlemi

4.4. Aktivatör

Bu çalışma kapsamında aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Çalışma bünyesinde, 3 farklı (5 M, 10 M , 15 M) konsantrasyona sahip NaOH çözeltileri hazırlanmıştır. 5 M, 10 M , 15 M ,olarak hazırlanan karışımlar sırasıyla 200 gr, 400 gr ,600 gr (NaOH) 1000 gr şebeke suyu ilave edilerek şebeke suyu içerisinde sodyum hidroksitin çözülmesi sağlanmıştır. Bir sonraki aşamada 2000 ml kadar sodyum silikat (Na_2SiO_3) ilave edilerek, hacimce $\frac{1}{2}$ oranı karışımda oluşturulmuştur. Bu karışımlar elde edildikten sonra 1 saat dinlendirilerek karışımların içerisinde belirlenen miktarlarda alınan aktivatör ile numuneler hazırlanmıştır. 15 M olarak hazırlanan karışımda numunenin dökümü esnasında hızlı priz alma olaya gerçekleşmiş olup, bu durumu aşabilmek için 15 M hazırlanan karışıma %1 oranında priz geciktirici katkı maddesi ilave edilmiştir. Kullanılan aktivatör bileşenlerinin fiziksel özellikleri Tablo 4.3’de belirtilmiş olup karışımların hazırlanma aşamaları Şekil 4.4’de görülmektedir.

Tablo 4.3 : Kullanılan aktivatör bileşenlerinin fiziksel özellikleri.

Aktivatörler	Molekül Formülü	Renk	Koku	Fiziksel Hali	Yoğunluğu	Molekül Ağırlığı(g/mol)
Sodyum silikat	Na_2SiO_3	Beyaz	Kokusuz	Sıvı	1.36	184.04
Sodyum hidroksit	NaOH	Beyaz	Kokusuz	Katı	2.13	40.00



Şekil 4.4 : Karışımların hazırlanma aşamaları.

4.5. Karışım suyu

Çalışma bünyesinde kullanılacak su, numunelerin yapısına zarar vermemesi ve üretilen geopolimerin yapısını bozmayacak şekilde olmalıdır. Bu kriterler göz önüne alındığında şehir şebeke suyunun kullanılmasında bir sakınca olmadığından bu çalışmada karma suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karışımda kullanılan su şehir şebeke suyu olup TS-EN 1008 standardına uygundur.

4.6. Priz Geciktirici

Çalışma bünyesinde 15M olarak üretilen geopolimer numunelerin hızlı priz aldığı ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Belirlenen bu sorunu ortadan kaldırmak için çalışma bünyesinde Sika priz geciktirici kullanılmıştır.

4.7. Aletler

4.7.1 Elekler

Çalışmada kullanılan elekler Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen elek takımı agreganın tane boyutunu elde etmek için kullanılmıştır. Elekler kare gözlü olup TS 802 standardına uygundur.



Şekil 4.5: Çalışmada Kullanılan Elekler

4.7.2 Çelik Kalıplar

Bu çalışmada eğilme dayanımı deneyi için 4x4x16 cm'lik kiriş kalıplar kullanılmıştır. 5x5x5 cm'lik küp numuneler ise basınç dayanımı, UVP ve yüksek sıcaklık deneylerini yapmak için kullanılmıştır. Şekil 4.6'da deneyde kullanılan kalıplar gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Çalışmada Kullanılan Küp ve Kiriş Kalıplar

4.7.3 Etüv

Hazırlanan numunelerin kurutulması ve birim hacim ağırlıklarının tespit edilmesi için Şekil 4.7'de gösterilen etüv kullanılmıştır. Deneyde kullanılan etüv TS 5965 standardına uygundur.



Şekil 4.7: Etüv

4.7.4 Karışım Mikseri

Deneyleerde Yüksel Kaya Makina markalı, çeşitli hızlarda karıştırma özelliklerine sahip beton karışım mikseri geopolimer harç örneklerini üretmek için kullanılmıştır. Şekil 4.8’de karışım mikseri gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Karışım Mikseri

4.7.5 Beton Basınç Presi

Deneyleerde ELE marka TS EN 196-1 standardına uygun basınç presini kullanılmıştır. Şekil 4.9’de basınç test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Basınç test cihazı

4.7.6 Eğilme Deney Aleti

Eğilme deneyi 4x4x16 cm kiriş numuneler üzerinde uygulanmıştır. Numunelerin eğilme dayanımlarının tespitinde TS EN 1015-11 standartına uygun ELE markalı eğilme test cihazı kullanılmış olup Şekil 4.10' da verilmiştir.



Şekil 4.10 : Eğilme Test Cihazı

4.7.7 Yüksek Sıcaklık Fırını

Çalışmada geopolimer numuneler yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi için seramik fırında 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve numuneler yüksek sıcaklıklarda 1 saat bekletilmiş ve daha sonra soğumaya bırakılmışlardır. Deneyde kullanılan yüksek sıcaklık fırını TS EN 30-1-1+A1 Standardına uygun olup Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11: Yüksek Sıcaklık Fırını

4.7.8 Ultrases Geçiş Hızı

Ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 4.12’de gösterilen Pund-It markalı cihaz kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12 : UVP cihazı

4.7.9 SEM Cihazı

SEM analizi için İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezinde bulunan EVO 40 marka SEM cihazı kullanılmış olup, deneylerde kullanılan SEM cihazı Şekil 4.13’ de verilmiştir.



Şekil 4.13 : SEM cihazı

4.7.10 XRD Cihazı

XRD analizi için İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezinde bulunan RİGAKU markalı XRD cihazı kullanılmış olup, deneylerde kullanılan cihaz Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14 : XRD cihazı

4.7.11 Vicat Aleti

Taze harç deneylerinin priz sürelerini tespit etmek için TS EN 196-3[53] standardına uygun ELE markalı Vicat aleti kullanılarak priz başlama ve sona erme süreleri tayin edilmiştir. Deneylerde kullanılan vicat aleti Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15: Vicat aleti

4.8. Harçların Karışım Oranlarının Belirlenmesi

4.8.1. Karışım oranları ve döküm planı

Hazırlanan karışımlarda aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. 5 M, 10 M ve 15 M konsantrasyonlu NaOH çözeltisi hazırlanıp üzerine Na₂SiO₃ ilave edilmiştir. NaOH/Na₂SiO₃=1/2 oranında kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak YFC kullanılmış olup karışım içerisine atık bor %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında YFC yerine kullanılmıştır. Sertleşmiş geopolimer harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, SEM ve XRD deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taze harç numunelerinin priz başlama ve priz sona erme süreleri tespit edilmiştir. Ayrıca 10 M hazırlanan serilerin yüksek sıcaklık (300°C, 600°C ve 900°C) altındaki basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. 5M, 10M ve 15M hazırlanan karışım numunelerinin içerik oranları Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4: 5 M, 10 M ve 15 M için hazırlanan karışım serileri

Karışımlar	Bor atığı (g)	YFC (g)	Agrega (0-5mm)	NaOH(g)	Na ₂ SiO ₃ (g)
0B-100YFC	0	700	1400	93,33	186,67
3B-97YFC	21	679	1400	93,33	186,67
6B-94YFC	42	658	1400	93,33	186,67
9B-91YFC	63	637	1400	93,33	186,67
12B -88 YFC	84	616	1400	93,33	186,67
15B -85 YFC	105	595	1400	93,33	186,67

4.8.2 Geopolimer Harç Numunelerin Hazırlanması

Yapılan ön deneylerin sonucunda bor atığı ve YFC numunelerini aktive etmek amacı ile 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip alkali çözeltinin aktivatör/bağlayıcı oranını öncelikle 0.35, 0.40 ve 0.45 oranlarında dökülmesi planlanmış olup ancak 0.35 oranında dökülen numunelerde kıvam sorunu olduğundan, 0.45 oranında dökülen numunelerde ise kalıplara yerleştirme sırasında fazla işlenebilirlikten dolayı akma olduğundan, 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranına sahip olan numunelerin bu çalışma kapsamında üretilerek kullanılmasına karar verilmiştir.

Karışım hazırlama aşamasına geçilmeden önce öğütülmüş bor atığı 0.125 mm elekten geçirilerek elenmiştir. Aktivatör olarak NaOH/Na₂SiO₃: 1/2 oranında karışımın bünyesine dahil edilmiştir. Harçlar hazırlanırken 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip alkali çözelti şeklinde hazırlanıp 1 saat boyunca dinlenmeye bırakılmıştır. Bor atığı, YFC ve agrega belirlenen miktarlarda hazırlanarak aktivatörler dahil edilerek homojen dağılım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Karıştırılan harçlar önceden yağlanmış durumda olan kalıplara yerleştirilip şişleme çubuğu ile sıkıştırılarak üst yüzeyi mala ile düzeltilmiştir. Hazırlanan numunelerin ilk olarak mukavemet gelişimlerini hızlandırmak için 90 °C de 24 saat süre ile etüvde ısıtılmaya bırakılmıştır. Bu süre sonunda numuneler kalıplardan çıkarılarak 7. ve 28. gün'e kadar oda koşullarında bekletilerek kür edilmiştir. Şekil 4.5'de numune kalıpları, Şekil 4.6'da numunenin kalıplara dökülme işlemi, Şekil 4.7'de numunelerin kür işlemi gösterilmiştir.

Numuneler kalıplara yerleştirilirken şişleme çubuğu ile sıkıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra numunelerin yüzeyi mala yardımıyla düzeltilmiştir. Daha sonra kalıplar fırına yerleştirilerek 24 saat 90 °C bekletilmiş ve firndan çıkarılan numuneler kalıplardan da çıkarılmıştır. Şekil 4.8'de geopolimer harç numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.16: Harç numunelerinin kalıba yerleştirilmesi ve kür edilmesi



Şekil 4.17: Çalışmada kullanılan boş numune kalıpları



Şekil 4.18: Kullanılan numunenin kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 4.19: Kullanılan numunelerin etüve bırakılması.

4.8.3 Taze Geopolimer harç numuneler üzerinde yapılan deneyler

4.8.3.1 Priz süresi tayin deneyi

Çalışma kapsamında numunelerin priz başlama ve bitiş sürelerini tayin etmek için hazırlanan her bir geopolimer harç örneklerinin öncelikle priz başlama ve priz sonu süreleri TS EN 196-3[53] standardına uygun olarak vikat cihazı ile ölçülmüştür.

Bu deneyin yapılabilmesi için hazırlanan her bir seriden 500 g harç karışımı alınarak vicat halkasına yerleştirilmiştir. Vicat aleti kullanılarak priz başlangıç süreci işlemine geçmeden önce harç numunelerinin üst yüzeyi düzeltilmiştir. Vicat aletinde priz başlangıç süresini belirlemek için iğne ucu numune bünyesine belirli aralıklarla (5-10 dak) batırarak deney yapılmıştır. Vicat aletinin ucu numune içinde tabana 3-5 mm uzaklıkta kaldığında priz başlangıç süresinin başladığı kabul edilmiştir.

Priz sona erme sürecinin belirlenebilmesi için vicat halkasının yeri sürekli değiştirilmiştir. Vicat aletinin ucu numune içerisine 1 mm batıncaya veya hiç batmayıncaya kadar geçen süre priz sona erme süresi olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.8’de priz süresi tayini deneyinin yapılışı gösterilmektedir.



Şekil 4.20: Vicat aleti kullanılarak priz süresinin belirlenmesi

4.8.4 Sertleşmiş geopolimer harç numuneler üzerinde yapılan deneyler

4.8.4.1 Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımını belirlemek amacı ile 5×5×5 cm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Üretilen basınç numuneleri üzerinde 7. ve 28. günün sonunda basınç dayanımı

testi gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harç örneklerinin basınç dayanımı tayini TS EN 196-1 [56] standardına uygun bir şekilde tamamlanmıştır. Her bir seri için üçer adet numune hazırlanmış ve elde edilen sonuçların standart sapmaları alınarak ortalama sonuçlar tabloya işlenmiştir.

3000 kN basınç kapasitesine sahip olan basınç aleti deneyde kullanılmıştır. Basınç dayanımı için numuneler kırılmadan önce küp numunelerin pürüzsüz yüzeyine denk gelecek şekilde basınç aletine yerleştirilerek 0,9 kN/s yükleme hızında numuneler basınç dayanımı tespiti için kırılmıştır. Şekil 4.9'da basınç dayanımı test cihazı ve basınç değerlerinin okunması hali gösterilmektedir.



Şekil 4.21: Basınç test cihazı ve basınç değerlerinin okunması.

4.8.4.2 Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı tespiti TS EN 1015-11[57]'e göre elde edilmiştir. Eğilme dayanımını belirlemek amacı ile 4×4×16 cm kiriş numuneleri üretilmiştir. Üretilen geopolimer harç numunelerine 7. ve 28. günün sonunda eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Her bir seri için üç adet numune hazırlanmıştır. Eğilme dayanımları bu üç örneğin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Eğilme deneyi için numuneler cihaza yerleştirilmiş ve yükleme hızı 80 N/s kabul edilerek kırılmışlardır. Uygulanan deney sonrasında yükleme sonuçları okunarak aşağıda belirtilen formüller kullanılarak eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Eğilme deneyi uygulanan numunelerden elde edilen sonuçların standart sapmaları alınarak ortalama sonuçlar tabloya işlenmiştir. Denklem 4.1'de eğilme dayanımını hesaplama formülü verilmiştir;

$$\sigma = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (4.1)$$

σ : eğilme dayanımı (n/mm^2), p : numunenin maximum dayanım kuvveti (n), l : mesnetler arasındaki uzaklık (mm), b : numunelerin eni (mm), d : numunelerin boyu (mm) olarak ifade edilmektedir. Şekil 4.10’da eğilme dayanımı test cihazı ve eğilme dayanımı değerlerinin okunması gösterilmiştir.



Şekil 4.22: Eğilme dayanımı test cihazı ve eğilme dayanımı değerlerinin okunması.

4.8.4.3 UPV deneyi

UPV deneyi TS EN 12504-4 [58] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde Pund-IT ölçüm değerini etkilemeyecek düz bir yüzeye konumlandırılıp kalibrasyon değeri standartlara uygun olarak 25,9 μs ayarlanmıştır. Deney 7x7x7 cm’lik küp numuneler üzerinde 7. ve 28. günün sonunda UPV deneyi uygulanmıştır. Her bir seri için üç adet numune hazırlanmıştır. Elde edilen UPV değerlerinin ortalama sonuçları tabloya işlenmiştir.

Elde edilen veriler formül (4.2) kullanılarak geçiş hızı değeri hesaplanmış ve bu değerler aşağıda belirtilen harcın standartları göz önüne alınarak değerlendirmeye tabi tutulmuştur. UPV hızının hesaplanması formül 4.2’de ifade edilmektedir. Tablo 4.5’de UPV deneyi sonuçlarına göre harcın kalite değeri gösterilmektedir.

$$\text{Ultra Ses Hızı} \left(\frac{mm}{\mu s} \right) = \frac{\text{Dalga Mesafesi (mm)}}{\text{Dalga Geçtiği Süre (\mu s)}} \quad (4.2)$$

Tablo 4.5: UPV deneyi sonuçlarına göre numunelerin kalite değerleri.

UPV Geçiş Hızı (V) mm/ μ s	Harcın Kalite Standardı
<2,0	Çok Zayıf
2,0-3,0	Zayıf
3,0-3,5	Orta
3,5-4,5	İyi
>4,5	Çok İyi

Şekil 4.23’de ise UPV deneyinde kullanılan PUND-IT aleti gösterilmektedir.



Şekil 4.23 : UPV deneyinde kullanılan PUND-IT aleti.

4.8.4.4 Yüksek sıcaklık deneyi

Geopolimer harç numunelerinin yüksek sıcaklık etkisindeki performanslarını belirlemek amacı ile ön deneylerle belirlenen optimum değerde 10 M olarak 5×5×5cm küp numuneleri üretilmiştir. Numuneler öncelikle fırına yerleştirildikten sonra fırın belirlenen sıcaklık değerlerine (300 °C, 600 °C, 900 °C) getirilerek numuneler bu sıcaklıkta bir saat boyunca bekletilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler daha sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması için bekletildikten sonra basınç dayanım deneyi gerçekleştirilmiştir. Her bir seri için üçer adet numune hazırlanmış ve elde edilen sonuçların standart sapmaları alınarak ortalama sonuçları tabloya işlenmiştir. Şekil 4.24’de yüksek sıcaklık fırını ve yüksek sıcaklık fırınına numunelerin yerleştirilmesi gösterilmektedir.



Şekil 4.24 : Yüksek sıcaklık fırını ve yüksek sıcaklık fırınına numunelerin yerleştirilmesi.

4.8.4.5 Mikroyapı analizi-(SEM)

Numunelerin mikro yapı analizlerini belirlemek için yüksek enerji yüklü elektronlar numuneler üzerine gönderilerek numunelerden oluşan yansımalarla göre cihazda bir görüntü oluşturularak elde edilmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler hariç 5, 10, 15 M ve altı farklı karışımdan üretilen numuneler 28 günün sonunda basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Uygulanan basınç dayanım testleri sonucunda kırılan numunelerden alınan parçalar SEM analiz aletine yerleştirilmiştir. SEM cihazı ilk olarak numune parçalarını vakumlayarak Au-Pd ile kaplanarak SEM görüntüleri elde edilmiştir.

SEM analizi İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi Laboratuvarlarında Leo-Evo 40 cihaz kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.13’de SEM mikro analiz cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.25: Çalışmada kullanılan SEM analiz cihazı

4.8.4.6 Mikroyapı analizi (XRD)

Numunelerin mikro yapı analizlerini belirlemek için yüksek enerji yüklü X ışınlarının numuneler üzerine gönderilerek gelen yansımalara göre XRD cihazda gelen X ışınları miktarının sayısal oran olarak elde edilmesi temeline dayanmaktadır.

5, 10, 15 M ve altı farklı karışım oranına sahip numuneler 28 günün sonunda basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Uygulanan basınç dayanım testleri sonucunda kırılan numunelerden alınan parçalar toz haline getirilerek XRD analizi için cihaza yerleştirilerek sayısal veriler elde edilmiştir.

XRD analizlerinde numunelerin iç yapısındaki element ve birleşiklerin oranları incelenmiştir. XRD analizi İnönü Üniversitesi Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Merkezinde Bruker D8 Advance cihazı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'de XRD analiz cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.26: Çalışmada kullanılan XRD analiz cihazı

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

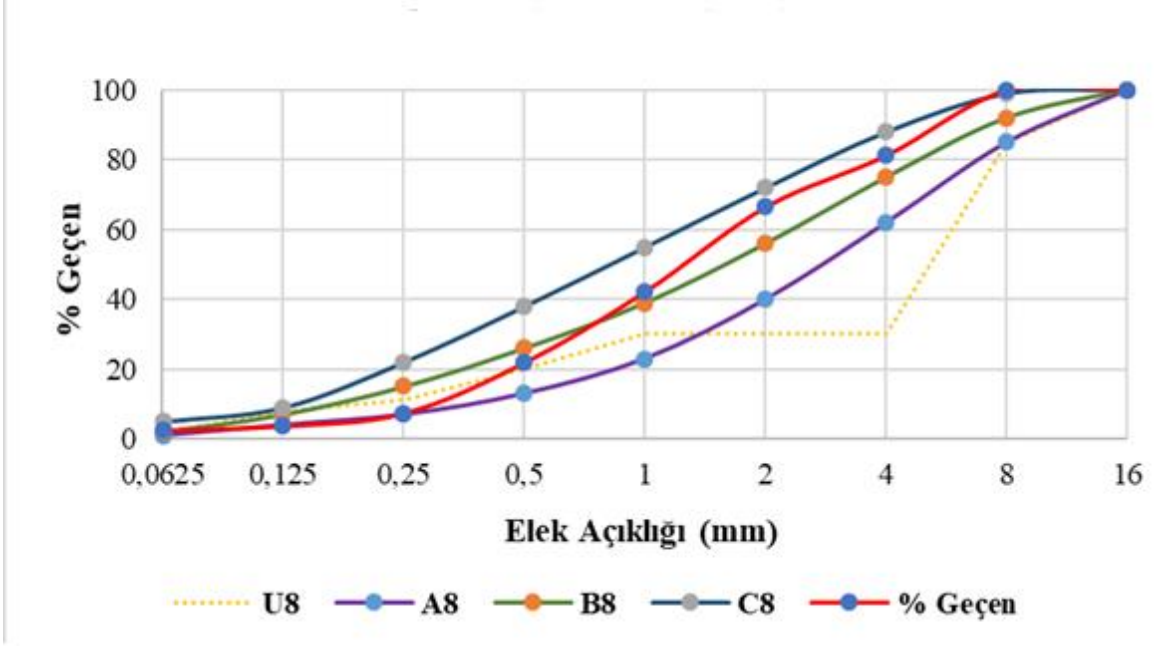
5.1. Elek Analizi Sonuçları

DEM mıcır ve kırma taş işletmesinden temin edilen agrega, kırma işlemine tabi tutulmuş olup en büyük dane çapı 5 mm'dir. Bu durum göz önüne alınarak gerçekleştirilen granülometri deneyi sonuçları Tablo 5.1 belirtilmiştir.

Tablo 5.1. Granülometri deneyi sonuçları

Elek Çapları (mm)	A8	B8	C8	U8	% Geçen
0,063	1	2	5	2	2.42
0,123	4	7	9	8	3.67
0,25	7	15	22	11	7.32
0,5	13	26	38	20	21.86
1	23	39	55	30	42.19
2	40	56	72	30	66.51
4	62	75	88	30	81.26
8	85	92	99	85	100
16	100	100	100	100	100

Agregalara uygulanan elek analizi TS 802 standartları göz önüne alınarak uygulanmış olup granülometri eğrisi Şekil 5.1.'de gösterilmiştir. Eğri standartlar arasında olup kullanılan agrega çalışma için uygun olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1. Deneyler bünyesinde kullanılmış $D_{max}=5$ mm olan agreganın granülometri eğrisi

Granülometri eğrisi TS 802 standartlarına uygun bir biçimde düzenlenmiştir. Yüzde geçen değeri A8 ve C8 değeri arasında olduğundan TS 802 belirtilen standartlara uygundur.

Deney bünyesinde kullanılan agreganın sınıfının kırma kum olarak seçilmesi numunelerin döküm ve yerleştirme aşamalarında kıvam ve karışım açısından olumlu etkileri olmaktadır.

5.2. Geopolimer Taze Harç Numuneler Üzerinde Uygulanan Deneyler

5.2.1. Priz başlangıç ve sona erme deney sonuçları

Yapılan priz başlangıç ve bitiş süresi deneyinde farklı mol yüzdelerinde ve farklı oranlarda ki priz başlangıç ve bitiş süreleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Harç numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri

	Priz Başlama Süresi (dakika)	Priz Sona Erme Süresi (dakika)
5M 0B-100YFC	130,00	360,00
5M 3B-97YFC	130,00	390,00
5M 6B-94YFC	140,00	390,00
5 M 9B-91YFC	140,00	400,00
5 M 12B -88 YFC	150,00	410,00
5 M 15B -85 YFC	160,00	420,00
10 M 0B -100 YFC	12,30	22,30
10 M 3B - 97 YFC	14,00	23,00
10 M 6B - 94 YFC	15,00	24,00
10 M 9B - 91 YFC	15,30	24,00
10 M 12B - 88 YFC	16,30	25,00
10 M 15B - 85 YFC	17,00	25,30
15 M 0B - 100 YFC	4,00	6,50
15 M 3B - 97 YFC	4,20	6,40
15 M 6B - 94 YFC	4,20	6,30
15 M 9B - 91 YFC	4,30	6,20
15 M 12B - 88 YFC	5,10	6,20
15 M 15B - 85 YFC	5,20	6,10

Elde edilen veriler incelendiğinde farklı mol oranlarında ve farklı karışım oranları göz önüne alınırsa 5 M olarak hazırlanan karışımlar da priz başlangıç ve bitiş sürelerinin 10M ve 15 M karışımlara göre daha uzun olduğu ve mol oranı artışına bağlı olarak priz başlama ve sona erme sürelerinin uzadığı belirlenmiştir. 15 M olarak hazırlanan karışımlarda mol artışına bağlı olarak numunelerin kıvamında kalıplara yerleştirmede sorunlar meydana gelmiştir.Yerleşme için gerekli sürenin iyileştirmesi için çalışmada kullanılan bağlayıcı oranının %1'i oranında priz geçiktirici katkı kullanılmış olup,bu katkılı harç numunelerin priz başlama ve sona erme sürelerini geçiktirmiştir.Ancak kalıptan çıkarılan numuneler üzerinde kusurlar gözlemlenmiştir.

Taştimur (2021) yaptığı çalışmada 16, 20, 24 M karışımlar hazırlamış yalnız hazırlanan 20 M karışımlarda döküm esnasında erken priz aldığı ve numunenin kalıplara

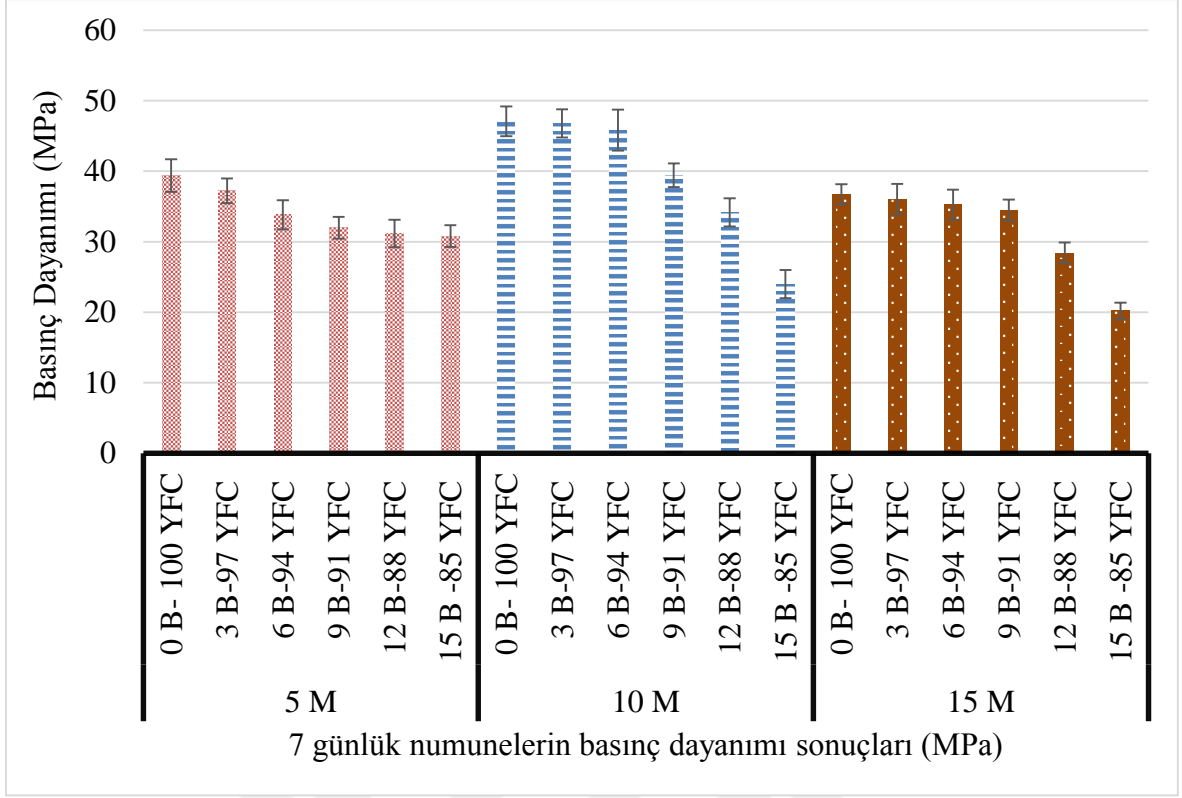
yerleştirmesi için yeteri kadar zaman kalmadığını gözlemlemiş bu sebeplerden ötürü 20 ve 24 M karışımları deney düzeneinden çıkarıp sadece 16 M karışım hazırlamıştır. 20 ve 24 M karışımların kullanılması için priz geciktirici katkı kullanılması çözüm sağlayabileceğini belirtmiştir [60].

5 M olan karışımlar da priz başlangıç süresi 130~ 160 dakika arasında değişirken priz bitiş süreleri 360~ 420 dakika arasında değişmiştir. 10 M olan karışımlarda ise priz başlama süresi 12 ~ 17 dakika arasında değişirken priz sona erme süresi ise 22~ 25 dakika arasında değişmiştir. 15 M olan karışımlarda ise priz başlangıç süreci 4~5 dakika arasında değişmiş olup, priz sona erme süreleri ise 6~7 dakika arasında değişmiştir.

5.3. Sertleşmiş Geopolimer Harç Numuneler Üzerinde Uygulanan Deneyler

5.3.1. Basınç dayanımı deney sonuçları

5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip alkali çözelti karışımında aktivatör/bağlayıcı oranı ön deneyler sonucunda 0.40 olarak belirlenmiş olup bunun sonuçları karışım oranları bölümünde ayrıntılı olarak belirtilmiştir. 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip alkali çözelti %100 YFC, %97 YFC+%3 B, %94 YFC+%6 B, %91 YFC+%9 B, %88 YFC+%12 B, %85 YFC+%15 B oranlarında hazırlanmış her seri için üç adet numune dökülmüş, dökümü yapılan numunelerin 7. ve 28. günlerde elde edilen basınç deneyi sonuçları sırasıyla Şekil 5.2., Şekil 5.3. ve Tablo 5.3., Tablo 5.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. 5,10 ve 15 M harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

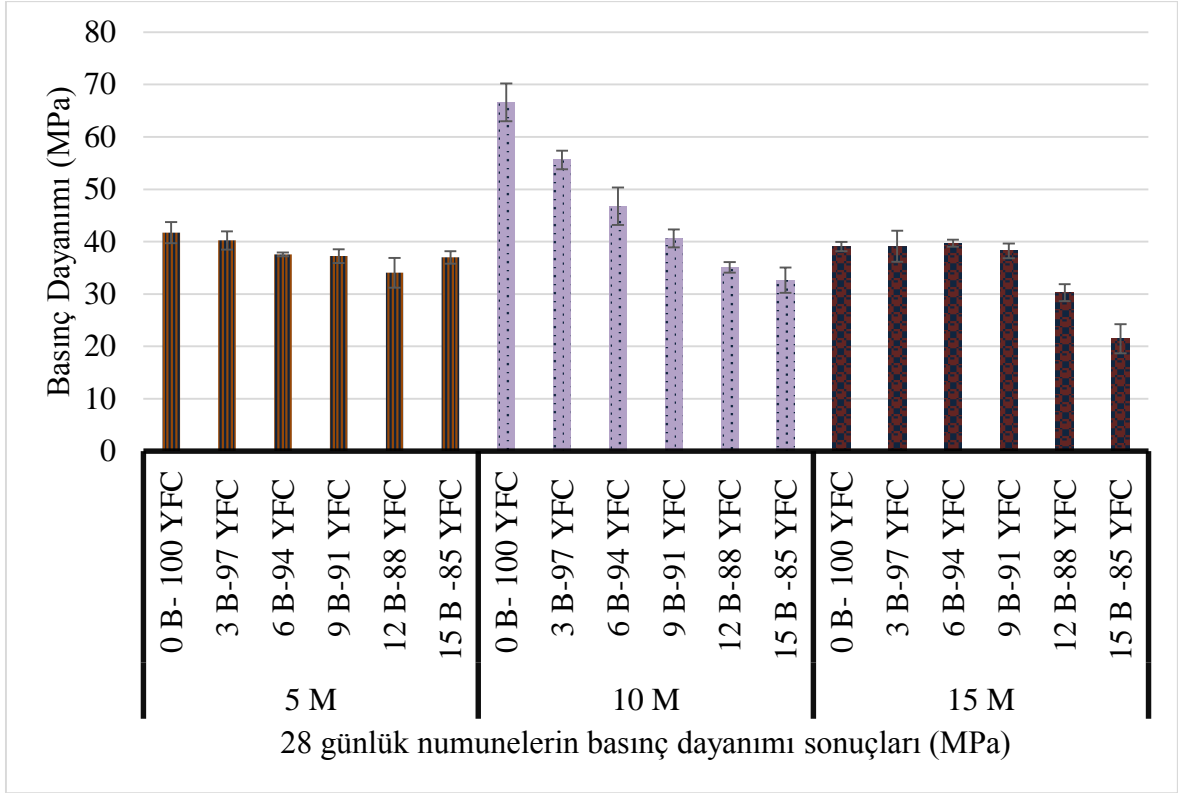
Tablo 5.3. 7 günlük numunelerin basınç dayanım değerleri

Mol Değerleri	0B-100 YFC	3B-97 YFC	6B-94 YFC	9B-91 YFC	12B-88 YFC	15B-85 YFC
5 M	39,38	37,22	33,84	31,99	31,16	30,82
10 M	47,06	46,78	45,83	39,43	34,18	24,01
15 M	36,73	36,02	35,24	34,49	28,42	20,17

7 günlük basınç deneyleri için; Şekil 5.2. ve Tablo 5.3. incelendiğinde 5 M içeren 7 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımı 39,38 MPa ile %100 YFC olan numunelerde rastlanmıştır. 5 M içeren karışımlarda bor oranı arttırıldıkça basınç dayanım değeri azalmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %5.4, %14.0, %18.7, %20.8 ve %21.7'dir. 10 M içeren numunelerin 7

günlük basınç deneyleri sonucunda en yüksek basınç değerine 47,06 MPa ile %100 YFC olan seride elde edilmiştir. 10 M içeren karışımlarda da bor içeriği arttıkça basınç dayanımında azalmalar meydana gelmiştir. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde bor atığı miktarı arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %0.6, %2.6, %16.2, %27.3 ve %48.9'dır. %12-%15 bor atığı kullanılan numunelerde diğer numunelere göre azalışın daha yüksek olduğu saptanmıştır. 15 M içeren numunelerin 7 günlük en yüksek basınç dayanımına 36,73 MPa ile %100 YFC olan numunelerde elde edilmiştir. 15 M içeren karışımlarda da bor oranı arttıkça basınç dayanımında bir miktar azalış meydana gelmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %1.9, %4.1, %6.1, %22.6 ve %45.1'dir. 15 M olan %12 bor atığı içeren numunelerden %15 bor atığı içeren numunelere geçişte basınç dayanımında diğer numunelere göre yüksek bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

7 günlük numunelerin basınç dayanım deneyleri sonucunda 10 M olarak hazırlanan numunelerin en yüksek basınç dayanım değerine sahip olduğu, ancak 15 M içeren ve %12 bor atığı içeren numunelerin ise en düşük basınç dayanımı değerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3. 5, 10 ve 15 M harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımları

Tablo 5.4. 28 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri

Mol Değerleri	0B 100YFC	3B 97YFC	6 B 94YFC	9 B 91YFC	12B 88YFC	15B 85YFC
5 M	41,74	40,24	37,55	37,23	34,05	31,98
10 M	66,62	55,59	46,78	40,63	35,08	32,64
15 M	39,07	39,13	39,68	38,22	30,23	21,43

28 günlük basınç deneyleri için; Şekil 5.3. ve Tablo 5.4. incelendiğinde 5 M içeren numunelerde 28 günlük en yüksek basınç dayanıma sahip olduğu ve bu dayanımın %100 YFC içeren numunelerde elde edildiği görülmüştür. 5 M içeren karışımlarda bor atığı miktarı arttıkça basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %3.6, %10.0, %10.8, %18.4 ve %23.4'dır. 7 günlük numunelerde elde edilen sonuçlar 28 günlük numunelerde ile

karşılaştırıldığında bor oranı arttıkça 28 günlük harç numunelerinin basınç dayanımında daha yüksek değerler elde edilmiştir.

10 M içeren numunelerde 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 66,62 MPa ile % 100 YFC içeren numunelerden elde edilmiştir. Bor atığı miktarı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %16.5, %29.7, %39.0, %47.3 ve %51.0'dır.

15 M içeren 28 günlük numunelerin en yüksek basınç dayanımı değeri (39,07 MPa) olarak %3 B+%97 YFC olan karışımlarında elde edilmiştir. 15 M içeren karışımlarda bor atığı değeri arttıkça basınç dayanımında düşük miktarlarda azalmalar meydana gelmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0,%3,%6,%9,%12,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %0.2,%1.5,%2.2,%22.6,%45.1 'dır.

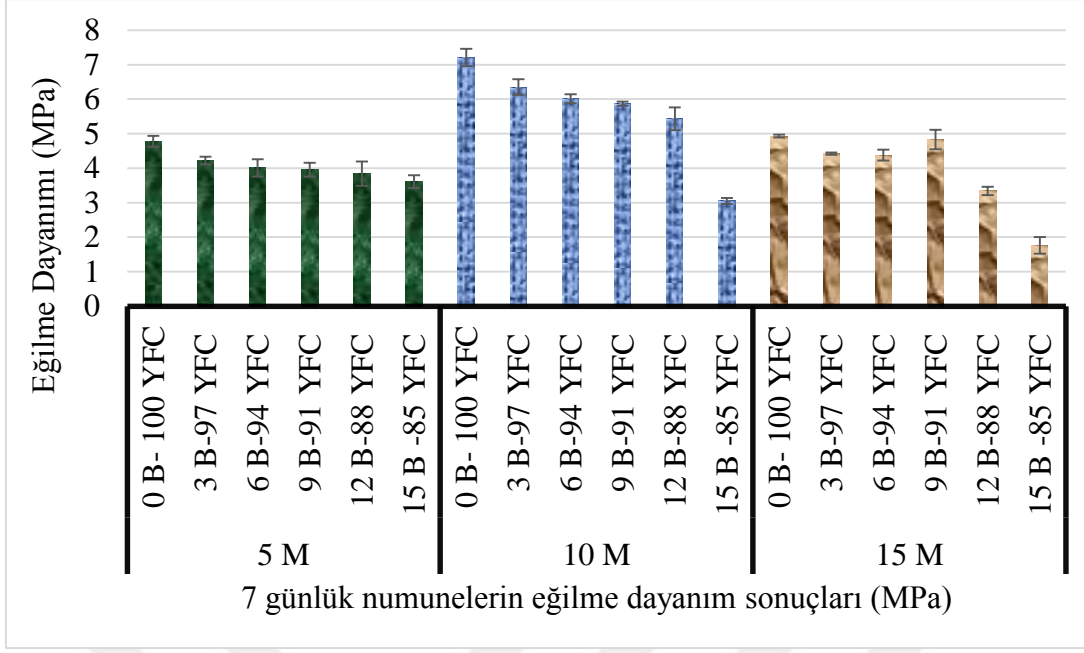
5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip alkali çözeltili numunelerin 28. günlük basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında 10 M olan serilerde en yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip alkali çözelti serilerinin tamamında bor oranı arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir.

Bu çalışmada 5 M'dan 10 M'la çıkıldığında basınç dayanımı değerlerinde artışlar meydana gelirken 15 M içeren karışımlarda basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir.

Uğurlu (2020), yaptığı çalışmada YFC ile birlikte geri dönüştürülmüş agregayı farklı oranlarda kullanarak alkali aktive edilmiş kompozitler üretmiş aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanmıştır. YFC miktarı artışına bağlı olarak basınç dayanımlarında artışlar olduğunu gözlemlemiştir. Bu çalışmada da Tablo 5.4'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde YFC oranı azaltılıp bor oranı artırıldığında basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir [61].

5.3.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Üretilen numuneler 7. ve 28. günlerde TS EN 1015-11 standartlarına göre kırılarak elde edilen eğilme deneyi sonuçları Şekil 5.4., Şekil 5.5. ve Tablo 5.5., Tablo 5.6. 'da gösterilmiştir.



Şekil 5.4. 5 M, 10 M ve 15 M harç numunelerin 7 günlük eğilme dayanımları

Tablo 5.5. 7 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri

Mol Değerleri	0B-100YFC	3B-97YFC	6B-94YFC	9B-91YFC	12B-88YFC	15B-85YFC
5 M	4,78	4,22	4,01	3,96	3,84	3,61
10 M	7,21	6,35	6,01	5,87	5,43	3,05
15 M	4,93	4,42	4,38	4,36	3,34	1,76

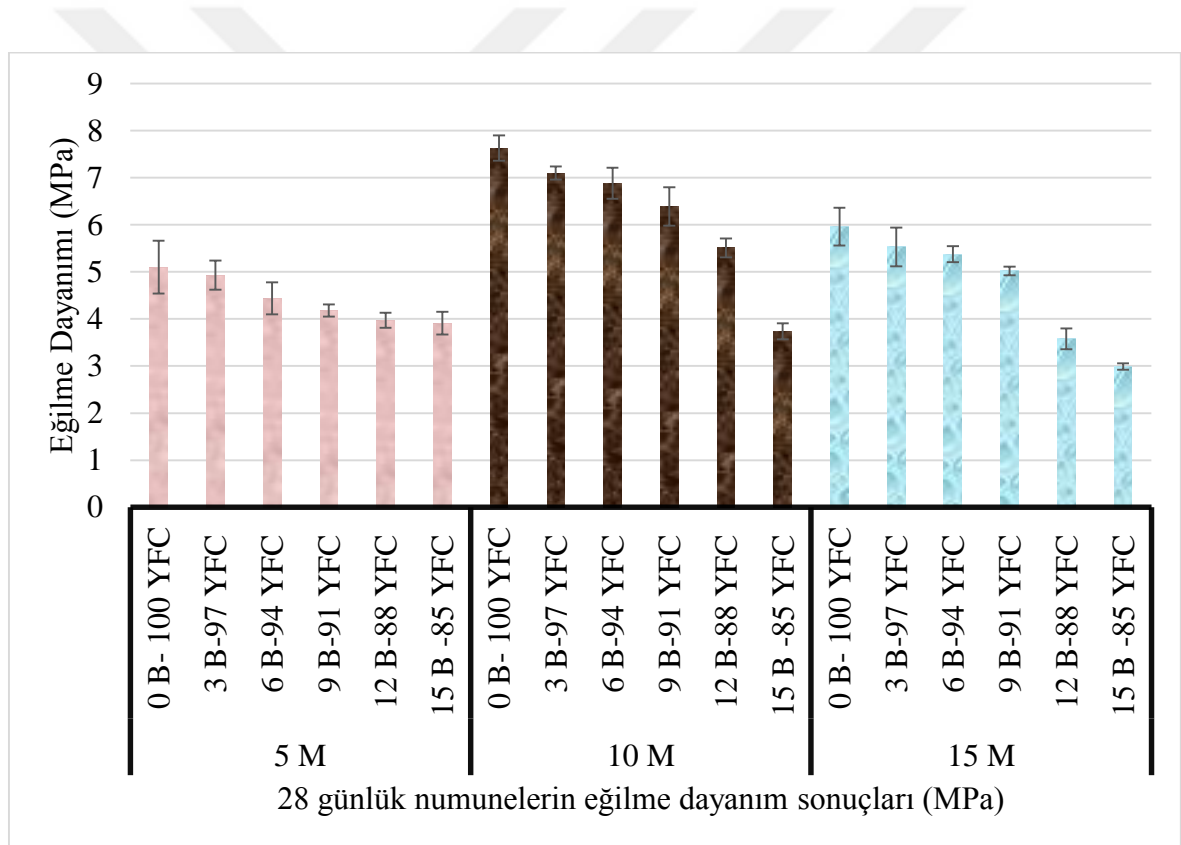
7 günlük eğilme deneyleri için; Şekil 5.4. ve Tablo 5.5. incelendiğinde 5 M içeren 7 günlük numunelerde en yüksek eğilme dayanımı 4,78 MPa ile %100 YFC ile üretilen numunelerden elde edilmiştir. 5 M içeren karışımlarda bor atığı miktarı arttırıldıkça eğilme dayanım değeri azalan bir yönelim göstermiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0,%3 ,%6 ,%9 , %12, %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %11.7 ,%16.1 ,%17.2 ,%19.6 ,%24.4 ‘dır.

10 M içeren 7 günlük numunelerde eğilme deneyi dayanımı en yüksek çıkan karışım 7.21 MPa ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 10 M içeren karışımlarda da bor içeriği arttıkça eğilme dayanımında bir azalış görülmektedir. Elde edilen veriler

incelendiğinde %0 ,%3 ,%6 ,%9 ,%12 ,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %11.9 ,%16.6 ,%18.6 ,%24.6 ,%57.7 'dır.

15 M içeren karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 4.93 MPa ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 15 M içeren karışımlar da bor oranı arttıkça eğilme dayanımlarında azalışlar meydana gelmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0 ,%3 ,%6 ,%9 ,%12 ,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %10.3 ,%11.5 ,%11.8 ,%32.2 ,%64.3 'dır.

7 günlük numunelerin eğilme deneyi verilerinde 10 M olarak hazırlanan numunelerin daha yüksek eğilme dayanım değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. 5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük eğilme dayanımları

Tablo 5.6. 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Mol Değerleri	0B 100YFC	3B 97YFC	6 B 94YFC	9 B 91YFC	12B 88YFC	15B 85YFC
5 M	5,10	4,93	4,44	4,18	3,97	3,91
10 M	7,63	7,10	6,88	6,39	5,51	3,74
15 M	5,96	5,53	5,38	5,02	3,58	2,99

28 günlük eğilme dayanımları için; Şekil 5.5. ve Tablo 5.6. incelendiğinde 5 M içeren 28 günlük numunelerin en yüksek eğilme dayanımı 5,10 MPa ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 5 M içeren karışımlarda bor atığı arttıkça eğilme değerlerinde çok küçük oranda bir azalış gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0 ,%3 ,%6 ,%9 ,%12 ,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %3.3 ,%12.9 ,%18.0 ,%22.1 ,%23.3 ‘dır.

10 M içeren 28 günlük numunelerde en yüksek eğilme dayanımı 7,63 MPa ile % 100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0,%3,%6,%9,%12,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %6.9,%9.8,%16.2,%27.8,%50.9 ‘dır.

15 M içeren 28 günlük numunelere uygulanan eğilme deneyinde maksimum eğilme değeri 5,96 MPa değeri % 100 YFC olan numunelerde gözlenmiştir. 15 M içeren karışımlarda bor atığı değeri arttıkça eğilme dayanımında bir miktar azalma meydana gelmiştir.Elde edilen veriler incelendiğinde %0,%3,%6,%9,%12,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %7.2,%9.7,%15.7,%39.9,%49.8 ‘dır.

5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip numunelerin 28. günün sonunda eğilme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında 10 M olan örneklerde daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip numunelerin tamamında bor oranı arttıkça eğilme dayanımlarında azalış gözlenmiştir.

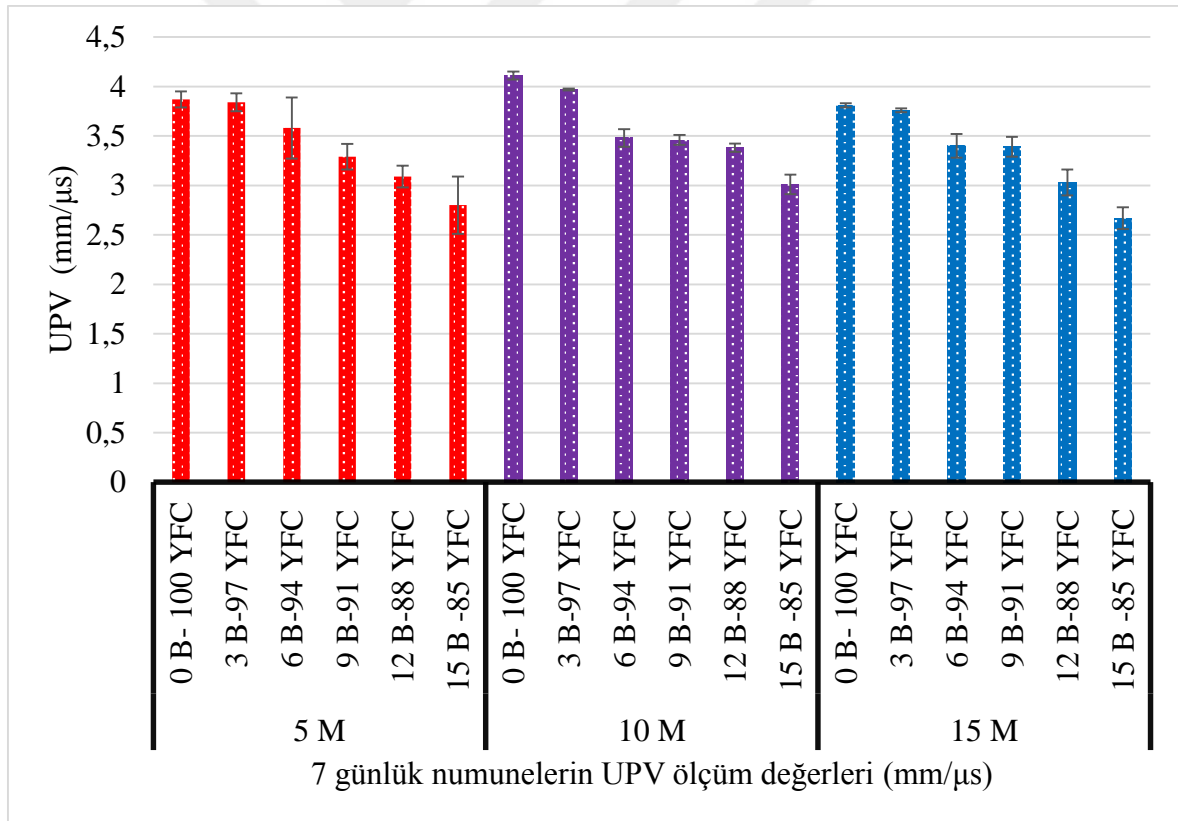
Basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçları beraber değerlendirildiğinde YFC oranı azalıp bor oranı arttıkça dayanım üzerinde eşdeğer bir azalma gözlemlenmiş olup iki deneyin birbiriyle uyumlu olduğu saptanmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda bor atığı

malzemesinin yüksek fırın cürufuna göre dayanımı olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Çelik (2019), yaptığı çalışmada 4 farklı lifle bor atığı katkılı geopolimer harçlar hazırlamıştır. Karışımı sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive ederek kompozitlerin mekanik özelliklerini, mikroyapısal özelliklerini ve yüksek sıcaklık davranışını incelemiştir. Geopolimer karışımları metakaolin ve bor atığının bir kombinasyonu ile hazırlamış ve daha sonra ısıyla kür etmiştir. Sonuç olarak bor atığının hazırlanan karışımların mekanik özelliklerinde olumlu etki oluşturduğunu belirmesine rağmen bor atığı miktarı arttıkça dayanımlarda bir azalış olduğunu tespit etmiştir [62].

5.3.3. UPV geçiş hızı deney sonuçları

Numuneler üretildikten sonra 90°C etüvde 24 saat bekletilmiş ve daha sonra bu numunelerin 7 ve 28 günlerde TS EN 12504-4 [58] standartlarına göre uygulanan UPV deneyi sonuçları elde edilerek Şekil 5.6. ve Şekil 5.7. ve Tablo 5.7., Tablo 5.8.'de verilmiştir.



Şekil 5.6. 5 M, 10 M ve 15 M harç numunelerin 7 günlük UPV deney sonuçları

Tablo 5.7. 7 günlük numunelerin ortalama UPV ölçüm sonuçları, mm/μs

Mol Değerleri	0B 100YFC	3B 97YFC	6 B 94YFC	9 B 91YFC	12B 88YFC	15B 85YFC
5 M	3,87	3,84	3,58	3,29	3,09	2,80
10 M	4,11	3,97	3,48	3,46	3,38	3,01
15 M	3,81	3,76	3,40	3,39	3,03	2,67

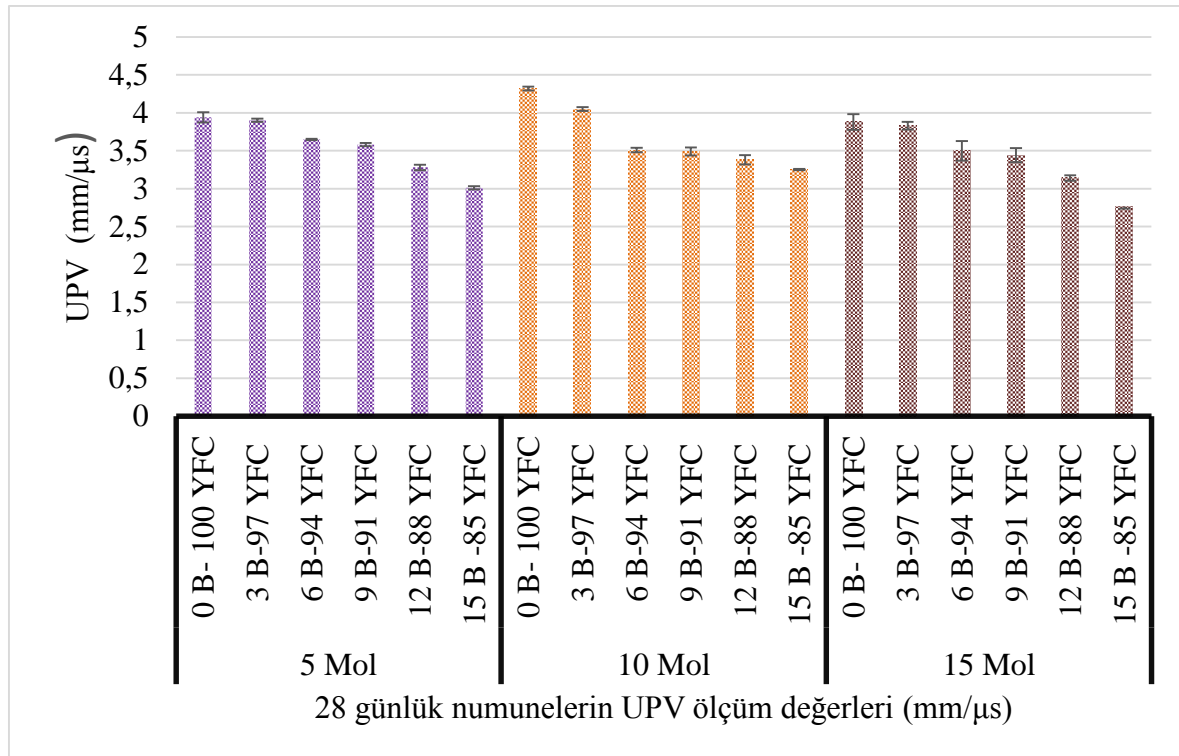
Şekil 5.6. ve Tablo 5.7. incelendiğinde 7 günlük 5 M olarak hazırlanan numunelerin en yüksek UPV değeri 3,87 mm/μs ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 5 M içeren karışımlarda bor atığı arttırıldıkça UPV değerleri azalan bir yönelim göstermiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0 ,%3 ,%6 ,%9 ,%12 ,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük UPV deney değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %0.7, %7.5, %14.9,%20.1,%27.6 ‘dır. UPV kalite tablosu göz önüne alınarak 5 M içeren karışımlara 7. günün sonunda uygulanan UPV deneyine göre %100 YFC, %3 B + %97 YFC, %6 B + %94 YFC içeren serilerin iyi kalitede, %9 B + %91 YFC ve %12 B + % 88 YFC olan numunelerin orta kalitede, %15 B + % 85 YFC olan numunelerin zayıf kalitede olduğu saptanmıştır.

10 M olarak hazırlanan 7 günlük numunelerde en yüksek UPV değerleri 4.11 mm/μs ile %100 YFC olan örneklerden elde edilmiştir. 10 M içeren karışımlarda bor oranı atığı arttırıldıkça UPV geçiş hızı değeri azalan bir yönelim göstermiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0 ,%3 ,%6 ,%9 ,%12 ,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7 günlük UPV deney değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %3.4 ,%15.3 ,%15.8 ,%17.7 ,%26.7 ‘dır. UPV geçiş hızı göz önüne alındığında 7 günün sonunda 10 M hazırlanan karışımların UPV geçiş hızları %100 YFC, %3 BA + %97 YFC, %6 BA + %94 YFC içeren numunelerde daha yüksek, %9 BA + %91 YFC ve %12 BA + % 88 YFC ve %15 BA + % 85 YFC içeren numunelerde ise orta düzeyde olduğu saptanmıştır.

15 M hazırlanan 7 günlük numunelerde en yüksek UPV geçiş hızı 3.81 mm/μs ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 15 M içeren karışımlarda bor atığı arttııkça UPV geçiş hızı değeri azalan yönde bir yönelim göstermiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %0,%3,%6,%9,%12,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 7

günlük UPV deney değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %1.3 ,%10.7 ,%11.0 ,%20.4 ,%29.9 'dır. UPV değerleri göz önüne alındığında 15 M içeren 7 günlük numunelerin UPV geçiş hızları % 100 YFC, %3 BA + %97 YFC içeren numunelerde daha yüksek, %6 BA + %94 YFC, %9 BA + %91 YFC, %12 BA + % 88 YFC içeren numunelerde daha orta düzeyde olduğu ve %15 BA + % 85 YFC olan numunelerde ise daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır.

Numunelerin 7 günlük UPV değerleri incelendiğinde 10 M olan örnekler diğer örnekler ile karşılaştırıldığında daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür.



Şekil 5.7. 5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük UPV deney sonuçları

Tablo 5.8. 28 günlük numunelerin ortalama UPV ölçüm değerleri

Mol Değerleri	0B 100YFC	3B 97YFC	6 B 94YFC	9 B 91YFC	12B 88YFC	15B 85YFC
5 M	3,94	3,90	3,65	3,58	3,28	3,01
10 M	4,32	4,05	3,51	3,49	3,38	3,25
15 M	3,88	3,83	3,50	3,44	3,14	2,76

Şekil 5.7. ve Tablo 5.8. incelendiğinde 28 günlük 5 M içeren numuneler için en yüksek UPV değeri 3,94 mm/μs ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 5 M içeren karışımlarda bor atığı miktarı arttırıldıkça UPV geçiş hızı değerleri de azalmıştır. UPV geçiş hızı değerlerini içeren Tablo5.8 göz önüne alındığında 5 M içeren 28 günlük karışımların UPV geçiş veriler incelendiğinde %0 ,%3 ,%6 ,%9 ,%12 ,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük UPV deney değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %1.0 ,%7.3 ,%9.1 ,%16.7 ,%23.6 ‘dır..

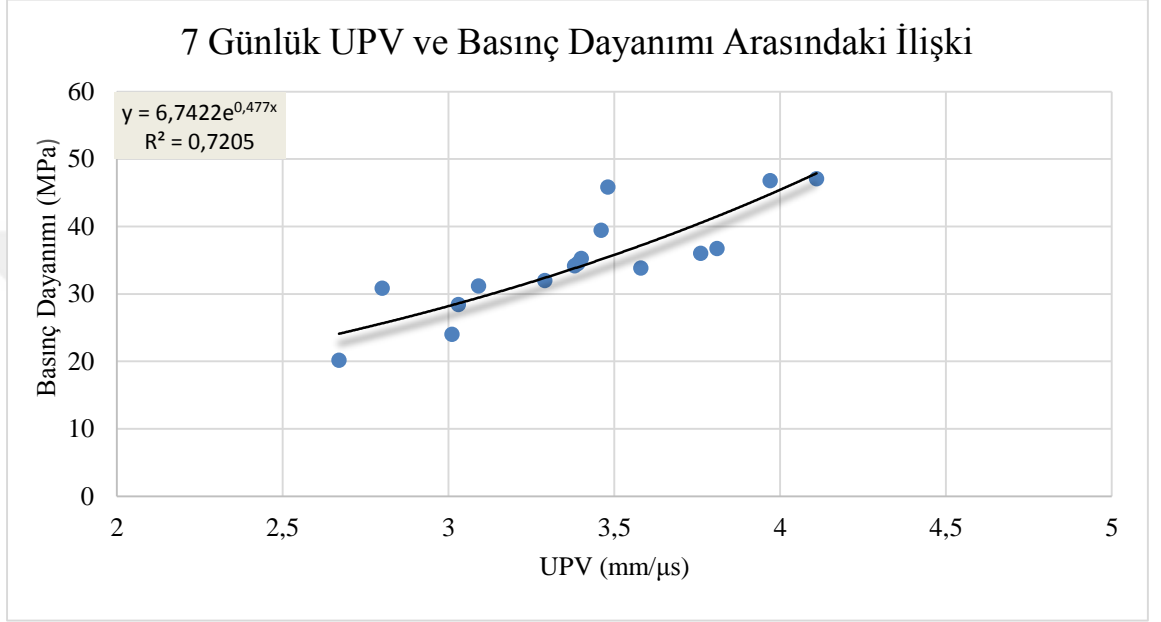
10 M olarak hazırlanan 28 günlük karışımlarda en yüksek UPV geçiş hızı 4.32 mm/μs ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 10 M içeren karışımlar da bor atığı miktarı arttııkça UPV değerleri azalan bir yönelim göstermiştir. 10 M içeren 28 günlük karışımların UPV geçiş veriler incelendiğinde %0 ,%3 ,%6 ,%9 ,%12 ,%15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük UPV deney değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %6.2 ,%18.7 ,%19.2 ,%21.7 ,%24.7 ‘dır.

15 M hazırlanan 28 günlük karışımlarda en yüksek UPV geçiş hızı 3.88 mm/μs ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 15 M içeren karışımlar da bor atığı miktarı arttııkça UPV geçiş hızı değerleri azalmıştır. 15 M içeren 28 günlük karışımların UPV geçiş veriler incelendiğinde %0, %3, %6, %9, %12, %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numunelerin 28 günlük UPV deney değerlerindeki azalma yüzdeleri sırası ile %1.2,%9.7,%11.3,%19.0,%28.8 ‘dır.

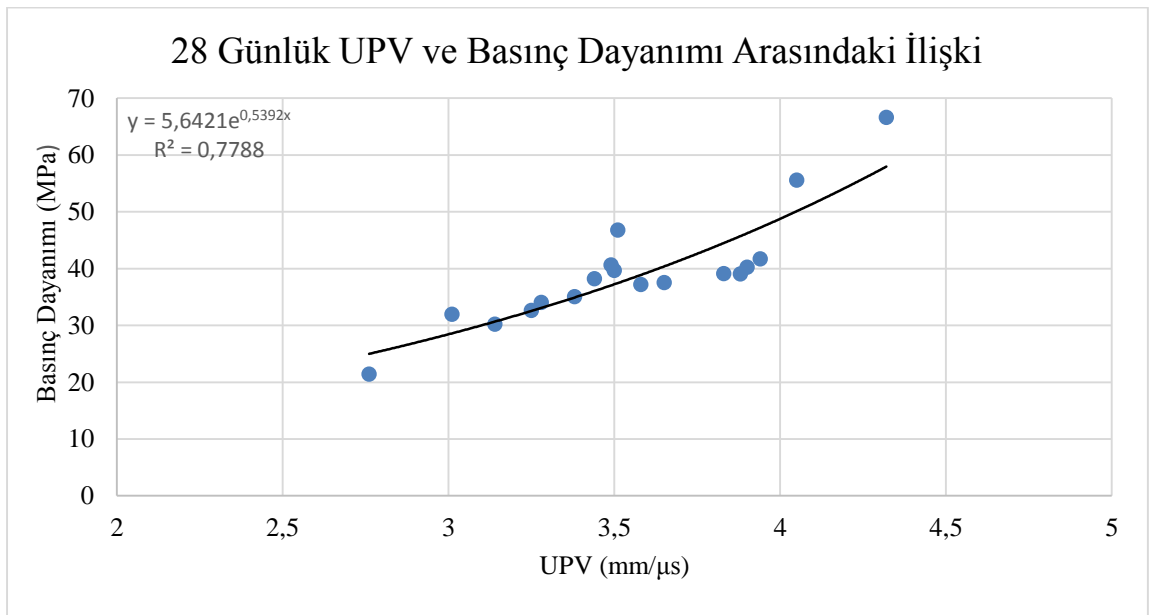
28 günlük UPV geçiş hızı deneyleri incelendiğinde 10 M olan örnekler ile diğer örnekler karşılaştırıldığında 10M olan numunelerin daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.

5.3.3.1 Basınç ve eğilme dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki

Bu çalışmada 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve UPV deneylerinden elde edilen sonuçlara ait ilişkiler sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde 7 ve 28 günlük ilişkilere ait R^2 değerleri sırasıyla 0,7205 ve 0,7788 dir.

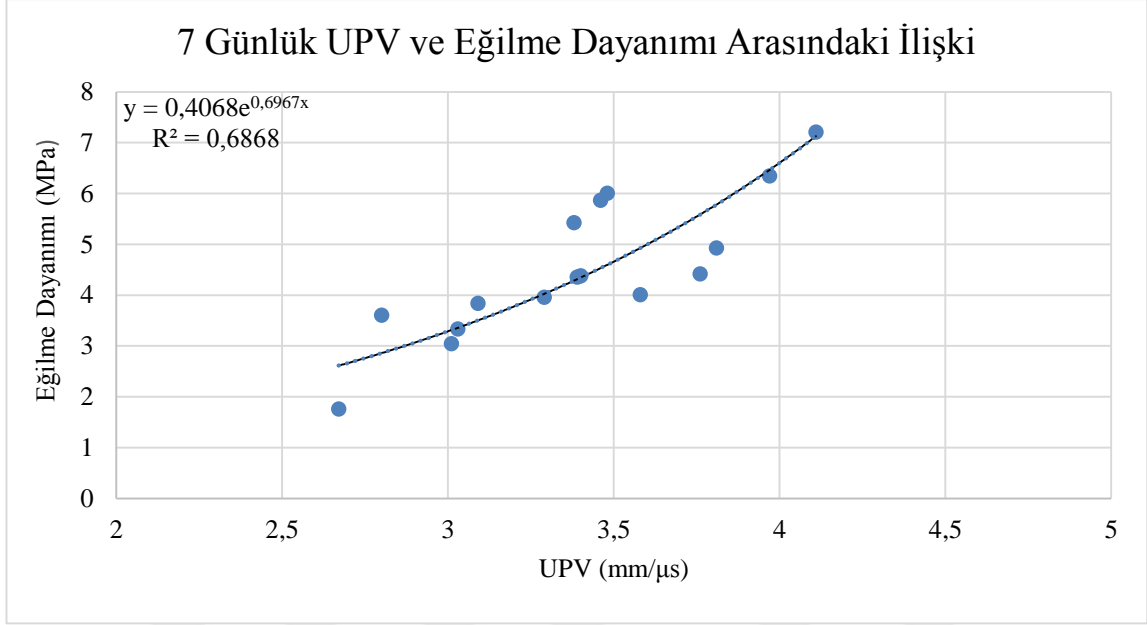


Şekil 5.8. 5 M, 10 M ve 15 M Harçların 7 Günlük UPV Ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

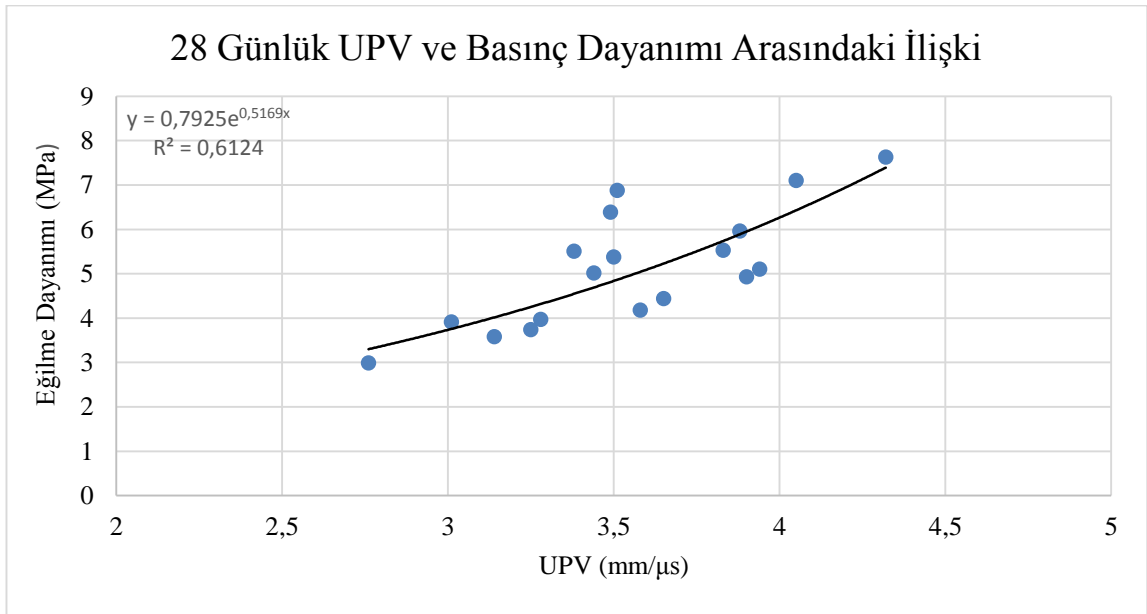


Şekil 5.9. 5 M, 10 M ve 15 M Harçların 28 Günlük UPV Ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Bu çalışmada 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı ve UPV deneylerinden elde edilen sonuçlara ait ilişkiler sırasıyla Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde 7 ve 28 günlük ilişkilere ait R^2 değerleri sırasıyla 0,6868 ve 0,6124 dır.



Şekil 5.10. 5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük UPV deney sonuçları

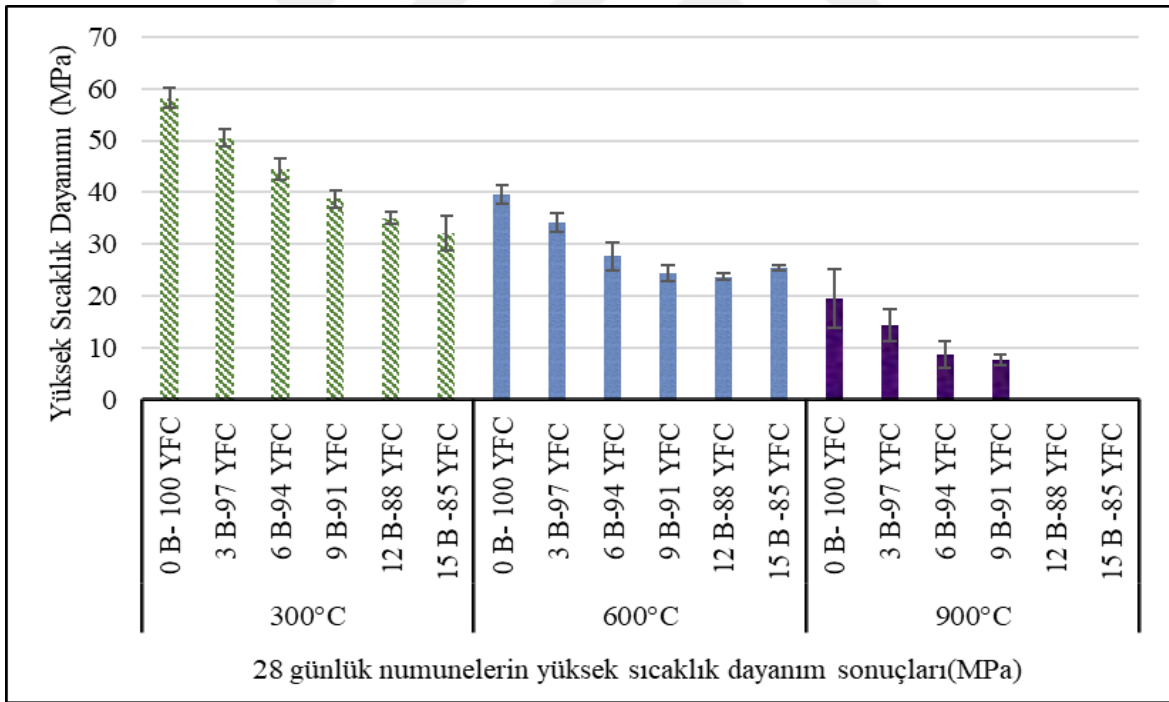


Şekil 5.11. 5 M, 10 M ve 15 M harçların 28 günlük UPV deney sonuçları

Kantarıcı (2018) yaptığı çalışmada UPV sonuçları ile basınç ve eğilme dayanımı sonuçları arasında ilişkiler incelenmiştir. UPV değerleri ile aynı arışıma sahip numunelerin basınç ve eğilme değerleri arasında doğrusal ilişki olduğu görülmüştür.

5.3.4. Yüksek sıcaklık deneyi sonuçları

Yüksek sıcaklık deneyi 5M, 10M ve 15M olan numunelerin ön deneyler sonucunda basınç ve eğilme deneyi sonuçları daha yüksek çıkan 10 M olarak hazırlanmış 28 günlük karışım numuneleri üzerinde uygulanmıştır. 28 günlük numunelerden %100 YFC, %97 YFC+%3 B, %94 YFC+%6 B, %91 YFC+%9 B, %88 YFC+%12 B, %85 YFC+%15 B oranlarında gruplar hazırlanmıştır. Bu grup numunelerinden yüksek sıcaklık etkilerinde bor atığı ilavesinin etkisi incelenmiştir. Her grup için üç adet numune dökülmüş, 90°C etüvde bir gün bekletilmiş ve daha sonra bu numunelere TS EN 196-1 standartlarına uygun olarak yüksek sıcaklık (300, 600 ve 900 °C) deneyi yapılarak yüksek sıcaklık etkisinde bırakılan numunelerin basınç dayanımlarına bırakılarak kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır. Numunelerin basınç dayanımı sonuçları Şekil 5.8. ve Tablo 5.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.12. YFC ve B atığı içeren 10 M harçların 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Tablo 5.9. 10 M 28 günlük numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçları

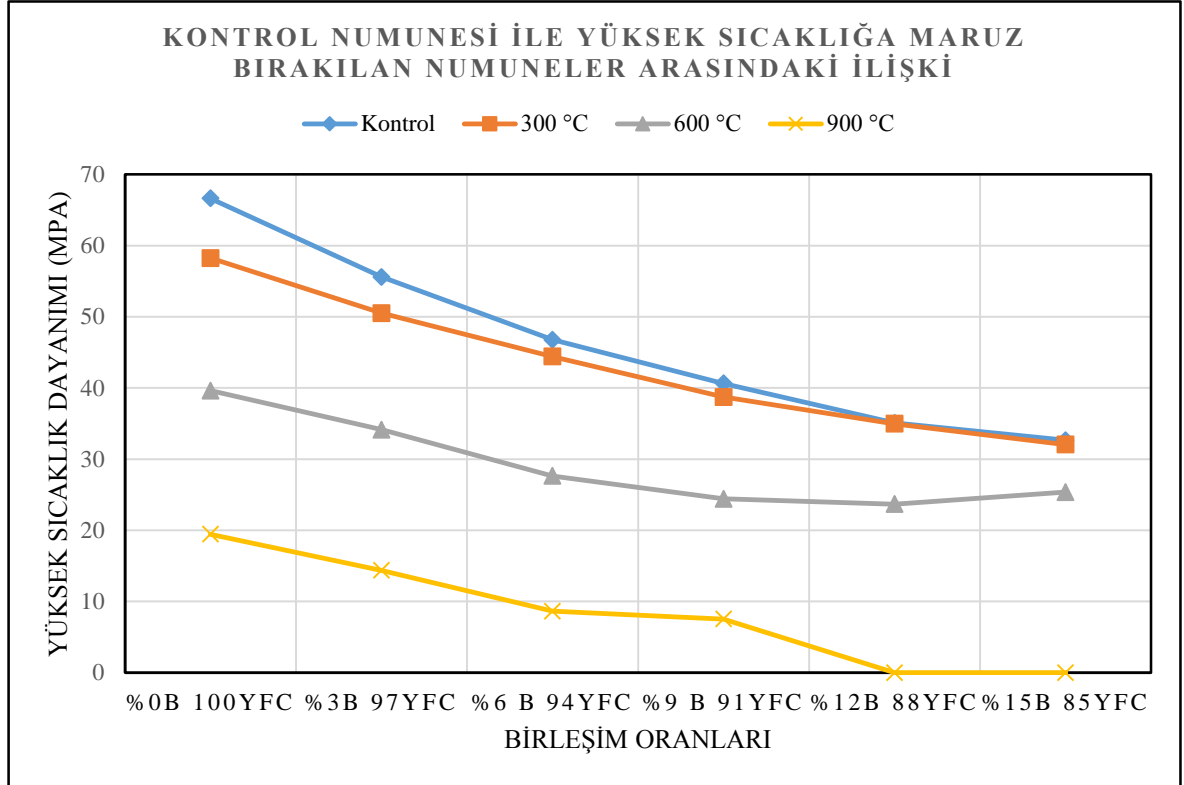
Sıcaklık Değerleri (°C)	0B 100YFC	3B 97YFC	6 B 94YFC	9 B 91YFC	12B 88YFC	15B 85YFC
Kontrol	66,62	55,59	46,78	40,63	35,08	32,64
300 °C	58,23	50,51	44,42	38,72	34,96	32,04
600 °C	39,63	34,13	27,63	24,42	23,68	25,36
900 °C	19,45	14,38	8,63	7,54	Numuneler dağıldı.	Numuneler dağıldı.

28 günlük yüksek sıcaklık deneyleri için; Tablo 5.9 ve Şekil 5.12. incelendiğinde 10 M hazırlanan 300 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan 28 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımına 58,23 MPa ile %100 YFC içeren numunelerden elde edilmiştir. 10 M içeren karışımlarda bor atığı değeri arttıkça basınç dayanımı değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. Bu azalma yüzdeleri %0, %3, %6, %9, %12, %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numuneler için sırası ile %12.5, %9.1, %5.0, %4.7, %0.4, %1.8 'dır. 300 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç mukavemetleri yüksek sıcaklık etkisine bırakılmayan kontrol numuneleri ile benzer çıkmışlardır.

600 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin yapılan deney sonucunda en yüksek basınç dayanımı 39,63 MPa ile %100 YFC olan numunelerden elde edilmiştir. 10 M içeren karışımlarda bor atığı değeri arttıkça basınç dayanımı değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Bu azalma yüzdeleri %0, %3, %6, %9, %12, %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numuneler için sırası ile %40.5, %38.6, %40.9, %39.8, %32.5, %22.3 'dır. 300°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 600°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelere göre daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olduğu elde edilmiştir.

28. günlük numunelerin 10 M olarak hazırlanan örnekler 900°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve en yüksek basınç dayanımına 19,45 MPa ile % 100 YFC olan seride rastlanılmıştır. 10 M içeren karışımlarda bor atığı değeri arttıkça basınç değerlerinde

düşüşler elde edilmiştir. Bu azalma yüzdeleri %0 ,%3 ,%6 ,%9 , %12 , %15 bor atığı katkısı kullanılan harç numuneler için sırası ile %70.8 ,%74.1 ,%81.5 ,%81.5 'dir. 300°C maruz bırakılmış numuneler 600°C maruz bırakılan numunelere göre daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olduğu 900°C maruz bırakılan numunelerde ise diğer örneklerle göre daha yüksek oranda basınç dayanımlarında azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen verilerde yüzde azalış oranları incelendiğinde bor oranı artışı basınç değerlerinde azalma ortaya koymasına rağmen, azalış yüzdeleri incelendiğinde bor oranının arttığı numunelerde



yüksek sıcaklık deneyine maruz bırakıldığında bor oranı düşük olan numuneler ile kıyaslandığında daha düşük miktarda basınç değer değişimleri olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu veriler ışığında bor oranı arttıkça yüksek sıcaklığa karşı dayanımın arttığı gözlenmiştir.

Şekil 5.13. Kontrol Numuesi İle Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılan Numuneler Arasındaki İlişki

300°C, 600°C ve 900°C maruz bırakılan numunelerden elde edilen veriler şekil 5.13'de yüzde azalış oranları incelendiğinde bor oranı artışı basınç değerlerinde azalma ortaya koymasına rağmen yüzde azalış değerleri incelendiğinde bor oranının arttığı numunelerde yüksek sıcaklık deneyine maruz bırakıldığında bor oranı düşük olan numuneler

ile kıyaslandığında daha düşük miktarda basınç değer değişimleri olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu veriler ışığında bor oranı arttıkça yüksek sıcaklığa karşı dayanımın arttığı gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklık deneyi sonuçlarına bakıldığında sıcaklık arttıkça basınç dayanımı değerlerinde düşüşler gözlemlenmiş olup, sıcaklık 900°C'ye ulaştığında numunelerde yüksek oranda dağılmalar gözlemlenmiştir. Pavel, vd (2013)'nin yaptığı çalışmalar incelendiğinde YFC içeren karışımlarda benzer sonuçlara ulaşılmıştır. 600°C sıcaklığa kadar numunelerin mukavemetlerinin %15'e kadar azaldığını, 800°C sıcaklık altında ise minimum basınç değerine ulaştığını gözlemlemiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda (1000 ve 1200°C) malzemenin mekanik özelliklerinde daha fazla bozulma oluştuğunu belirtmişlerdir [64].

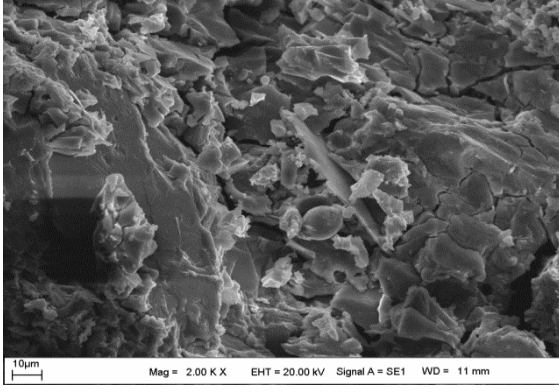
Kantarıcı (2013) yaptığı çalışmada Elazığ ferrokrom cürufunu atı malzeme olarak kullanarak geopolimer harçlar hazırlamış. Bağlayıcı olarak Na_2SiO_3 ve NaOH kullanmıştır. Harç numunelerin yangın dayanımlarını belirlemek amacıyla tüm numuneler sırasıyla 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C olmak üzere yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Deney sonuçlarına göre, geopolimer karışımlarda 100°C ve 300°C sıcaklıklarda kontrol karışımına nispeten basınç dayanımında artış meydana geldiği gözlenmiştir. Sonuç olarak geopolimer beton örneklerinin normal beton örneklerine kıyasla yangın dayanımlarının daha iyi olduğu belirlenmiştir.

5.3.5. SEM analiz sonuçları

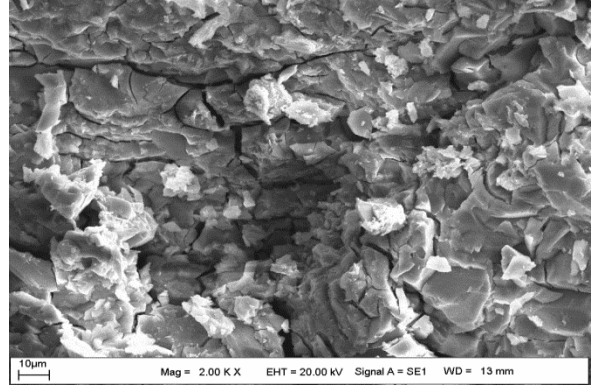
SEM analizi için 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip numuneler 28 gün oda koşullarında bekletilmiştir. Numuneler basınç dayanım testine maruz bırakılmadan önce 90°C etüvde 24 saat kurutma işlemi uygulanmış ve basınç dayanım testi uygulanmıştır. Basınç dayanım testi uygulanan numunelerden alınan parçacıkların SEM analiz görüntüleri incelenmiştir.

5.3.5.1 5 M olan numunelerin SEM analizi

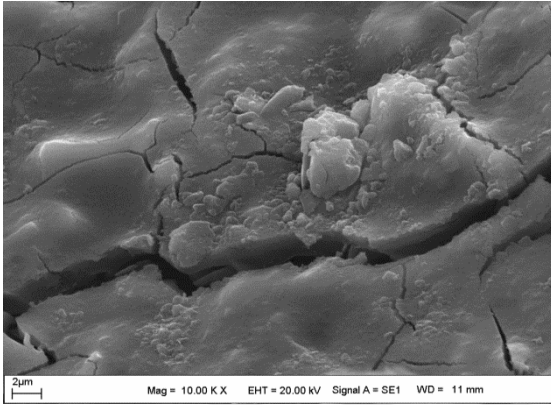
5 M olarak üretilen %100 YFC, %97 YFC+%3 B, %94 YFC+%6 B, %91 YFC+%9 B, %88 YFC+%12 B, %85 YFC+%15 B oranlarına sahip numunelerin SEM görüntüleri Şekil 5.14'de verilmiştir.



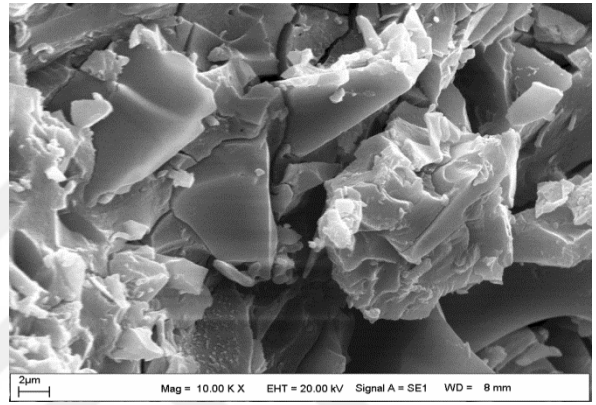
(a)



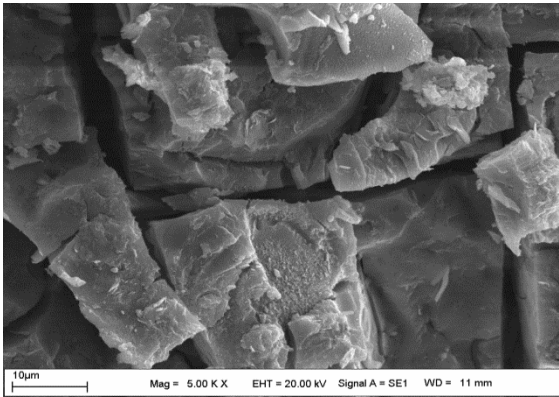
(b)



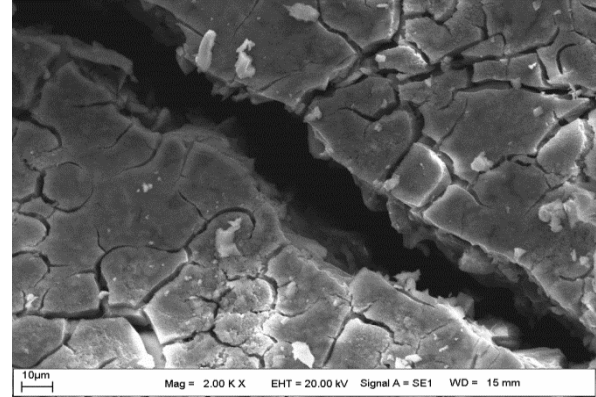
(c)



(d)



(e)



(f)

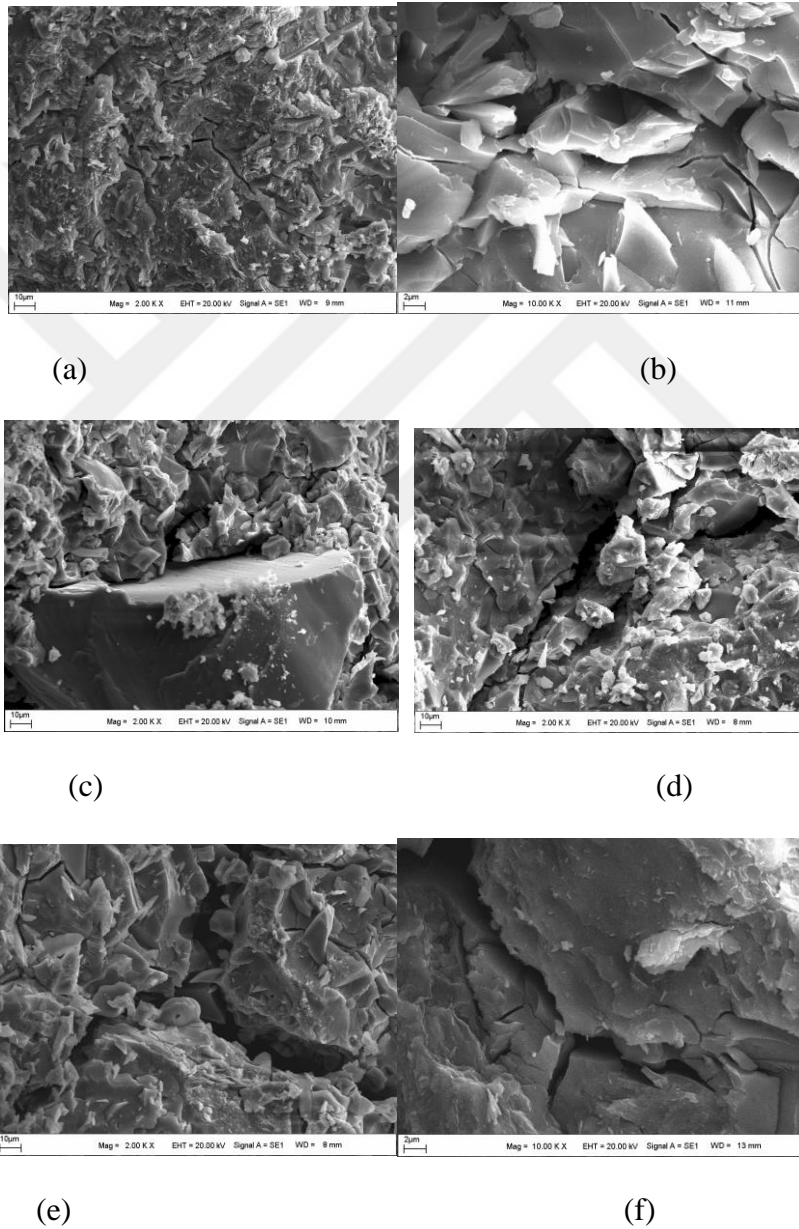
Şekil 5.14. 5 M üretilen harç numunelerin SEM görüntüleri, a) %0 B içeren karışım b) %3 B içeren karışım c) %6 B içeren karışım d) %9 B içeren karışım e) %12 B içeren karışım f) %15 B içeren karışım

Şekil 5.14'de a'da yoğun bir yapıda mikron boyutlarında basınç çatlakları mevcuttur. Şekil 5.14'de b'de %100 YFC bulunan a 'ya göre daha az yoğun bir yapı mevcuttur. Şekil 5.14'de c'de ve d'de yoğunluk değerlerinde bir azalma gözlenmesi ile birlikte basınç çatlak

açıklığı artış göstermiştir. Şekil 5.14 'de e ve Şekil 5.14 'de f'ye bakıldığında ise yoğun yapının devam ettiği ama diğer şekiller ile karşılaştırıldığında basınç çatlak açıklığının arttığı saptanmıştır. Tüm şekiller incelendiğinde etrenjit oluşumu gözlemlenmemiştir.

5.3.5.2 10 M olan numunelerin SEM analizi

10 M olarak üretilen %100YFC, %97YFC+%3B, %94YFC+%6B, %91YFC+%9B, %88 YFC+%12 B, %85YFC+%15B oranlarına sahip numuneler 28 günlük SEM görüntüleri Şekil 5.15'de verilmiştir.

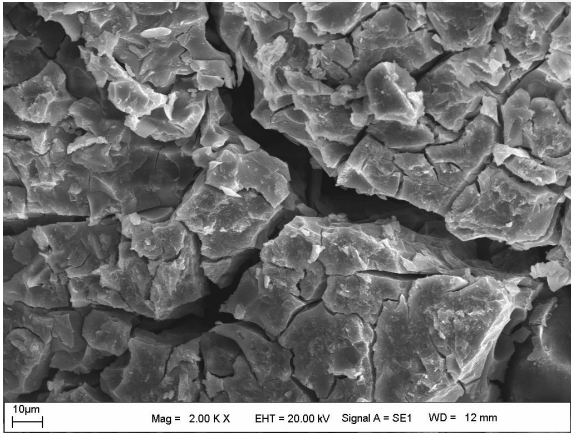


Şekil 5.15. 10 M üretilen harç numunelerin SEM görüntüleri, a) %0 B içeren karışım b) %3 B içeren karışım c) %6 B içeren karışım d) %9 B içeren karışım e) %12 B içeren karışım f) %15 B içeren karışım

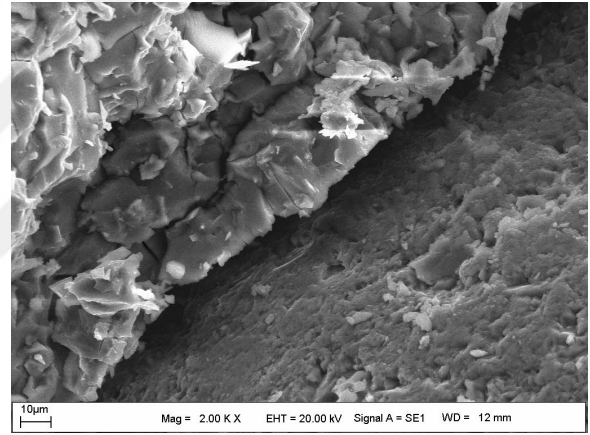
Şekil 5.15'de a'da yoğun bir yapı ve beraberinde küçük parçacıklar şeklinde harç kalıntıları gözlenmiştir. Şekil 5.15'de b'de bu yoğun yapı devam etmesi ile birlikte mikron düzeyinde basınç çatlaklarına rastlanmıştır. Ayrıca beyaz kare şeklindeki parçacıkların reaksiyona girmeyen sodyum parçacıkları olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.15'de c ve d'de yoğunluk değerlerinde bir azalma gözlenmesi ile birlikte çatlak açıklıklarında artış gözlenmiştir. Şekil 5.15'de e ve f'ye bakıldığında ise yoğun yapının devam ettiği ama diğer şekiller ile karşılaştırıldığında çatlak açıklığının arttığı görülmüştür. Tüm şekiller incelendiğinde etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır.

5.3.5.3 15 M olan numunelerin SEM analizi

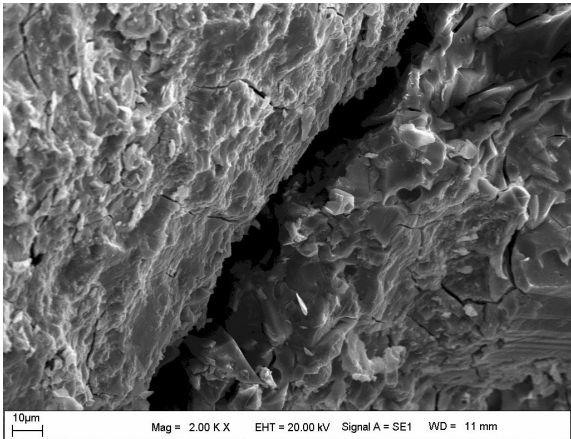
15 M olarak üretilen %100YFC, %97YFC+%3B, %94YFC+%6B, %91YFC+%9B, %88YFC+%12B, %85YFC+%15B oranlarına sahip numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri Şekil 5.16.'da verilmiştir.



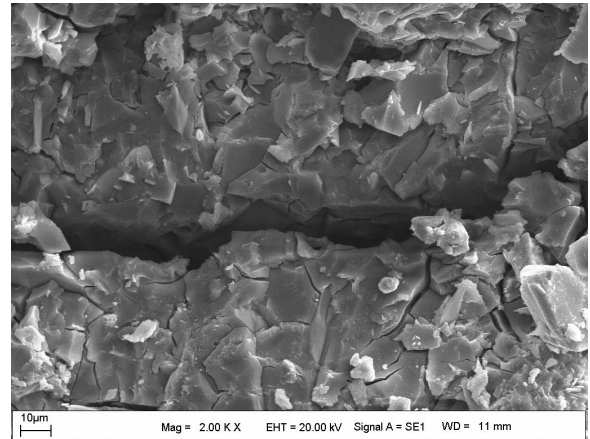
(a)



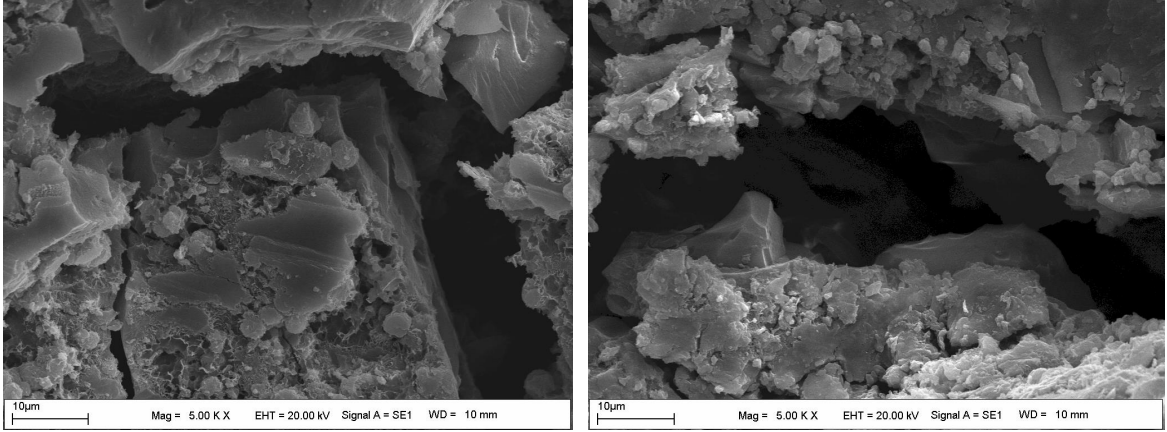
(b)



(c)



(d)



(e)

(f)

Şekil 5.16. 15 M üretilen harç numunelerinin SEM görüntüleri, a) %0 B içeren karışım b) %3 B içeren karışım c) %6 B içeren karışım d) %9 B içeren karışım e) %12 B içeren karışım f) %15 B içeren karışım

Şekil 5.16'da a'da yoğun bir yapıda olsa da belli bölgelerde numunenin yerleştirilmesinden kaynaklı aderansın tam olarak sağlanamadığı gözlenmiştir. Şekil 5.16'da b'de bu yoğun yapı devam etmesi ile birlikte mikron düzeyde çatlaklara rastlanmıştır. Şekil 5.16'da c'de ve d'de yoğunluk değerlerinde bir azalma gözlenmesi ile birlikte basınç çatlak açıklığı artış gözlenmiştir. Şekil 5.16'da e ve f bakıldığında ise yoğun yapının devam ettiği ama diğer şekiller ile karşılaştırıldığında çatlak açıklığının arttığı saptanmıştır. Tüm şekiller incelendiğinde etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır. 15 M olarak üretilen numuneler erken priz alması ve numunelerin kalıplara yerleştirilmesinde yaşanan sorunlardan dolayı diğer M oranlarına göre daha az yoğunlukta olduğu saptanmıştır.

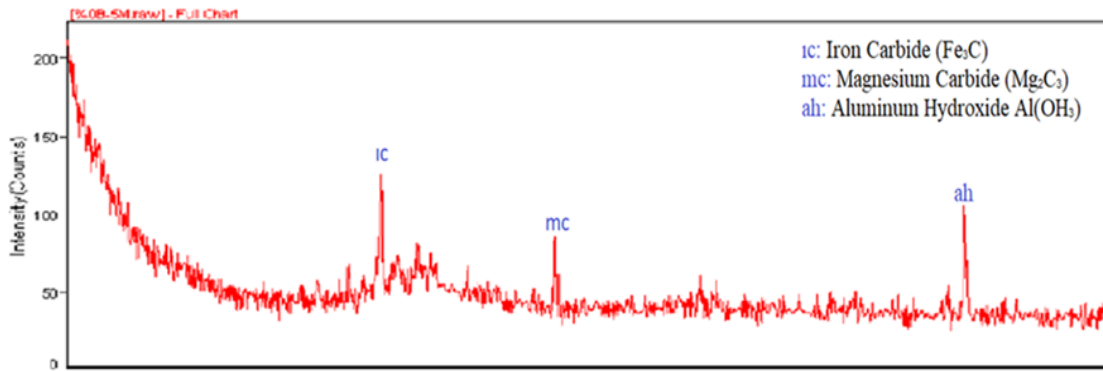
Xie vd., (2019) geri dönüştürülmüş agrega içeren betonlarda normal çimento hamurunun yerini tamamen almak üzere granüle YFC/metakaolin bazlı geopolimer ürettikleri çalışmada SEM analizi sonuçları incelendiğinde, geri dönüştürülmüş agregalı beton gruplarında oluşan çatlakların nedeni olarak geri dönüştürülmüş agrega ve ara yüzey geçiş bölgesinde meydana gelen bozukluklar gösterilmiştir. Doğal agregalı betonlarda geri dönüştürülmüş agrega olmaması nedeniyle daha az kusur olduğundan çatlaklar sadece ara yüzey geçiş bölgesinde ve çimento matrisindeki herhangi bir zayıf noktadan kaynaklanıp çatlakların çimento matrisi boyunca yayılmasıyla daha yüksek bir çatlak yoğunluğu oluşabileceği belirtilmiştir.

5.3.6. XRD analiz sonuçları

XRD analizi için 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip numuneler %100YFC, %97YFC+%3B, %94YFC+%6B, %91YFC+%9B, %88YFC+%12B, %85YFC+%15B oranlarında dökülmüştür. Basınç dayanım testi uygulanan numunelerden alınan parçacıkların XRD analizi de yapılmıştır.

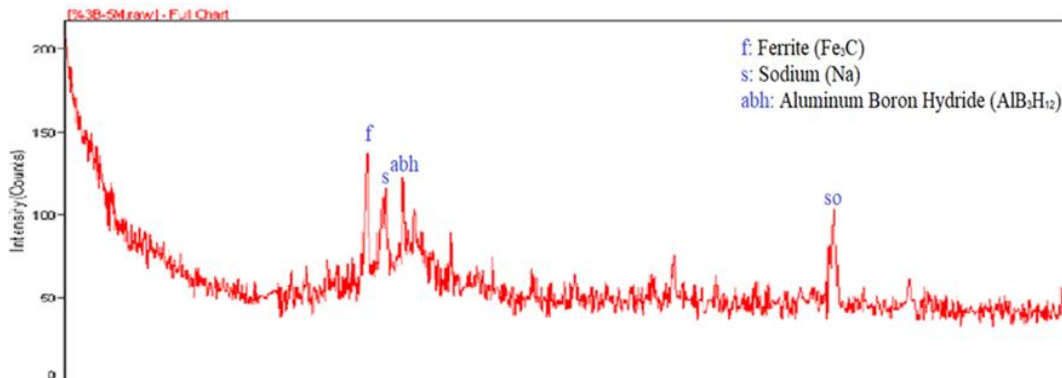
5.3.6.1 5 M olan numunelerin XRD analizi

5 M olarak üretilen %100YFC, %97YFC+%3B, %94YFC+%6B, %91YFC+%9B, %88YFC+%12B, %85YFC+%15B oranlarına sahip numuneler 28.günün sonunda basınç dayanımına tabi tutulmuş ve basınç dayanımı sonunda alınan numune parçacıkları üzerinde XRD deneyleri yapılmıştır. XRD deneyleri sonucunda alınan görüntülerin sonuçları Şekil 5.17. – Şekil 5.23. arasında verilmiştir.



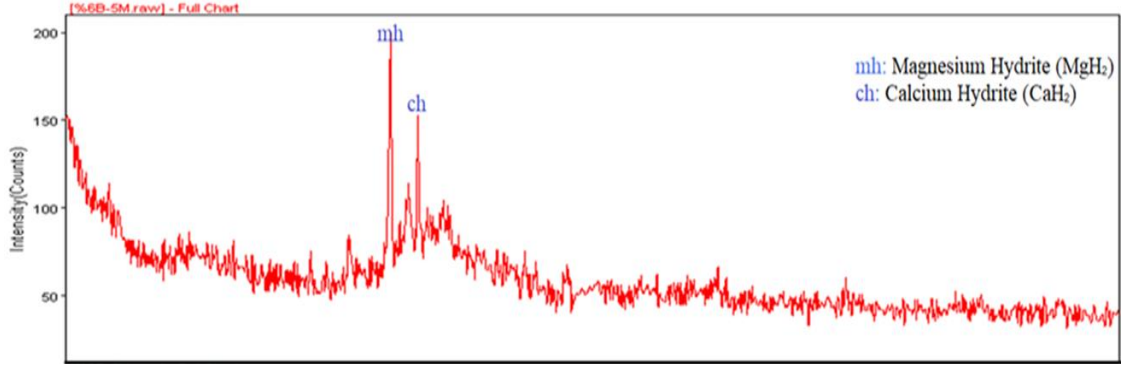
Şekil 5.17. 5 M olarak üretilen %0 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

5 M %0 bor içeren numunelerde Iron Carbide, Magnesium Carbide ve Aluminum Hydroxide fazları tespit edilmiş olup XRD deneyinde pikler çok belirgin olmadığından elde edilen difraktogramlarda sağlıklı sonuçlar alınamamıştır.



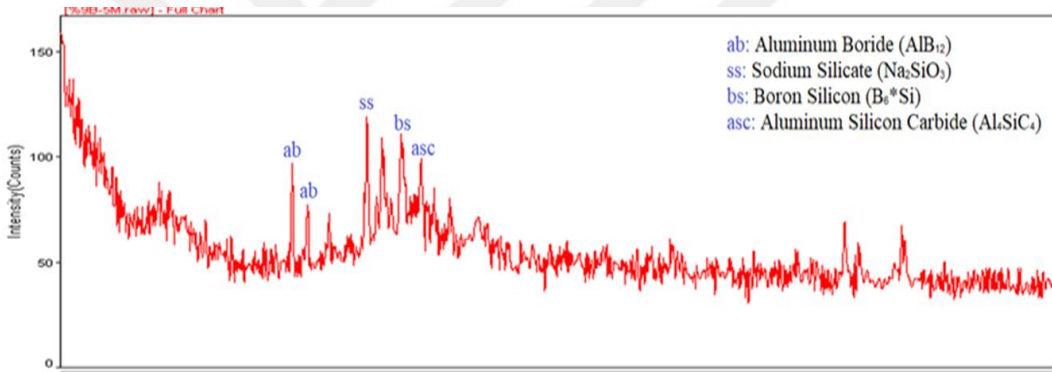
Şekil 5.18. 5 M olarak üretilen %3 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%3 bor içeren seride ise Ferrite, Sodium ve Aluminum Boron Hydride fazları tespit edilmiştir.



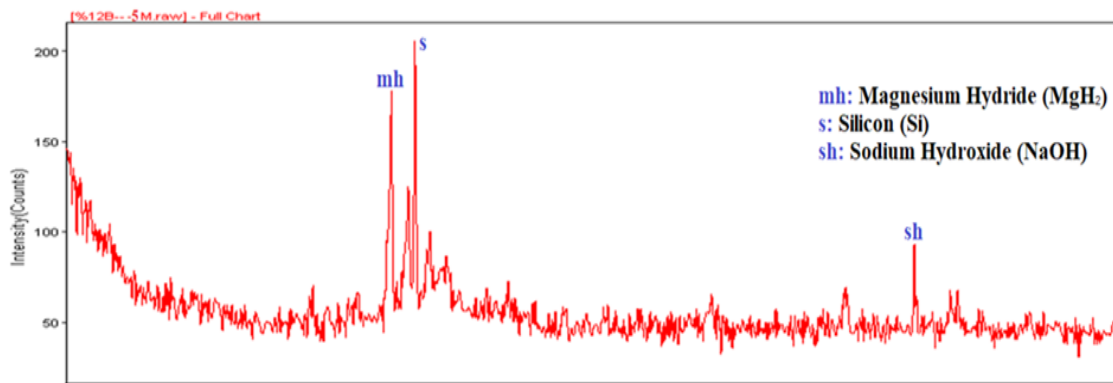
Şekil 5.19. 5 M olarak üretilen %6 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

5 M %6 bor içeren seride Magnesium Hydrite ve Calcium Hydrite fazları tespit edilmiş olup XRD deney sonuçlarından elde edilmiştir.



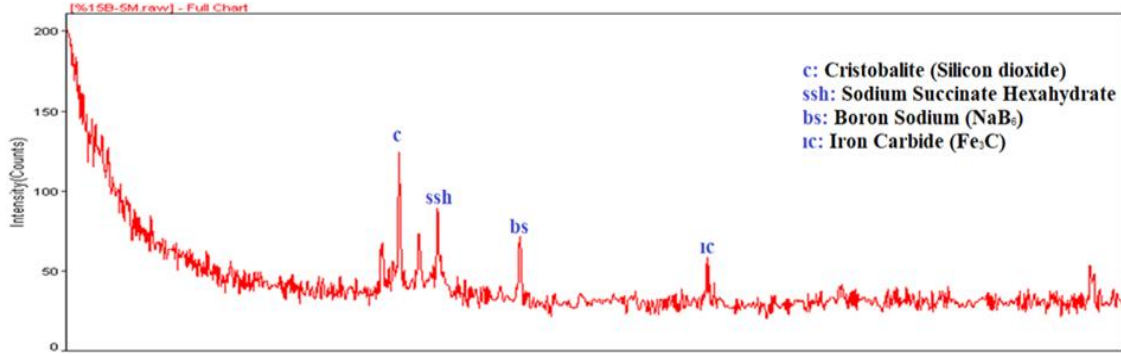
Şekil 5.20. 5 M olarak üretilen %9 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%9 bor içeren seride ise Alüminyum Boride, Sodium Silicate, Boron Silicon ve Alemnium Silikon Carbide fazları tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. 5 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

5 M %12 bor içeren seride Magnesium Hydrite, Silicon, Sodium Hydroxide fazları tespit edilmiş olup XRD deney sonuçlarından elde edilmiştir.

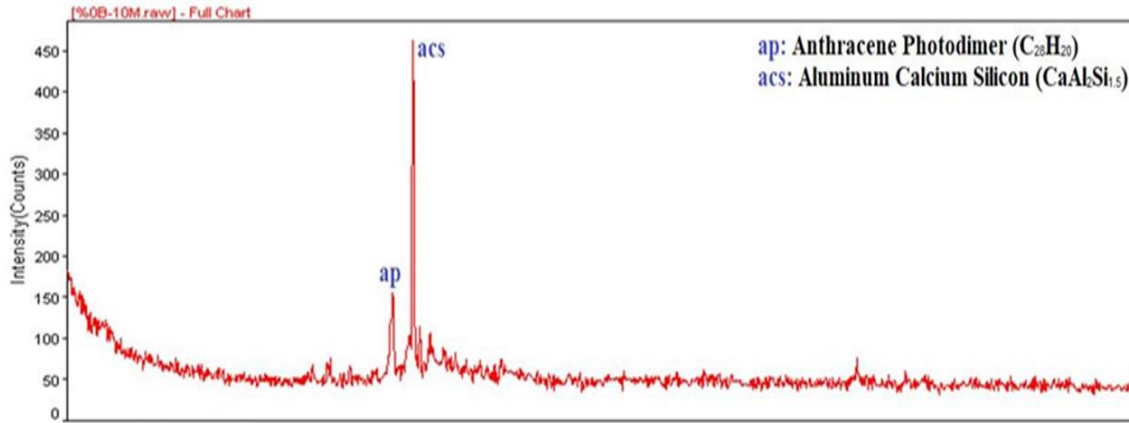


Şekil 5.22. 5 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%15 bor içeren seride ise Cristobalite , Sodium Succinate Hexahydrate , Boron Sodium ve Iron Carbide fazları tespit edilmiştir.

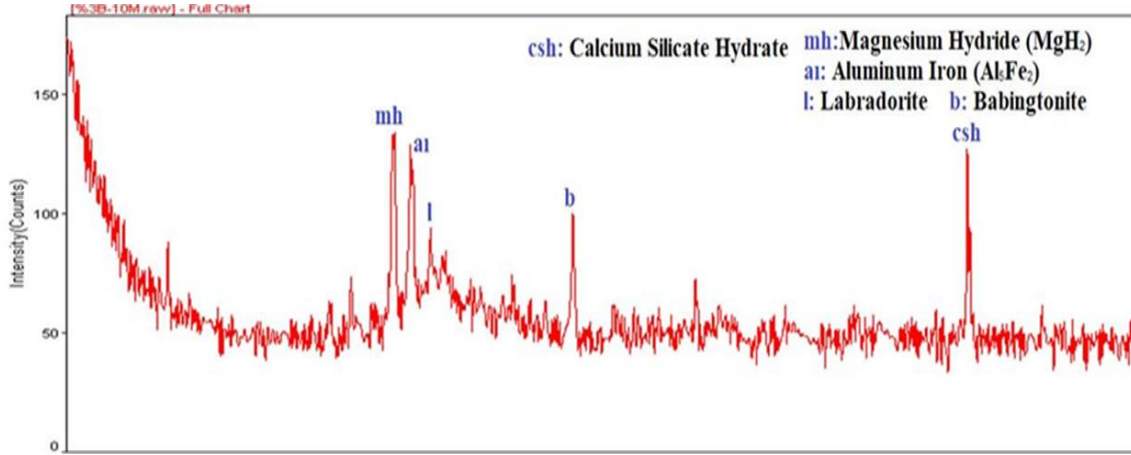
5.3.6.2 10 M olan numunelerin XRD analizi

10 M olarak üretilen için %100YFC, %97YFC+%3B, %94YFC+%6B, %91YFC+%9B, %88YFC+%12B, %85YFC+%15B oranlarına sahip numuneler 28 günlük numuneler basınç dayanım deneyleri sonrasında alınan parçalar üzerinde XRD deneyleri yapılarak sonuçları şekil 5.23. – Şekil 5.28. arasında verilmiştir



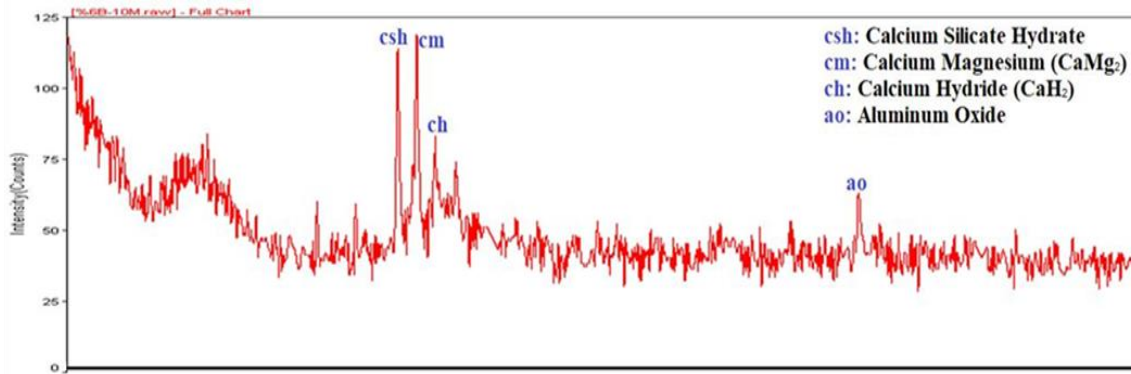
Şekil 5.23. 10 M olarak üretilen %0 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

10 M %0 bor içeren seride Anthracene Photodimer, Aluminum Calcium Silicon fazları tespit edilmiş olup XRD deneyi sonuçları elde edilmiştir.



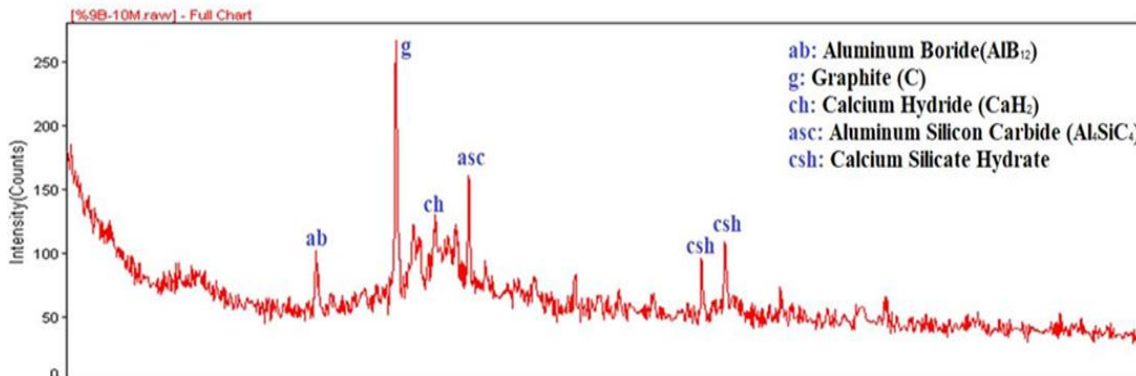
Şekil 5.24. 10 M olarak üretilen %3 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%3 bor içeren seride ise Magnesium Hydrite , Calcium Silicate Hydrate, Aluminum İron, Labradorite ve Babingtonite fazları tespit edilmiştir.



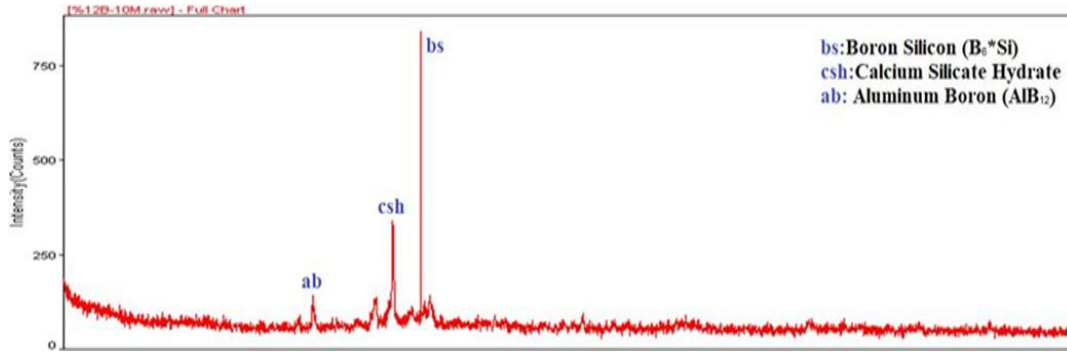
Şekil 5.25. 10 M olarak üretilen %6 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

10 M %6 bor içeren seride Calcium Silicate Hydrate, Calcium Hydrite, Calcium Magnesium ve Alemnium Oxide fazları tespit edilmiş olup XRD deneyinde pikler çok belirgin olmadığından dolayı edilen difraktogramlarda sağlıklı sonuçlar alınamamıştır.



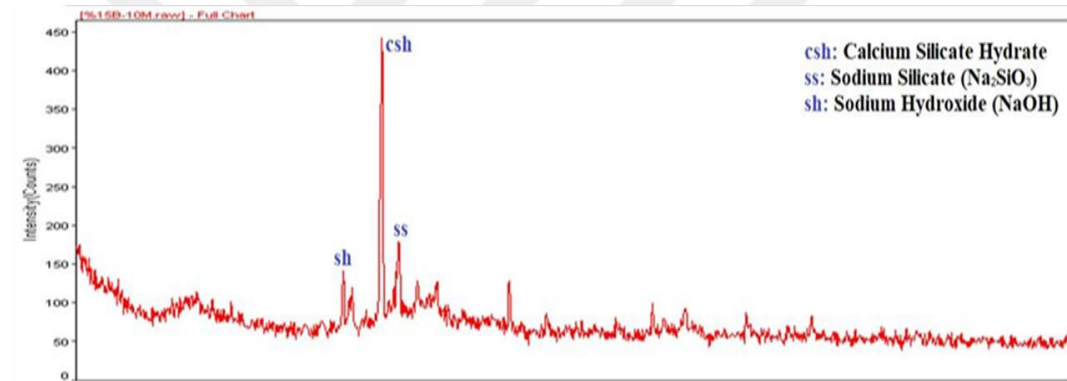
Şekil 5.26. 10 M olarak üretilen %9 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%9 bor içeren seride ise Alevinun Boride, Calcium Silicate Hydrate, Calcium Hydrate, Graphite ve Aluminum Silicon Carbide fazları tespit edilmiştir.



Şekil 5.27. 10 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

10 M %12 bor içeren seride Boron Silicon, Calcium Silicate Hydrate, Aluminum Boron fazları tespit edilmiş olup XRD deney sonuçlarından elde edilmiştir.

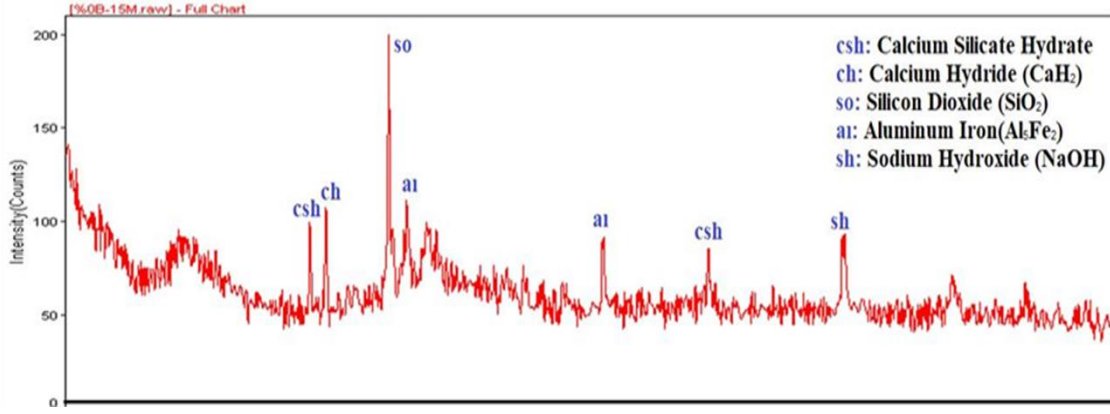


Şekil 5.28. 10 M olarak üretilen %15 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%15 bor içeren seride ise Calcium Silicate Hydrate, Sodium Silicate, Sodium Hydroxide fazları tespit edilmiştir. Çalışma içerisinde kullanılan bor, sodyum silikat ve sodyum hidroksitin ürünleri olan fazlar görülmüştür.

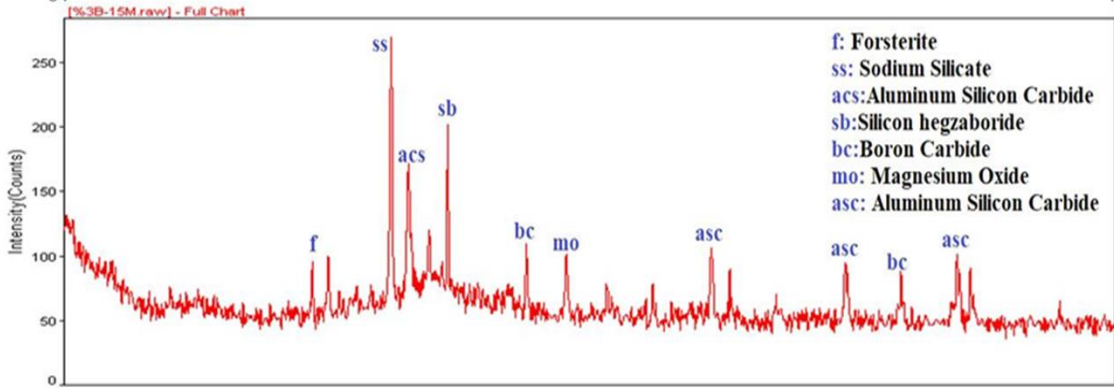
5.3.6.3 15 M olan numunelerin XRD analizi

15 M olarak üretilen için %100YFC, %97YFC+%3B, %94YFC+%6B, %91YFC+%9B, %88YFC+%12B, %85YFC+%15B oranlarına sahip 28 günlük numuneler basınç dayanımına maruz bırakıldıktan sonra elde edilen parçacıklar XRD deneylerine tabi tutulmuş olup alınan sonuçlar Şekil 5.29– Şekil 5.34 arasında verilmiştir.



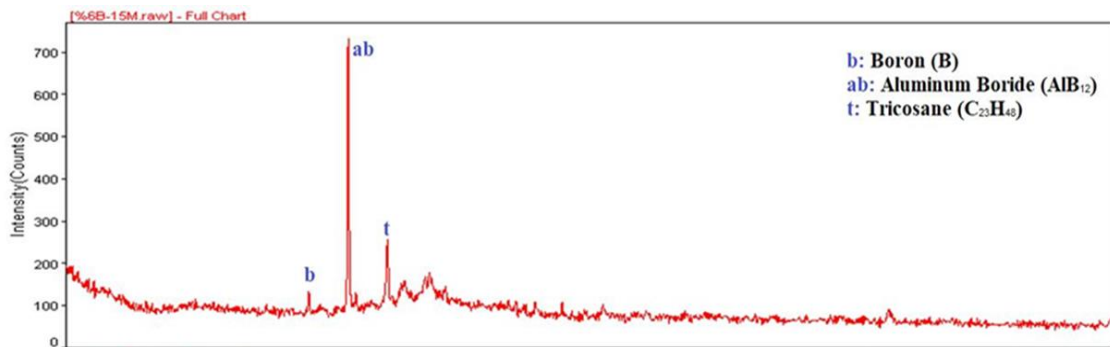
Şekil 5.29. 15 M olarak üretilen %0 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

15 M %0 bor içeren seride Calcium Silicate Hydrate, Calcium Hydrite, Silicon Dioksit ve Aluminum İron fazları tespit edilmiştir.



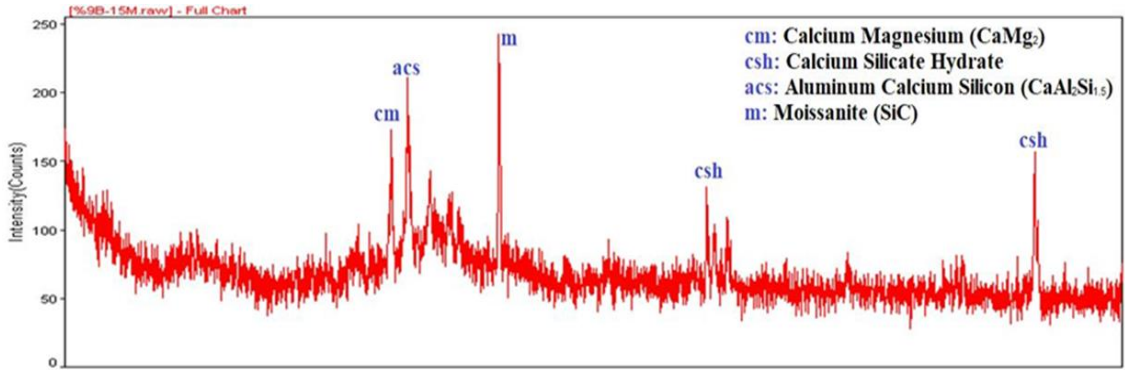
Şekil 5.30. 15 M olarak üretilen %3 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%3 bor içeren seride ise Sodium Silicate ,Aluminum Silikon Carbide, Boron Carbide, Forsterite, Silicon Hegzaboride, Magnesium Oxide fazları tespit edilmiştir.



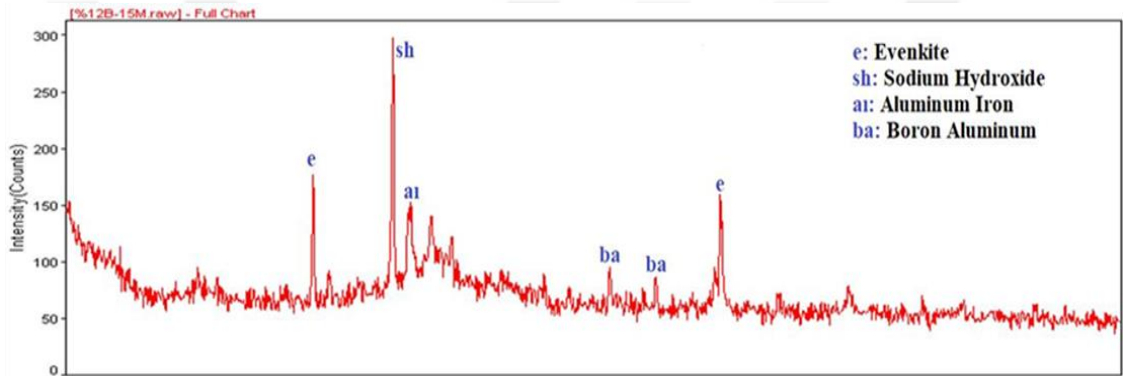
Şekil 5.31. 15 M olarak üretilen %6 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizleri

15 M %6 bor içeren seride Boron, Alüminyum Boride ve Tricosane fazları tespit edilmiştir.



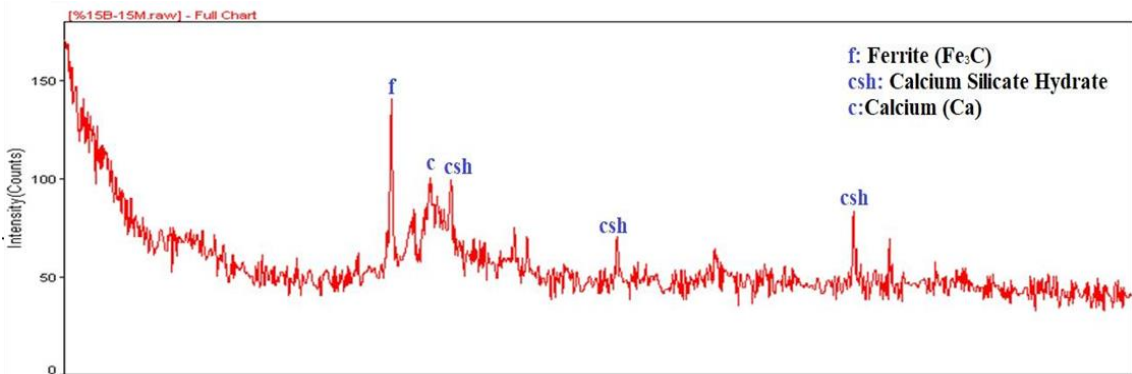
Şekil 5.32. 15 M olarak üretilen %9 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%9 bor içeren seride ise Calcium Silicate Hydrate ,Aleminum Calcium Silikon tespit edilmiştir.



Şekil 5.33. 15 M olarak üretilen %12 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

15 M %12 bor içeren seride Sodium Hydroxide, Alüminyum İron ve Boron Alemunium fazları tespit edilmiştir.



Şekil 5.34. 15 M olarak üretilen %15 oranında bor atığı içeren harçların XRD analizi

%15 bor içeren seride ise Calcium Silicate Hydrate , Calcium ve Ferrite tespit edilmiştir.

Peng vd.,(2019) yaptıkları çalışmada,geopolimer betondaki ara yüzey geçiş bölgesinin mikro sertliğinin geopolimer hamurun mikro sertliğine kıyasla daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.[64]

Bor atığı oranındaki artışın,ara yüzey geçiş bölgesinde çatlak genişliğinde bir artışa ve mikro sertlikte ise bir azalmaya neden olduğu gözlenmiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Eskişehir Kırka bor madenlerinden elde edilen bor atığı ve Karabük temin edilen YFC kullanılarak üretilen geopolimer harçların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. 5M, 10M ve 15M konsantrasyona sahip alkali çözeltiler için aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40 olan için %100YFC, %97YFC+%3B, %94YFC+%6B, %91YFC+%9B, %88YFC+%12B, %85YFC+%15B oranlarında her seri için üç adet numune dökülmüş, numuneler üretildikten sonra 90°C etüvde bir gün bekletilmiş ve daha sonra bu numunelerin 7 ve 28 günlük geopolimer harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, UPV deneyi, yüksek sıcaklık dayanım deneyi ve mikro yapı (SEM ve XRD) deneyleri uygulanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir.

- Priz başlangıç ve bitiş süreleri deneylerine göre 5 M olarak hazırlanan numunelerde priz başlangıç ve bitiş süreleri daha yüksek çıkmış bu sınıf harçların sıcak hava koşullarında kullanımı daha uygun olduğu görülmüştür. Bor oranı arttıkça priz başlangıç ve bitiş sürelerinde bir miktar artış gözlenmiştir. 10 M olarak hazırlanan numunelerde priz başlangıç ve bitiş süreleri 5 M ve 15 M olan numunelere göre daha yüksek uygulamada kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. 15 M olarak hazırlanan numunelerde priz başlangıç ve bitiş süreleri düşük değerlerde olup kalıba yerleştirme ve karışım açısından işlenebilirlik sorunları meydana getirmiştir. Bu durum karışımlara priz geciktirici katılarak aşılabilecek durumdadır.
- Basınç dayanım 7 ve 28 günlük numunelere uygulanmıştır. 7 günlük numuneler göz önüne alındığında 5 M, 10 M, 15 M için bor atığı oranı arttıkça basınç dayanım değerlerinde bir miktar azalış meydana gelmiştir. 28 günlük basınç dayanım değerleri göz önüne alındığında 5 M, 10 M, 15 M olarak hazırlanan numuneler için bor atığı arttıkça basınç dayanımlarında bir miktar azalmalar meydana gelmiştir. 7.günün sonunda yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında 28 günlük numunelerde bor oranı arttıkça basınç dayanımında yüksek miktarda bir değişim olmadığı görülmüştür. 5 M, 10 M ve 15 M olan serilerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında 10 M olan numunelerde en yüksek basınç dayanımı değerleri gözlenmiştir. 5 M, 10 M ve 15 M olan serilerin tamamında bor oranı arttıkça belli

oranlarda basınç dayanım azalışı gözlenmiştir. Bu çalışma %15'e kadar B atığı kullanımı ile geopolimer taşıyıcı harç üretilebileceğini göstermiştir.

- 10 M olarak hazırlanan numunelerin 7 günlük eğilme dayanımı deneyleri 5 M ve 15 M olan numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. 5 M, ve 15 M olan numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri 10 M olan numunelerle karşılaştırıldığında daha düşük çıkmıştır. 5 M, 10 M ve 15 M olan serilerin tamamında bor oranı arttıkça belli oranlarda eğilme dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir.
- Numunelerin UPV deneyleri göz önüne alındığında ,numunelerin basınç dayanımları ile benzerlik gösterdikleri görülmüştür. Örneklerin içerdikleri bor atığı içeriği arttıkça UPV değerlerinde azalmalar meydana geldiği görülmüştür. 10 M olan numunelerin 28 günlük UPV değerleri diğer örneklere göre en yüksek çıkmıştır.
- Yüksek sıcaklık sonrasında numunelerin basınç dayanım deney sonuçları incelendiğinde 10 M olarak üretilen numunelerde en yüksek dayanım değerleri kontrol numunelerinden elde edilmiştir. Bor atığı içeriği arttıkça numunelerin or atığı içeriği arttıkça numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları azalmıştır. 300 °C maruz bırakılmış numunelerde 600 °C maruz bırakılan numunelere göre daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahipken 900 °C maruz bırakılan numunelerde ise diğer numunelere göre daha yüksek bir dayanım azalmaları meydana gelmiştir.
- 300°C, 600°C ve 900°C maruz bırakılan numunelerden elde edilen veriler incelendiğinde yüzde azalış oranları incelendiğinde bor oranı artışı basınç değerlerinde azalma ortaya koymasına rağmen yüzde azalış değerleri incelendiğinde bor oranının arttığı numunelerde yüksek sıcaklık deneyine maruz bırakıldığında bor oranı düşük olan numuneler ile kıyaslandığında daha düşük miktarda basınç değer değişimleri olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu veriler ışığında bor oranı arttıkça yüksek sıcaklığa karşı dayanımın arttığı gözlenmiştir.
- SEM analizleri sonuçlarında bor yüzdesi arttıkça çatlak miktarlarında da artış olduğu tespit edilmiştir.
- XRD analizi deneyleri sonucunda numune içeriklerinde bor, sodyum silikat ve sodyum hidroksit ürünleri içeren fazlar görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Dyson, R. G. (2004). Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick. *European journal of operational research*, 152(3), 631-640.
- [2] Pavithra, P. E., Reddy, M. S., Dinakar, P., Rao, B. H., Satpathy, B. K., & Mohanty, A. N. (2016). A mix design procedure for geopolymers concrete with fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 133, 117-125.
- [3] Haddad, R. H., & Alshbuol, O. (2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Construction and Building Materials*, 114, 699-707.
- [4] Komnitsas, K., Zaharaki, D., & Perdikatsis, V. (2009). Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 760-768.
- [5] Davidovits, J. (2008). Geopolymer Chemistry and Applications, saint-Quentin. France, *institut géopolymère*.
- [6] Davraz, M. (2013). Bor Katkılı Portland Çimentosu ile Üretilen Betonların Mühendislik Özelliklerinin, Avantaj ve Dezavantajlarının ve Optimum Uygulama Alanlarının Belirlenmesi. BAP Proje no: 2573M10, Süleyman Demirel Üniversitesi. Isparta
- [7] Acarkan, N. (2002). Bor Ürün Çeşitleri ve Kullanım Alanları. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, 3-4 Ekim, Kütahya, 1-5.
- [8] Topçu, İ.B., Boğa, A.R. ve Demir, A. (2006). Bor Atıklı Çimento Harçlarında Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi. 3. Uluslararası Bor Sempozyumu, 2- 4 Kasım, Ankara, s. 117-121
- [9] Akyıldız, A. (2012). Beton üretiminde bor atıklarının puzzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması
- [10] Pehlivanoglu, H. E., Davraz, M., & Kılınçarslan, Ş. (2013). Bor Bileşiklerinin Çimento Priz Süresine Etkisi ve Denetlenebilirliği. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(3), 39-48.
- [11] Kaman, D., Köroğlu, L., Ayas, E. ve Güney, Y. (2017). The Effect Of Heat Treated Boron Derivative Waste At 600°C On The Mechanical and Microstructural Properties Of Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 154, 743-751
- [12] Çağlar, A. (2018). Geleneksel kastamonu evlerinde kullanılan harman tuğlası özelliklerinin bor atığı katkısı ile iyileştirilmesi üzerine deneysel araştırma (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [13] Kavasa, T., Olgun, A., Erdogan, Y., Once, G. (2007). The Effect of Pectin on The Physicochemical and Mechanical Properties of Cement Containing Boron. *Building and Environment*, 42, 1803-1809.
- [14] Erdoğan, E., Yılmaz, B., Erdoğan Y., Avcıata, U. (2004). Sodyum Karbonat'ın Kolemanit Konsantratör Atığı + Karabük Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. 2.Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, Türkiye, 425-430
- [15] Kula, İ., Erdoğan, Y., Olgun, A., Sevinç, V. (2001). Effects of Colemanite Waste, Coal Bottom Ash, and Fly Ash on the Properties of Cement. *Cement and Concrete Research*, 31, 491-494.
- [16] Uğurlu, A., Özdemir, M., Topçu, İ. (2004). Bor İçeren Kil Atıkların Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi Evaluation of Boron Containing Clay Wastes in Cement.

- .Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, Türkiye, 405-411.
- [17] Davraz, M. (2010). The Effect of Boron Compound on the Properties of Cementitious Composites. *Science and Engineering of Composite Materials*, 17/1, 1-17.
- [18] Demir D., Keleş G. (2006). Radiation Transmission of Concrete Including Boron Waste for 59.54 and 80.99 keV Gamma Rays. *NIM-B 245*, p. 501-504.
- [19] Buluttekin, M. (2008). Bor Madeni Ekonomisi: Türkiye'nin Dünya Bor Piyasasındaki Yeri. 2. Ulusal İktisat Kongresi, 20-22 Şubat, İzmir, s.1-36.
- [20] Volkman D.E., Bussolini P.L. (1992). CoMParison of Fine Particle Colemanite and Boron Frit in Concrete for Time-Strength Relationship. JTE, USA
- [21] Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., & Zeybek, B. (2002). Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi Utilization of Natural Pozzolan, Bentonit and Colemanite Waste in Cement Production.
- [22] Yalçınalp, S., 2000. Hafif beton üretimi.
- [23] Keskin, M., & Karacasu, M. (2018). Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 185-192.
- [24] Gezmen, T., & Türkel, S. (2017). Bor Minerali Ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Özelliklerinin Ve Sülfata Dayanıklılığının İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19(57), 757-778.
- [25] Möröydor, E. (2000). Borik asit atığı ve çelik tel katkılı hafif beton üretimi.
- [26] Ergin, E. R. G. İ., Bilgin, G. S., Zeybek, M. S., & Abdurrahman, A. S. A. N. (2007). Endüstriyel Atık Katkılı Çimentoların Beton Dayanımı Ve Donatı Korozyonuna Etkileri.
- [27] Çelik, A. (2019). Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri.
- [28] Vural, T. (2019). Atık külün geopolimer kompozit malzeme üretiminde kullanımı.
- [29] Tokay, H. (2019). Vermikülit ve uçucu kül katkılı geopolimer harç üretilmesi.
- [30] Temuujin, J. V., & Van Riessen, A. (2009). Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 634-639.
- [31] Erdoğan, S. T. (2014). Are geopolymers environmentally friendly?. *Cem. Concr. World*, 19(107), 50-62.
- [32] Álvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., ... & Barra, M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 175-183.
- [33] Al Muhit, B. A., Foong, K. Y., Alengaram, U. J., & JUMAAT, M. Z. (2013). Geopolymer Concrete: A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(2), 11-15.
- [34] Li, Z., Ding, Z., & Zhang, Y., 2004, May. Development of sustainable cementitious materials. In *Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China* (pp. 55-76).
- [35] Bilenler Altundal, M. (2019). *Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Betonların% 5 Sülfürik Asit Etkisinde Mekanik Davranışı*.
- [36] Özbey, N. (2021). Farklı bağlayıcı miktarlarına sahip yüksek fırın cürufu ikameli uçucu küllü geopolimer betonların durabilitesi.
- [37] Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y. L. (2003). Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 83-89.

- [38] Wang, K., Shah, S. P., & Mishulovich, A. (2004). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 299-309.
- [39] Erdoğan, T., 2015. *Beton*. Ankara: ODTÜ Yayınları.
- [40] Hillerborg, A. (1985). The theoretical basis of a method to determine the fracture energy GF of concrete. *Materials and structures*, 18(4), 291-296.
- [41] Joseph, B., & Mathew, G. (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Scientia Iranica*, 19(5), 1188-1194.
- [42] Recommendation, R. D. (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and structures*, 18(106), 285-290.
- [43] Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- [44] Yeşilyurt, E. (2013). “Isıl İşlem örmüş Ham Perlit ile Yeni Nesil Yapı Malzemesi Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, s.127.
- [45] Aydın, T., & Pehlivanlı, Z. O. (2017). Jeopolimer esaslı gözenekli hafif yapı malzemelerinin geliştirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 227-236.
- [46] <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/bor-mineralleri.html> (27 Kasım 2021).
- [47] <https://tr.tradingeconomics.com/country-list/gdp-annual-growth-rate> (27 Kasım 2021)
- [48] <https://www.etimaden.gov.tr/bor-elementi>(27 Kasım 2021)
- [49] Erdoğan, T. Y. (2004). “ Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri” , THBB Yayınları.
- [50] Acı 233R-03, “Slag Cement in Concrete and Mortar”, 2003
- [51] Siddique,R., Khan, and Mohammadı. (2011). “Supplementary Cementing Materials”, Springer.
- [52] Hewlett, P. C. (2004). “Lea’s Chemistry of Cementand Concrete”, Elsevier Science and Technology Books.
- [53] TS EN 196-3. (2000). Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini. TSE, Ankara.
- [54] TSE EN 196-1. (2002). Çimento deney metotları-Dayanım tayini, TSE, Ankara.
- [55] TS EN 1015-11. (2000). Kagir Harcı Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- [56] TS EN 12504-4, (2004). “Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [57] TSE EN 196-1. (2002). Çimento deney metotları-Dayanım tayini, TSE, Ankara.
- [58] Taştımur, O., (2021). “Uçucu Kül ve Cam Lifi İçeren Cürufufla Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi” Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Teknolojileri, Elâzığ.
- [59] Uğurlu, İ., (2020). “Yüksek Fırın Cürufufları Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme Ve Sülfat Direncine Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisi” İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [60] Çelik,A. (2019)” Sentetik Liflerle Güçlendirilmiş Bor Atığı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Davranışı Ve Mekanik Özellikleri”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- [61] Pavel R.,Patrik B., Pavla R., (2013) , Construction and Building Materials Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high

- temperatures Pages 1479-1487.
- [62] Eti Maden For Life, Faaliyet Raporu, Page 47- 54, (2019).
- [63] Mısır, M.N. (2021). “Elâzığ Ferrokrom Cürufu ile Alkali Aktive Edilmiş Cam Lifi ve Atık Mermer Tozu Katkılı Harçların Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- [64] Topal, Ö. (2020). Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin araştırılması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [65] Xie, J., Chen, W., Wang, J., Fang, C., Zhang, B., Liu, F. (2019). Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 345–359.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Oğuzhan BELTEKİN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği. Fırat Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık

