

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

**NANO SİLİS, MİKRO SİLİS VE POLİMER KATKILAR İÇEREN VOLKANİK TÜF
ESASLI GEOPOLİMER BETON ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

FATİH KANTARCI

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

MAYIS 2018

Tezin Başlığı: Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tüf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Fatih KANTARCI

Sınav Tarihi: 04.05.2018

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Tez Danışmanı:	Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN
	İnönü Üniversitesi	
	Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ
	Erciyes Üniversitesi	
	Doç. Dr. Kazım TÜRK
	İnönü Üniversitesi	
	Doç. Dr. M. Burhan KARAKOÇ
	İnönü Üniversitesi	
	Dr. Öğr. Üyesi Serhan İLKENTAPAR
	Erciyes Üniversitesi	

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum ‘**Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tüf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması**’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Fatih KANTARCI

ÖZET

Doktora Tezi

NANO SİLİS, MİKRO SİLİS VE POLİMER KATKILAR İÇEREN VOLKANİK TÜF ESASLI GEOPOLİMER BETON ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih KANTARCI

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

221 + xvii sayfa

2018

Danışman: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Çimento üretimi yüksek sıcaklıklarda (1400-1500°C) gerçekleştirilebildiği için önemli ölçüde enerji tüketimini zorunlu kılmaktadır. 1 ton çimento üretimi için yaklaşık olarak 1 ton CO₂ salınımı meydana gelmektedir. Dünyada toplam CO₂ salınımının %7'sinin çimento üretiminden kaynaklandığı bilinmektedir. Ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı çimentoya alternatif bağlayıcı arayışları giderek önem kazanmaktadır. Geopolimerler, doğal ve atık puzolanların alkali aktivatörler (NaOH ve Na₂SiO₃) ile aktive edilmesi sonucu üretilen alümin silikat tipi bağlayıcı malzemelerdir. Bu çalışmanın amacı, Nevşehir yöresinden temin edilen volkanik tüfün geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu amaçla, aktivatör tipi, aktivatör konsantrasyonu ve kür sıcaklığı parametrelerinin modifikasyonu ile optimum özelliklere sahip geopolimer hamur, harç ve beton numuneler üretilmiştir. Sonraki aşamada, deneysel olarak elde edilmiş optimum özelliklere sahip geopolimer betonun bazı mekanik, durabilite ve mikroyapı özelliklerine nano silis, mikro silis ve polimer katkılarının etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda volkanik tüfün geopolimer hamur, harç ve beton üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir. Kullanılan katkıların volkanik tüf esaslı geopolimer betonların bazı mekanik, durabilite ve mikroyapı özelliklerini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, volkanik tüf, alkali aktivatör, kür sıcaklığı, nano silis, mikro silis, polimer

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

PRODUCTION OF VOLCANIC TUFF BASED GEOPOLYMER CONCRETE CONTAINING NANO SILICA, MICRO SILICA AND POLYMER ADDITIVES AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

Fatih KANTARCI

Inönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

221 + xvii pages

2018

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Because cement production can be carried out at high temperatures (1400-1500°C), it requires significant energy consumption. Approximately 1 ton of CO₂ is emitted for 1 ton of cement production. It is known that 7% of total CO₂ emissions in the world is due to cement production. The search for alternative binding to cement is becoming increasingly important due to economic and environmental reasons. Geopolymers are aluminosilicate type binding materials produced by the activation of natural and waste pozzolans with alkali activators (NaOH ve Na₂SiO₃). The aim of this study is to investigate the usability of volcanic tuff supplied from Nevşehir region in the production of geopolymer binders. For this purpose, geopolymer paste, mortar and concrete specimens with optimum properties were produced by modification of activator type, activator concentration and curing temperature parameters. In the next step, the effects of nano silica, micro silica and polymer additives on some mechanical, durability and microstructure properties of geopolymer concrete which has experimentally obtained with optimum properties were investigated. As a result of the experimental studies, it has been revealed that volcanic tuff can be used in the production of geopolymer paste, mortar and concrete. It has been found that the additives used have a significant effect on some mechanical, durability and microstructural properties of volcanic tuff based geopolymer concrete.

Keywords: Geopolymer, volcanic tuff, alkali activator, curing temperature, nano silica, micro silica, polymer

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının konusunu öneren ve çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek tez çalıőmamı tamamlamamı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e;

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a;

Çalıőmalarımıza yardımcı olan beraber çalıőtıęım arkadaőım Sayın Arő. Gör. Enes EKİNCİ'ye

alıőlarımız için volkanik tuf temin etmemizi sağlayan Böltaş Madencilik ve Yapı yetkililerine,

Laboratuvar çalıőmalarımıza yardım eden teknisyenimiz Sayın İlhami BAYSAL'a,

teşekkür ederim.

Ayrıca, bugüne kadar olduğu gibi, doktora eğitimim süresince de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli eőime, anne ve babama teşekkür eder, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

	ÖZET	iii
	ABSTRACT.....	iv
	TEŞEKKÜR.....	v
	İÇİNDEKİLER.....	vi
	SİMGELER ve KISALTIMA DİZİNİ.....	x
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
	ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1.	GİRİŞ.....	1
1.1.	Araştırmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.2.	Kaynak Özetleri.....	5
2.	KURAMSAL TEMELLER.....	22
2.1.	Çimento Üretimi ve Çevreye Etkileri.....	22
2.2.	Çimentoya Alternatif Bağlayıcı Araştırmaları.....	23
2.3.	Çalışma Alanının Yeri ve Coğrafi Özellikleri.....	24
2.4.	Volkanik Tüf.....	24
2.4.1.	Volkanik tüfün rezerv potansiyeli.....	25
2.4.2.	Volkanik tüfün kullanım alanları.....	27
2.5.	Geopolimerler.....	27
2.5.1.	Geopolimerlerin ekonomik ve çevresel avantajları.....	31
2.5.2.	Geopolimerlerin durabilite özellikleri.....	32
2.5.3.	Geopolimerlerin uygulama alanları.....	33
2.5.4.	Geopolimer kimyası.....	34
2.5.5.	Volkanik tüf esaslı geopolimerler.....	38
2.6.	Alkali Aktivatörler.....	39
2.7.	Kür Koşullarının Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi.....	39
2.8.	Aktivatör Tipinin ve Konsantrasyonunun Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi.....	41
2.9.	Hammaddenin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi.....	43
2.9.1.	Hammaddenin inceliğinin geopolimerlerin özelliklerine etkisi.....	43
2.9.2.	Hammaddenin kimyasal bileşiminin geopolimerlerin özelliklerine etkisi.....	43
2.10.	Karışım Oranının ve Karıştırma Yönteminin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi.....	46
2.11.	Nano Silis İlavesinin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi.....	47
2.12.	Mikro Silis İlavesinin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi.....	48
2.13.	Polimer Lateks İlavesinin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi.....	49

2.14.	Geopolimerlerde Basınç Dayanımı.....	49
2.15.	Geopolimerlerde Hidratasyon Isısı.....	50
2.16.	Geopolimerlerde Priz Süresi.....	51
2.17.	Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Direnci.....	51
2.18.	Geopolimerlerde Asit Etkisi.....	53
2.19.	Geopolimerlerde Fiziksel Özellikler.....	54
2.20.	Geopolimerlerde Mikroyapı.....	55
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	56
3.1.	Materyal.....	56
3.1.1.	Deneylerde kullanılan malzemeler.....	56
3.1.1.1.	Volkanik tüf.....	56
3.1.1.2.	Alkali aktivatörler (NaOH - Na ₂ SiO ₃).....	57
3.1.1.3.	Nano silis.....	58
3.1.1.4.	Mikro silis.....	59
3.1.1.5.	Polimer lateks.....	60
3.1.1.6.	Agrega.....	61
3.1.1.7.	Karışım suyu.....	62
3.1.2.	Deneylerde kullanılan makine-teçhizatlar.....	62
3.1.2.1.	Elekler.....	62
3.1.2.2.	Kalıplar.....	62
3.1.2.3.	Harç karıştırıcı.....	62
3.1.2.4.	Mikser.....	63
3.1.2.5.	Vikat aleti.....	64
3.1.2.6.	ToniCAL izotermal kalorimetre.....	64
3.1.2.7.	Pres cihazı.....	65
3.1.2.8.	Ultrasonik hız ölçüm cihazı.....	66
3.1.2.9.	Etüv.....	66
3.1.2.10.	Yüksek sıcaklık fırını.....	67
3.1.2.11.	Bilyeli değirmen.....	68
3.1.2.12.	pH ölçüm cihazı.....	69
3.1.2.13.	Deneylerde kullanılan diğer teçhizatlar.....	69
3.2.	Yöntem.....	69
3.2.1.	Karışım tipleri ve deney parametreleri.....	69
3.2.2.	Yapılan deneysel çalışmalar.....	72
3.2.3.	Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler.....	73
3.2.4.	Geopolimer numunelerin karışım hesapları.....	75
3.2.4.1.	Geopolimer hamur numunelerin karışım hesapları.....	75

3.2.4.2	Geopolimer harç numunelerin karışım hesapları.....	76
3.2.4.3.	Geopolimer beton numunelerin karışım hesapları.....	78
3.2.5.	Karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları.....	80
3.2.5.1.	Geopolimer hamur numunelerin karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları.....	80
3.2.5.2.	Geopolimer harç numunelerin karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları...	81
3.2.5.3	Geopolimer beton numunelerin karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları.	82
3.2.6.	Geopolimer numunelerde uygulanan yöntemler.....	83
3.2.6.1.	Priz süresi tayini.....	83
3.2.6.2.	Hidratasyon ısısı tayini.....	84
3.2.6.3.	Basınç dayanımı tayini.....	85
3.2.6.4.	Yüksek sıcaklık direnci tayini.....	85
3.2.6.5	Asit direnci tayini.....	86
3.2.6.6.	UPV tayini.....	87
3.2.6.7.	Mikroyapı analizi.....	87
3.2.6.8.	Fiziksel özellikler.....	88
3.2.6.9.	pH ölçümü.....	89
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	90
4.1.	Hammadde Deneyleri ile ilgili Bulgular.....	90
4.2.	Agrega Deneyleri ile ilgili Bulgular.....	91
4.3.	Geopolimer Hamur ile ilgili Bulgular ve Tartışma.....	93
4.3.1.	Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı.....	93
4.3.2.	Geopolimer hamur numunelerin priz süreleri.....	101
4.3.3.	Geopolimer hamur numunelerin hidratasyon ısıları.....	107
4.3.4.	Geopolimer hamur numunelerin mikroyapıları.....	118
4.3.4.1.	Geopolimer hamur numunelerin SEM analizleri.....	118
4.3.4.2.	Geopolimer hamur numunelerin XRD analizleri.....	120
4.4.	Geopolimer Harç ile ilgili Bulgular ve Tartışma.....	121
4.4.1.	Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı.....	122
4.4.2.	Geopolimer harç numunelerin UPV değerleri.....	133
4.4.3.	Geopolimer harç numunelerin mikroyapı özellikleri.....	139
4.4.3.1.	Geopolimer harç numunelerin SEM analizleri.....	139
4.4.3.2.	Geopolimer harç numunelerin XRD analizleri.....	141
4.5.	Katkısız Geopolimer Beton ile ilgili Bulgular ve Tartışma.....	142
4.5.1.	Katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı.....	143
4.5.2.	Katkısız geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	151
4.5.3.	Katkısız geopolimer beton numunelerin mikroyapı özellikleri.....	156
4.5.3.1.	Katkısız geopolimer beton numunelerin SEM analizleri.....	156

4.5.3.2.	Katkısız geopolimer beton numunelerin XRD analizleri.....	158
4.6.	Katkılı Geopolimer Beton Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma.....	159
4.6.1.	Katkılı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı.....	160
4.6.2.	Katkılı geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	162
4.6.3.	Katkılı geopolimer beton numunelerin fiziksel özellikleri.....	164
4.6.3.1.	Katkılı geopolimer beton numunelerin su emme değerleri.....	164
4.6.3.2.	Katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri.....	165
4.6.4.	Katkılı geopolimer beton numunelerin mikroyapı incelemeleri.....	167
4.6.4.1.	Katkılı geopolimer beton numunelerin SEM analizleri.....	167
4.6.4.2.	Katkılı geopolimer beton numunelerin XRD analizleri.....	168
4.6.5.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık direnci.....	169
4.6.5.1.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı.....	170
4.6.5.2.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimleri.....	172
4.6.5.3.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme değerleri.....	174
4.6.5.4.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görsel görünümü.....	175
4.6.5.5.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası mikroyapı özellikleri.....	178
4.6.6.	Katkılı geopolimer beton numunelerin asit direnci.....	183
4.6.6.1.	Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası basınç dayanımı.....	183
4.6.6.2.	Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası ağırlık değişimi.....	188
4.6.6.3.	Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası görsel görünümü.....	191
4.6.6.4.	Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası mikroyapı özellikleri.....	193
4.6.6.5.	Asit ortamının zamana göre pH değişimi.....	197
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	199
6.	KAYNAKLAR.....	203
	ÖZGEÇMİŞ.....	221

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CASH	Kalsiyum alüminosilikat hidrat
CSH	Kalsiyum silikat hidrat
FTIR	Fourier transform infrared spektroskopisi
M	Molar
MPa	Megapaskal
MS	Mikro silis
NASH	Sodyum alüminosilikat hidrat
NS	Nano silis
ç/b	Çözelti/bağlayıcı
SAK	Süperakışkanlaştırıcı
SB	Stiren bütadien
SBL	Stiren bütadien lateks
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SM	Silis modülü ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı)
TBHA	Teorik birim hacim ağırlık
TGA	Termogravimetrik analiz
UPV	Ultrasonik hız
w/b	Su/bağlayıcı
XRD	X-Işını difraksiyon spektroskopisi
XRF	X- Işını floresan spektroskopisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Yıllara göre çimento üretimi ve CO ₂ salınımı (Blaszczynski ve Krol, 2015).....	22
Şekil 2.2.	2005–2013 yılları arası çimento üretimi ve sebep olduğu CO ₂ salınımı (Kajaste ve Hurme, 2016).....	23
Şekil 2.3.	Geopolimer bağlayıcı üretiminin şematik gösterimi (Yun-Ming vd. 2016).....	29
Şekil 2.4.	Geopolimer hamur, harç ve beton üretimi (Shrestha, 2013).....	31
Şekil 2.5.	Ukrayna'da geopolimer beton kullanılarak üretilmiş konut yapıları (Hlavacek, 2014).....	34
Şekil 2.6.	Oksijen atomunun koordinasyon mekanizması (Joseph, 2015).....	36
Şekil 2.7.	Yüksek sıcaklık esnasında geopolimerlerin faz dönüşümü (Singh vd. 2015).....	52
Şekil 2.8.	Geopolimer bağlayıcıların asit etkisinde bozulma aşamaları (Singh vd. 2015).....	54
Şekil 3.1.	Volkanik tüf rezervleri ve kesilen doğal taşlar.....	57
Şekil 3.2.	Fırında kurutulmuş ve sonrasında öğütülmüş volkanik tüf.....	57
Şekil 3.3.	Kullanılan alkali aktivatörler, a) NaOH, b) Na ₂ SiO ₃	58
Şekil 3.4.	Nano silis.....	59
Şekil 3.5.	Mikro silis.....	60
Şekil 3.6.	SB lateks.....	61
Şekil 3.7.	Elenmiş dere agregası örnekleri.....	61
Şekil 3.8.	Harç karıştırıcı.....	63
Şekil 3.9.	Geopolimer beton karışımlarının hazırlandığı mikser.....	63
Şekil 3.10.	Vikat aleti.....	64
Şekil 3.11.	ToniCAL izotermal kalorimetre.....	65
Şekil 3.12.	ELE marka pres cihazı.....	65
Şekil 3.13.	Dijital ultrasonik hız ölçme cihazı.....	66
Şekil 3.14.	Geopolimer numunelerin kür edildiği etüv.....	67
Şekil 3.15.	Yüksek sıcaklık fırını.....	67
Şekil 3.16.	Yüksek sıcaklık fırınının ısınma eğrisi.....	68
Şekil 3.17.	Numune öğütmede kullanılan bilyeli değirmen.....	68
Şekil 3.18.	pH ölçüm cihazı.....	69
Şekil 3.19.	Organik madde içeriği tayini.....	74
Şekil 3.20.	Özgül ağırlık tayini.....	74
Şekil 3.21.	Su emme oranı tayini.....	75

Şekil 3.22.	Geopolimer hamur numuneleri, a) Kalıplara yeni dökülmüş, b) Kür için yüzeyi kaplanmış, c) Basınç dayanımı deneyi sonrası.....	81
Şekil 3.23.	Geopolimer harç, a) Taze hal, b) Sertleşmiş hal.....	81
Şekil 3.24.	Sertleşmiş haldeki geopolimer beton numuneleri.....	83
Şekil 3.25.	Hamur numunelerde priz süresi ölçümü, a) Laboratuvar ortamında, b) Isıl kür etkisinde.....	84
Şekil 3.26.	Yüksek sıcaklık direnci için fırına yerleştirilmiş geopolimer beton numuneleri.....	86
Şekil 3.27.	HCl çözeltisine maruz bırakılmış geopolimer beton numuneleri.....	87
Şekil 3.28.	Geopolimer beton numunelerin UPV ölçümü.....	87
Şekil 3.29.	Geopolimer beton numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....	89
Şekil 4.1.	Volkanik tüfün XRD analizi.....	91
Şekil 4.2.	Geopolimer beton üretiminde kullanılan agreganın granülometri eğrisi.	92
Şekil 4.3.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	95
Şekil 4.4.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	95
Şekil 4.5.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	96
Şekil 4.6.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	98
Şekil 4.7.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	98
Şekil 4.8.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	99
Şekil 4.9.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri.....	102
Şekil 4.10.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri.....	105
Şekil 4.11.	Silis modülü 0.4 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	108
Şekil 4.12.	Silis modülü 0.5 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	109
Şekil 4.13.	Silis modülü 0.6 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	110
Şekil 4.14.	Silis modülü 0.7 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	111
Şekil 4.15.	Silis modülü 0.8 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	112
Şekil 4.16.	NaOH konsantrasyonu 10 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	113
Şekil 4.17.	NaOH konsantrasyonu 12 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	114
Şekil 4.18.	NaOH konsantrasyonu 14 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	115
Şekil 4.19.	NaOH konsantrasyonu 16 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı.....	116
Şekil 4.20.	Silis modülü 0.8, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer hamur numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri.....	118

Şekil 4.21.	NaOH konsantrasyonu 12 M, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer hamur numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri.....	119
Şekil 4.22.	Silis modülü 0.8, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer hamur numunesinin XRD analizi.....	120
Şekil 4.23.	NaOH konsantrasyonu 12 M, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer hamur numunesinin XRD analizi.....	121
Şekil 4.24.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	124
Şekil 4.25.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	125
Şekil 4.26.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	126
Şekil 4.27.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri.....	127
Şekil 4.28.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	130
Şekil 4.29.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	130
Şekil 4.30.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	131
Şekil 4.31.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri.....	131
Şekil 4.32.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri.....	135
Şekil 4.33.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki.....	136
Şekil 4.34.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri.....	138
Şekil 4.35.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki.....	138
Şekil 4.36.	Silis modülü 0.6, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 105°C olan geopolimer harç numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri.....	140
Şekil 4.37.	NaOH konsantrasyonu 16 M, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer harç numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri.....	140
Şekil 4.38.	Silis modülü 0.6, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 105°C olan geopolimer harç numunesinin XRD analizi.....	141
Şekil 4.39.	NaOH konsantrasyonu 16 M, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer harç numunesinin XRD analizi.....	142
Şekil 4.40.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	144
Şekil 4.41.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	144
Şekil 4.42.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	145
Şekil 4.43.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri.....	145
Şekil 4.44.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	148
Şekil 4.45.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	148
Şekil 4.46.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	149
Şekil 4.47.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri.....	149

Şekil 4.48.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	152
Şekil 4.49.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki.	153
Şekil 4.50.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	155
Şekil 4.51.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki.....	155
Şekil 4.52.	Silis modülü 0.8, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer beton numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri.....	157
Şekil 4.53.	NaOH konsantrasyonu 12 M, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer beton numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri.....	157
Şekil 4.54.	Silis modülü 0.8, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan katkısız geopolimer beton numunesinin XRD analizi.....	158
Şekil 4.55.	NaOH konsantrasyonu 12 M, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan katkısız geopolimer beton numunesinin XRD analizi.....	159
Şekil 4.56.	Katkılı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	160
Şekil 4.57.	28 günlük katkılı geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	163
Şekil 4.58.	Katkılı geopolimer beton numunelerin su emme oranları.....	164
Şekil 4.59.	Katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri.....	166
Şekil 4.60.	Katkılı geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri, a) Katkısız, b) Nano silis katkılı, c) Mikro silis katkılı, d) SB lateks katkılı.....	167
Şekil 4.61.	%2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinin XRD analizi.....	168
Şekil 4.62.	%2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinin XRD analizi.....	168
Şekil 4.63.	%5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinin XRD analizi.....	169
Şekil 4.64.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerleri.....	170
Şekil 4.65.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değişimleri.....	171
Şekil 4.66.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimleri.....	173
Şekil 4.67.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme değerleri.....	174
Şekil 4.68.	%2 nano silis katkılı geopolimer beton numunelerin renk değişimi.....	175
Şekil 4.69.	%2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunelerin renk değişimi.....	176
Şekil 4.70.	%5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin renk değişimi.....	176
Şekil 4.71.	Katkısız geopolimer beton numunede görülen mikro çatlaklar, a) 23°C, b) 700°C.....	177
Şekil 4.72.	Katkısız geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C.....	178
Şekil 4.73.	Nano silis katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C.....	179
Şekil 4.74.	Mikro silis katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C.....	179
Şekil 4.75.	SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C.....	180
Şekil 4.76.	Katkısız geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi.....	181

Şekil 4.77.	%2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi.....	182
Şekil 4.78.	%2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi.....	182
Şekil 4.79.	%5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi.....	183
Şekil 4.80.	Katkılı geopolimer beton numunelerin 90 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı değerleri.....	184
Şekil 4.81.	Katkılı geopolimer beton numunelerin 180 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı değerleri.....	185
Şekil 4.82.	Katkılı geopolimer beton numunelerin 90 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı kaybı.....	185
Şekil 4.83.	Katkılı geopolimer beton numunelerin 180 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı kaybı.....	186
Şekil 4.84.	Katkılı geopolimer beton numunelerin %3 HCl etkisinde ağırlık değişimi.....	189
Şekil 4.85.	Katkılı geopolimer beton numunelerin %5 HCl etkisinde ağırlık değişimi.....	189
Şekil 4.86.	Katkılı geopolimer beton numunelerin %7 HCl etkisinde ağırlık değişimi.....	190
Şekil 4.87.	Geopolimer beton numunelerin %7 HCl çözeltisi etkisi öncesi ve sonrasında görsel görünümü, a) Katkısız, b) %2 Nano silis katkılı, c) %2 Mikro silis katkılı, d) %5 SB lateks katkılı.....	192
Şekil 4.88.	180 gün boyunca %7 HCl etkisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri, a) Katkısız, b) %2 nano silis katkılı, c) %2 mikro silis katkılı, d) %5 SB lateks katkılı.....	194
Şekil 4.89.	Katkısız geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi.....	195
Şekil 4.90.	%2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi.....	196
Şekil 4.91.	%2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi.....	196
Şekil 4.92.	%5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi.....	197
Şekil 4.93.	Asit ortamlarının zamana bağlı pH değerleri.....	198

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Bazı yörelerdeki volkanik tüflerin kimyasal analizi (Sınıksaran, 2012)..	25
Çizelge 2.2.	Türkiye'nin pomza rezervleri (Bayrak, 2005).....	26
Çizelge 2.3.	Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların tarihsel gelişimi (Roy, 1999).....	30
Çizelge 2.4.	Geopolimer malzemelerin uygulamaları (Hardjito, 2005).....	34
Çizelge 3.1.	Alkali aktivatörlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	58
Çizelge 3.2.	Nano silisin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	59
Çizelge 3.3.	Mikro silisin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	60
Çizelge 3.4.	SB lateksin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	61
Çizelge 3.5.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ ile aktive edilen geopolimer hamur numunelerinin deney parametreleri.....	70
Çizelge 3.6.	NaOH ile aktive edilen geopolimer hamur numunelerinin deney parametreleri.....	70
Çizelge 3.7.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ ile aktive edilen geopolimer harç numunelerinin deney parametreleri.....	71
Çizelge 3.8.	NaOH ile aktive edilen geopolimer harç numunelerinin deney parametreleri.....	71
Çizelge 3.9.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ ile aktive edilen geopolimer beton numunelerinin deney parametreleri.....	71
Çizelge 3.10.	NaOH ile aktive edilen geopolimer beton numuneleri ve deney parametreleri.....	72
Çizelge 3.11.	Katkılı geopolimer beton numuneleri ve deney parametreleri.....	72
Çizelge 3.12.	Yapılan deneysel çalışmalar.....	73
Çizelge 3.13.	Geopolimer hamur numunelerin karışım oranları.....	76
Çizelge 3.14.	Geopolimer harç numunelerin karışım oranları.....	77
Çizelge 3.15.	Geopolimer beton numunelerin karışım oranları.....	79
Çizelge 4.1.	Volkanik tüfün kimyasal bileşimi.....	90
Çizelge 4.2.	Geopolimer beton üretiminde kullanılan agreganın elek analizi sonuçları.....	91
Çizelge 4.3.	Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri.....	92
Çizelge 4.4.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	94
Çizelge 4.5.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	97
Çizelge 4.6.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri.....	101
Çizelge 4.7.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri.....	104
Çizelge 4.8.	Geopolimer hamur numunelerin hidrasyon ısısı değerleri.....	107
Çizelge 4.9.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	123

Çizelge 4.10.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	129
Çizelge 4.11.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri.....	134
Çizelge 4.12.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri.....	137
Çizelge 4.13.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	143
Çizelge 4.14.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	147
Çizelge 4.15.	NaOH+Na ₂ SiO ₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	152
Çizelge 4.16.	NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	154
Çizelge 4.17.	Katkılı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	160
Çizelge 4.18.	28 günlük katkılı geopolimer beton numunelerin UPV değerleri.....	163
Çizelge 4.19.	Katkılı geopolimer beton numunelerin su emme oranları.....	164
Çizelge 4.20.	Katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri.....	165
Çizelge 4.21.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerleri.....	170
Çizelge 4.22.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimleri.....	173
Çizelge 4.23.	Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme değerleri.....	174
Çizelge 4.24.	Katkılı geopolimer beton numunelerin 90 ve 180 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı değerleri.....	184
Çizelge 4.25.	Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisinde ağırlık değişimleri	188

1. GİRİŞ

Beton inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir ve tüketimi yıldan yıla artış göstermektedir. Beton tüketimindeki bu yüksek oran, çeşitli çevresel ve ekonomik sorunları beraberinde getirmektedir. Betonun en önemli bileşeni ise çimentodur. Kalkerin ve fosil yakıtların yanmasına bağlı olarak normal Portland çimentosu üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ miktarı, 1 ton çimento için yaklaşık olarak 1 ton civarındadır. Dünya CO₂ salınımının yaklaşık %7'sinin çimento endüstrisinden kaynaklandığı birçok araştırmacı tarafından ifade edilmektedir. Ayrıca çimento üretimi, yüksek sıcaklıklarda (1400–1500°C) gerçekleştirilebildiği için önemli ölçüde enerji ihtiyacını zorunlu kılmaktadır. Enerji fiyatlarındaki artışlar çimento üretim maliyetini de arttırmaktadır.

Bilim insanları günümüzde enerji kaynakları, çevresel ve ekonomik problemlerin çözümü için pek çok çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalarda, hem ülke ekonomisine hem de çevreye katkıda bulunmak için, endüstriyel atıkların ve mevcut doğal kaynakların değerlendirilmesine ağırlık verilmektedir. İnşaat sektöründe, daha çok çimento kaynaklı problemlerin azaltılması ve çimento yerine alternatif, doğal ve ekonomik malzemelerin değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Geopolimerler, doğal ve atık puzolanların çeşitli alkali aktivatörler ile aktive edilmesiyle oluşan alümin silikat tipi bağlayıcı malzemelerdir. Geopolimer bağlayıcılar 1978 yılında Davidovits tarafından tanımlanmasından itibaren kimya alanının yanında mühendisliğin de ilgisini çekmiştir. Geopolimer bağlayıcılar Portland çimentosu ile kıyaslandığında ileri mühendislik özellikleri sergileyen bir malzeme grubudur. Geopolimer üretiminin Portland çimentosu üretiminden %80 daha az CO₂ salınımına yol açtığı ve %60 oranında enerji tasarrufu sağladığı çeşitli kaynaklarda ifade edilmiştir. Aynı zamanda geopolimer bağlayıcıların hidrasyonu sonucunda C₃A ve Ca(OH)₂ gibi ürünler oluşmadığından, geopolimer bağlayıcılı betonların durabilite özellikleri de geleneksel çimento ile üretilen betonlardan daha iyi olmaktadır. Ayrıca geopolimerler; hammadde kaynaklarının bol olması, kolay

hazırlama yöntemleri, hacim kararlılığı, kısa sürede dayanım kazanımı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gibi olumlu özelliklere de sahiptirler.

Volkanik tüfler, volkanik patlamalar sonucunda atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarının ani soğuması sonucu oluşmuştur. Anadolu coğrafyası birçok volkanik aktiviteye maruz kaldığından, volkanik tüf rezervi bakımından oldukça zengindir. Volkanik tüfler İç Anadolu Bölgesi başta olmak üzere Türkiye'nin birçok yerinde görülmektedir. Özellikle, Ankara, Eskişehir, Kayseri, Konya, Nevşehir ve Niğde gibi şehirlerde çeşitli minerallere sahip volkanik tüfler bulunmaktadır. Nevşehir, ülkemizin önemli volkanik tüf rezervlerine sahip illerin başında gelmektedir. Tüflerin kimyasal bileşimi, yöresel olarak farklılık gösterse de yakın kimyasal içeriklere sahiptir. Volkanik tüfün, geopolimer üretiminde değerlendirilmesi ülkemiz için ekonomik ve çevresel kazanımlar sağlayacaktır.

Nano teknoloji, üstün özelliklere ve yüksek performansa sahip yeni malzemeler geliştirmek için ortaya çıkan alanlardan biridir. Yapı malzemelerinin özellikleri nanoteknoloji ile iyileştirilebilir. Bağlayıcı malzemelerin mekanik ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesinde nano boyutlu malzemelerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Son yıllarda farklı mikro ve nano malzemelerin uygulanmasıyla beton performansında önemli oranlarda artış meydana gelmiştir. Polimer teknolojisindeki gelişmelerle ucuzlayan ve yaygınlaşan polimerler, günümüzde beton gibi çeşitli yapısal uygulamalarda oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır.

1.1. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, Avanos (Nevşehir) yöresinden temin edilmiş olan volkanik tüfün geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılabilirliğini araştırmaktır. Yüksek silis-alümin oranına sahip olan volkanik tüf, çimento inceliğinde öğütülmüş ve alkali aktivatörler ile aktive edilmiştir.

Bu tez kapsamında, i) öğütülmüş volkanik tüften alkali aktivasyon metoduyla geopolimer bağlayıcılı hamur, harç ve beton numuneler üretilmiş, ii) elde edilen geopolimer bağlayıcılı beton numunelerin bazı mekanik, durabilite ve mikroyapı özelliklerine nano silis, mikro silis ve polimer katkıların etkisi araştırılmıştır. Deneysel bulgular daha önce yapılan çalışmalarla kıyaslanmıştır. Bu tez çalışması 4 aşamalı olarak planlanmıştır. Bu aşamalar aşağıda belirtilmiştir:

1. Aşama: Geopolimer Hamur

Volkanik tüf çimento inceliğinde öğütülmüş, elek açıklığı 45 mikron olan elekten geçirilerek geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ seçilmiştir. Volkanik tüf yalnız NaOH çözeltisi ve NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile normal kıvamda karıştırılmış ve farklı kür sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Üretilen geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı (3, 7 ve 28 gün), priz süreleri ve hidrasyon ısıları tayin edilmiştir. Ayrıca mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

2. Aşama: Geopolimer Harç

Harç numunelerin karışım oranları, her iki alkali aktivatör (NaOH ve NaOH+Na₂SiO₃) çözeltisi için 0.35 ve 0.45 ç/b oranlarına göre hesaplanmıştır. Kum miktarı kuru bağlayıcı ağırlığının 2 katı alınmıştır. Üretilen harç numuneleri farklı kür sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Kür sürecinin sonunda, numuneler deney günlerine kadar oda sıcaklığında bırakılmıştır. Harç numunelerde basınç dayanımı (3, 7, 28 ve 90 gün) ve ultrasonik hız (UPV) değerleri elde edilmiştir. Harç numunelerin mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harç numunelerin optimum karışım oranı, alkali aktivatör tipi ve kür sıcaklığı basınç dayanımına göre tayin edilmiştir.

3. Aşama: Geopolimer Beton

Beton numunelerinde volkanik tüf dozajı 500 kg/m³ olarak seçilmiştir. Her iki alkali aktivatör (NaOH ve NaOH+Na₂SiO₃) çözeltisi için 0.5 ve 0.6 ç/b oranlarına göre alkali aktivatör miktarları belirlenmiştir ve agrega miktarları 1 m³ beton için hesaplanmıştır. Üretilen beton numuneler farklı kür sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Kür sürecinin sonunda, numuneler deney günlerine kadar oda sıcaklığında bırakılmıştır. Beton numunelerde basınç dayanımı (3, 7, 28 ve 90 gün)

ve UPV değerleri elde edilmiştir. Beton numunelerin mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Geopolimer beton numunelerin optimum karışım oranı, alkali aktivatör tipi ve kür sıcaklığı basınç dayanımına göre tayin edilmiştir.

4. Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılı Geopolimer Beton

Deneysel olarak belirlenen optimum özelliklere sahip geopolimer betona nano silis, mikro silis ve polimer katkıların etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla geopolimer beton numunelerine, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 stiren butadien (SB) lateks ilave edilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneler üzerinde basınç dayanımı (3, 7, 28 ve 90 gün), asit direnci (%3, %5 ve %7 HCl), yüksek sıcaklık direnci (100, 300, 500 ve 700°C) testleri yapılmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-Işını difraksiyon spektroskopisi (XRD) analizleri ile mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Geopolimer bağlayıcı numunelerden elde edilen sonuçlar literatürde verilen çalışmalarla kıyaslanmıştır.

Bu tez çalışmasında öğütölmüş volkanik tufün alkali aktivasyon metoduyla geopolimer bağlayıcı hamur, harç ve beton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu konu kapsamında, Portland çimentolarına alternatif olabilecek volkanik tuf esaslı geopolimer bağlayıcıların, karışım oranları, üretim yöntemleri, kür sıcaklıkları ve durabilite özellikleri üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu alışma sonucunda;

- Volkanik tufün alkali aktivasyon mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır.
- Nano silis, mikro silis ve polimer katkıların geopolimer beton numunelerin mekanik, durabilite ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.
- Geopolimer beton üretimi arttıkça, imento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımı azalacaktır.
- Ülkemizde bol miktarda bulunan volkanik tuf hammaddesi daha aktif bir şekilde değerlendirilmesine imkan sağlanmıştır.
- Volkanik tufün geopolimer bağlayıcı madde üretiminde kullanılmasıyla ekonomiye katkı sağlanması beklenmektedir.

- Volkanik tüfün geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılmasıyla literatüre katkı sağlanacağı beklenmektedir.

1.2. Kaynak zetleri

Bu bölümde; geopolimer hamur, harç ve betonların bazı mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri üzerine daha önceden yapılış çalışmaların kısaca zetleri verilmiştir.

Tekin (2016) yaptığı çalışmada 1.5, 5 ve 10 M konsantrasyona sahip NaOH ile Bayburt yöresinden topladığı mermer, traverten ve volkanik tüf atıklarının kullanılarak geopolimer hamur numuneleri üretmiştir. Kür işlemi, fırında 24 saat boyunca 20, 45 ve 75°C sıcaklıklarda yapılıştır. Bundan sonra geopolimer hamur numuneleri ayrıca ıslak ve kuru şartlarda muhafaza edilmiştir. 2, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Islak koşullarda kr edilen numunelerin basınç dayanımı zamanla azalırken kuru şartlarda kr edilen numunelerin basınç dayanımı ise zamanla artmıştır. Zeolit içeren tüfün geopolimer hammaddesi olarak kullanılabilieceğini ifade etmiştir.

Ndjock vd. (2017) yaptıkları çalışmada beş adet volkanik kül numunesinin kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklerini belirlemiş ve geopolimer hammaddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Alkali aktive edilmiş volkanik kül esaslı geopolimer numunelerin 14 günlük basınç dayanımı ve mikroyapıları incelenmiştir. NaOH ile aktive edilmiş olan harç numunesinin 80°C'de 1 gün kr edilmesi sonucunda 12.6 MPa ile maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar işığında, volkanik küllerin hem geopolimer üretiminde hem de dolgu olarak kullanılabilieceği ifade edilmiştir.

Yadollahi vd. (2015) Hasankale pomzasından ürettikleri geopolimer kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. En iyi karışım oranını elde etmek için, farklı silis modülleri ($SM=SiO_2/Na_2O$), su/bağlayıcı (w/b) oranları ve Na_2O içeriklerine bağlı olarak, deneme yanılma yaklaşımı ile numuneler üretilmiştir. Bu amaçla, Hasankale pomzasının alkali aktivasyonu için %4, %7 ve %10 Na_2O içeriği,

0.52, 0.6 ve 0.68 silis modülü ve 0.36, 0.40 ve 0.44 w/b oranlarına sahip geopolimer hamur numuneler üretilmiştir. SM=0.68, Na₂O içeriği %10, w/b oranı 0.36 olan karışımdan maksimum basınç dayanımı değeri yaklaşık 40 MPa elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, üretilen geopolimer hamurların basınç dayanımının yeterince yüksek olduğunu ve yapısal bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Geopolimer bağlayıcıların, pomza kaynakları bakımından zengin olan Türkiye gibi ülkelerde ekonomik fayda sağlayacağını ifade etmişlerdir.

Lee vd. (2016) yaptıkları çalışmada SB lateks ilavesinin geopolimer harçların mekanik özellikleri ve priz sürelerine etkisini incelemişlerdir. SB lateks içeren uçucu kül/cüruf esaslı geopolimer harç numuneleri üretmiş ve alkali aktivatörün optimum silis modülü ile cüruf içeriğini belirlemek amacıyla priz süresi, basınç dayanımı ve eğilme dayanımını incelemişlerdir. En hızlı priz, cüruf içeriği %30 ve silis modülü 2.27 olan geopolimer harçta, başlangıç ve bitiş priz süresi sırasıyla 9 ve 70 dakika olarak elde edilmiştir. Geopolimer matrisinin güçlendirilmiş bağlanma etkileşimleri nedeniyle, SB lateks ilavesinin %0'dan %10'a yükseltilmesi durumunda, eğilme mukavemetinde %50 oranında artış gözlenmiştir.

Haddad ve Alshbuol (2016) yaptıkları çalışmada Ürdün doğal puzolanının NaOH ve Na₂SiO₃ ile alkali aktivasyonu sonucu üretilen geopolimer betonun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Farklı ç/b ve Na₂SiO₃/NaOH oranlarında ve farklı NaOH konsantrasyonlarında üretilen geopolimer betonların taze ve sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır. Üretilen numuneler dökümden 24 saat sonra, 24 ve 48 saat boyunca havada ve farklı sıcaklıklarda (40, 80 ve 120°C) kür işlemlerine tabi tutulmuştur. Farklı kür işlemlerine maruz bırakılan numunelerden SEM görüntüleri alınmıştır. Belirlenen parametrelerin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür ve literatürde elde edilen 30 MPa basınç dayanımını aşan değerler elde edilmiştir. 12 M konsantrasyona sahip NaOH çözeltisi, geopolimer beton numunelerin özellikleri üzerinde en olumlu etkiye yol açmıştır. Geopolimer betonlarda en iyi mekanik performans 80°C kür sıcaklığında elde edilmiştir. 40 ve 80°C sıcaklıklarda uygulanan kuru kür işlemleri geopolimer betonların basınç dayanımlarında sırasıyla %25 ve %32 oranlarında artışa neden olmuştur. 120°C'nin üzerinde uygulanan kür işlemi beton basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Kuru

kür süresinin uzatılması 28 günlük basınç dayanımında sınırlı bir artışa neden olmuştur. Geopolimer beton numunelerine uygulanan üç günlük kuru kür işlemi sonucunda, nihai basınç dayanımının %70'ini elde ettikleri gözlenmiştir. SEM görüntüleri, farklı geopolimer beton karışımlarında boşluk yüzdesi ve dağılımında belirgin bir fark olduğunu ortaya koymuştur: yoğun matris ve daha az mikro çatlak içeren numunelerde daha yüksek mukavemet elde edilmiştir.

Park vd. (2016) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktive edilmiş uçucu kül/cüruf esaslı malzemelerin bağlayıcı jelinin yüksek sıcaklık etkisi sonrası fizikokimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel bulgular, yüksek sıcaklık etkisi ile basınç dayanımının 400°C'ye kadar arttığını ve bundan sonra düşmeye başladığını göstermiştir. 400°C'nin altındaki mukavemet artışı gözenekliliğin azalması ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası oluşan bağlayıcı jel ile ilişkilendirilmiştir. Kalsiyum alüminosilikat hidrat (CASH) jelinin dehidrasyonu ve sodyum alüminosilikat hidrat (NASH) jelinin oluşumu aynı anda gerçekleşmiş ve gözenek yapısı mikro gözenekli durumdan mezo gözenekli hale dönüşmüştür. Bağlayıcı jelin kristalleşmesi, gözenekliliğin artmasına ve dolayısıyla 400°C'nin üzerindeki mukavemette bir düşüşe yol açmıştır ve gözenek yapısının mezo gözenekli durumdan makro gözenekli duruma dönüşmesine neden olmuştur. Yüksek sıcaklık altındaki porozite, mukavemet ile ters ilişki göstermiştir.

Deb vd. (2015) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcılara nano silis ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Alüminosilikat hammaddesi olarak düşük kalsiyum içerikli uçucu kül kullanılmış ve oda sıcaklığında kür işlemini hızlandırmak için yüksek fırın cürufu veya Portland çimentosu düşük yüzdelerde karıştırılmıştır. Nano silisin mukavemet ve mikroyapısal gelişim üzerindeki etkisini anlamak için toplam bağlayıcı ağırlığının %3'üne kadar oranda kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, geopolimer karışımlarına nano silis ilavesi ile mukavemet ve mikroyapısal özelliklerin geliştirilebileceğini göstermiştir. Basınç dayanımı, nano silis içeriğinin %2'ye kadar artması ile artmış daha sonra düşmüştür. Bu düşüş, kullanılan nano silis katkısının sahip olduğu yüksek yüzey alanının polimerizasyon işlemi için yeterli olduğu ve %2'den fazla kullanılan nano silisin reaksiyona girmemesinden kaynaklı

olduğu ifade edilmiştir. SEM görüntülerinde, optimum nano silis içeriğinde iyi kenetlenmiş morfolojiye sahip yoğun mikroyapılar gözlenmiştir. Mukavemet artışının mikroyapının nano silis ilavesi ile yoğunlaştırılmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Assaedi vd. (2016a) yaptıkları çalışmada keten lif ve nano kil parçacıkları ile güçlendirilmiş geopolimer kompozitler üreterek fiziksel, mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Nano kil partikülleri ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında geopolimer matrisleri güçlendirmek amacıyla eklenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ağırlıkça %2 nano kil ilavesinin yoğunluğu arttırdığı, gözenekliliği azalttığı, eğilme mukavemeti ve tokluğu ise geliştirdiği gözlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, nano kilin yalnızca bağlayıcının mikroyapısını iyileştiren dolgu maddesi olarak değil, aynı zamanda, daha yüksek miktarda geopolimer jel üreten, geopolimer reaksiyonunu destekleyen bir aktivatör gibi davrandığını belirtmişlerdir.

Phoo-ngernkham vd. (2014) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer hamur numunelerine %1, %2 ve %3 oranlarında nano SiO₂ ve nano Al₂O₃ ilave etmişlerdir. Geopolimer hamur numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ile normal Portland imentolu hamurlardan elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Basınç dayanımı sonuçları, katkının dozajından bağımsız olarak nano SiO₂ ve nano Al₂O₃ ilavesinin, normal Portland imentolu numunelere kıyasla daha yüksek dayanıma yol açtığını göstermiştir. Geopolimer matrisine ilave SiO₂ ve Al₂O₃ sağlayan ve aynı zamanda mikro dolgu maddesi olarak işlev gören nano partiküllerin, geopolimer matrisinde ilave kalsiyum silikat hidrat (CSH), CASH ve NASH jelleri ile birlikte yoğun bir geopolimer yapı oluşumuna imkân sağladığını belirtmişlerdir.

Okoye vd. (2017) yaptıkları çalışmada, %2 H₂SO₄ ve %5 NaCl ortamlarına maruz bırakılmış uçucu kül esaslı geopolimer betonların durabilite özelliklerine mikro silis ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Geopolimer beton numunelerin kimyasal saldırılara karşı dirençleri, görsel görünüm, ağırlık kaybı ve basınç dayanımı

değişimi incelenerek değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla normal Portland çimentolu kontrol numuneleri hazırlanmıştır. %2 H₂SO₄ çözeltisine daldırılan 90 günlük numunelerde ölçülen basınç dayanımı kayıpları, kontrol numunelerinde %36, mikro silis katkıli geopolimer beton numunelerinde ise %8 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde %5 NaCl çözeltisine daldırılan 90 günlük numunelerdeki basınç dayanımı kayıpları ise kontrol numunelerinde %18, mikro silis katkıli geopolimer beton numunelerinde ise %0 olarak bulunmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, mikro silis katkıli uçucu kül esaslı geopolimer beton numunelerin sülfürik asit ve sodyum klorür etkilerine karşı normal Portland çimentolu numunelere kıyasla daha dayanıklı olduğunu ifade etmişlerdir.

Duan vd. (2015) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklık ve asit etkilerine maruz bırakılmış uçucu kül ve metakaolin esaslı geopolimerlerin dayanıklılığını ve mikroyapılarını araştırmışlardır. Uçucu kül ve metakaolin hammaddelerinin Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltileri ile aktive edilmesi sonucu hazırlanan geopolimer numuneler ısı kür işlemi ile sertleştirilmiştir. Geopolimer ve normal Portland çimentolu numunelerin basınç dayanımı ve bazı dayanıklılık parametreleri değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Mikroyapı oluşumu ve gelişimi ile gözenek yapısı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, geopolimerlerin normal Portland çimentolu numunelere kıyasla yoğun bir mikroyapı oluşturduğunu belirtmişlerdir. Asit ortamlarına ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından değerlendirildiğinde, geopolimerlerin normal Portland çimentolarına kıyasla daha düşük dayanım ve ağırlık kaybı gösterdiğini ifade etmişlerdir. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerlerinde, normal Portland çimentolu numunelerde belirgin bir düşüş gözlenirken, geopolimer numunelerde ise 400°C'ye kadar artış elde edilmiştir. Geopolimer numunelerin ağırlık kaybı eğrileri normal Portland çimentolu numunelere benzerlik göstermesine rağmen, nispeten daha düşük ağırlık kaybı gözlenmiştir.

Kim vd. (2014) yaptıkları çalışmada, Na₂SiO₃ ve NaOH ile alkali aktive edilmiş pirinç kabuğu külü esaslı geopolimer bağlayıcıların özelliklerini araştırmışlardır. NaOH konsantrasyonu ve kür koşullarının geopolimer betonların basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. 10 M konsantrasyona sahip alkali aktivatör ile aktive

edilmiş, 60°C'de 24 saat kür edilmiş geopolimer harç numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 31 MPa ve 45 MPa olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, kür süresinde ve alkali aktivatör konsantrasyonunda meydana gelen artışın basınç dayanımını arttırdığını ifade etmişlerdir. Durabilite deneyleri H₂SO₄, HCl, Na₂SO₄ ve MgSO₄ ortamları gibi asit ve sülfat ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harç numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Isıl kür uygulanmış geopolimer betonların basınç dayanımı laboratuvar ortamında kür edilmiş numunelere kıyasla daha yüksek çıkmıştır. 10 M alkali ile aktivatör ile aktive edilmiş ve ısıl kür uygulanmış geopolimer beton numuneleri, ısıl kürün etkisiyle artan güçlü Si-O-Al bağ oluşumuna bağlı olarak daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Asit etkisi sonrası ağırlık kaybı aktif kalsiyum hidroksitin varlığına bağlıdır. Genel olarak geopolimer bağlayıcıların bünyesinde kalsiyum hidroksit bulunmamasından dolayı mükemmel asit ve sülfat direncine sahip olduğu ifade edilmiştir.

Bouguermouh vd. (2017) yaptıkları çalışmada, kaolin esaslı geopolimerlerin hidroklorik asit çözeltisi içerisinde dayanıklılığını incelemişlerdir. Geopolimerlerin asit çözeltilerindeki durabilitelerini araştırmak için 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler, plastik kutularda 0.1 mol/l HCl çözeltisine (pH=1.47) daldırılmıştır. Numuneler 28 gün boyunca bu asit ortamına maruz bırakılmıştır. Numunelerin ağırlık kaybı haftalık olarak belirlenmiştir. Geopolimer numunelerde, asit çözeltisine daldırıldıktan 28 gün sonra önemli bir görünüm değişikliği gözlenmemiştir. Hammaddenin kimyasal bileşiminin geopolimerlerin asidik ortamlara direncinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir. Kuvars ve muskovit gibi ikincil minerallerin alkali kationların çözeltiliye salınmasını önlediği, bu sebeple daha az bozulma ve daha az ağırlık kaybı elde edildiği ifade edilmiştir. Aside batırıldıktan sonra, XRD grafiklerinde ve kristal bileşiklerinde (kuvars ve muskovit) değişiklik gözlenmemiştir. Ancak asit ortamlarında çözünmelerinden dolayı karbonat parçacıkları kaybolmuştur. Elde edilen bulgular ışığında, 28 gün boyunca etki eden hidroklorik asit çözeltisinin geopolimer matrisini etkilemediği ifade edilmiştir.

Raijiwala vd. (2012) uçucu kül esaslı geopolimer beton numunelerde alkali aktivatörlerin mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine etkisini araştırmışlardır.

NaOH ve KOH eşit oranlarda (%50 NaOH + %50 KOH) karıştırılarak Na_2SiO_3 ile birlikte geopolimer betonların üretilmesinde alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Uçucu kül yerel bir termik santralden temin edilmiştir. Üretilen numuneler farklı sıcaklıklarda kür edilmiştir. Basınç dayanımı testi ve çeşitli dayanıklılık deneyleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, 80°C 'de uygulanan kür işleminin geopolimer betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini olumlu etkilediğini, 80°C 'den daha yüksek sıcaklıklarda yapılan kür işleminin mukavemete katkısı olmadığını belirtmişlerdir.

Soutsos vd. (2016) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer betonların reaktivitesini etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, alkali aktive edilmiş uçucu külün yüksek kür sıcaklıklarına ve yüksek alkali konsantrasyonlarına ihtiyaç duyduğu ortaya çıkarılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı kullanılmıştır. Çözelti içerisinde silikatların varlığı basınç dayanımını etkileyen önemli bir parametre olarak ifade edilmiştir. Silis modülü, alkali çözelti içindeki sodyum oksit ile silikanın ağırlık oranı olarak tanımlanmıştır.

Sukmak vd. (2013) kil-uçucu kül esaslı geopolimer tuğlalar üzerine yaptıkları çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve ç/b oranı gibi parametrelerin basınç dayanım gelişimine etkisini uzun süreli kür işlemi altında incelemişlerdir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranları 0.4, 0.7, 1.0, 1.5 ve 2.3 olarak, ç/b oranları ise 0.4, 0.5, 0.6 ve 0.7 olarak seçilmiştir. Kil-uçucu kül esaslı geopolimer tuğlalarda, maksimum kuru birim ağırlığına ulaşmak için numuneler optimum su içeriğinde el ile çalışan hidrolik krikoyla sıkıştırılmıştır. Üretilen geopolimer tuğlalar oda sıcaklığında 24 saat bekletildikten sonra fırında 75°C 'de 48 saat kür işlemine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testleri 7, 14, 28, 60 ve 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, 0.3'den küçük ve 0.8'den büyük ç/b oranlarında basınç dayanımı elde edilememesi sebebiyle geopolimer tuğlalarının imalatı için uygun olmadığını ortaya koymuştur. Optimum $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 0.7, ç/b oranı ise 0.6 olarak elde edilmiştir.

Sathonsaowaphak vd. (2009) yaptıkları çalışmada, NaOH çözeltisinin silis ve alüminyumun çözünme hızını arttırırken Na⁺ iyonlarının yük dengeleyici iyonlar olarak işlev görmesi nedeniyle, 10 M NaOH çözeltisinin geopolimerizasyon reaksiyonu için şart olduğunu vurgulamışlardır.

Nazari vd. (2011) yaptıkları çalışmada kür sıcaklığının uçucu kül ve pirinç kabuğu kabuğu külü esaslı geopolimerinin basınç dayanımına etkisini incelemiştir. Kullanılan NaOH konsantrasyonu 4-12 M arasında değişmiştir. 7 ve 28 günlük numunelerde optimum kür sıcaklığı 80°C ve optimum NaOH konsantrasyonu 12 M olarak elde edilmiştir. 90°C üzerinde yapılan kür işleminde basınç dayanımı değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak yüksek sıcaklıkta uzun süre kür işleminin geopolimerlerin granüler yapısını bozması olarak açıklanmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta kür işleminin geopolimer matrisinin dehidrasyonuna ve daha sonra polimerik jelin kasılmasına bağlı aşırı büzülme neden olduğu ifade edilmiştir.

Wallah ve Rangan (2006) yaptıkları çalışmada ısıl kür uygulanmış düşük kalsiyum içerikli uçucu kül esaslı geopolimer beton numunelerin sülfürik asit direncini incelemiştir. Sülfürik asit çözeltisinin konsantrasyonu %0.5, %1 ve %2 olarak ayarlanmıştır. Geopolimer betonun sülfürik asit direncini tayin etmek amacıyla, numuneler bir yıla kadar asit etkisine maruz bırakılmış, ağırlık kaybı ve kalan basınç dayanımı değerlendirilmiştir. Üretilen numunelere dökümden sonra 24 saat boyunca 60°C'de ısıl kür uygulanmıştır. Sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan numunelerin görsel olarak görünümü incelendiğinde, asit saldırısının numunelerin yüzeyine hafif bir şekilde zarar verdiği görülmüştür. Sülfürik aside maruz kalan numunelerin yüzeyinin erozyona uğradığı tespit edilmiştir. Asit çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça numunelerin yüzeyindeki hasar boyutu da artmıştır. 365 gün maruz kaldıktan sonra, deney numunelerin maksimum ağırlık kaybı yaklaşık %3 olarak elde edilmiştir. Sülfürik asit etkisi, basınç dayanımının düşmesine neden olmuştur. Asit çözeltisinin konsantrasyonu ve asit etkisine maruz kalma süresi dayanımdaki düşüşü etkilemiştir.

Fernandez-Jimenez vd. (2007) yaptıkları çalışmada alkali ile aktive edilmiş uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcıların saf su, deniz suyu, sodyum sülfat ve asidik çözeltiler gibi agresif ortamlarda dayanıklılığını incelemişlerdir. Asit çözeltisi 0.1 Normal HCl çözeltisi (pH 1.0) olarak seçilmiştir. İncelenen başlıca parametreler ağırlık kaybı, basınç dayanımı, hacim değişiklikleri, bozulma ürünlerinin varlığı ve mikroyapısal değişiklikler olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, alkali aktive edilmiş uçucu kül esaslı hamur numunelerin agresif ortamlarda tatmin edici bir performans gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Bu malzemelerin bozulmasının normal Portland çimentolu hamurların bozulmasından belirgin bir şekilde farklı olduğu ifade edilmiştir.

Rajarajeswari ve Dhinakaran (2016) yaptıkları çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. NaOH'in molaritesi 14 olarak belirlenmiştir. İstenilen molaritede çözeltiler hazırlanmış ve kimyasal reaksiyonu kolaylaştırmak için bir gün dinlendirilmiştir. Isıl kürünün geopolimerizasyon süreci ve beton basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için numuneler 60, 80 ve 100°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta 6 saat süreyle etüvde kür edilmiştir. Isıl kürden sonra, numuneler belirtilen süre boyunca oda sıcaklığında tutulmuştur. Sonuçlar, betonun yaşı arttıkça basınç dayanımının arttığını göstermiştir. Dayanım kazanma oranının 28. güne kadar daha fazla olduğu ve 28. günden sonra daha az olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın 60°C'den 80°C'ye yükseltilmesi betonun basınç dayanımında artışa neden olmuştur. Ancak, sıcaklık 100°C değerine yükseltildiğinde ise basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu nedenle, 80°C'nin üzerinde uygulanan ısıl kür işleminin geopolimerizasyon reaksiyonlarında etkisiz olduğu ifade edilmiştir.

Narayanan ve Shanmugasundaram (2017) yaptıkları çalışmada ortam sıcaklığı, ısıtma odası, kuru etüv ve otoklav gibi farklı kür işlemleri etkisinde uçucu kül esaslı geopolimer harçların ısı iletkenliği, basınç dayanımı ve kuru yoğunluk gibi termal performansını araştırmışlardır. Çalışmada, $Na_2SiO_3/NaOH$ oranı 2.5 ve ç/b oranı 0.40 olarak sabitlenmiştir. Elde edilen deneysel bulgulara göre, tüm kür koşulları arasında kuru etüv kürünün en iyi sonucu verdiği ifade edilmiştir. 80°C'de 6 saat uygulanan

etüv kürü sonucunda 27.20 MPa'dan yüksek basınç dayanımı ve 1875 kg/m³ yoğunluk elde edilmiştir.

Chindaprasirt ve Rattanasak (2017) uçucu kül esaslı geopolimer harç üzerine yaptığı çalışmada, ısıl kürün Si-O-Al ağ yapısının oluşumuyla sonuçlanan geopolimerizasyon reaksiyonuna katkıda bulunduğunu ifade etmişlerdir. 35°C ve 65°C'de uygulanan ısıl kür işleminin kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve alümin-silikat (geopolimer bağ) oluşumuna yol açtığını belirtmişlerdir. Üretilen geopolimer numunelerin %3 sülfürik asit çözeltisine daldırılması durumunda, ısı ile kür edilmiş numunelerin oda sıcaklığında kür edilmiş numunelere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Hamidi vd. (2016) yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer hamur numunelerin özelliklerine NaOH konsantrasyonunun etkisini araştırmışlardır. Üretilen numuneler 60°C kür sıcaklığında 24 saat boyunca kür edilmiştir. NaOH konsantrasyonu 4-18 M aralığında seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre en iyi mekanik dayanım 12 M konsantrasyona sahip geopolimer hamur numunesinde elde edilmiştir.

Okoye vd. (2016) yaptıkları çalışmada, NaOH ve Na₂SiO₃ kullanarak farklı oranlarda silis dumanı içeriğine sahip uçucu kül esaslı geopolimer beton numuneler üretmişlerdir. Numuneler 100°C'de fırında kür edilmiştir. İşlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilme ve çekme mukavemetleri incelenmiştir. Referans olarak Portland çimentolu beton kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH (14 M) ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Sonuçlar, silis dumanı ilavesinin geopolimer betonların basınç dayanımını iyileştirdiğini göstermiştir. Silis dumanı içeriği arttıkça çekme ve eğilme mukavemetleri de artmıştır. Geopolimer betonların %2 H₂SO₄, %5 Na₂SO₄ ve %5 NaCl ortamlarında oldukça dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

Tippayasam vd. (2016) yaptıkları çalışmada yaygın olarak kullanılan NaOH ve Na_2SiO_3 alkali aktivatörleri yerine KOH ve K_2SiO_3 alkali aktivatörlerini kullanılarak geopolimer hamur numuneleri üretmişlerdir. Metakaolin esaslı geopolimerlerin özellikleri üzerine KOH konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve ısıtma işleminin etkisi araştırılmıştır. KOH konsantrasyonları 6, 8, 10, 20, 30 ve 40 M olarak seçilmiştir. $\text{K}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ oranları 1 ve 1.5 olarak belirlenmiş olup, üretilen numunelere 24 saat boyunca 40°C ve 60°C 'de kür işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar, 10 M KOH konsantrasyonuna sahip, 40°C 'de 24 saat kür edilmiş ve 550°C 'de ısıtma işlemi görmüş geopolimer numunelerin 28. günde en yüksek basınç dayanımını verdiğini göstermiştir. Isıtma işlemi uygulanan geopolimer yapıdan su çıkışı olduğu için geopolimerin gözenekliliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yoğunluk azalırken, su emme ve gözenekliliğin arttığı belirtilmiştir. Isıtma işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapısının, ısıtma işlemi uygulanmamış numunelerden daha olgun geopolimer matrisine sahip olduğu belirtilmiştir.

Ariffin vd. (2013) pulverize yakıt külü ve hurma yağı yakıt külü karışımından üretilmiş geopolimer beton numuneleri 18 ay boyunca %2 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakmışlardır. Geopolimer beton numunelerde %8 olan ağırlık kaybının, %20 ağırlık kaybına sahip normal Portland çimentolu beton numunelerinden çok daha düşük olduğunu gözlemlenmiştir. Portland çimentolu beton numunelerinde görülen ağırlık kaybının esas olarak kalsiyum hidroksit ile asit arasında meydana gelen ve çatlak oluşumuna neden olan reaksiyonlardan kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte 18 ay sonunda geopolimer betonlardaki basınç dayanımı düşüşü %35 iken, normal Portland çimentolu betonlarda ise %68 olarak gerçekleşmiştir. Geopolimer beton numunelerde gözlenen basınç dayanımı düşüşünün ise esas olarak alüminosilikat bağlarının kırılmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Cheng ve Chiu (2003) yaptıkları çalışmada granüle yüksek fırın cürufunun, geopolimer üretiminde aktif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Geopolimer hamurlarının priz süresinin sıcaklık, potasyum hidroksit konsantrasyonu, metakaolinit ve Na_2SiO_3 ilavesine bağlı olduğu ifade edilmiştir. KOH konsantrasyonu arttıkça priz süresi artmıştır. 60°C 'de kür edilen geopolimer

numunelerin priz süresi laboratuvar koşullarında bekletilen numunelerden daha kısa olmuştur. Maksimum basınç dayanımı 79 MPa olarak elde edilmiştir. Geopolimerlerin yapısal amaçla kullanılabilceği ve mühendislik uygulamaları için iyi bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir.

Gomaa vd. (2017) yaptıkları çalışmada yüksek kalsiyum içerikli alkali aktive edilmiş uçucu kül esaslı geopolimer harçların taze haldeki özelliklerini ve basınç dayanımını araştırmışlardır. Geopolimer harç karışımlarını hazırlamak için farklı kimyasal bileşimlere sahip C sınıfı uçucu külden iki farklı kaynak kullanılmıştır. NaOH konsantrasyonu sabit 10 M olmak üzere $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.5 olan alkali aktivatörler kullanılmıştır. 70°C 'de 24 saat boyunca fırında kür ve $23\pm 2^\circ\text{C}$ 'de ortam koşullarında kür işlemi uygulanmıştır. Numunenin dökülmesi ile fırın kür işleminin başlaması arasındaki bekleme süresi 2 saat olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, ç/b oranının artması ile harç numunelerin priz süresi ve işlenebilirliğinin azaldığını ortaya koymuştur. Maksimum basınç dayanımı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 1.0 olduğu karışımdan elde edilmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 2.5'e yükseltilmesi, priz süresi ve işlenebilirlikte önemli bir azalmaya yol açmıştır. Harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı laboratuvarında kür işlemi sonucunda 20.80 MPa, fırında kür işlemi sonucunda ise 41.10 MPa olarak elde edilmiştir.

Bakharev vd. (2003) yaptıkları çalışmada, ürettikleri 40 MPa basınç dayanımına sahip cüruf esaslı geopolimer betonları asetik asit çözeltisine ($\text{pH}=4$) 12 ay boyunca maruz bırakmış ve basınç dayanımında %33 oranında bir düşüş elde etmişlerdir. Aynı koşullara maruz bırakılan normal Portland çimentolu betonlarda ise %47 azalma gözlenmiştir. Numuneler %2 H_2SO_4 çözeltisine maruz bırakıldığında ise basınç dayanımındaki düşüş geopolimer betonlarda %11, normal Portland çimentolu betonlarda %36.2 olmuştur.

Hanjitsuwan vd. (2014) yaptıkları çalışmada NaOH konsantrasyonunun yüksek kalsiyum içerikli uçucu kül esaslı geopolimer hamurların priz süresi, basınç dayanımı ve elektriksel özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. NaOH molaritesi 8, 10, 12, 15

ve 18 M olarak seçilmiştir. Ç/b oranı 0.40, Na₂SiO₃/NaOH oranı 0.67, kür sıcaklığı ise 40°C olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, NaOH konsantrasyonunun geopolimer hamurların elektriksel ve fiziksel özelliklerine önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yüksek NaOH konsantrasyonunun geopolimerizasyon reaksiyonlarında artışa sebep olduğu için basınç dayanımını ve priz sürelerini arttırdığını ifade etmişlerdir.

Djobo vd. (2016) yaptıkları çalışmada 27°C ve 80°C'de kür edilen volkanik kül esaslı geopolimer harçların mekanik özelliklerini ve durabilitelerini araştırmışlardır. Su emme oranı ve görünür porozite değerlerinin 28. güne kadar arttığı sonrasında ise sabit kaldığı tespit edilmiştir. 80°C'de kür edilen numunelerin yoğunluklarında önemli bir değişim gözlenmezken, 27°C'de kür edilen numunelerin yoğunluğu ise zamanla azalmıştır. 27°C'de kür edilen geopolimer numunelerin 28 günlük basınç dayanımı 20.5 MPa olarak elde edilmiştir ve sonraki zamanlarda kayda değer bir artış gözlenmemiştir. Maksimum basınç dayanımı 80°C'de kür edilmiş olan 90 günlük numunelerde 37.9 MPa olarak elde edilmiştir. 27°C'de kür edilen geopolimer numuneler %5 sülfürik asit ortamında 80°C'de kür edilmiş numunelere kıyasla daha yüksek direnç göstermişlerdir. Asit ortamına maruz bırakılmış geopolimer numunelerde geopolimer jeldeki Ca ile sülfürik asit arasındaki reaksiyonlar sonucunda ikinci bir faz olarak alçı oluşumu gözlenmiştir. Na içeriği yüksek jele sahip numunelerin asit direncinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Duan vd. (2016) yaptıkları çalışmada demir cevheri atığının geopolimer hamur üretiminde kullanımı araştırmışlardır. %0, %10, %20 ve %30 oranlarda demir cevheri atığı katkılı uçucu kül esaslı geopolimer hamurların taze haldeki özellikleri ve yüksek sıcaklığa (200, 400 ve 800°C) maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı değişimi, ağırlık kaybı ve mikroyapıları incelenmiştir. Deneysel sonuçlar %20 ve %30 oranlarda demir cevheri atığı ilavesinin geopolimerlerin işlenebilirliğini ve priz süresini arttırdığını göstermiştir. Sıcaklık arttıkça basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir. %30'dan az oranlarda demir cevheri atığı ilavesi yüksek sıcaklık direncini iyileştirmiştir. Ca(OH)₂ miktarındaki düşüşün ve demir cevheri ilavesinin meydana getirdiği CSH oluşumundaki artışın, basınç dayanımını iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Duan vd. (2017) yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer betonların yüksek sıcaklık dayanımına mikro silis ikamesinin etkisini incelemişlerdir. Uçucu külün %30'a varan oranlarda mikro silis ile yer değiştirmesinin geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık direncini arttırdığını ifade etmişlerdir.

Hardjito ve Rangan (2005) düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül esaslı geopolimer betonun karışım oranları üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 0.4–2.5 aralığında daha iyi basınç dayanımı verdiğini ifade etmişlerdir. NaOH konsantrasyonunun 8-16 M aralığında, ç/b oranının ise 0.3-0.4 aralığında kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Normal çimentolu betonlarda kullanılan ince ve iri agrega oranlarının geopolimer betonlarda da kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Geopolimer betonların ağırlıkça %75-80'in agregadan oluşmasının daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Joseph (2015) uçucu kül esaslı geopolimer betonlar üzerine yaptığı çalışmada, maksimum basınç dayanımını hacimce %70 agrega içeren, ince agrega/toplam agrega oranı 0.35 olan, NaOH molaritesi 10 M olan, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2.5 olan ve 100°C'de kür edilen numuneden elde etmiştir. Kür sıcaklığının ve süresinin optimizasyonu ile erken yüksek basınç dayanımı elde edilebileceğini belirtmiş, 100°C'de 24 saatlik kür işlemi sonucunda 28 günlük basınç dayanımının %96.4'ünün 7 günde kazanıldığını ifade etmiştir. Geopolimer betonlarda normal çimentolu betonlara kıyasla daha az çatlak oluştuğu vurgulamıştır. Normal Portland çimentolu betonlarda 400°C'de yüzeysel çatlak oluşumu başladığı halde, geopolimer betonlarda 600°C'ye kadar gözle görülür çatlak oluşmadığını belirtmiştir.

Atiş vd. (2015) yaptıkları çalışmada aktivatör konsantrasyonunun, kür sıcaklığının ve kür süresinin uçucu kül esaslı geopolimer harçların basınç ve çekme mukavemeti üzerine etkisi araştırmışlardır. Kür sıcaklığı 45°C'den 115°C'ye kadar 10°C'lik artış adımı ile değiştirilmiştir. Isıl kür süreleri 24, 48 ve 72 saat olarak seçilmiştir. Kür işleminden sonra numuneler laboratuvar ortamına soğutulmuştur. Kür süresi uzadıkça basınç ve çekme dayanımının arttığını ifade etmişlerdir.

Girgin (2016) yaptığı çalışmada, uçucu kül ve metakaolinin Na_2SiO_3 ve NaOH ile alkali aktivasyonu sonucu geopolimer hamur numuneleri üretmiştir. Numunelere etüvde farklı sıcaklık ve sürelerde kür uygulanmıştır. Geopolimer hamur numunelerinde basınç dayanımı, su emme, görünür porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda kür süresinin artmasıyla porozite ve su emme oranlarının azaldığı ifade edilmiştir. Numunelerin yoğunluk değerlerinin ise kür süresine bağlı olarak artış gösterdiği belirtilmiştir.

Demirdağ ve Gündüz (2003) yaptıkları çalışmada Ege Bölgesi'nde özellikle Manisa ili Salihli ve Kula Yöresi çevresinde bulunan kırmızı renkli volkanik cüruf oluşumlarının, inşaat sektöründe kırmataş agregası şeklinde, hafif beton agregası olarak değerlendirilebilirliğini araştırmışlardır. Yapılan teknik analizler sonucunda bu agregası türleri standartları sağlayan ürünlerin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Ancak, yörede daha farklı karakteristik özellik sergileyen değişik renk tonlarındaki volkanik cüruf oluşumlarının da benzer şekilde deneysel irdelemelerinin yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Yaşar ve Erdoğan (2005a) yaptıkları çalışmada, asidik ve bazik kökenli pomzaların yapı sektöründe hafif beton agregası olarak kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma için asidik pomza olarak Nevşehir bölgesinden, bazik pomza olarak Toprakkale (Osmaniye) bölgesinden numuneler temin edilmiştir. Ayrıca beton yapımında en çok kullanılan kireçtaşı agregaları Ceyhan bölgesinden alınmıştır. Pomza ocaklarından alınan numuneler kırılıp elendikten sonra sınıflandırılmıştır. Daha sonra asidik pomza, bazik pomza ve kireçtaşı agregalarının farklı su/çimento oranlarında karışımları hazırlanmış ve uygun işlenebilirlik şartlarında küp ve silindir numuneler üretilmiştir. Hazırlanan beton numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine yapılan incelemeler sonucunda, agregaların normal beton, hafif beton ve depreme dayanıklı beton üretiminde kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Yaşar ve Erdoğan (2005b) yaptıkları çalışmada, Nevşehir pomzasının jeolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirledikten sonra, uygun karışım oranlarında farklı boyut ve şekillerde briketler üretmişlerdir. Daha sonra briketlerin fiziksel ve

mekanik özellikleri belirlemiş, ısı ve ses izolasyonu alanında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Üretilen briketlerin birim hacim ağırlığının $650\text{--}700\text{ kg/m}^3$, ısı iletkenlik değerinin $1.5\text{--}2\text{ W/mK}$, ses izolasyonunun $31\text{--}49\text{ Rw (dB)}$, Elastisite modülünün $6580\text{--}7850\text{ MPa}$ ve tek eksenli basınç dayanımının $2.8\text{--}3.4\text{ MPa}$ değerleri arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Yapılan inceleme sonucunda Nevşehir yöresi pomzularından üretilen briketlerin yapı sektöründe kullanılacak ekonomik bir malzeme olduğunu tespit etmişlerdir.

Bekar vd. (2006) yaptıkları çalışmada, Orta Anadolu Bölgesi Hasandağı volkanizmasının bir ürünü olan Aksaray bölgesi volkanik tüf rezervlerinin öncelikle teknik olarak agrega analizlerini gerçekleştirmiş daha sonra standartlara uygun çimento dozajlarında ve bileşimlerinde hazırlanan sıva harcı üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Aksaray bölgesi volkanik tüfleri kullanılarak hazırlanmış sıva harcı örneklerinin priz alma süreleri, yayılma değerleri, birim ağırlık, dayanım ve su emme değerleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Aksaray bölgesi volkanik tüflerinin sıva harcı üretiminde kullanılabilceği belirtilmiştir.

Demir vd. (2008) yaptıkları çalışmada, Seyitömer termik santrali uçucu külünün ve Afyonkarahisar yöresi volkanik tüfünün çimento ve beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Afyonkarahisar yöresi volkanik tüflerinin yeterli dayanım indeksine sahip olduğu, çimento ve beton üretiminde puzolanik katkı olarak kullanılabilceği belirtilmiştir.

Hou vd. (2009) yaptıkları çalışmada, F sınıfı uçucu külü kullanarak ürettikleri geopolimer hamur numunelerinin faz kompozisyonu, mikroyapı ve mukavemet gelişimi üzerine silis modülü ve kür işleminin etkisini araştırmışlardır. Numuneler $50, 65$ ve 80°C sıcaklıklarda 1, 2, 3, 6, 7 ve 28 gün boyunca küre maruz bırakılmıştır. Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımının silikat çözeltisinin silis modülünün 1.4'e kadar artmasıyla arttığı, sonrasında düştüğü ifade edilmiştir. Üç günden daha uzun süre uygulanan ısıl kürün basınç dayanımında önemli bir artışa yol açmadığı belirtilmiştir.

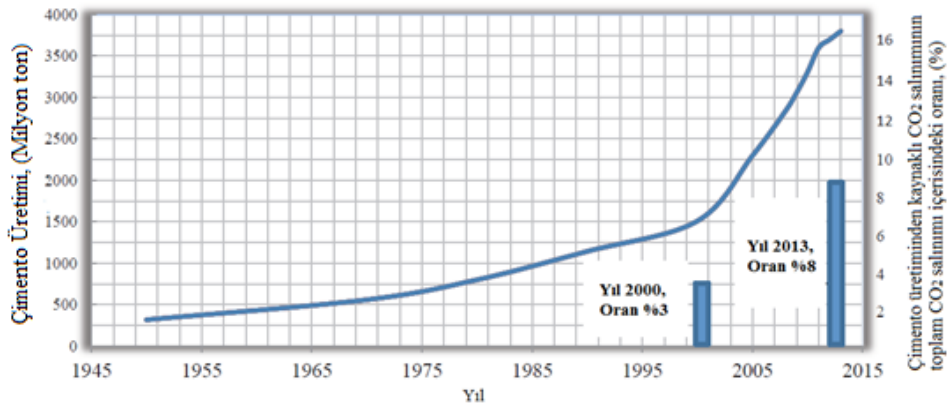
Helmy (2016) F sınıfı uçucu kül kullanarak ürettiği geopolimer harç numunelerine aralıklı kür işlemi uygulamıştır. Alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltisi kullanılmıştır. İlave su içeren ve içermeyen, iki farklı uçucu kül/alkali aktivatör kullanılmıştır. Kür işlemine başlamadan önce iki farklı bekleme süresi uygulanmıştır. Kür sıcaklığı 70°C olmak üzere günde 6 saat kür işlemi uygulanmış ve bunu takiben ortam sıcaklığında 18 saat bekletilmiştir. 21 farklı geopolimer karışımı sabit bir oranda uçucu kül ve doğal kum karışımı kullanılarak üretilmiştir. Basınç dayanımı değişimi 1, 2, 3, 4 ve 7. günde test edilmiştir. Aralıklı kür işleminde, her kür aşamasının sonunda tüm geopolimer harçların basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Basınç dayanımının, numune yaşı, $\text{Na}(\text{OH})$ çözeltisinin konsantrasyonu, ç/b oranı ve $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ mol oranı arttıkça arttığı ifade edilmiştir. Ancak su içeriği arttıkça basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir.

Behfarnia ve Rostami (2017) yaptıkları çalışmada alkali aktive edilmiş cüruf esaslı geopolimer betonların geçirgenlik özelliklerine nano silis ve mikro silis ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Nano silis ve mikro silis, hem ayrı hem de kombinasyon halinde geopolimer betonlara ilave edilmiş, su geçirgenlik testi, hızlı klorür geçirgenlik testi, karbonatlaşma testi, kısa ve toplam su emme testleri ve basınç dayanım testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hamur mikroyapısındaki değişiklikler SEM ve XRD analizleri ile incelenmiştir. Deneysel sonuçları; mikro ve nano silis ilavesinin numunelerin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Bu etkiye bakıldığında, %10 mikro silika ilavesi 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %24 ve %28 oranlarında arttırırken, nano silis ilavesi bakımından ideal karışım oranı olarak bulunan %3 nano silis ilavesinin numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %12 ve %11 oranlarında arttırdığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar mikro silis ilavesinin nano silis ilavesine göre daha yüksek basınç dayanımına yol açtığını göstermiştir. Deneysel çalışmalar, nano silis ilavesinin geçirgenlik açısından istenmeyen sonuçlara neden olduğunu göstermiştir. Ancak, mikro silis kullanımı geçirgenliği azaltmıştır. Mikro silis ilavesinin geopolimer betonun kısa süreli ve toplam su emme oranlarını %19 ve %10 oranlarında azalttığı, ancak nano silisin bu açıdan herhangi bir iyileşme sağlamadığı ifade edilmiştir.

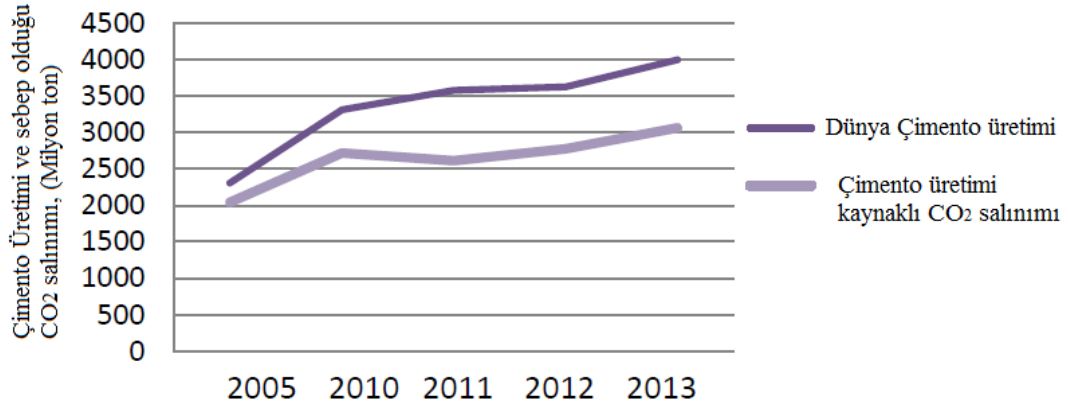
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Çimento Üretimi ve Çevreye Etkileri

Bina, yol, tünel, köprü, baraj, liman gibi birçok alan ve uygulamada kullanılan beton, inşaat sektöründe sıkça tercih edilen bir yapı malzemesidir (Blaszczynski ve Krol, 2015; Choate, 2003; USGS, 2014). Betonun en önemli bileşeni ise çimentodur. Geleneksel Portland çimentosu, yıllık 4 milyar ton üretim kapasitesi ve %4'lük büyüme oranıyla dünyanın dört bir yanında önde gelen bir yapı malzemesidir (USGS, 2014). Çimento üretimi yıldan yıla artış göstermektedir (Şekil 2.1). Tüketimindeki bu artış birçok çevresel ve ekonomik sorunları beraberinde getirmektedir. Şekil 2.2'den de görüleceği üzere, kalkerin ve fosil yakıtların yanmasına bağlı olarak normal Portland çimentosu imalatı sırasında açığa çıkan CO₂ miktarı, üretilen 1 ton çimento için yaklaşık 1 ton civarındadır (Davidovits, 1994; Malhotra, 1999; Kajaste ve Hurme, 2016). Dünya CO₂ salınımının yaklaşık %7'sinin çimento üretiminden kaynaklandığı çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir (Meyer, 2009; Shi vd. 2012; Kajaste ve Hurme, 2016; Wallah ve Rangan, 2006). Önümüzdeki bir kaç yıl içerisinde ise toplam CO₂ salınımının %17'sinin çimento üretiminden kaynaklı olacağı tahmin edilmektedir (El-Gamal ve Selim, 2017; Damilola, 2013). Çimento üretimi yüksek sıcaklıklarda (1400–1500°C) gerçekleştirildiği için önemli ölçüde enerji ihtiyacını zorunlu kılmaktadır. 1 ton çimento üretimi için yaklaşık olarak 94.76x10⁶ Joule enerji gerektiği tahmin edilmektedir (Choate, 2003).



Şekil 2.1. Yıllara göre çimento üretimi ve CO₂ salınımı (Blaszczynski ve Krol, 2015)



Şekil 2.2 2005–2013 yılları arası çimento üretimi ve sebep olduğu CO₂ salınımı (Kajaste ve Hurme, 2016)

CO₂ salınımının neden olduğu sera etkisi küresel sıcaklığı arttırmaktadır. İklim değişikliklerine neden olan bu durum çimento endüstrisi için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Türkiye, 2015 yılı sonu itibarı ile çimento üretiminde Avrupa’da birinci, dünyada ise dördüncü sırada yer almaktadır. Bu artışın sonucu olarak doğa hızla kirlenmektedir (Meyer, 2009; Shi vd. 2012). Enerji fiyatlarındaki artışlar çimento üretim maliyetini de arttırmaktadır. Ayrıca, normal Portland çimentosu ile 50 yıl servis ömrü için tasarlanan yapıların agresif ortamlarda 20–30 yıldan sonra tahrip olmaya başladığı ifade edilmektedir (Mehta ve Burrows, 2001; Hardjito, 2005).

2.2. Çimentoya Alternatif Bağlayıcı Araştırmaları

Bilim insanları çimento üretimi sonucunda oluşan çevresel ve ekonomik problemlerin çözümü üzerine yoğunlaşmaktadırlar. McCaffrey (2002) çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımı miktarını azaltmak için, çimento içinde kalsine edilmiş malzemenin miktarını azaltmak, betondaki çimento miktarını azaltmak ve çimento kullanılan bina sayısını azaltmak gibi üç öneri sunmuştur (Hardjito, 2005). Bununla birlikte beton içerisinde çimento kullanımının tamamen kaldırılması da denenmektedir. Yapılan araştırmalarda, çimento yerine alternatif, doğal ve daha ucuz malzemeler olan geopolimer bağlayıcılar öne çıkmıştır. Geopolimer bağlayıcılar alümin-silikat esaslı malzemelerin alkali aktivasyonu sonucunda elde edilen bir yapı malzemesidir. Ekonomik ve çevre dostu olan bu bağlayıcılar, geleneksel Portland

çimentosuna alternatif bir araştırma potansiyeline sahiptirler. Geopolimer beton kullanımını 1990 yılından sonra ivme kazanmıştır (Joseph, 2015).

2.3. Çalışma Alanının Yeri ve Coğrafi Özellikleri

Çalışma alanı Orta Anadolu'da Nevşehir ili sınırları içerisinde Avanos bölgesinde yer almaktadır. Böltaş Madencilik ve Yapı Malzemeleri şirketi tarafından işletilen ocaklar, Nevşehir havalimanı yolu üzerinde bulunmaktadır. Bölgenin hâkim yeryüzü şekilleri yayla özelliği taşımaktadır. Dağlar ve ovaların kapladığı alan nispeten azdır. Bölgedeki en önemli akarsu çalışma alanının yakınında bulunan Kızılırmak nehridir. Bölgede karasal bir iklim hüküm sürmekte olup, yöre halkı Kızılırmak vadisi üzerinde ve diğer dere alüvyonlarında sulu tarım, meyve ve sebzeçilik yaparak geçimini sağlamaktadır. Ayrıca son yıllarda gelişen turizm sektörü bölgede önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır (Sınıksaran, 2012). Nevşehir yöresinde birçok volkanik çıkış bacası mevcuttur. Asit kökenli bir takım volkanik çıkışlar oldukça yaygın pomza yataklarının oluşmasına neden olmuşlardır (Yaşar ve Erdoğan, 2005a). Kapadokya Bölgesi'ndeki Erciyes, Hasandağı, Melendiz ve Güllüdağ gibi jeolojik devirlerde aktif oldukları bilinen volkanların püskürmeleri sonucu yanardağlardan çıkan lavlar, plato, göller ve akarsular üzerinde 100-150 m kalınlığında, farklı sertlikte bir tuf tabakası meydana getirmiştir (Yaşar ve Erdoğan, 2005b).

2.4. Volkanik Tuf

Volkanik tüfler, volkanik patlamalar sonucunda atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarından oluşur. Malzemenin hava etkisinde kalması tufün camsı yapısının zeolitleşmesine neden olmaktadır. Zeolitleşme malzemenin puzolanik özelliğinde iyileşmeye yol açar. Tüflerin camsı yapısı ve içinde bulunan amorf silis miktarı puzolanik aktivitesi ile doğru orantılıdır. Anadolu toprakları birçok volkanik aktiviteye maruz kaldığından volkanik tüfler bakımından oldukça zengindir. Özellikle Orta Anadolu yöresinde çok miktarda bulunan bu malzemelerin değerlendirilmesi ekonomik kazanımlar sağlayacaktır (Duran, 2009). Volkanik tüfler, doğal taşlar arasında en eski ve en bol rezerve sahip olandır. Tuf, yapısında

yüksek oranda silika ve zeolit mineralleri içerir. Zeolit, kafes yapısında alüminyum, silis ve oksijen içeren mikro gözenekli katı kristal yapıya sahiptir (Colella vd. 2001; Mehta, 1987; Massazza, 2001; Tekin, 2016).

Türkiye'deki bütün volkanik arazilerde tüfitik kayalara rastlanır ve bu kayalar andezit, dasit ve trakitler arasında veya genelde birlikte bulunurlar. Ocakta iken yumuşak olan bu kayaların işlenmeleri kolaydır. Ancak, bunlar açık havada kaldıkça su içeriğinin bir kısmını kaybederek daha dayanıklı bir duruma gelebilmektedirler (Sınıksaran, 2012). Tüflerin kimyasal yapısı yöresel olarak farklılık gösterse de yakın kimyasal içeriklere sahiptirler. Türkiye'nin çeşitli yerlerinde bulunan volkanik tüflerin kimyasal bileşimi Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Volkanik tüfler İç Anadolu Bölgesi başta olmak üzere Türkiye'nin birçok yerinde görülmektedir. Özellikle, Ankara, Eskişehir, Kayseri, Konya, Niğde, Nevşehir gibi şehirlerde çeşitli minerallere sahip volkanik tüfler bulunmaktadır (Duran, 2009). Nevşehir ülkemizin önemli volkanik tüf stoklarının başında gelmektedir (Sınıksaran, 2012).

Çizelge 2.1. Bazı yörelerdeki volkanik tüflerin kimyasal analizi (Sınıksaran, 2012)

	Gölcük yöresi	Nevşehir yöresi	Van-Bitlis yöresi	Dünyanın 80 değişik yöresinin ortalaması
SiO ₂	61.55	68.50	69.00	70.38
Al ₂ O ₃	15.50	14.00	14.65	15.82
Fe ₂ O ₃	6.05	3.00	2.50	1.50
CaO	2.24	1.50	1.10	1.56
MgO	2.40	1.40	0.53	0.48
Na ₂ O	3.30	3.25	3.50	3.70
K ₂ O	3.43	3.50	3.50	4.10
TiO ₂	0.40	0.25	0.38	-
SO ₃	0.94	0.002	0.40	-
Kızdırma Kaybı	1.40	3.90	4.63	3.62

2.4.1. Volkanik tüfün rezerv potansiyeli

Yapılan çalışmalar sonucunda Nevşehir ve çevresinde 1.5 milyar m³'ü aşan, farklı özelliklere sahip üretilebilir pomza rezervi saptanmıştır. Ülkemizin Maden Tetkik ve

Arama (MTA) tarafından yapılan çalışmalar neticesinde 3 milyar m³ pomza rezervine sahip olduğu belirtilmektedir. En çok talep gören asidik pomza Nevşehir bölgesindeki beyaz renkli pomzadır (Yaşar ve Erdoğan, 2005a). Türkiye'nin görünür rezerv, mümkün rezerv ve muhtemel rezerv verileri hesaba katıldığında, 18 milyar m³ civarında pomza rezervlerinin olduğu ve dünya pomza rezervlerinin yaklaşık %40'ına sahip olduğu ifade edilmiştir. Toplam pomza rezervlerinin yöresel olarak dağılımı ise Çizelge 2.2'de verilmiştir (Bayrak, 2005; Yadollahi, 2013). Bazı kaynaklarda volkanik tuf yerine pomza terimi kullanılmaktadır. Magmatik kökenli doğal puzolan olan volkanik tuf ile pomzanın kimyasal bileşimleri yakın olmasına rağmen, mekanik özellikler ve yoğunluk değerleri açısından farklılık göstermektedirler. Nevşehir yöresinde bulunan rezervler için volkanik tuf terimini kullanmak daha doğru bir ifadedir.

Çizelge 2.2. Türkiye'nin pomza rezervleri (Bayrak, 2005)

Yer	Rezerv miktarı, (m ³)	Rezerv kategorisi
Nevşehir - Avanos - Ürgüp	404412834	A+B
Nevşehir - Derinkuyu	48660500	C
Kayseri - Gömeç	13250000	A+B
Kayseri - Develi	58500000	A+B
Kayseri - Talas - Tomarza	241000000	A
Bitlis - Tatvan	284000000	B
Van-Erciş - Kocapınar	1100000000	B
Van - Molla Kasım	154625000	A+B
Ağrı - Patnos	5950000	A+B
Ağrı - Doğubeyazıt	27812000	A+B
Kars - Iğdır- Kavak Tepe	26875000	A+B
Kars-Digor	40156250	B
Kars - Sarıkamış	11718750	B
Ankara - Güdül –Tekköy	1875000	B
Isparta - Gölcük	8070000	A+B
Isparta - Gölcük	30983250	A+B+C
A:Görünür rezerv, B:Mümkün rezerv, C:Muhtemel rezerv		

2.4.2. Volkanik tüfün kullanım alanları

Bugün inşaat sektöründe, volkanik, tortul veya metamorfik kökenli pek çok kayaç türü doğal kaplama taı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte volkanik kökenli kayaçlar arasında, birim ağırlığı düşük, ısı ve ses yalıtım özelliği diğer kaplama talarına göre daha üstün, işlemesi ve işçiliği daha kolay, farklı renk seçeneklerinde bulunabilen kayaç türleri mevcuttur (Gündüz vd. 2006). Ülkemizde üretilen volkanik tüfler, tuğla, perde beton ve briket duvarların kaplanmasında kullanılması yanı sıra özellikle Kapadokya bölgesinde yığma binaların taşıyıcı olarak duvarlarının oluşturulmasında, cami ve minare gibi yapılarla kullanılmaktadır. Kayseri ve Nevşehir illerinde bulunan orta ölçekteki işletmelerde, bu bölgelerden elde edilen kayaçlar mermer ilemesinde olduğu gibi işlenerek boyutlandırılmı levha ve/veya plaka Őekillerine dönüştürülerek doğal olarak değişik renkteki özellikle beyaz, pembe, sarı-kırmızı desenli ve yeşil renklerin baskın olduğu tüfler üretilmektedir (Gündüz vd. 2006; Atıcı, 2016).

İnsanoğlu, dünyanın çeşitli volkanik bölgelerinde bulunan tüflerden binlerce yıllardan beri faydalanmaktadır. Blok olarak çıkarılıp kolayca Şekil verilebilen çeşitli renklerdeki tüfler, tarihi yapılarla yapı taşı olarak oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Yumuşak tf kayalara oyularak yapılmış yeraltı Őehirleri tarih boyunca pek çok uygarlığa ev sahipliği yapmıştır. Bunlardan en önemlileri Kapadokya bölgesinde bulunan yeraltı Őehirleridir. Tüfler hidrolik bağlayıcılık özelliği olmasından dolayı hafif beton ve duvar elemanlarının yapımında ve çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yine tüflerin bu özelliğinden dolayı, zeminlerin iyileştirilmesinde, karayolu ve havaalanı gibi geniş dolgu hacimlerinde kullanımı araştırılmaktadır (Ene ve Okagbue, 2009; Saltan ve Fındık, 2008; Hossain vd. 2007; Kaya ve Durukan, 2004; Acar, 2011).

2.5. Geopolimerler

Geopolimerler, doğal ve atık puzolanların çeşitli alkali aktivatörler ile aktive edilmesiyle elde edilen alümin silikat tipi bağlayıcı malzemelerdir. Geopolimer bağlayıcılar Portland imentosu ile kıyaslandığında ileri mühendislik özellikleri

sergileyen bir malzeme grubudur. Geopolimer üretiminin Portland çimentonsu üretiminden 5 kat daha az CO₂ salımına yol açtığı ve %60 oranında enerji tasarrufu sağladığı çeşitli kaynaklarda ifade edilmiştir (Comrie ve Davidovits, 1988; Davidovits vd. 1990; El-Gamal ve Selim, 2017).

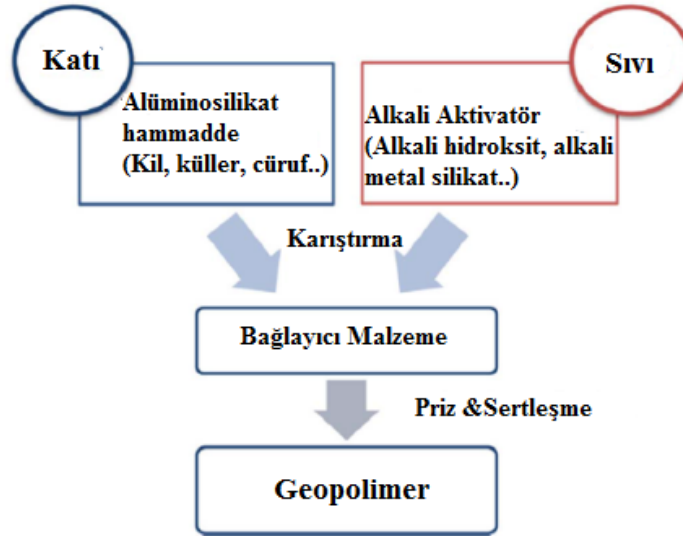
Geopolimer terimi 1978 yılında Fransız araştırmacı Davidovits tarafından alüminosilikat esaslı inorganik polimerlerin tanımı için kullanılmıştır. Geopolimerler puzolanik veya alüminosilikat hammaddenin yüksek alkali çözeltisi ile sentezlenmesi ile oluşur (Davidovits, 1991). Geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler genellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerdir. Depolanması, taşınması ve yok edilmesi çok büyük bir sorun teşkil eden uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların değerlendirilmesi de geopolimer malzemelerin sahip olduğu avantajlardan birisidir (Shi vd. 2012; Haddad ve Alshbuol, 2016).

Geopolimer bağlayıcılar, 1978 yılında Davidovits tarafından tanımlanmasından bu yana kimya alanının yanında mühendisliğin de ilgisini çekmiştir. Son yıllarda, çevre dostu olmalarının yanı sıra yüksek erken dayanımı, asit ve sülfat direncinden dolayı geopolimerler normal Portland çimentolarına muhtemel alternatif olarak ortaya çıkmışlardır. Geopolimerler uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi yüksek silis ve alümin içerikli hammaddelerden üretilse de, günümüzde uçucu kül esaslı geopolimerler daha fazla ilgi çekmektedir. Geopolimer bağlayıcılar, asit etkisine dirençli beton üretiminde iyi bir alternatif olabilirler, çünkü geopolimerler yapı bütünlüğü için kalsiyum silikat hidrat bağlayıcılarından çok alüminosilikat esaslıdır (Thokchom vd. 2009).

Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar, sürdürülebilir çimentolu bağlayıcı sistemlerinin mevcut ve gelecekteki kilit taşı olarak yaygın şekilde tartışılmış ve desteklenmiştir (Provis ve Bernal, 2014; Provis vd. 2015; Provis ve van Deventer, 2014; Shi ve Qian, 2000; Shi vd. 2011; Shi vd. 2006). Geopolimer olarak adlandırılan bu bağlayıcılar, kullanılabilirliği, reaktivitesi, maliyeti ve miktarı dünya çapında farklı olan bir çok alüminosilikat hammaddeden üretilebilir (Davidovits, 2008a). Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar yerinde döküm ve prekast döküm dahil olmak üzere bir çok yöntemle

üretilebilirler. Alkali aktivatörlerin uygun bir şekilde karıştırılabileceği ve kontrollü kür işleminin mümkün olduğu prekast yapılarda uygulamasının daha uygun olduğu sıklıkla ifade edilmiştir (Provis, 2017).

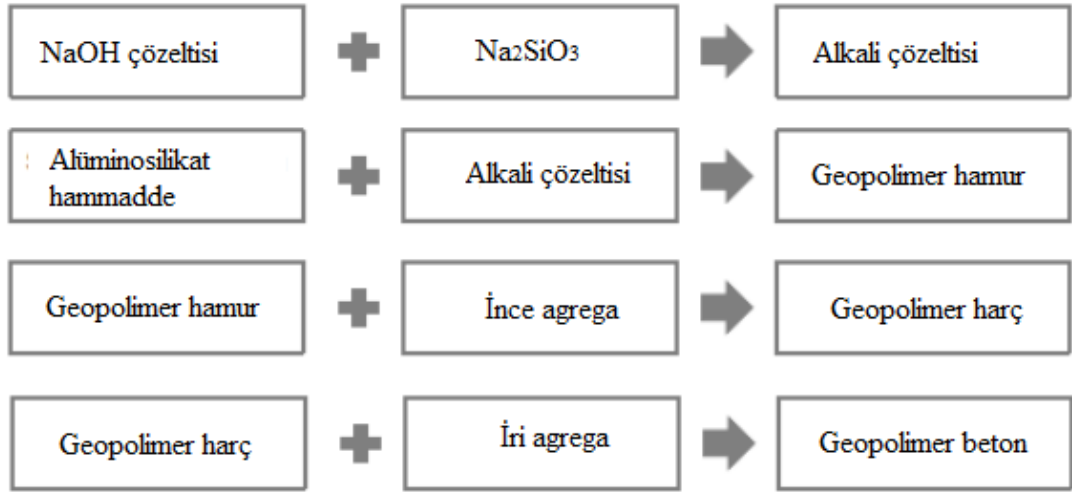
Geopolimer beton, bağlayıcı olarak Portland çimentosunun varlığına ihtiyaç duymayan 'yeni' bir malzemedir. Çimento yerine, silisyum ve alüminyum içeriği zengin olan uçucu kül gibi hammaddeler geopolimer bağlayıcı elde etmek için alkali çözeltisi ile aktive edilmektedir. Sonuçta Portland çimentosu içermeyen bir beton elde edilmektedir (Hardjito, 2005). Geopolimer bağlayıcı üretimi Şekil 2.3'de şematik olarak gösterilmiştir (Yun-Ming vd. 2016; Huseien vd. 2017). Geopolimer hamur, harç ve beton üretimi ise Şekil 2.4'de şematik olarak gösterilmiştir (Shrestha, 2013). Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların tarihsel gelişimi Çizelge 2.3'de sıralanmıştır (Roy, 1999).



Şekil 2.3. Geopolimer bağlayıcı üretiminin şematik gösterimi (Yun-Ming vd. 2016)

Çizelge 2.3. Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların tarihsel gelişimi (Roy, 1999).

Sıra No	Yazar	Yıl	Araştırma
1	Feret	1939	Çimentoda cüruf kullanımı
2	Purdon	1940	Alkali-cüruf bileşimi
3	Glukhovsky	1959	Alkali çimentonun teorik temelleri ve gelişimi
4	Glukhovsky	1965	Alkali çimento teriminin ilk defa kullanımı
5	Davidovits	1979	Geopolimer teriminin ilk defa kullanımı
6	Malinowsky	1979	Tarihi su kemerlerinin karakterize edilmesi
7	Forss	1983	Klinkersiz çimento (cüruf-alkali-akışkanlaştırıcı)
8	Langton ve Roy	1984	Tarihi yapıların karakterize edilmesi
9	Davidovits	1985	Pramit çimento patenti
10	Krivenko	1986	Doktora tezi, $R_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$
11	Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melit cüruflarının aktivasyonu
12	Malek vd.	1986	Cürufllu çimento-düşük seviyeli radyoaktif atık formları
13	Davidovits	1987	Tarihi ve modern betonların kıyaslanması
14	Deja ve Malolepsy	1989	Klor direncinin ortaya çıkarılması
15	Kaushal vd.	1989	Alkali karışımlarından adyabatik kürlenmiş nükleer atıklar
16	Roy ve Langton	1989	Tarihi beton analogları
17	Majundar vd.	1989	Monokalsiyum alüminat-cüruf aktivasyonu
18	Talling ve Brandstetr	1989	Alkali aktive edilmiş cüruflar
19	Wu vd.	1990	Cürufllu çimentoların alkali aktivasyonu
20	Roy vd.	1991	Hızlı priz alan alkali aktive edilmiş çimentolar
21	Roy ve Silsbee	1992	Alkali aktive edilmiş çimentolar
22	Palomo ve Glasser	1992	Metakaolin esaslı kimyasal bağlı çimentolar
23	Roy ve Malek	1993	Cürufllu çimentolar
24	Glukhovsky	1994	Tarihi, modern ve gelecekteki betonlar
25	Krivenko	1994	Alkali aktive edilmiş çimentolar
26	Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkali aktive edilmiş mikroyapı



Şekil 2.4. Geopolimer hamur, harç ve beton üretimi (Shrestha, 2013)

2.5.1. Geopolimerlerin ekonomik ve çevresel avantajları

Çimentoya alternatif olarak önerilen geopolimerler, çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımını %80 oranında azaltmaktadır (Duxson vd. 2007a; Shi vd. 2012). Geopolimer üretiminin Portland çimentosu üretimine kıyasla %60 oranında enerji tasarrufu sağladığı çeşitli kaynaklarda ifade edilmiştir (Comrie ve Davidovits, 1988; Davidovits vd. 1990; El-Gamal ve Selim, 2017).

Rajarajeswari ve Dhinakaran (2016) yaptıkları çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanarak ürettikleri geopolimer beton numuneleri üzerine maliyet analizi gerçekleştirmişlerdir. 28 MPa basınç dayanımına sahip normal Portland çimentolu 1 m³ betonun maliyetini 83.05 dolar olarak hesaplanmışken, 26.97 MPa basınç dayanımına sahip 1 m³ geopolimer betonun maliyetini 51.66 dolar, 32.98 MPa basınç dayanımına sahip 1 m³ geopolimer betonun maliyetini 57.05 dolar, 37.65 MPa basınç dayanımına sahip 1 m³ geopolimer betonun maliyetini 61.66 dolar olarak elde etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda geopolimer betonun daha ucuz olduğu ortaya çıkarılmıştır. Normal Portland çimentolu beton ile geopolimer beton arasındaki maliyet farkının ise çimentodan kaynaklı olduğunu ifade etmişlerdir.

Li vd. (2004) geopolimerlerin avantajlarını aşağıdaki gibi açıklamışlardır:

1. Hammadde kaynaklarının bol olması: Alkali çözeltide çözünen silikat veya alümin silikatlar doğada bol miktarda bulunur. Geopolimerler endüstri atıklarından ve doğal puzolanlardan elde edilebilmektedirler.
2. Enerji tasarrufu ve çevre korunumu: Geopolimerler, yüksek enerji tüketimi gerektirmezler. Doğal alüminosilikatların düşük rölatif sıcaklıklarda (600~800°C) ısıl süreci, Portland çimentosunun harcadığı enerjinin 3/5'ini kullanarak uygun geopolimerik hammaddeler sağlar ve az miktarda CO₂ açığa çıkarır.
3. Basit hazırlama yöntemi: Geopolimerler, alüminosilikat reaktif malzemelerin, kuvvetli alkali çözeltilerle düzenli karıştırılmasıyla kolaylıkla sentezlenebilir. Kısa bir zaman diliminde dikkate değer bir dayanım elde edilir. Bu işlem Portland çimentolu betonların hazırlanmasına benzerdir.
4. İyi hacim kararlılığı: Geopolimerler Portland çimentolarından %80 daha az rötreye sahiptirler.
5. Kısa sürede dayanım kazanımı: Geopolimerler, prizinin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının yaklaşık %70'ini kazanabilirler.
6. Mükemmel dayanıklılık: Geopolimer beton veya harçlar dayanımından çok fazla kayıp olmaksızın binlerce sene dış etkilere dayanabilirler.
7. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık ve düşük ısı iletkenliği: Geopolimerler 1200°C'ye kadar önemli bir zarar görmeden dayanabilirler. Isıl iletkenlikleri ise hafif tuğlalara göre düşük olup 0.24 - 0.3 W/mK arasındadır.

2.5.2. Geopolimerlerin durabilite özellikleri

Geopolimer malzemeler üstün fiziksel ve mekanik özelliklerine ek olarak, mükemmel kimyasal dayanıklılığa sahiptirler. Geopolimer hamur ve harçlar sülfat, deniz suyu, asidik ortamlar ve alkali silika reaksiyonu etkilerine karşı tatmin edici dayanıklılığa sahiptirler (Fernandez-Jimenez vd. 2007; Comrie vd. 1988). Geopolimer bağlayıcıların hidrasyonu sonucunda C₃A ve Ca(OH)₂ gibi ürünler oluşmadığından, geopolimer bağlayıcılı betonların durabilite özelliklerinin de

geleneksel çimento ile üretilen betonlardan daha iyi olacağı beklenmektedir. Ayrıca geopolimer betonlar yüksek sıcaklıklara da dayanıklıdır (Haddad ve Alshbuol, 2016).

Bakharev (2005a) F tipi uçucu kül kullanarak ürettiği geopolimer numuneleri %5 asetik asit ve %5 sülfürik asit ortamlarına maruz bırakmıştır. Geopolimer bağlayıcı numunelerin normal Portland çimentolu numunelere kıyasla daha üstün performans gösterdiklerini tespit etmiştir. NaOH ile aktive edilmiş ve yüksek sıcaklıkta kür edilmiş geopolimer numunelerin en iyi performansı sergilediklerini ifade etmiştir (Edouard, 2011).

2.5.3. Geopolimerlerin uygulama alanları

Geopolimer beton teknolojisinin dünyanın çeşitli yerlerinde uygulanmaya başladığını söylemek mümkündür. Örneğin Avustralya'da 2013 yılında 40000 m³ geopolimer beton kullanımı gerçekleşmiştir. Geopolimer bağlayıcıların uygulama alanları oldukça geniştir. Normal beton, hazır beton, betonarme, beton borular, harç, hafif beton gibi uygulamaları olan geopolimer bağlayıcıların kullanım alanları ile genişlemeye devam etmektedir (Provis, 2017). Benzer şekilde Rafeet vd. (2017) geopolimer betonların Avrupa, Amerika, Avustralya ve Hindistan'da ticari olarak kullanıldığını ifade etmişlerdir.

Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar 60 yıldan daha uzun süredir bilinmektedir. Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar kullanılarak yapılmış geniş ölçekli çalışmalardan biri Ukrayna'da bulunan konut yapılarıdır (Şekil 2.5). Bu evler demir-çelik atığının alkali aktivasyonu sonucu elde edilen geopolimer bağlayıcı ile 1960 yılında 7.5 MPa tasarım mukavemetine göre inşa edilmiştir. 2012 yılında yapıdan alınan numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyinde 14 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir (Hlavacek, 2014).



Şekil 2.5. Ukrayna'da geopolimer beton kullanılarak üretilmiş konut yapıları (Hlavacek, 2014)

Davidovits (1999) geopolimer malzemelerin potansiyel uygulama alanlarını Si/Al oranına bağlı olarak Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi önermiştir (Hardjito, 2005).

Çizelge 2.4. Geopolimer malzemelerin uygulamaları (Hardjito, 2005)

Si/Al oranı	Uygulama alanı
1	Tuğla, seramik, yangın barınakları
2	Düşük CO ₂ çimentoları, beton, radyoaktif ve toksik atık kapsülleme
3	Isıya dayanıklı kompozitler, döküm ekipmanları, cam elyafı kompozitler
>3	Endüstri için sızdırmaz malzemeler
20 < Si/Al < 35	Yangına dayanıklı ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

2.5.4. Geopolimer kimyası

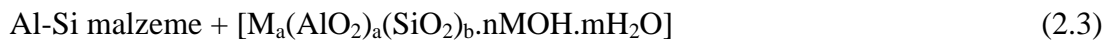
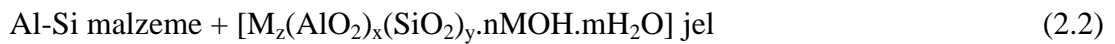
Geopolimer bağlayıcılar, alüminosilikat bakımından zengin hammadde ile alkali aktivatör arasında gerçekleşen bir dizi reaksiyon sonucunda meydana gelirler. Bu reaksiyonlar alümin ve silikat monomerler meydana getiren Si-Al-O bağları oluştururlar. Monomerler daha sonra oligomerlere ve daha sonra silikat polimerlere dönüşür. Alüminosilikat ve alkali (Na₂O) arasındaki reaksiyon genellikle alümin silikat hidrat (NASH) jeli oluşturur. Bu jel oksijen atomlarını paylaşarak birbirine bağlanan SiO₄ ve AlO₄ tetrahedral birimleri içerir (Davidovits, 1991). Geopolimer matrisinin yük dengesi Na⁺, K⁺ ve Ca²⁺ gibi ilave katyonlar vasıtasıyla elde edilir.

Kalsiyum ve magnezyum iyonları içeren geopolimer bağlayıcılar, alüminosilikat esaslı geopolimerlere kıyasla daha karmaşık reaksiyon mekanizmalarına sahiptir. Bu sistemler amorf NASH jelinden başka CSH ve CASH jeli de üretirler (Garcia-Lodeiro vd. 2014; Tennakoon, 2016).

Geopolimerler alüminosilikat hammaddenin sıcak ortamda alkali aktivasyonu ile elde edilmektedir. Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların priz ve sertleşme mekanizmasının hammadde ve aktivatör tipine bağlı olduğu düşünülmektedir rağmen, işlem tam olarak anlaşılmamıştır (Pacheco-Torgal vd. 2008). Geopolimerlerin oluşum süreci üzerine farklı mekanizmalar önerilmiştir (Joseph, 2015). Davidovits (2008a) geopolimer sentezinin üç adımda oluştuğunu ifade etmiştir (Xu ve van Deventer, 2000; Hardjito, 2005):

- Si ve Al atomlarının hammaddeden hidroksit iyonlarının etkisiyle çözünmesi ve böylece öncü iyonlar oluşturulur
- Hammadde iyonlarının monomerlere yoğunlaşması
- Monomerlerin polimerik yapılara polimerize olması / polimerizasyonu.

Geopolimerizasyon işleminin polikondenzasyonu için Denklem 2.1–2.3'te gösterilen reaksiyon şeması önerilmiştir (Xu ve van Deventer, 2000; Joseph, 2015):

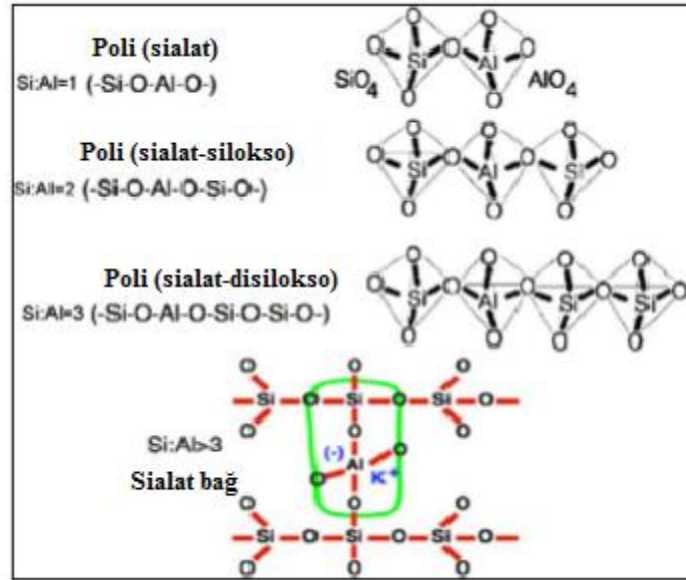


(Amorf geopolimer yapılı)

Davidovits (1991) üç farklı amorf-yarı kristal üç boyutlu alüminosilikat yapılar (geopolimer) olduğunu ifade etmiştir (Joseph, 2015; Hardjito, 2005):

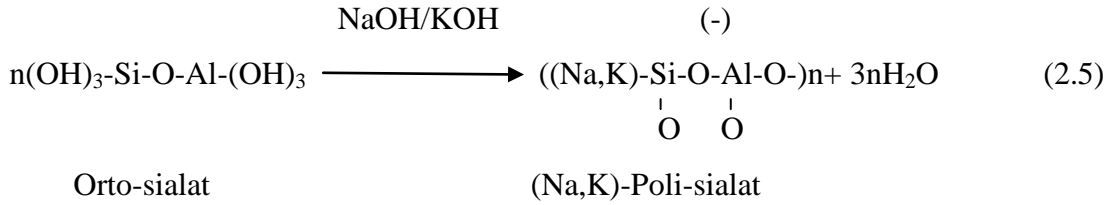
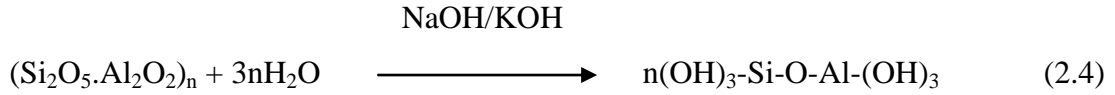
- Tekrar eden birim olarak [-Si-O-Al-O-] olan Poli (sialat).
- Tekrar eden birim olarak [-Si-O-Al-O-Si-O-] olan Poli (sialat-silokso).
- Yinelenen olarak [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-] olan Poli (sialat-disilokso) birimi.

Davidovits tarafından önerilen oksijen atomunun silis ve alümin ile koordinasyon mekanizması Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Xu ve van Deventer, 2000; Joseph, 2015).

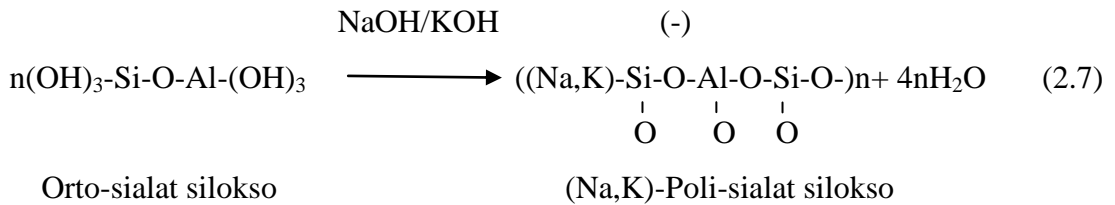
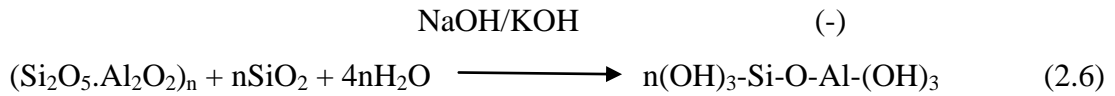


Şekil 2.6. Oksijen atomunun koordinasyon mekanizması (Joseph, 2015)

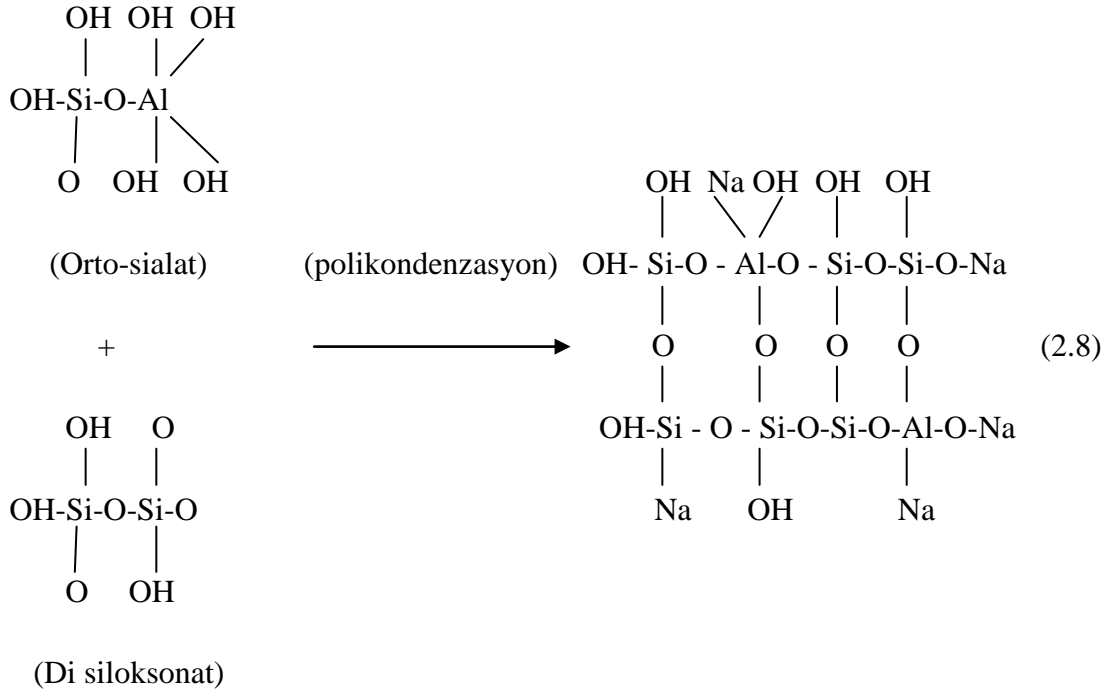
Hammaddedeki silis ve alümin oranına göre farklı reaksiyon mekanizmaları önerilmiştir. Silis ve alümin oranı 1:1 olduğunda, alkali ile reaksiyon orto-sialat oluşturur. Bu ürün ayrıca poli-sialat yapı oluşturmak üzere alkali ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon mekanizması Denklem 2.4 ve 2.5'de açıklanmaktadır (Joseph, 2015).



Hammaddedeki silis ve alümin içeriği 2:1 oranındayken, alkali ile reaksiyon, orto-sialat-silokso oluşturur. Bu ayrıca poli-sialat-silokso yapısını oluşturmak üzere alkali ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon mekanizması Denklem 2.6 ve 2.7'de açıklanmaktadır (Joseph, 2015).



Hammaddedeki silis ve alümin içeriği 3:1 oranında olduğunda, alüminyum silikat malzemeye alkali etkisi nedeniyle, orto-sialat ve di-siloksonat başlangıçta oluşur. Bunlar daha sonra polikondenzasyona uğrarlar ve poli-sialat di-silokso oluştururlar. Bu reaksiyon mekanizması Denklem 2.8'de açıklanmıştır (Joseph, 2015).



2.5.5. Volkanik tuf esaslı geopolimerler

Puzolanik özelliğe sahip olan volkanik tüfler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 içerikleri yüksek, amorf yapıları silikatlı bileşiklerdir. Kristal yapısı bozuk silikatlar pH'sı yüksek; alkali ortamda OH^- iyonlarının etkisi ile çözülebilir (Akgül, 2006). Volkanik tuf, volkanik kül gibi alüminosilikat esaslı mineraller ince öğütülmeleri durumunda bazik ortamda çözünürler. Ortamda Na_2SiO_3 gibi katalizör bulunması durumunda üç boyutlu kovalent bağlı yapılar meydana getirirler (Davidovits, 2008b; Gualtieri vd. 2012). Palomo vd. (1999) çalışmalarında alkali aktivatörlerin, karışımda çözünebilir silis olduğu takdirde çok hızlı davranarak polimerizasyon reaksiyonlarında önemli rol oynadığını açıklamışlardır. Bu sebeple yüksek silis ve alümin içeriğine sahip, amorf yapıları, doğal puzolanik malzeme olan volkanik tufün geopolimer bağlayıcıların hammaddesi olarak kullanılabilmesini ifade etmişlerdir. Tüflerin camı yapısının ve içinde bulunan amorf silis miktarının puzolanik aktivitesi ile doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Djobo vd. (2016) volkanik kül esaslı geopolimerlerin durabilitesi üzerine yapılan çalışmaların yetersiz olduğunu ifade etmiş ve yaygın uygulamalar için yeni çalışmaların yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

2.6. Alkali Aktivatörler

NaOH ve KOH alkali aktivatörleri, Na_2SiO_3 ile karıştırılarak veya yalnız başına geopolimer kompozitlerin üretimi için kullanılmaktadır. NaOH'in tek başına kullanımı, özellikle düşük konsantrasyonda biraz daha düşük mukavemetli geopolimer ile sonuçlanır (Görhan ve Kürklü, 2014). Na_2SiO_3 kullanılması önemli ölçüde mukavemet gelişimine yol açar (Phoo-ngernkham vd. 2015). Aslında basınç dayanımı kullanılan alüminosilikat hammaddesine bağlıdır (Dimas vd. 2009). Bununla birlikte NaOH, CO_2 salınımı açısından Na_2SiO_3 'ten daha çevre dostudur. Çünkü, tuzlu suyun elektroliz işlemi NaOH üretiminde tercih edilir ve bu işlem sadece Cl_2 ve H_2 'yi serbest bırakır. Ancak, Na_2SiO_3 üretmek için NaCO_3 ve SiO_2 kabaca 1200–1400°C'de yakılmalıdır ve bu yöntem ile CO_2 salınımı meydana gelir (Speight, 2002; Tekin, 2016).

Geopolimerizasyon reaksiyonlarında en yaygın kullanılan alkali aktivatör sodyum hidroksit veya potasyum hidroksitin sodyum silikat veya potasyum silikat ile karıştırılmasından elde edilir (Davidovits, 1999; Palomo vd. 1999; Xu and van Deventer, 2000; Swanepoel ve Strydom, 2002). Tek alkali aktivatörün kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Palomo vd. 1999; Teixeira-Pinto vd. 2002; Hardjito, 2005).

2.7. Kür Koşullarının Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi

Kür işlemleri geopolimer karışımlarının prizi ve sertleşmesi esnasında uygulanan sıcaklık, nem, hava sirkülasyonu gibi etkileri kapsar. Bu parametrelerin geopolimer malzemelerin özelliklerini oldukça etkilediği bilinmektedir (Duxson vd. 2007b; Montes ve Allouche, 2012; Alonso ve Palomo, 2001). Birçok araştırmacı, 20°C ile 100°C arasında sıcaklıkta, bir kaç saat ile bir kaç gün arasında değişen sürelerde uygulanan kür işleminin geopolimerizasyon üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir (Bing-hui vd. 2014; Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2003; Alonso ve Palomo, 2001; Rovnaník, 2010; Gasparini vd. 2015; Aredes vd. 2015). Araştırma sonuçları, kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımının da arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, belirli bir sıcaklığın üzerinde uygulanan kürün mukavemete katkısı yoktur. Metakaolin esaslı geopolimerler üzerine yapılan birçok çalışmada 60-70°C üzerindeki kür

işleminin uzun süreli dayanım üzerinde zararlı olduğu bulunmuştur. Daha yüksek sıcaklıkta uygulanan kür işlemleri hızlı prize neden olan reaktiviteye yol açmaktadır (Bing-hui vd. 2014; Rovnaník, 2010; Gasparini vd. 2015; Aredes vd. 2015). Bu eşik sıcaklığı, bazı uçucu kül ve volkanik kül esaslı geopolimerlerde daha yüksektir, ancak genellikle 100°C'yi aşmamaktadır (Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2003; Lemouagna vd. 2011; Suksiripattanapong vd. 2015; Okoye vd. 2015; Lemouagna vd. 2016).

Geopolimer betonların normal Portland çimentolu betonlar ile karşılaştırıldığında benzer veya daha yüksek basınç dayanımına ulaşması için ısıl kürün gerekli olduğu çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır (He vd. 2013; Islam vd. 2014; Ryu vd. 2013; Ranjbar vd. 2014a, b). Isıl kür, çözünme ve alüminosilikat jelin geopolimerizasyonuna faydalıdır ve bu da erken yüksek basınç dayanımı sağlar (Khater, 2012). Isıl kür silika ve alümina esaslı hammaddelerin çözünmesinin hızlandırılmasına ve daha sonra polikondenzasyon işlemine yardımcı olur. Geopolimerizasyon, hammaddeye bağlı olarak belirli sıcaklık ve ısıl işlem periyodunu aştıktan sonra engellenebilir ve bu da geopolimerlerin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler (He vd. 2013; Nazari vd. 2011; Ahmari ve Zhang, 2012; Ken vd. 2015). Örneğin Chindapasirt vd. (2007) yaptıkları çalışmada geopolimer harç numunelerine yüksek sıcaklıklarda 3 günden daha uzun süreli uygulanan kür işleminin basınç dayanımını düşürdüğünü elde etmişlerdir. Bu durumun sebebini nem kaybından dolayı mikroyapının zayıflaması ve gözenekliliğin artması olarak açıklamışlardır (Singh vd. 2015). Cho vd. (2017) yüksek sıcaklıktaki uzun süreli kür işleminin dehidrasyona ve aşırı büzölmeye neden olması sebebiyle jel yapısının yarı kristal ağ oluşturmadan kasılmasına yol açarak jel yapısını bozduğunu ifade etmişlerdir.

Isıl kür işlemi buharlı kür veya kuru kür olarak uygulanabilir. Deneysel çalışmalar kuru kür yöntemiyle üretilmiş olan geopolimer betonların basınç dayanımının buharlı kür ile geopolimer betonun basınç dayanımından %15 daha fazla olduğunu göstermektedir (Hardjito ve Rangan, 2005; Rangan, 2010). Kovalchuk vd. (2007) kaplanmış kalıplarda kür işleminin, mukavemet gelişimi için kuru kür ve buhar

küründen daha faydalı olduğunu bildirmişlerdir. Kapalı kalıplar, sentez içinde silis ve alüminyum iyonlarının yer değiştirmesi için gerekli olan su ortamı sağlayarak geopolimerden su buharlaşmasını durdurur. Yaptıkları çalışmada, kapalı kalıplar içinde kür edilmiş numunelerden elde edilen basınç dayanımının, kuru kür ve buhar kürü uygulanmış numunelerden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Tennakoon, 2016). Hardjito (2005) yaptığı çalışmada su kaybını önlemek için numunelerin yüzeyini örtmüştür. Geopolimerizasyon reaksiyonlarının devamı için uygun ortam oluşturan yüzey kaplama işlemi bir çok araştırmacı tarafından uygulanmıştır (Tippayasam vd. 2016; Yadollahi vd. 2015; Pavithra vd. 2016).

2.8. Aktivatör Tipinin ve Konsantrasyonunun Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi

Aktivatör tipi ve konsantrasyonu geopolimerizasyon reaksiyonları için önemli parametrelerdir (Komljenovic vd. 2010). Kimyasal aktivatör veya alkali aktivatör çözeltisi, geopolimerizasyon işleminin başlatılmasında hayati bir rol oynar. Genellikle, alkali aktivatörün konsantrasyonu geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahipken, hammadde içinde bulunan alüminosilikat parçacıklarının yüzey hidrolizini arttırmak için güçlü bir alkali ortam gereklidir (de Vargas vd. 2011; Mingyu vd. 2009). Geopolimerin sentezi sırasında Si ve Al bağlarının çözünmesi, NaOH konsantrasyonuna bağlıdır (Panias vd. 2007). Kullanılan alkali aktivatörlerin tipine bakılmaksızın, basınç dayanımı genellikle aktivatör konsantrasyonundaki artışla birlikte artar. NaOH konsantrasyonundaki artışın sonucunda basınç dayanımında görülen artış daha fazla silis ve alümin bağlarının çözünmesi ile alakalıdır. Ancak hammadde tipine bağlı olarak belirli bir alkali aktivatör konsantrasyonundan sonra basınç dayanımı düşmeye başlar. Basınç dayanımındaki bu azalma esasen alüminosilikat jelinin çökmesine neden olan aşırı hidroksit iyonlarından kaynaklıdır. Bu sebeple daha düşük basınç dayanımına sahip geopolimerler elde edilmektedir (Somna vd. 2011; Ken vd. 2015).

Aktivatör konsantrasyonu geopolimerlerin basınç dayanımlarına önemli etki yapmaktadır. İdeal aktivatör konsantrasyonu geopolimerin dayanımında artışa yol

açmaktadır. Bu ideal konsantrasyonun ötesinde malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş matriste bulunan serbest OH⁻ iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da oluşabilmektedir. Geopolimerler numunelerin yaşı ve kür sıcaklığı da basınç dayanımında etkili olan diğer değişkenlerdir. Bununla birlikte bu değişkenlerin etkili olabilmesi için geopolimerizasyon sürecinde ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu bulunmalıdır (de Vargas vd. 2011; Girgin, 2016).

Phoo-ngernkham vd. (2015) yaptıkları çalışmada yüksek oranda silikat ve alüminat içeren atıkların alkali aktivasyonuna aktivatör tipinin etkisini araştırmışlardır. NaOH, Na₂SiO₃ ve NaOH+Na₂SiO₃ gibi üç tip çözelti kullanılmıştır. Uçucu kül ile aktive edilmiş bütün NaOH, Na₂SiO₃, ve NaOH+Na₂SiO₃ serilerinde düşük erken basınç dayanımı elde edilmiştir. NaOH çözeltisinin, Si⁴⁺ ve Al³⁺ iyonlarının hammaddeden çözünmesinde ve sonraki geopolimerizasyon reaksiyonlarında kritik bir rol oynadığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte, oda sıcaklığında NaOH veya Na₂SiO₃ ile aktive edilmiş olan uçucu kül esaslı hamur numunelerin mukavemet gelişiminin çok yavaş olduğu gözlenmiştir. NaOH+Na₂SiO₃ kullanımının ileri aşamalarda mukavemet gelişiminde belirgin bir iyileşme gösterdiği ifade edilmiştir (Phoo-ngernkham vd. 2015).

Palomo vd. (1999) aktivatör tipinin polimerizasyon reaksiyonlarında önemli rol aldığını ifade etmişlerdir. Xu ve van Deventer (2000) geopolimerizasyon reaksiyonlarında sodyum hidroksitin potasyum hidroksite göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Hardjito, 2005).

Silis modülü mevcut çözünür silikatların miktarını ifade etmektedir. Sertleşmiş geopolimer karışımlarının oluşumunda önemli bir etkiye sahip olan silis modülü, çözünme hızının kontrolünde ve geopolimerizasyon sırasında jel oluşumunda kritik önem taşır (Ken vd. 2015).

2.9. Hammaddenin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi

2.9.1. Hammaddenin inceliğinin geopolimerlerin özelliklerine etkisi

Tane çapının öğütme işlemi ile azaltılması, kimyasal yapıyı değiştirmeden hammaddenin reaktivitesini artırmak için ekonomik bir yöntemdir (Kumar ve Kumar, 2010; Paya vd. 1995). Paya vd. (1995) öğütmenin birim hacim ağırlığının artırılmasına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Stutzman ve Centeno (1995) hammaddenin tane çapının 10 µm'nin altına düştüğünde, camsı yapısını artırma ihtimalinin yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Kiattikomol vd. (2001) hammadde inceliğinin alkali ile aktifleştirilmiş karışımların işlenebilirliğini arttırdığını belirtmişlerdir (Tennakoon, 2016).

Hammaddenin tane çapı dağılımının oluşan geopolimer hamurun basınç dayanımı, fiziksel özellikleri ve mikroyapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir (He vd. 2013; Sata vd. 2012). Genellikle, daha ince tane çapı dağılımı olan bağlayıcı faz daha yüksek bir reaktiviteye sahiptir ve sonrasında daha yoğun mikroyapıya, yüksek basınç dayanımına ve daha iyi fiziksel özelliklere sahip olan geopolimer hamuru üretir (Nazari vd. 2011; Detphan ve Chindaprasirt, 2009). Geopolimer hammaddesinin inceliğinin artmasıyla basınç dayanımında gözlenen artış ince tane çapı ve öğütülmüş hammaddenin yüksek yüzey alanı ile elde edilen daha fazla geopolimerizasyon reaksiyonu sonucu oluşan daha güçlü bir geopolimer yapıya bağlanmıştır (He vd. 2013). Daha ince parçacıklar gözenekleri daha fazla doldurur ve nihai kırılma öncesinde uygulanan yükü taşıyabilen daha yoğun ve daha kompakt bir geopolimer hamur yapısı elde edilir (Nazari vd. 2011; Ken vd. 2015).

2.9.2. Hammaddenin kimyasal bileşiminin geopolimerlerin özelliklerine etkisi

Hammadde geopolimerizasyon reaksiyonlarında önemli bir rol oynamaktadır ve sertleşmiş ürünün mekanik özelliklerini etkilemektedir (Xu ve van Deventer, 2000; van Jaarsveld vd. 2002). Hammadde ağırlıklı olarak SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O

ve CaO içerir. Hammadde bünyesinde bulunan her oksit, geopolimer betonun basınç dayanımında belirgin bir etkiye sahiptir. Geopolimer numunesinin basınç dayanımı ağırlıklı olarak alümin-silikat oksit yüzdesi tarafından etkilenmektedir. Buna karşın CaO ve Fe₂O₃ gibi oksitler alümin-silikat oksitlere kıyasla mukavemet gelişiminde daha az etkiye sahiptir. Üstün basınç dayanımı elde etmek için gerekli olan önemli oksit yüzdesinin tipik aralığını belirlemek, geopolimer beton karışımlarının geliştirilmesinde faydalı olacaktır. Geopolimer üretiminde kullanılacak ve iyi basınç dayanımını verebilecek bir hammadde en az %45–%55 aralığında SiO₂, %22–%28 aralığında Al₂O₃ içermelidir. CaO ve Fe₂O₃, toplamının ise %15–%20 oranlarını geçmemesi gerekir. İki veya daha fazla hammadde kullanıldığında ise, hammaddenin karışım oranının belirlenmesinde oksitlerin bu tipik aralığı çok yararlı olacaktır (Reddy vd. 2016).

Silisyum geopolimerizasyon için hammadde içerisindeki ana bileşendir. Hajimohammadi vd. (2011a) alkali ile aktive olan bir sistemde çözünür silis iyonlarının bulunmasının, gelişmiş alüminyum bağlarıyla bir geopolimer ağ yapısına yol açtığını belirtmişlerdir. Ayrıca, reaksiyonun erken safhasındaki silis varlığının hammaddedeki reaksiyona girmemiş parçacıklardan alüminyum ve silis çekirdeklenmesine yardımcı olduğunu ifade etmişlerdir. Hammadde silis iyonlarını yavaş bir şekilde sentez içine yayarsa, antonik gibi yüksek silis esaslı kristal fazlar hammaddenin alkali aktivasyonu sırasında oluşabilir (Hajimohammadi vd. 2011a). XRD analizleri, silisin erken aşamada varlığının düzgün bir diziye sahip olan geopolimer üretmeye yardımcı olduğunu göstermektedir (Autef vd. 2012; Tennakoon, 2016).

Alüminat türleri, kimyasal sertleşmeyi sağlamak için geopolimerizasyon reaksiyonunda vazgeçilmez bir bileşendir (Duxson vd. 2007b; Rattanasak vd. 2010). Sentez esnasında yeterli alüminyum varlığı, silikat türleriyle hızlı yoğunlaşmaya yardımcı olur (Weng vd. 2005). Fernandez-Jimenez vd. (2006a) reaksiyonun ilk aşamalarında (hammaddenin alkali aktivasyonundan 2–8 saat sonra) alüminyumun silisten daha reaktif olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, hammadde içerisindeki neredeyse bütün reaktif alüminanın geopolimerizasyon tarafından tüketildiğini

gözlemlenmişlerdir. Reaksiyonun başlamasından 8 saat sonra reaktif amorf alüminyum miktarı az olan malzemeler, geopolimerizasyon için minimum alüminyum içeriğinin altına düştüğü için reaksiyon kinetiğinin azaldığı gözlenmiştir. Fernandez-Jimenez vd. (2006a) geopolimerizasyon reaksiyonlarının başlangıç aşamalarında üretilen alüminyum bağlarının kırılmasının daha kolay olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek alüminyum içeriğinde, Al-O-Si ürünlerin üretilmesi Si-O-Si ürünlerinden daha fazla olur. Sonuçta oluşan geopolimer ürünün mekanik dayanımı daha düşük olur. Bu sebeplerden dolayı hammadde içerisindeki SiO₂ ve Al₂O₃ içeriği arasında uygun bir dengenin bulunması gerekir (Tennakoon, 2016).

Kalsiyum, geopolimer bağlayıcıların prizini ve mekanik özelliklerini geliştirir. Kalsiyum içeriği yüksek hammaddenin alkali aktivasyonu, kalsiyum silikat hidratın ve kısmen alüminyum içerikli kalsiyum silikat hidrat jellerin karışımına neden olur (Khater, 2012). Yip (2004) alkali ile aktive olan bağlayıcılardaki olası ürünler için kavramsal bir haritalama ortaya çıkarmıştır. Yazar, düşük alkali varlığında CSH ve amorf geopolimer jelinin bir kombinasyonunun oluştuğunu, yüksek alkali ortamda (>7.5 M) ise NASH'nin oluştuğunu bildirmiştir (Tennakoon, 2016).

Si iyonlarının diğer iyonlarla yer değiştirmesi ve yük dengesi için birbirinden ayrılması bir geopolimerizasyon tepkimesinin önemli kısımlarıdır ve her iki mekanizma da düzensiz yapılara (amorf davranış) ihtiyaç duyar. Chen-Tan vd. (2009) alkali aktivasyondan sonra hammaddedeki amorf fazların davranışını incelemiş ve amorf fazların kristal fazlardan nispeten daha hızlı çözünmüş olduğunu bulmuşlardır. Bu sonuçlar Fernandez-Jimenez ve Palomo (2003) tarafından yapılan çalışma ile uyum göstermektedir. Álvarez-Ayuso vd. (2008) yüksek amorf içeriğin, daha istikrarlı ve güçlü geopolimer bağlayıcıya yol açtığını belirtmişlerdir (Tennakoon, 2016).

2.10. Karışım Oranının ve Karıştırma Yönteminin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi

Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar üzerine kapsamlı çalışmalar mevcuttur (Provis, 2014). Yapılan çalışmaların çoğu alkali aktive edilmiş bağlayıcıların reaksiyon mekanizmaları ve mikroyapıları üzerine odaklanmışken, göreceli olarak az sayıda çalışma betonların karışım dizaynları üzerine gerçekleştirilmiştir (Rafeet vd. 2017). Chindaprasirt vd. (2007) üretilen geopolimer bağlayıcıda yüksek mekanik özellikler elde etmek için $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 0.6–1.0 aralığında olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Provis vd. (2009) ç/b oranının 0.6–0.7 arasında olması ve aktivatörün $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının 1–1.5 aralığında olması durumunda ortaya çıkan geopolimer bağlayıcının daha iyi mekanik özellikler verdiğini belirtmişlerdir.

Yang vd. (2009) alkali aktive edilmiş harçların akışkanlığının ç/b oranının artması ile arttığını, agrega/bağlayıcı oranının artması ile azaldığını ifade etmişlerdir. Agregabağlayıcı oranının 2.5'ten fazla olması durumunda ise akışkanlığın ani olarak düştüğü belirtmişlerdir (Singh vd. 2015). Daha yüksek ç/b oranı genellikle taze geopolimer karışımının işlenebilirliğinin artmasına yol açar. Daha yüksek $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı, yüksek Na_2SiO_3 viskozitesi nedeniyle taze karışımların işlenebilirliğini genellikle düşürür. NaOH konsantrasyonundaki artış geopolimer karışımının priz süresinin artmasına neden olur (Ken vd. 2015). Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin %3'e kadar kullanılması basınç dayanımında düşüşe yol açmaz (Huseien vd. 2017).

Teixeira-Pinto vd. (2002) taze geopolimer harçların karıştırma esnasında sert ve kuru olduğunu ancak yüksek viskozite ve kohezyona sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Karıştırma süresindeki artışın taze geopolimer bağlayıcıların sıcaklığını arttırdığı ve bu sebeple işlenebilirliğin azaldığı gözlenmiştir. İşlenebilirliği arttırmak, viskoziteyi ve kohezyonu azaltmak için çeşitli katkıların kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir (Hardjito, 2005).

2.11. Nano Silis İlavesinin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi

Nano teknoloji, üstün özelliklere ve yüksek performansa sahip yeni malzemeler geliştirmek için ortaya çıkan alanlardan biridir. Geleneksel inşaat malzemelerinin özellikleri nanoteknoloji ile iyileştirilebilir. Çimento harcının mukavemetini, işlenebilirliğini ve dayanıklılığını arttırmak için nano parçacıkların kullanımı hakkında az sayıda araştırma yapılmıştır (Aly vd. 2011). Nano malzemeler, fiziksel ve kimyasal özellikleriyle olağanüstü bir dayanım sergilerler. Kullanılan başlıca nano malzemeler nano SiO₂, nano Al₂O₃, nano TiO₂, nano Fe₂O₃, nano ZnO₂, nano kil gibi küresel partiküllü malzemelerdir (Sanchez ve Sobolev, 2010). Serbest suyun bağlanması, çimento tanelerine nano parçacıklar eklendiğinde gerçekleşir. Bunun nedeni, çimento taneleri arasındaki boşlukların nano parçacıklar tarafından doldurulmasıdır. Bu durum nano partiküllerin dolgu etkisi olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, nano partiküller puzolanik reaksiyonlara katılır ve ek CSH jellerinin oluşumuna neden olur (Sumesh vd. 2017). Etkin bir geopolimer sentezini elde etmek için, geopolimerizasyon sırasında temel elementler arasında, yani SiO₂, Al₂O₃, Na₂O ve CaO arasında ideal bir dengeleme bulunması gerekmektedir. Bahsedilen elemanların ideal dengesini bulmanın yollarından biri, kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂), alüminyum hidroksit (Al(OH)₃), silis dumanı, nano SiO₂, nano Al₂O₃ vb. ticari olarak ulaşılabilecek katkıların ilave edilmesidir (Mijarsh vd. 2014; Phoo-ngernkham vd. 2014; Rashad, 2014; Rattanasak vd. 2010; Ken vd. 2015).

Az miktarda nano SiO₂ ve nano Al₂O₃ gibi nano boyutlu katkı maddelerinin eklenmesinin ek puzolanik ve dolgu maddesi etkisi yaparak betonun basınç ve çekme gerilmesini etkili bir şekilde arttırdığı bilinmektedir (Li, 2004; Ken vd. 2015; Deb vd. 2015). Nano parçacıkların eklenmesi ile agrega ile çimento hamuru arasındaki bağ ve ara yüzey geçiş bölgesi güçlenir. Sonunda, karışımın bağlanma mukavemeti özelliklerini geliştirir. Çimento esaslı malzemelerin sertlik, kesme, çekme ve eğilme mukavemeti nano parçacıklar ile iyileştirilebilir. Ayrıca kayma düzlemleri arasında çatlak durdurma ve kenetlenme etkileri de sağlar (Nazari ve Riahi, 2011). Ultra ince parçacıkların çimento hamuruna ve harcına eklenmesi, konvansiyonel malzemelerden farklı özelliklere neden olur. Nano boyutlu katı CSH partikülleri veya çimento ve agrega taneleri arasındaki katı partiküller ara yüzey bölgelerindeki nano

boyutlu boşluklar çimento esaslı malzemelerin performansını etkiler. Dayanım, işlenebilirlik, stabilite, büzülme ve bağlanma mukavemeti özellikleri nano boyutlu parçacıklardan oldukça etkilenir. Nano malzemeler, CSH jelindeki partiküller arasındaki boşlukları doldurarak dolgu maddesi olarak görev yapar ve yüksek yüzey alanı sayesinde bir puzolan görevi görür. Dolgu etkisi ve puzolanik reaksiyon, kimyasal reaktiviteyi önemli ölçüde geliştiren potansiyel özelliklerdir. Böylece, yoğun bir çimento mikroyapısının oluşturulması ile malzemenin gözenek yapısı gelişir (Behfarnia ve Salemi, 2013). Nano parçacıkların yüksek yüzey alanı hidrasyon için çok önemlidir. Nano malzeme erken hidrasyonu destekler, aynı zamanda hidrasyon ürünlerinin gelişimini hızlandırır (Ma vd. 2016a). Ek CSH jel oluşumu, matristeki mikro gözenekleri doldurur. Böylece, daha yüksek mukavemete yol açan daha etkili hidrasyon sağlar (Shaikh vd. 2014; Sumesh vd. 2017). Nano partiküllerin eklenmesi sonucu CSH, CASH ve NASH gibi reaksiyon ürünlerinin artması nedeniyle geopolimer matrisindeki ara yüzey geçiş bölgesinde kayda değer bir iyileşme sağlanmaktadır (Phoo-ngernkham vd. 2014; Ken vd. 2015).

Nano silis, yüksek yüzey alanı nedeniyle erken yaştan itibaren reaksiyon sürecine dahil olur. Alüminosilikat hammaddenin daha fazla reaksiyon yapması sonucu daha yüksek mukavemet kazandırması beklenir (Fernandez-Jimenez vd. 2008). Bununla birlikte, mukavemet artışı sağlayan nano silis yüzdesinin sınır değeri vardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda optimum nano silis içeriği %2 olarak bulunmuştur. Belkowitz vd. (2015) reaksiyona girmemiş nano silisin matriste kuruma ve çatlamaya yol açtığını ve sonuç olarak mukavemeti azalttığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle, %3 nano silis ilavesinin, %2 nano silis ilavesine kıyasla daha az mukavemet gelişimine yol açması, kusurlu bölgeler olarak işlev gören reaksiyona girmemiş parçacıkların varlığı ile ilişkilendirilir (Deb vd. 2016).

2.12. Mikro Silis İlavesinin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi

Silis dumanı ilavesi geopolimerizasyon sürecini hızlandırır ve gözenekliliği düşürür. Bunun sonucunda basınç dayanımında artış meydana gelir. Ayrıca silis dumanı ilavesi boşlukları doldurur ve kompakt yapıyı geliştirir (Okoye vd. 2016). Saxena vd.

(2017) yaptıkları çalışmada silis dumanı içeren geopolimer harç numunelerin yangın öncesi ve sonrası basınç dayanımlarında önemli artış gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Okoye vd. (2017) geopolimer betonların durabilite özelliklerine mikro silis ilavesinin etkisini inceledikleri çalışmada, mikro silis ilavesinin sülfürik asit ve sodyum klorür saldırılarına karşı dayanıklılığı arttırdığını ifade etmişlerdir.

2.13. Polimer Lateks İlavesinin Geopolimerlerin Özelliklerine Etkisi

Polimer lateksler suda dağılmış çok küçük boyutlu (0.05-0.5 µm) polimer küreciklerden oluşurlar ve monomer emülsiyonunun polimerleşmesi ile hazırlanırlar. Lateksler yaklaşık %50 oranında katı içeriğine sahip olup surfaktan denilen ve emülsiyon stabilizasyonunu sağlayan madde içermektedirler. Polimerle iyileştirilmiş betonlar, mümkün olan en düşük su miktarı ile üretilebilirler ve küresel polimer parçacıkları ve sürüklenen hava sayesinde mükemmel akışkanlığa sahip olurlar (Chen ve Liu, 2007). Çözünebilen organik polimerlerin ilavesi geopolimer matrisinin mikroyapısını ve gözenek büyüklüğü dağılımını değiştirmesi nedeniyle geopolimerlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir (Ken vd. 2015).

Zhang vd. (2010) polimer reçinenin eklenmesinin metakaolin/öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer numunelerin eğilme dayanımını geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Yüksek dozda polimer reçinesi katılmasının, metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu ince parçacıkları üzerinde kaplama etkisine yol açması ve bağlayıcının reaktivitesinde belirgin bir düşüşe sebep olması sebebiyle eğilme dayanımında azalmaya yol açtığı gözlenmiştir (Ken vd. 2015).

2.14. Geopolimerlerde Basınç Dayanımı

Betonun en önemli özelliklerinden biri basınç dayanımıdır. Geopolimer bağlayıcı numunelerin basınç dayanımındaki iyileşme, artan reaksiyon ürünleri miktarıyla açıklanabilir. Sıcaklık geopolimer bağlayıcılarda reaksiyon hızlandırıcı etki yapmaktadır. Yüksek kür sıcaklığı geopolimer hammaddesinin çözünmesini ve

polikondenzasyonunu arttırır. Bu durum geopolimerlerin mukavemet gelişimine katkıda bulunur (Bakharev, 2005b; Cho vd. 2017). Geopolimer hammaddesinin öğütülmesi sonucu elde edilen ince tane çapı ve yüksek yüzey alanı geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak daha güçlü bir geopolimer yapı oluşmasına imkân sağlar (He vd. 2013; Ken vd. 2015).

Kullanılan alkali aktivatörlerin tipine bakılmaksızın, aktivatör konsantrasyonundaki artış, daha fazla silis ve alümin bağlarının çözünmesine neden olduğu için genellikle basınç dayanımını artırır. Ancak belirli bir değerden sonra, basınç dayanımında düşüş gözlenir. Bu durum esasen alüminosilikat jelinin çökmesine neden olan aşırı hidroksit iyonlarından kaynaklıdır (Somna vd. 2011; Ken vd. 2015).

2.15. Geopolimerlerde Hidratasyon Isısı

Hidratasyon sırasında ısı açığa çıkar. Hidratasyon ısısı olarak adlandırılan bu ısının büyük bir bölümü ilk günlerde meydana gelir. Hidratasyon hızını ve hidratasyon ısısının açığa çıkma hızını etkileyen önemli faktörler; hammaddenin kimyasal bileşimi, hammaddenin inceliği ve hidratasyonun yer aldığı sıcaklık koşullarıdır. Geopolimer bağlayıcılı numunelerin Portland çimentolu numunelere göre oldukça düşük hidratasyon ısı çıkardığı birçok araştırmada ifade edilmiştir (Karakoç vd. 2014; Angulo-Ramírez vd. 2017). Guo vd. (2010) yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu kül ile alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH kullanarak geopolimer numuneler üretmişlerdir. Uçucu kül esaslı geopolimerlerin, Portland çimentolu numunelere göre daha az hidratasyon ısısı açığa çıkardığını tespit etmişlerdir. Nath ve Kumar (2013) yaptıkları çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş Corex (Uluslararası çelik üretim firması Voestalpine'nin patentli ürünü) cürufunu uçucu kül esaslı geopolimerlere %0–%50 aralığında değişen oranlarda eklemiştir. Cüruf eklemenin geopolimerizasyon reaksiyonlarına etkisi izotermal kalorimetre ile incelenmiştir. Her iki cüruf için hidratasyon ısısı grafiklerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Her iki durumda da iki adet keskin tepe noktası elde edilmiştir. Cüruf miktarı arttıkça toplam açığa çıkan hidratasyon ısısında artış gözlenmiştir.

2.16. Geopolimerlerde Priz Süresi

Priz süresi taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma için gerekli zamandır. Geopolimerlerin priz süresi, işlenebilirliği ile ilişkilidir. Geopolimerlerin prizi, NASH jelinin oluşumu ile bağlantılıdır (de Silva vd. 2007; Stevenson ve Sagoe-Crentsil, 2005; Siyal vd. 2016). Daha sonraki aşamalarda bu jel oluşumu mukavemet gelişimine katkıda bulunur. Geopolimerlerin priz süresi, alkali çözeltisinin kompozisyonu, alkali çözeltisi ile uçucu kül oranı, silis modülü ve Na₂O içeriği gibi faktörlere bağlıdır (Al Bakri vd. 2011; Karakoç vd. 2014; Siyal vd. 2016). Perna ve Hanzlicek (2016) cüruf ve kil karışımlarını kullanarak ürettiği geopolimer hamur numunelerin priz sürelerini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, yüksek fırın cürufu ilavesinin geopolimer hamurların priz süresini kısalttığını ortaya çıkarmışlardır. Hanjitsuwan vd. (2014) NaOH konsantrasyonlarının geopolimerlerin prizi üzerindeki etkisini incelemiştir. 8-18 M aralığında, artan NaOH konsantrasyonunun geopolimer hamurların priz başlangıç ve bitiş sürelerini arttırdığını gözlemlemiştir.

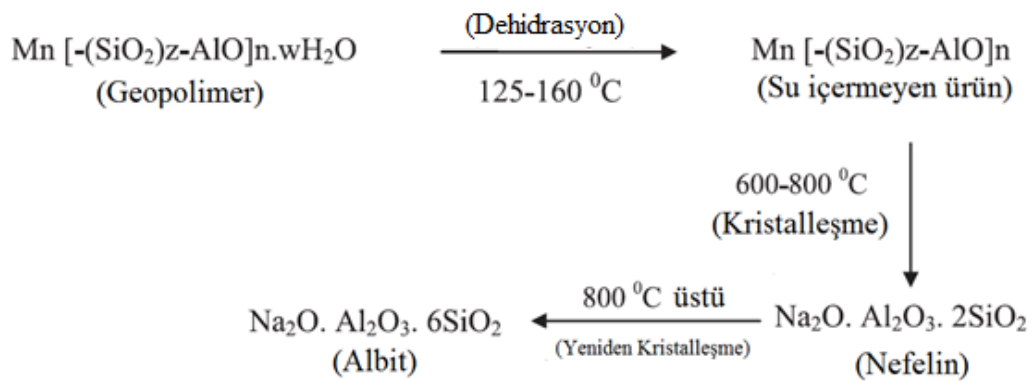
Cheng ve Chiu (2003) metakaolin ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer hamur numunelerin priz sürelerinin ölçümünü hem laboratuvar koşullarında hem de yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda ölçümler fırın içerisinde yapılmıştır. Priz başlangıç süresinin 60°C'de kür edilen numunelerde 15–45 dakikaya kadar düştüğünü ifade etmişlerdir (Hardjito, 2005). Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen priz süresi ölçümlerinde, kimyasal reaksiyonların laboratuvar ortamında yavaş ilerlemesinden dolayı priz sürelerinin oldukça uzun olduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir (Fernandez-Jimenez vd. 2006b; Davidovits, 2008a; Nath, 2014).

2.17. Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Direnci

CSH jeli ve diğer kristal hidratların dehidrasyonu ve tahrip olması, agrega türleri, geçirgenlik gibi sebeplerden dolayı normal Portland çimentolu betonların 800-1000°C sıcaklık sonrası kalan basınç dayanımı %20-%30 civarındadır. Yangın esnasında, yüksek sıcaklığa erişmiş olan tabakalar, daha serin olan iç tabakadan ayrılma ve parçalanma eğilimindedir (Neville, 1997). Buna karşın, geopolimerler

fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun alüminosilikat yapıya zarar vermeden yer değiştirmesini ve buharlaşmasını sağlayan, seramik benzeri mikroyapıda dağılmış olan nano gözeneklerin varlığı nedeniyle yüksek yangın dayanıklılığına sahiptirler (Duxson vd. 2007b; Singh vd. 2015). Alüminosilikat esaslı betonlarda bulunan alkali aktive edilmiş alüminosilikat jelleri Portland çimentolu betondan farklılık gösterir. Bu tür bağlayıcıların kullanılması, silis ve alüminyum bakımından zengin fazlar (örn. killeri ve camlar) ile reaksiyona giren sodyum veya potasyum bazlı alkali hammaddeye ihtiyaç duyar. Sonuçta, Portland çimentosu hidratasyonu ile üretilen CSH jellerine kıyasla büyük miktarlarda kimyasal veya fiziksel su içermeyen bir jel meydana gelir. Alüminosilikat bileşimlerini ayıran bu açık gözenek yapısı, hammaddenin tane boyutlarını gösterir (Hajimohammadi vd. 2011b). Açık gözenek yapısı, az miktarda mukavemet kaybıyla 600–800°C aralığındaki sıcaklıklara dayanabilen yeni bir inorganik kompozit malzeme oluşturur (Rivera vd. 2016).

Yüksek sıcaklık esnasında, NASH jel tarafından emilen suyun buharlaşması, su içermeyen ürünlerin oluşumu, kararlı su içermeyen fazların kristalleşmesi ve tahrip olmaya götüren eritme (sinterleme) gibi çeşitli olaylar meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklık esnasında geopolimerlerin faz dönüşümü Şekil 2.7'de gösterilmiştir (Singh vd. 2015).



Şekil 2.7. Yüksek sıcaklık esnasında geopolimerlerin faz dönüşümü (Singh vd. 2015)

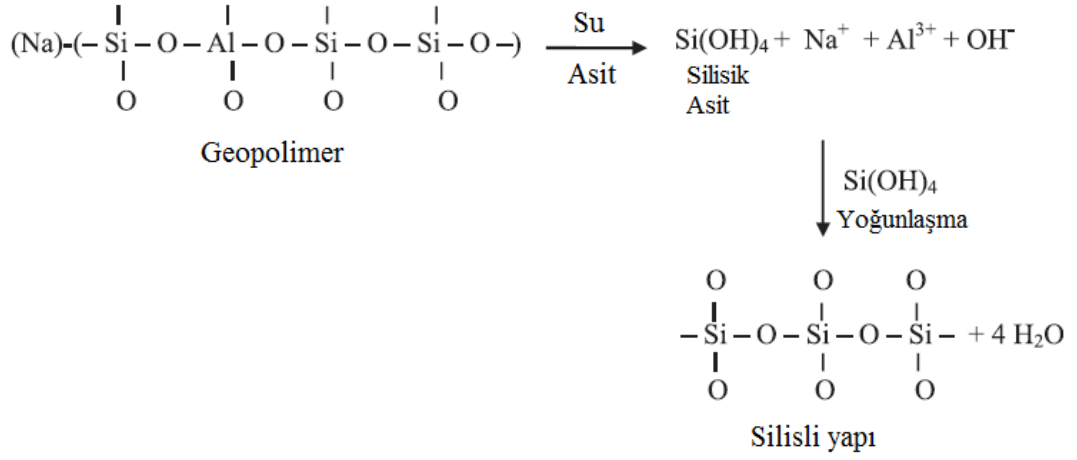
Geopolimerler hidrat fazı ve özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içermez. Portland çimentosu, yüksek sıcaklığa ($>400^\circ\text{C}$) maruz bırakıldığında, yapısal su iç gerilmelere neden olur. Ayrıca

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ CaO 'ya dönüşür. CaO soğutulduğunda, hacim değişimi ile tekrar hidrate olur, bu da matrisler üzerinde olumsuz etkilere neden olur. Buna karşın, geopolimerler, yüksek sıcaklıkta çok dengeli olan kararlı susuz alüminosilikat malzemeler halinde tekrar kristalleşirler (Saxena vd. 2017). Geopolimer betonların normal Portland çimentolu betonlara kıyasla daha iyi yüksek sıcaklık dayanımına sahip olduğu birçok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır (McNulty, 2009; Rashad ve Zeedan, 2011). Zhao ve Sanjayan (2011) tarafından yapılan çalışmada, 40–100 MPa basınç dayanımına sahip uçucu kül esaslı geopolimer betonlar, 850°C'ye maruz bırakıldığında parçalanma gözlenmemiştir. Aynı basınç dayanımı değerine sahip beton numunelerinde, gözenekliliğin artması nedeniyle geopolimer betonların, normal Portland çimentolu betonlardan daha iyi yüksek sıcaklık direncine sahip olduğu ifade edilmiştir. Sarker ve Meillon (2007) ürettikleri uçucu kül esaslı geopolimer betonları 800°C sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra kalan basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda geopolimer betonların Portland çimentolu numunelere kıyasla daha yüksek sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

2.18. Geopolimerlerde Asit Etkisi

Asit direnci agresif ortamlara maruz kalan yapılar için çok önemli bir özelliktir. Normal Portland çimentolu betonlar asit ortamlarına maruz bırakıldığında, saldıran asitin kalsiyum tuzları oluşur ve beton dayanım kaybederek hızlı bir şekilde bozulur. Geopolimer bağlayıcıların bozulması ise Si-O-Al bağlarının kırılması, bununla beraber Si-OH ve Al-OH bağlarının sayısının artması ve geopolimer matrisindeki silisik asit miktarının artması ile meydana gelmektedir (Bakharev, 2005c). Bu işlem, ağırlık kaybına neden olan geopolimer jelinin dealüminyumünasyonuna (bir malzemedeki alüminatların kimyasal olarak uzaklaşması) ve Si/Al oranının yükselmesine yol açar. Basınç dayanımındaki düşüş esas olarak, alüminosilikat yapının asit etkisi sonrası kırılması sonucu geopolimer yapıda görülen çatlak oluşumu ile ilgilidir (Djobo vd. 2016). Geopolimer bağlayıcıların asit etkisinde bozulma aşamaları Şekil 2.8'de gösterilmiştir (Bakharev, 2005c; Singh vd. 2015). Asit etkisi sonrası geopolimer numunelerin bozulma derecesi asit çözeltisinin konsantrasyonuna ve maruz bırakılma süresine bağlıdır (Singh vd. 2015). Al, Si ve Fe iyonları güçlü asit çözeltilerinde çözüldüğü için uçucu kül esaslı geopolimerlerin

asit direncinin mineralojik bileşimine kuvvetle bağlı olduğu ifade edilmiştir (Temuujin vd. 2011; Singh vd. 2015).



Şekil 2.8. Geopolimer bağlayıcıların asit etkisinde bozulma aşamaları (Singh vd. 2015)

Geopolimer betonların normal Portland çimentolu betonlara kıyasla daha iyi asit direncine sahip olduğu birçok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır. Temuujin vd. (2011) uçucu kül esaslı geopolimer numunelerini %5 asetik asit ve %5 H₂SO₄ çözeltilerine maruz bıraktığında, normal Portland çimentolu numunelerden daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Sata vd. (2012) ve Bakharev (2005c) tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular geopolimer betonların uzun süren asit ortamlarına maruz bırakılmaları sonucu minimum basınç dayanımı kaybı gösterdiğini ve normal Portland çimentolu betonlara göre üstün özelliklere sahip olduğunu doğrulamıştır. Fernandez-Jimenez vd. (2007) HCl asit ortamlarına daldırılmış geopolimer ve normal Portland çimentolu numunelerin davranışını incelemiştir. Deney sonucunda, normal Portland çimentolu geopolimer numuneler 56. günün sonunda tahrip olurken, geopolimer numunelerin 90. günün sonunda bile bozulmadığı gözlenmiştir. Djobo vd. (2016) volkanik kül esaslı geopolimer harçların asit direncinin araştırılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

2.19. Geopolimerlerde Fiziksel Özellikler

Geopolimer numunelerin su emme ve gözeneklilik gibi fiziksel özellikleri, geopolimer matrisinde açık ve kapalı gözeneklerin bulunması ile ilgilidir. Bu

boşlukların varlığı, genellikle, geopolimerizasyon reaksiyonunda yer almayan serbest sudan kaynaklanmaktadır. Geopolimer numunelerin yoğunluk değerlerinin düşük olması, geopolimerizasyon sırasında tepkimeye girmeyen ekstra suyun kaybı ile alakalı olabilir. Yoğunluğun genel olarak gözeneklilik arttıkça azaldığı bilinmektedir (Djobo vd. 2016). Su emme, geopolimer numunelerin geçirgenliği ve reaksiyon derecesini gösterdiği için çok önemli bir parametredir. Genellikle yüksek derecede geopolimerizasyon, daha az gözenekli ve daha az geçirgen bir geopolimer matris oluşmasına imkan sağlar (Ken vd. 2015).

2.20. Geopolimerlerde Mikroyapı

Malzemelerin özellikleri büyük ölçüde mikroyapıya bağlıdır. Uygulanan bir dış etki sonucunda malzeme özelliklerinde meydana gelen değişiklikler mikroyapı gözlemlenerek yorumlanabilir. SEM, XRD, XRF, FTIR ve TGA gibi analiz yöntemleri kullanılan hammaddenin ve oluşan bağlayıcı malzemenin mikroyapılarının yorumlanmasında kullanılmaktadır. Geopolimer bağlayıcılar göreceli olarak yeni bir konu olması sebebiyle mikroyapıları üzerinde detaylı incelemeler ve analizler gerekmektedir.

Geopolimer betonların matris yapısı normal çimentolu betonlarınkinden farklıdır. Özel amorf yapısı ve matris oluşumundan dolayı, geopolimer betonlar yüksek basınç dayanımı, iyi aşınma direnci, hızlı ve kontrol edilebilir sertleşme, yüksek sıcaklık direnci, asit ve tuz direnci, düşük büzülme değerleri ve düşük ısıl iletkenlik katsayıları sergilerler (Komljenovic vd. 2010; Lee ve van Deventer, 2002; Miranda vd. 2005; van Jaarsveld vd. 2002; Xu ve van Deventer, 2000). Geopolimer betonların mikroyapı incelemeleri göstermiştir ki dolu morfolojik yapı ve kimyasal element birleşimleri geleneksel betondan farklıdır. Ara yüz geçiş bölgelerinin beton performansında önemli rol aldığı ifade edilmiştir (Komljenovic vd. 2010; Hewayde vd. 2006; Bakharev, 2005b; Palomo vd. 1999; Shi vd. 2012; Haddad ve Alshbuol, 2016).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde çalışmanın amacı doğrultusunda kullanılan volkanik tüf, alkali aktivatörler, nano silis, mikro silis, SB lateks ve agrega gibi malzemeler ile çalışmalarda kullanılan deney düzenekleri, ölçüm cihazları ve deney aletleri hakkında bilgi verilmiştir. Geopolimer hamur, harç ve beton numunelerin deney parametreleri, karışım hesapları, üretim yöntemleri ve kür koşulları detaylıca açıklanmıştır. Laboratuvar çalışmalarında üretilen geopolimer numuneler üzerinde yapılan deneyler açıklanmıştır.

3.1. Materyal

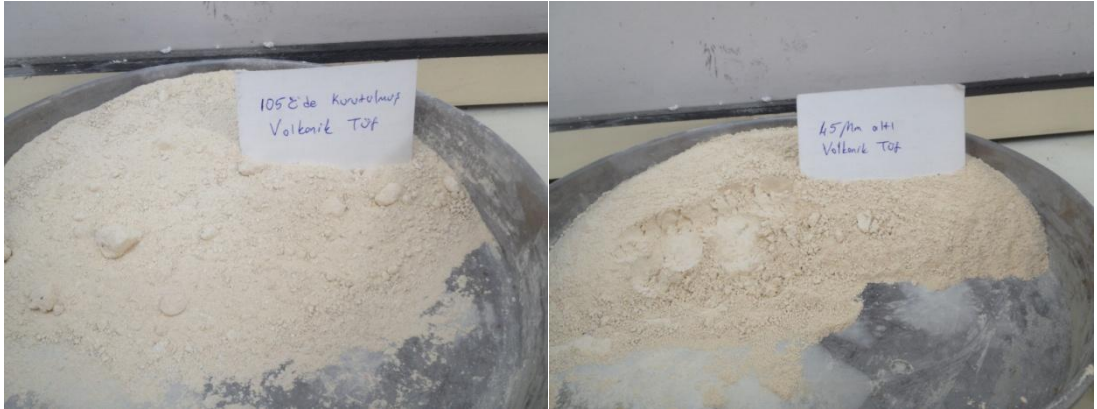
3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

3.1.1.1. Volkanik tüf

Deneysel çalışma boyunca geopolimer hammaddesi olarak kullanılan volkanik tüf Nevşehir ili sınırları içerisinde bulunan Avanos yöresinden temin edilmiştir. Böltaş Madencilik tarafından işletilen çalışma alanında doğal taşlar kesilip çıkarılmaktadır (Şekil 3.1). Laboratuvar çalışmalarında kullanmak amacıyla özgül ağırlığı 2.44 g/cm^3 olan volkanik tüften 500 kg temin edilmiştir. Dere kumu inceliğinde olan volkanik tüf ilk olarak değişmez ağırlığa kadar etüvde 105°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Tane çapının öğütme işlemi ile küçültülmesi, kimyasal yapıyı değiştirmeden hammaddenin reaktivitesini artırmak için sıkça kullanılan ekonomik bir yöntemdir. Bu amaçla kurutulan volkanik tüf bilyeli değirmende öğütülüp $45 \mu\text{m}$ çaplı elekten elenmiştir (Şekil 3.2). Volkanik tüfün oksit oranları XRF analizi ile mineralojik yapısı ise XRD analizi ile tayin edilmiştir. XRF ve XRD analizleri sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



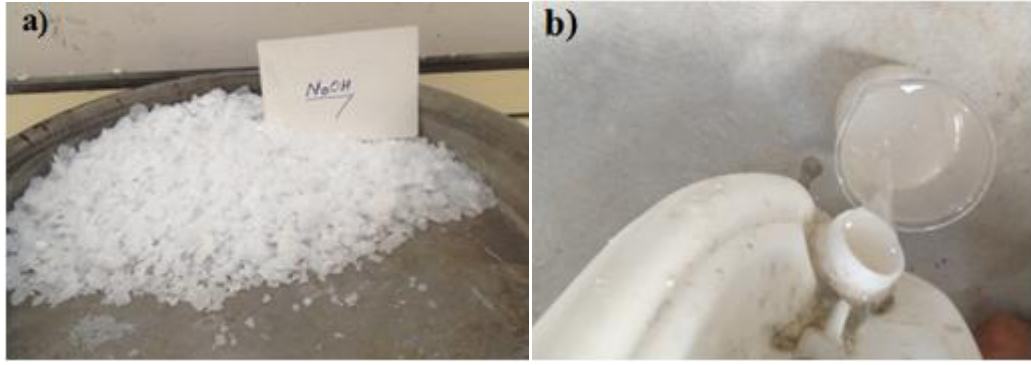
Şekil 3.1. Volkanik tuf rezervleri ve kesilen doğal taşlar



Şekil 3.2. Fırında kurutulmuş ve sonrasında öğütülmüş volkanik tuf

3.1.1.2. Alkali aktivatörler (NaOH - Na₂SiO₃)

Geopolimer bağlayıcıların mekanik ve durabilite özelliklerine alkali aktivatör tipinin ve konsantrasyonun önemli etkisi olduğu literatürden bilinmektedir. Geopolimer üretiminde NaOH ve Na₂SiO₃ en yaygın kullanılan alkali aktivatörler olduğu için bu tez çalışmasında tercih edilmiştir (Şekil 3.3). Öğütülmüş volkanik tuf yalnız NaOH çözeltisi ve NaOH+Na₂SiO₃ karışımı ile alkali aktive edilerek geopolimer hamur, harç ve beton numuneler üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan alkali aktivatörlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Kullanılan alkali aktivatörler, a) NaOH, b) Na₂SiO₃

Çizelge 3.1. Alkali aktivatörlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel ve kimyasal özellikler	Sodyum hidroksit	Sodyum silikat
Molekül formülü	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Molekül kütlesi (g/mol)	40.00	122.06
Renk	Beyaz	Jel (Renksiz)
pH	13–14	-
Yoğunluk (gr/cm ³)	2.13	1.39
Na ₂ O içeriği (%)	-	8.9
SiO ₂ içeriği (%)	-	28.7
H ₂ O içeriği (%)	-	64.8

3.1.1.3. Nano silis

Az miktarda nano silis ilavesinin ek puzolanik ve dolgu maddesi etkisi yaparak betonun mekanik ve durabilite özelliklerini etkili bir şekilde iyileştirdiği bilinmektedir. Bu sebeple deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen optimum özelliklere sahip geopolimer betona kuru bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında nano silis ilave edilmiştir. Temin edilen nano silis Şekil 3.4'de gösterilmiş olup, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Nano silis

Çizelge 3.2. Nano silisin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Değerler
SiO ₂	%92
SO ₃	%0.80
Cl	%0.10
Serbest CaO	%0.70
Serbest Si	%0.25
Kızdırma kaybı	%2.42
Ortalama tane çapı	100 nm
Hacimsel yoğunluk	600 kg/m ³
28. gündeki puzolanik aktivite indeksi	%100
Renk	Gri
Erime Noktası	1560°C

3.1.1.4. Mikro silis

Daha kompakt ve dolu bir mikroyapı elde edebilmek amacıyla geopolimer betonlara mikro silis ilave edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen optimum geopolimer betona kuru bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında mikro silis ilave edilmiştir. Temin edilen mikro silis Şekil 3.5'de gösterilmiş olup, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Mikro silis

Çizelge 3.3. Mikro silisin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Değerler
SiO ₂ oranı	%90.82
H ₂ O (Nem)	%0.60
Kızdırma kaybı	%2.05
45 µm üzeri tane yüzdesi	%1.20
Gevşek yığın yoğunluğu	309.50 kg/m ³
Ortalama tane çapı	15 µm

3.1.1.5. Polimer lateks

Geopolimer betonların işlenebilirliğini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla SB lateks katkısı kuru bağlayıcı ağırlığının %5'i oranında ilave edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan SB lateks Şekil 3.6'da gösterilmiş olup, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.6. SB lateks

Çizelge 3.4. SB lateksin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Renk	Beyaz
Kimyasal yapı	Stiren bütadien emülsiyon
Yoğunluk	1.015±0.01 kg/l (+20°C'de)
pH değeri	8-12
Donma noktası	-5°C

3.1.1.6. Agrega

Tez çalışması boyunca kullanılan agrega, dere agregası olup yıkanmış halde temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı yapılan deneme dökümleri sonucunda 8 mm olarak seçilmiştir. 2, 4 ve 8 mm çaplı eleklerden elenen agrega örnekleri Şekil 3.7'de görülmektedir. Gerekli miktarda agrega 0-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm tane sınıflarına ayrılarak stoklanmıştır.



Şekil 3.7. Elenmiş dere agregası örnekleri

3.1.1.7. Karışım suyu

Deneysel çalışmalarda kullanılacak suyun temiz olması ve üretilen numunelerin özelliklerine olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. Farklı konsantrasyonlardaki NaOH çözeltilerinin hazırlanmasında TS EN 1008 (2003) standardına uygun Malatya ili şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan makine-teçhizatlar

3.1.2.1. Elekler

Deneysel çalışmalarda TS EN 933-2 (1996) standardına uygun kare delikli elekler kullanılmıştır.

3.1.2.2. Kalıplar

Geopolimer hamur, harç ve beton üretiminde çelikten imal edilmiş 50x50x50 mm boyutlarındaki kalıplar kullanılmıştır.

3.1.2.3. Harç karıştırıcı

Geopolimer hamur ve harç karışımlarının TS EN 196-1 (2016) standardına uygun olarak homojen şekilde karıştırılması için 10 dm³ kapasiteli 280 dev/dk karıştırma hızına sahip harç karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Harç karıştırıcı

3.1.2.4. Mikser

Geopolimer beton üretiminde 60 dm^3 kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Geopolimer beton karışımlarının hazırlandığı mikser

3.1.2.5. Vikat aleti

Priz süreleri ve normal kıvam tayini Vikat aleti ile yapılmıştır. Vikat aleti düz bir tablanın eksenine gelecek şekilde ayarlanmış silindir mili tutan deveboynundan ibarettir. Deveboynuna bağlı sabit bir taksimatlı gösterge mevcuttur. Ayrıca deveboynundaki yatağı vida ile sıkıştırılabilen silindir mili vardır. Mili istenilen noktada göstergeye sıfırlayabilen aparat mile vida ile sıkıştırılmıştır. Milin alt ucuna vikat sondası ve iğnesi monte edilir. Deneyde milin etken ağırlığı 300 gramdır. Tez çalışmasında kullanılan Vikat aleti Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Vikat aleti

3.1.2.6. ToniCAL izotermal kalorimetre

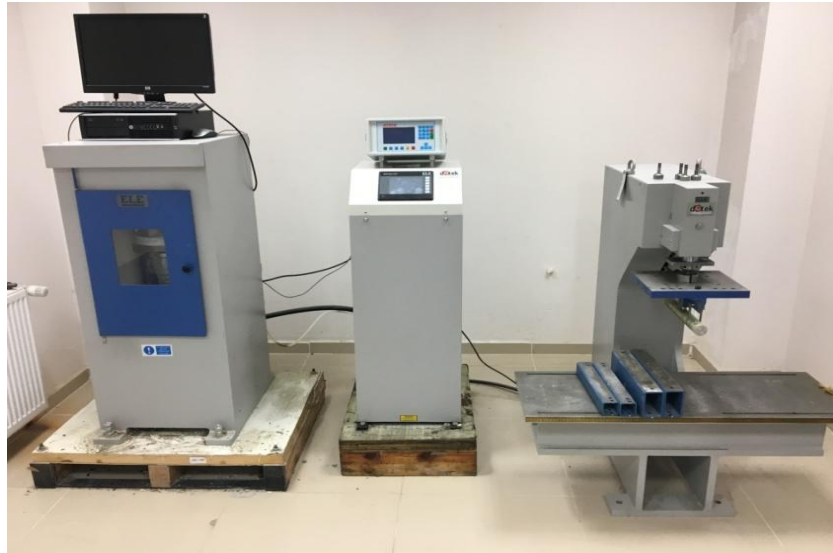
Hidratasyon ısısının belirlenmesinde, ısının kesintisiz saptanması nedeni ile ToniCAL izotermal kalorimetre oldukça avantajlıdır. Ayrıca ToniCAL kalorimetresi ile yapılan ölçümlerde zamandan tasarruf sağlanmaktadır. ToniCAL izotermal kalorimetre Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. ToniCAL izotermal kalorimetre

3.1.2.7. Pres cihazı

Geopolimer hamur, harç ve beton numunelerin basınç dayanımının tayininde, ELE marka AUTOTEST 3000 tipinde 300 ton kapasiteli yükleme hızını otomatik olarak ayarlayabilen hidrolik pres cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. ELE marka pres cihazı

3.1.2.8. Ultrasonik hız ölçüm cihazı

Ultrasonik hız ölçüm cihazı, ultrasonik dalgalar göndererek bu dalgaların belirli boyuttaki numunenin bir yüzeyinden diğer bir yüzeyine ulaşmasına kadar geçen süreyi elektronik olarak ölçmektedir. Algılayıcılar arasındaki uzaklık geçiş süresine bölüldüğünde dalga'nın ortalama hızı elde edilmektedir. Ölçülen ultrasonik hız, betonun mukavemeti, homojenliği, elastisite modülü, döküm özellikleri ve çatlakların varlığının belirlenmesi gibi betonun birçok özelliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tez çalışmasında ultrasonik hız ölçümleri, Proceq marka dijital cihaz ile yapılmıştır. Deneyleerde kullanılan ultrasonik hız ölçüm cihazı Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Dijital ultrasonik hız ölçme cihazı

3.1.2.9. Etüv

Isıl kürün geopolimerizasyon reaksiyonları üzerinde olumlu etkisi olduğu bilindiği için laboratuvar çalışmalarında üretilen geopolimer hamur, harç ve beton numuneleri 60°C ile 150°C arasında değişen sıcaklıklarda ısıl küre tabii tutulmuştur. Isıl kür için kullanılan etüv Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



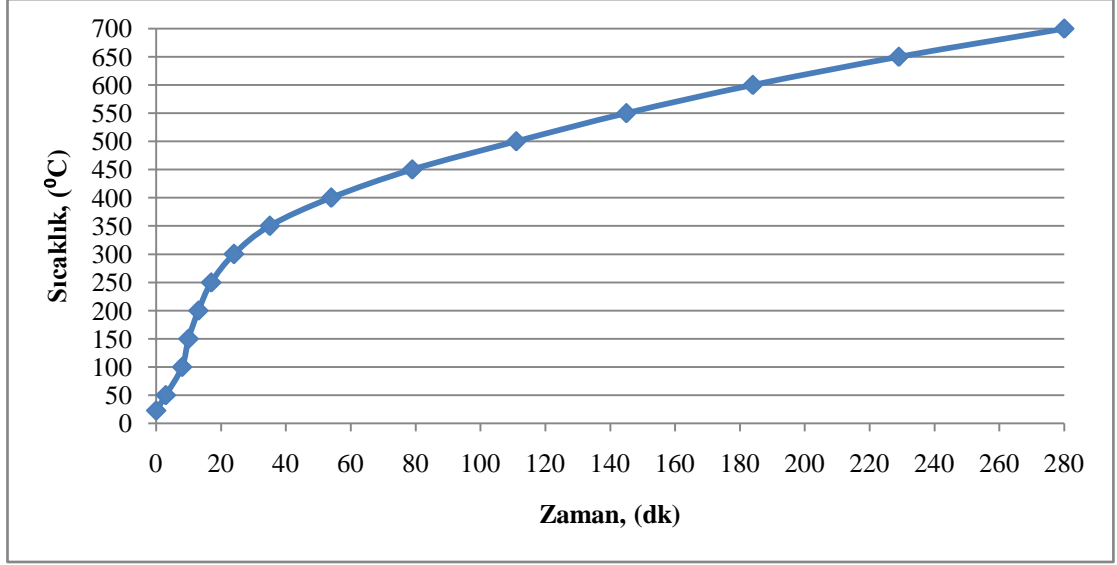
Şekil 3.14. Geopolimer numunelerin kür edildiği etüv

3.1.2.10. Yüksek sıcaklık fırını

Geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık direncinin tayini için Şekil 3.15’de görülen fırın kullanılmıştır. Fırın kapasite olarak 1000°C sıcaklığa kadar çıkabilmektedir. Yüksek sıcaklık fırınının ısınma eğrisi Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 3.16. Yüksek sıcaklık fırınının ısınma eğrisi

3.1.2.11. Bilyeli değirmen

Tane çapının öğütme işlemi ile küçültülmesi, hammaddenin reaktivitesini arttırmak için sıkça kullanılan ekonomik bir yöntemdir. Bu amaçla kurutulan volkanik tüf bilyeli değirmende öğütülüp 45 µm çaplı elekten elenmiştir. Numune öğütmede kullanılan bilyeli değirmen Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Numune öğütmede kullanılan bilyeli değirmen

3.1.2.12. pH ölçüm cihazı

Geopolimer beton numunelerin asit etkisinde durabilite özellikleri incelenmiştir. Numunelerin bekletildiği asit ortamlarının zamana bağlı pH değerleri Şekil 3.18'de gösterilen pH ölçüm cihazı ile tayin edilmiştir.



Şekil 3.18. pH ölçüm cihazı

3.1.2.13. Deneylerde kullanılan diğer teçhizatlar

Geopolimer numunelerin üretilmesinde ihtiyaç duyulan kürek, mala, eldiven, anahtar takımı vb. teçhizat temin edilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışım tipleri ve deney parametreleri

Tez çalışması boyunca üretilen geopolimer hamur, harç ve beton numunelerinin deney parametreleri Çizelge 3.5-3.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimer hamur numunelerinin deney parametreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler	
		Silis modülü	Kür sıcaklığı, (°C)
Geopolimer hamur	NaOH+Na ₂ SiO ₃		23 (Lab.)
		0.4	60
		0.5	75
		0.6	90
		0.7	105
		0.8	120
		135	

Çizelge 3.6. NaOH ile aktive edilen geopolimer hamur numunelerinin deney parametreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler	
		NaOH konsantrasyonu, (M)	Kür sıcaklığı, (°C)
Geopolimer hamur	NaOH		23 (Lab.)
		10	60
		12	90
		14	120
		16	150

Çizelge 3.7. NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimer harç numunelerinin deney parametreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		
		Silis modülü	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)
Geopolimer harç	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.6	0.35	90
		0.7		105
		0.8		120
		0.9		
		1.0		

Çizelge 3.8. NaOH ile aktive edilen geopolimer harç numunelerinin deney parametreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		
		NaOH konsantrasyonu, (M)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)
Geopolimer harç	NaOH	10	0.35	90
		12		120
		14		150
		16		

Çizelge 3.9. NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimer beton numunelerinin deney parametreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		
		Silis modülü	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)
Geopolimer beton	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.6	0.5	90
		0.8	0.6	105
				120

Çizelge 3.10. NaOH ile aktive edilen geopolimer beton numuneleri ve deney parametreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		
		NaOH konsantrasyonu, (M)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)
Geopolimer beton	NaOH	10	0.5	90
		12		120
		14	0.6	150
		16		

Çizelge 3.11. Katkılı geopolimer beton numuneleri ve deney parametreleri

Numune tipi	Deneysel olarak elde edilmiş optimum geopolimer betona ait parametreler				Katkı tipi
	Alkali aktivatör tipi	NaOH konsantrasyonu, (M)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	
Katkılı geopolimer beton	NaOH	12	0.6	90	Katkısız %2 Nano Silis %2 Mikro Silis %5 SB Lateks

3.2.2. Yapılan deneysel çalışmalar

Tez çalışması boyunca üretilen geopolimer hamur, harç ve beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Yapılan deneysel çalışmalar

Karışım tipi	Yapılan deneyler
1. Geopolimer hamur	1. Basınç dayanımı tayini (3, 7 ve 28 günlük) 2. Priz süresi tayini 3. Hidratasyon ısı tayini 4. Mikroyapı incelemesi
2. Geopolimer harç	1. Basınç dayanımı tayini (3, 7, 28 ve 90 günlük) 2. UPV tayini (28 günlük) 3. Mikroyapı incelemesi
3. Geopolimer beton	1. Basınç dayanımı tayini (3, 7, 28 ve 90 günlük) 2. UPV tayini (28 günlük) 3. Mikroyapı incelemesi
4. Katkılı geopolimer beton	1. Basınç dayanımı tayini (3, 7, 28 ve 90 günlük) 2. UPV tayini (28 günlük) 3. Fiziksel özellikler (Su emme oranı, Hacimsel yoğunluk) 4. Yüksek sıcaklık direnci tayini (100, 300, 500 ve 700°C) 4.1. Basınç dayanımı değişimi 4.2. Ağırlık değişimi 4.3. Su emme 4.4. Görsel görünüm 4.5 Mikroyapı incelemesi 5. Asit direnci tayini (%3, %5 ve %7 HCl) 5.1. Basınç dayanımı değişimi 5.2. Ağırlık değişimi 5.3. Görsel görünüm 5.4. Mikroyapı incelemesi

3.2.3. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler

Laboratuvar çalışmalarında kullanılmak üzere temin edilen dere agregasından TS 706 EN 12620+A1 (2009) standardına uygun olarak çeyrekleme metodu ile numuneler alınmış ve agregada deneylerine tabii tutulmuştur. Agregaların tane dağılımı

TS 802 (2016) ve TS 706 EN 12620+A1 (2009) standartlarına göre, organik madde içeriği TS EN 1744-1+A1 (2013) standardına göre, özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri TS EN 1097-6 (2013) standardına göre tespit edilmiştir (Şekil 3.19-3.21). Her bir deney için, numuneler üzerinde üçer defa agrega deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Agregaların geopolimer beton üretimi için kullanıma uygun olduğu belirlendikten sonra karışımlarda kullanılmıştır. Agrega deneyleri ile ilgili sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.19. Organik madde içeriği tayini



Şekil 3.20. Özgül ağırlık tayini



Şekil 3.21. Su emme oranı tayini

3.2.4. Geopolimer numunelerin karışım hesapları

3.2.4.1. Geopolimer hamur numunelerin karışım hesapları

İki farklı alkali aktivatör çözeltisi ile aktive edilen geopolimer hamur numunelerin karışım oranları normal kıvama göre belirlenmiştir. Çizelge 3.13'de belirtilen oranlarda alkali aktivatör çözeltileri hazırlanmış, sonrasında Vikat aleti ile tayin edilen normal kıvama göre volkanik tüf ile karıştırılmıştır. Sodyum silikatın sodyum hidroksit çözeltisine kıyasla daha viskoz bir malzeme olması nedeniyle, $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ ile aktive edilen karışımlarda normal kıvam daha yüksek ç/b oranında elde edilmiştir. Geopolimer hamur numunelerin karışım oranları Çizelge 3.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.13. Geopolimer hamur numunelerin karışım oranları

Alkali aktivatör tipi	Aktivatörün değişken parametresi		Alkali aktivatörlerin karışım oranları		Toplam alkali aktivatör çözeltisi, (g)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Volkanik tuf, (g)
	Silis modülü	NaOH kons. (M)	Na ₂ SiO ₃ , (g)	NaOH çözeltisi, (g)			
NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.4	-	100	135.14	235.14	0.50	470.28
	0.5	-	100	104.09	204.09	0.50	408.18
	0.6	-	100	83.37	183.37	0.50	366.74
	0.7	-	100	68.64	168.64	0.50	337.28
	0.8	-	100	57.51	157.51	0.50	315.02
NaOH	-	10	-	1400	1400	0.42	3333.33
	-	12	-	1480	1480	0.42	3523.81
	-	14	-	1560	1560	0.42	3714.28
	-	16	-	1640	1640	0.42	3904.76

3.2.4.2. Geopolimer harç numunelerin karışım hesapları

Geopolimer harç numunelerin karışım oranları, ç/b oranının mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla 0.35 ve 0.45 ç/b oranlarında olmak üzere iki farklı oranda belirlenmiştir. Volkanik tuf:alkali çözeltisi:kum oranları 1:0.35:2 ve 1:0.45:2 olacak şekilde iki farklı karışım hazırlanmıştır. Alkali aktivatör tipine bağlı olarak belirlenmiş olan geopolimer harç karışımları Çizelge 3.14'de gösterilmiştir. Geopolimer harç numunelerin yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinde kolaylık sağlaması amacıyla farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 3.14. Geopolimer harç numunelerin karışım oranları

Alkali aktivatör tipi	Aktivatörün değişken parametresi		Alkali aktivatörlerin karışım oranları		Toplam alkali aktivatör çözeltisi, (g)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Volkanik tüf, (g)	Kum, (g)	SAK, (%)
	Silis modülü	NaOH kons. (M)	Na ₂ SiO ₃ , (g)	NaOH çözeltisi, (g)					
NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.6	-	100	83.37	183.37	0.35	523.91	1047.82	4
						0.45	407.49	814.98	2
	0.7	-	100	68.64	168.64	0.35	481.83	963.66	4
						0.45	374.75	749.50	2
	0.8	-	100	57.51	157.51	0.35	450.03	900.06	4
						0.45	350.02	700.04	2
	0.9	-	100	48.90	148.90	0.35	425.43	850.86	4
						0.45	330.89	661.78	2
	1.0	-	100	42	142	0.35	405.71	811.42	4
						0.45	315.55	631.10	2
NaOH	-	10	-	1400	1400	0.35	4000	8000	3
						0.45	3111.11	6222.22	1.5
	-	12	-	1480	1480	0.35	4228.57	8457.14	3
						0.45	3288.89	6577.78	1.5
	-	14	-	1560	1560	0.35	4457.14	8914.28	3
						0.45	3466.67	6933.33	1.5
	-	16	-	1640	1640	0.35	4685.71	9371.42	3
						0.45	3644.44	7288.88	1.5

3.2.4.3. Geopolimer beton numunelerin karışım hesapları

Geopolimer beton üretiminde hammadde olarak kullanılan volkanik tüfün dozajı tüm karışımlar için 500 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Belirlenmiş olan ç/b oranlarına göre toplam alkali aktivatör içerikleri elde edilmiştir. Alkali aktivatör tipine bağlı olarak her bir karışım için NaOH ve Na_2SiO_3 miktarları hesaplanmıştır. Beton karışım hesabında hava içeriği %3 olarak alınmıştır. Bağlayıcı madde ve aktivatörlerin hacimleri hesaplanmış ve hesaplanan bu malzeme hacimleri 1 m^3 değerinden çıkarılarak toplam agrega hacimleri bulunmuştur. Daha sonra agregaların gradasyonu ve özgül ağırlık değerlerine göre miktarları hesaplanmıştır. 1 m^3 geopolimer beton üretimi için kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.15’de verilmiştir.

Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi aşamasında maksimum agrega tane çapı ilk olarak 16 mm olarak seçilmiştir. Geopolimer betonların mekanik özelliklerine agregaların tane çapının etkisini incelemek amacıyla yapılan deneme dökümlerinde, 8 mm maksimum agrega tane çapına sahip geopolimer betonların daha yüksek basınç dayanımı vermesi nedeniyle maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak değiştirilmiştir. Çalışmada ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır. Bu sebeple agregalar doğal halleri ile değil de tane sınıflarına ayrılmış olarak kullanılmıştır. Geopolimer beton numunelerin yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerini kolaylaştırmak için ihtiyaç duyulan karışımlarda %2 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı içeriğinin %3’e kadar çıkarılmasının basınç dayanımında azalmaya yol açmayacağı literatürde belirtilmiştir (Huseien vd. 2017).

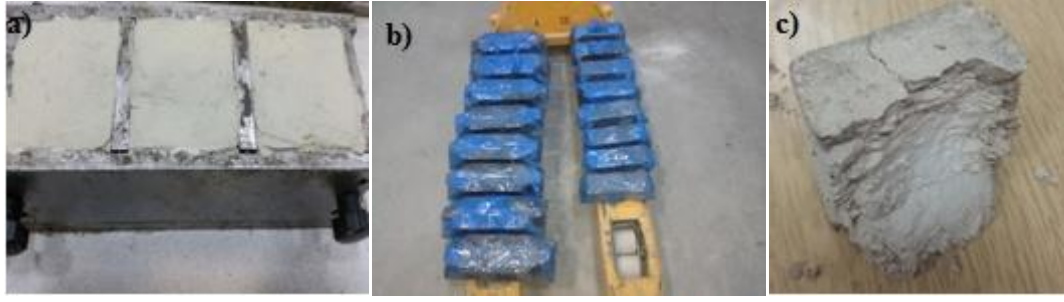
Çizelge 3.15. Geopolimer beton numunelerin karışım oranları

Karışımın özellikleri				Beton bileşenleri, (kg/m ³)							TBHA, (kg/m ³)	
Alkali aktivatör tipi	Aktivatörün değişken parametresi		Çözelti/ bağlayıcı oranı	Volkanik tuf	Alkali aktivatörler			Agrega				SAK
	Silis modülü	NaOH kons. (M)			Toplam alkali aktivatör çözeltisi	Alkali aktivatörlerin karışım oranları		0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm		
						Na ₂ SiO ₃	NaOH çözeltisi					
NaOH + Na ₂ SiO ₃	0.6	-	0.5	500	250	136.34	113.66	616.20	356.60	436.48	-	2159.28
			0.6	500	300	163.60	136.40	574.18	332.28	406.71	-	2113.17
	0.8	-	0.5	500	250	158.70	91.30	619.34	358.43	438.70	-	2166.47
			0.6	500	300	190.46	109.54	577.94	334.45	409.38	-	2121.77
NaOH	-	10	0.5	500	250	-	250	597.19	345.60	423.02	10	2125.81
			0.6	500	300	-	300	551.40	319.10	390.58	-	2061.08
	-	12	0.5	500	250	-	250	602.74	348.80	426.95	10	2138.49
			0.6	500	300	-	300	558.05	322.95	395.28	-	2076.28
	-	14	0.5	500	250	-	250	607.70	351.68	430.47	10	2149.85
			0.6	500	300	-	300	564	326.38	399.48	-	2089.86
	-	16	0.5	500	250	-	250	612.19	354.28	433.63	10	2160.10
			0.6	500	300	-	300	569.38	329.50	403.31	-	2102.19

3.2.5. Karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları

3.2.5.1. Geopolimer hamur numunelerin karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları

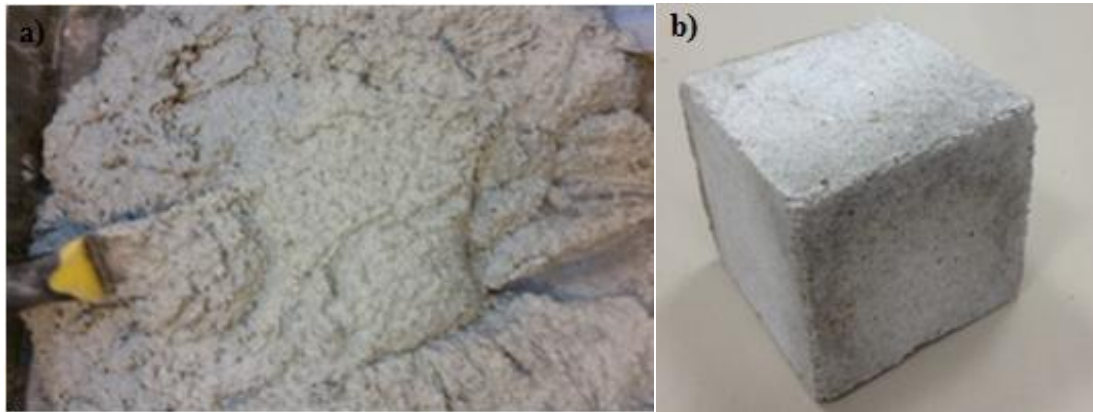
Geopolimer hamur numunelerin üretilmesine ilk olarak alkali aktivatör çözeltisinin hazırlanması ile başlanmıştır. Suyun NaOH ile reaksiyonu ekzotermik bir işlemdir. Açığa çıkan ısının sıvıların buharlaşmasına neden olmasını önlemek amacıyla, belirlenen konsantrasyona sahip NaOH çözeltileri bir gün önceden hazırlanmış ve laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Bu dinlendirme yöntemi çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiştir (Yadollahi vd. 2015; Rajarajeswari ve Dhinakaran; 2016; Ma vd. 2016b). NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen numunelerde NaOH konsantrasyonu sabit 10 M olarak seçilmiştir. Yalnız NaOH ile aktive edilen numunelerde ise aktivatör oranları farklı konsantrasyonlarda (10-16 M) belirlenmiştir. NaOH konsantrasyonları harç ve beton karışımlarında da değiştirilmemiştir. İstenilen konsantrasyonda bir gün önceden hazırlanmış ve laboratuvarında dinlendirilmiş NaOH çözeltisi ile Na₂SiO₃ aktivatör tipine bağlı olarak Çizelge 3.13'de belirtilen oranlarda 5 dakika boyunca karıştırılıp alkali aktivatörler hazırlanmıştır. Daha sonra öğütülmüş volkanik tüf ile alkali aktivatörler Vikat aleti ile tayin edilen normal kıvama göre karıştırılmıştır. Tartımlar ± 0.001 g doğrulukta terazi ile yapılmıştır. Numunelerin sertleştikten sonra kalıplardan kolayca çıkması için kalıp yüzeyleri yağlanmıştır. Üretilen geopolimer hamur numuneleri 50x50x50 mm boyutlarda çelik kalıplara dökülmüştür. Numunenin içerisindeki sıvının buharlaşmasını önlemek için yüzeyi naylon veya alüminyum folyo ile örtülmüştür. Elde edilen hamur numuneleri Çizelge 3.5-3.6'da belirtilen sıcaklıklarda 72 saat boyunca küre tabii tutulmuştur. Kür süresinin ilk 24 saati sonunda numunelerin yeterli sertleşmeyi sağladığı görülmüş ve numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler tekrar yüzeyi örtülerek kalan 48 saatlik kür işlemine devam edilmiştir. Isıl kür işlemi tamamlandıktan sonra numuneler laboratuvar ortamında deney gününe kadar bekletilmiştir. Kalıplara yeni dökülmüş, kür için hazırlanmış ve basınç dayanımı deneyi sonucunda kırılmış geopolimer hamur numunesi Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Geopolimer hamur numuneleri, a) Kalıplara yeni dökülmüş, b) Kür için yüzeyi kaplanmış, c) Basınç dayanımı deneyi sonrası

3.2.5.2. Geopolimer harç numunelerin karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları

Geopolimer harç numunelerin üretilmesine hamur fazında da yapıldığı gibi önce alkali aktivatör çözeltisinin hazırlanması ile başlanmıştır. İstenilen konsantrasyonda bir gün önceden hazırlanmış ve laboratuvarında dinlendirilmiş NaOH çözeltisi ile Na_2SiO_3 aktivatör tipine bağlı olarak Çizelge 3.14'de belirtilen oranlarda karıştırılmıştır. Volkanik tüf ile ince agrega harç karıştırıcıda 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Katıların homojen karıştırılması sağlandıktan sonra alkali aktivatör çözeltisi yavaşça ilave edilmiş sonrasında yine 5 dakika boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Taze haldeki geopolimer harç numunesi yağlanmış kalıplara dökülüp sıkıştırılmıştır. Numunelerden sıvı kaybı olmaması için yüzeyi kaplanmış, Çizelge 3.7-3.8'de belirtilen sıcaklıklarda 72 saat boyunca kür işlemine maruz bırakılmıştır. Numuneler bir gün sonra kalıptan çıkarılıp yüzeyi kapatılarak kür işlemine devam edilmiştir. Isıl kür işlemi tamamlandıktan sonra numuneler laboratuvar ortamında deney gününe kadar bekletilmiştir. Taze ve sertleşmiş haldeki geopolimer harç numuneleri Şekil 3.23'de gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Geopolimer harç, a) Taze hal, b) Sertleşmiş hal

3.2.5.3. Geopolimer beton numunelerin karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları

Geopolimer beton üretiminde daha önce uygulandığı gibi öncelikle alkali aktivatör çözeltisi hazırlanmıştır. İstenilen konsantrasyonda bir gün önceden hazırlanmış ve laboratuvarında dinlendirilmiş NaOH çözeltisi ile Na_2SiO_3 aktivatör tipine bağlı olarak Çizelge 3.15'de belirtilen oranlarda karıştırılmıştır. Alkali aktivatör çözeltisinin hazırlanmasından sonra, volkanik tuf, ince ve iri agrega 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Katıların homojen olarak karışması sağlandıktan sonra alkali aktivatör çözeltisi yavaşça kuru karışıma dökülmüş sonrasında ilave 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan taze haldeki geopolimer beton numuneleri 50x50x50 mm boyutlardaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Numunenin kalıplardan kolaylıkla çıkarılabilmesi için, kalıplar yağlanmıştır. Geopolimer beton numuneleri daha sonra yüzeyleri kaplanıp Çizelge 3.9-3.10'da belirtilen sıcaklıklarda 72 saat boyunca kür işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler bir gün sonra yeterli sertliğe ulaştıkça kalıptan çıkarılıp yüzeyi kapatılarak kür işlemine devam edilmiştir. Isıl kür işlemi tamamlandıktan sonra numuneler laboratuvar ortamında deney gününe kadar bekletilmiştir. Sertleşmiş haldeki geopolimer beton numuneleri Şekil 3.24'de gösterilmiştir.

Geopolimer numunelerin üretiminde, karışıma katılacak malzemelerin hangi sıraya göre hazırlanacağı detaylı literatür taramasından sonra belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda önce katı bileşenlerin homojen olarak karıştırılması, daha sonra ayrı olarak hazırlanmış olan alkali aktivatörlerin ilave edilmesinin optimum yöntem olduğu tespit edilmiştir (Okoye vd. 2017; Omer vd. 2015; Hardjito, 2005). Nano silis, mikro silis ve SB lateks gibi katkıların geopolimer betona ilave edilmesi işleminde ise, nano silis ve mikro silis gibi katı haldeki katkıların, agrega ve volkanik tufün karıştırılması esnasında, SB lateks gibi sıvı halindeki katkının ise alkali aktivatörlerin karıştırılması esnasında ilave edilmesi yöntemi uygulanmıştır. Assaedi vd. (2016a, c) kuru karışıma ilave edilen nano katkıların yaş karışıma ilave edilen katılardan daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler sergilediğini ifade etmişlerdir. Üretilen numunelerin sıvı kaybının önlenmesi için yüzeyinin kapatılması işlemi daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından uygulanmıştır (Tippayasam vd. 2016; Hardjito, 2005; Yadollahi vd. 2015; Pavithra vd. 2016).



Şekil 3.24. Sertleşmiş haldeki geopolimer beton numuneleri

3.2.6. Geopolimer numunelerde uygulanan yöntemler

3.2.6.1. Priz süresi tayini

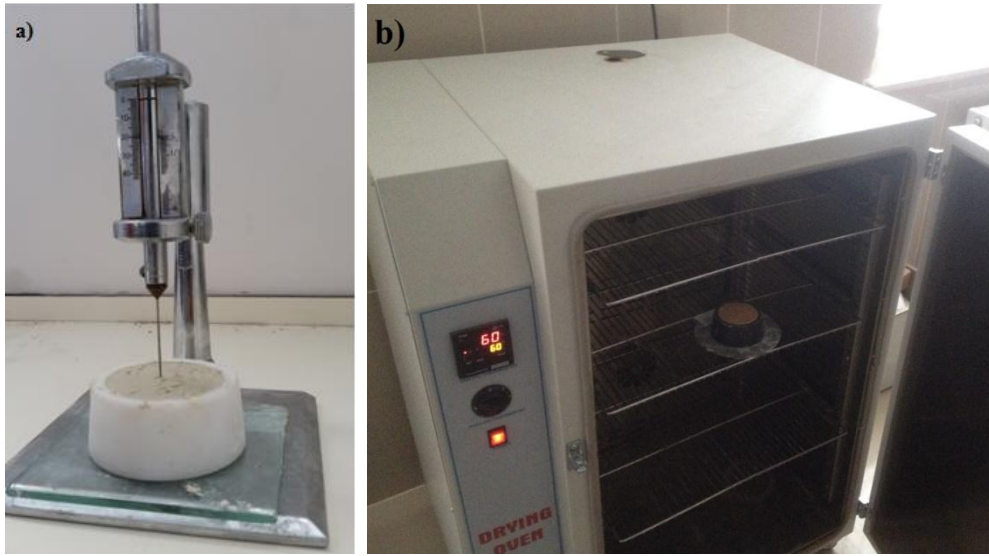
Priz süreleri ASTM C191–01 (2001) standardına, normal kıvam ASTM C187-16 (2016) standardına uygun olarak Vikat aleti ile yapılmıştır. Priz süresinin tayini için Vikat iğnesi kullanılmıştır.

a) Priz başlama süresinin tayini

Öncelikle Vikat aletinin iğnesi tabandaki cam plakaya değene kadar indirilmiş ve skala sıfırlanmıştır. Dolu Vikat kabı deney odasındaki cam taban plakasının üstünde veya standartlara uygun rutubetli kabinde saklanmış ve uygun bir süre sonra Vikat cihazının iğnesinin altına konmuştur. İğne hamurun üst yüzeyine değene kadar dikkatlice indirilmiştir. İğne, sondada ani darbe ve çarpma etkisi olmaması için (1-2 saniye) bu konumda tutulmuştur. Ardından sonda hızla serbest bırakılmıştır. İğnenin hamura düşey şekilde saplanması durduğunda veya en geç 30 saniye sonra skala okunmuştur. Bunlardan ilk oluşan değer esas alınmıştır. İğne ile cam plaka arasındaki mesafe ve hamurun hazırlanışından bu ana kadar geçen süre kaydedilmiştir. Aynı numune üzerinde, birbirinden ve kenardan en az 10 mm mesafe kalacak şekilde ve uygun sürelerle iğne batırma işlemleri tekrarlanmıştır. Karışımın hazırlanmasından itibaren plakanın üst yüzü ile iğnenin ucu arasındaki mesafenin 4 mm olduğu ana kadar geçen süre hamurun priz başlangıç süresi olarak not edilmiştir.

b) Priz bitiş süresinin tayini

Dolu olan ve priz başlama süresi tayininde kullanılan Vikat kalıbı, priz süresi deneyinin cam plaka tarafındaki alt bölümünde devam ettirilebilmesi için, kalıp üstüne kapatılan diğer bir cam plaka üzerine ters çevrilmiştir. Karışımın tamamlanmasından itibaren iğne ucunun en çok 1 mm battığı ana kadar geçen süre hamurun priz sona erme süresi olarak not edilmiştir. Batma derinliği, priz başlama süresinin tayininde tarif edildiği gibi belirlenmiştir. Vikat aleti ile geopolimer hamur numunelerin hem laboratuvar hem de ısıl kür ortamında priz süresi ölçümleri Şekil 3.25'de gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Hamur numunelerde priz süresi ölçümü, a) Laboratuvar ortamında, b) Isıl kür etkisinde

3.2.6.2. Hidratasyon ısısı tayini

İzotermal kalorimetre ile hidratasyon ısısı ölçümü ASTM C186-17 (2017) standardına uygun olarak yapılmıştır. İzotermal kalorimetre cihazı 96 saat sürede optimum sonuç vermektedir. Deney hazırlanırken 10 g volkanik tüf tüpe yerleştirilmiştir. Daha sonra 5 g alkali aktivatör çözeltisi enjektörle çekilerek dolu enjektör tüpün üstüne konulmuştur. Enjektör ve tüp ToniCAL Kalorimetre cihazındaki numune kısmına tam oturacak şekilde yerleştirilmiştir. Numune kabin içindeyken kabinin termik dengeye (0.05 değerinin altına) gelmesi beklenmiştir. Daha sonra programda verilen menüye uygun değerler girilmiştir. Bunlar; numuneye isim verme, hammadde kütlesi, sıvı kütlesi, kabin içi sıcaklığı ve test süresidir. Bütün

değerler girildikten sonra cihaz termik dengeyi yeniden kontrol eder. Kabin termik dengeye geldikten sonra enjektördeki sıvı kapağın üstündeki mil yardımı ile tüpün içine enjekte edilmiştir. Sıvının hammadde içine enjeksiyonu sırasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir. Kapağın arkasındaki sabit vida gevşetilir ve vidalı mil çevrilerek enjektörün içindeki sıvının hammaddenin içine boşaltılması sağlanmıştır. Bütün sıvı boşaltıldığında vidalı mil kabin kapağını yukarı doğru itmektedir. El ile bu hareket algılandığında sıvının bittiği anlaşılmıştır. Vidalı mil bu durumda tamamen yukarı çekilip ve kapağın arkasındaki sabitlenen vidası da sıkıştırılarak kabin kapağı tamamen sabitlenmiştir. Sıvı hammaddeye tamamen enjekte edildikten sonra programın ilk değerleri almaya başladığı görülmüştür. Numune 4 gün boyunca cihazda bekletilerek zamana göre hidrasyon ısı grafiği elde edilmiştir.

3.2.6.3. Basınç dayanımı tayini

Basınç dayanımı değerleri TS EN 12390-3 (2010) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Numune, deney makinesine yerleştirilmeden önce, yüzeyindeki fazla su kurulanmıştır. Deney makinesi yükleme başlıklarının yüzeyleri silinerek temizlenmiş ve numunenin başlıklarla temas edecek yüzeylerinde bulunan herhangi gevşek çıkıntı veya tane alınmıştır. Deney numunesi ve deney makinesinin yükleme başlığı arasında, aralık ayarlama blokları ve ilâve plâkalardan başka yerleştirme parçası kullanılmamıştır. Küp numuneler, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda yerleştirilmiştir. Numuneler, makinenin alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir. Küp numuneler, belirtilmiş boyutta numuneler, belirtilmiş çapının $\pm 1\%$ 'i doğrulukla merkeze yerleştirilmiştir. İlâve yükleme plâkaları kullanılmış ve bunlar, numunenin alt ve üst yüzeylerine göre ayarlanmıştır. Yükleme hızı cihaz tarafından otomatik ayarlanmaktadır. Basınç dayanımı tayininde her gruptan 50x50x50 mm boyutlarında üç adet üretilmiş ve sonuç bu üç numunenin ortalaması olarak kaydedilmiştir.

3.2.6.4. Yüksek sıcaklık direnci tayini

28 günlük numuneler yüksek sıcaklık dirençlerini tespit etmek için fırına yerleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık fırını hedeflenen sıcaklığa (100, 300, 500 ve 700°C) ulaştıktan sonra numuneler bir saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır.

Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanımı, ağırlık, su emme oranı, görsel görünüm ve mikroyapı özellikleri karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık direnci tayini için fırına yerleştirilmiş olan geopolimer beton numuneleri Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Yüksek sıcaklık direnci için fırına yerleştirilmiş geopolimer beton numuneleri

3.2.6.5. Asit direnci tayini

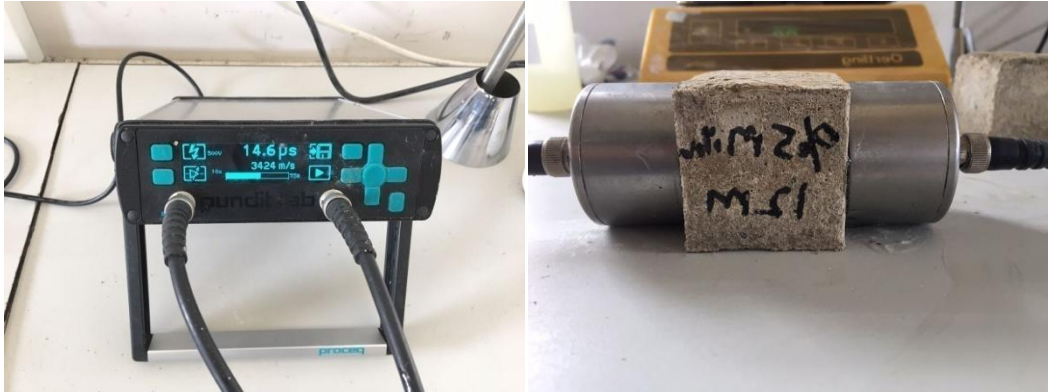
Katkı içermeyen ve nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılarını içeren optimum karışım ve kür koşullarında üretilmiş geopolimer beton numunelerin asit direnci basınç dayanımı değişimi, ağırlık değişimi, görsel görünümdeki değişim ile değerlendirilmiştir. 28 günlük geopolimer beton numuneleri %3, %5 ve %7 HCl çözeltilerinde 180 güne kadar bekletilmiştir. HCl çözeltisine maruz bırakılmış geopolimer beton numuneleri Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. HCl çözeltisine maruz bırakılmış geopolimer beton numuneleri

3.2.6.6. UPV tayini

Ultrasonik hız test cihazı ile betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresi ölçülüp, dalga hızı hesaplanmaktadır. Bulunan bu ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki elde edilmeye çalışılmıştır. Geopolimer beton numunelerin UPV ölçümü Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Geopolimer beton numunelerin UPV ölçümü

3.2.6.7. Mikroyapı analizi

Numunelerin mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinde XRD ölçüm metodu ve SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Mikroyapı analizleri İnönü Üniversitesi bünyesinde bulunan Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezinde (İBTAM) yapılmıştır.

a) SEM ölçüm metodu: Kalın örnekler elektron ışınlarının yüzeyden yansması ile incelenebilir. Bu inceleme SEM ile yapılabilir. Elektron ışını örnek yüzeyine odaklanır ve örnek yüzeyini taramaya başlar. Işının örnek yüzeyini taramaya başlamasıyla yüzeyden yansıyan elektronlar örneğe göre birkaç yüz volt pozitif voltajda tutulan anot ile toplanır. Toplayıcı anottaki akım yükseltilir ve katot ışın tüpündeki mikroskop ışını ile eşzamanlı olarak taranan elektron ışınlarını değiştirmek için kullanılır. Bu nedenle katot ışın tüpü örneğin oldukça büyütülmüş olan görüntüsünü alır. SEM'in ayırma gücü 10 nm mertebesindedir. Üretilen geopolimer numunelerden alınan parçalar üzerinde SEM ile görüntü alınmıştır. Numuneler öncelikle vakumlanmış, daha sonra 75 s süre içinde Au-Pd ile kaplanmıştır. Bu çalışma için LEO-EVO 40 adlı cihaz kullanılmıştır.

b) XRD ölçüm metodu: X-Işınları kırınım tekniği malzemenin içerdiği fazları belirlemede, nicel faz analizinde, sıcaklık, basınç vs. fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerinde, tanecik boyutu belirlemede, tanecik yönelimi belirlemede, kimyasal kompozisyonu belirlemede, örgü sabitlerini bulmakta kullanılan bir tekniktir. Üretilen geopolimer numunelerden alınan parçalar üzerinde XRD analizi ile mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir.

3.2.6.8. Fiziksel özellikler

Geopolimer beton numunelerine ait ağırlıkça su emme oranları ve hacimsel yoğunluk değerleri TS EN 12390-7 (2010) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Deney her gruptan 3 numune üzerinde yapılmıştır ve elde edilen her bir deney sonucu 3 deneyin aritmetik ortalamasıdır. Öncelikle numuneler 24 saatlik periyotlar halinde etüvde tutulmuş ve daha sonra oda sıcaklığına geldikten sonra ağırlıkları tayin edilmiştir. Ölçülen ağırlıklar arasındaki fark en düşük olan ağırlığın %0.2'sinden az olduğunda numunenin etüv kurusu ağırlığa geldiği kabul edilmektedir. Etüv kurusu haline gelen numuneler daha sonra $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kür havuzuna bırakılıp, 72 saat sonra çıkarılmış yüzey ıslaklıkları havlu ile kurulanıp tartılmıştır. Daha sonra numuneler tekrar 24 saatliğine kür havuzuna bırakılmıştır. Sonrasında havuzdan çıkarılmış yüzey ıslaklığı alınan numuneler tartılarak, birbirini izleyen iki tartım arasındaki fark büyük ağırlığın %0.2'sinden az oluncaya kadar bu döngüye devam edilmiş ve doymuş kuru yüzeyli numune ağırlıkları belirlenmiştir (Şekil 3.29). Numunelerin su

içerisindeki ağırlıkları da belirlendikten sonra geopolimer beton numunelerin ağırlıkça su emme ve yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.29. Geopolimer beton numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

3.2.6.9. pH ölçümü

%3, %5 ve %7 HCl etkisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin asit ortamlarının pH değerlerinin zamana göre değişimi incelenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

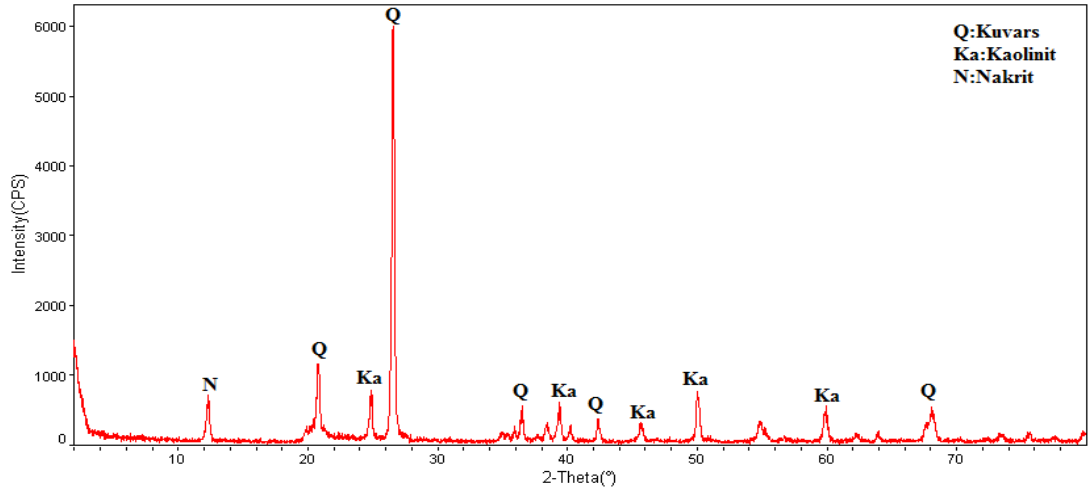
Bu bölümde hammadde ve agregata üzerinde yapılan deneyler ile ilgili bulgular, geopolimer hamur, harç ve beton numuneleri ile ilgili bulgular ve son olarak nano silis, mikro silis ve SB lateks gibi katkıların geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerine etkileri ile ilgili bulgular verilmiştir. Sonuçlar tablo ve şekiller ile desteklenerek daha anlaşılır hale getirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar yorumlanarak daha önceden yapılan çalışmalar ile kıyaslanmıştır.

4.1. Hammadde Deneyleri ile ilgili Bulgular

Tane çapının öğütme işlemi ile küçültülmesi, kimyasal yapıyı değiştirmeden hammaddenin reaktivitesini artırmak için sıkça kullanılan ekonomik bir yöntemdir. Bu amaçla etüvde kurutulmuş volkanik tüf bilyeli değirmende öğütülüp 45 µm çaplı elekten elenmiştir. Volkanik tüfün kimyasal bileşimi XRF analizi ile tayin edilmiştir. Volkanik tüfün kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca volkanik tüf üzerinde yapılmış olan XRD analizi sonuçları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Volkanik tüfün XRD analizinde kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), nakrit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) mineralleri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Volkanik tüfün kimyasal bileşimi

Volkanik tüf	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	BaO	P_2O_5	K_2O	TiO_2	SO_3
Oran, (%)	77.22	18.89	1.69	0.27	0.09	0.39	0.91	0.25	0.21



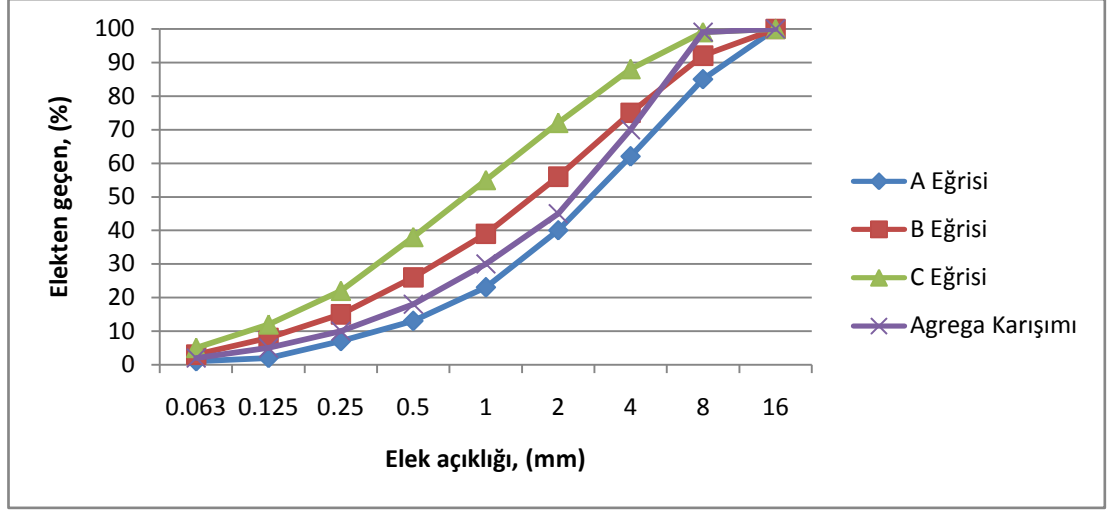
Şekil 4.1. Volkanik tüfün XRD analizi

4.2. Agrega Deneyleri ile ilgili Bulgular

Laboratuvara getirilen dere agregasından TS 706 EN 12620+A1 (2009) standardına uygun olarak dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) metodu ile numune alınmış ve agrega deneyleri gerçekleştirilmiştir. Agrega karışım seçeneklerinin belirlenmesi aşamasında maksimum agrega tane çapı ilk olarak 16 mm olarak seçilmiştir. Geopolimer betonların mekanik özelliklerine agregaların tane çapının etkisini incelemek amacıyla yapılan deneme dökümlerinde, 8 mm maksimum agrega tane çapına sahip geopolimer betonların daha yüksek basınç dayanımı göstermesi nedeniyle maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak değiştirilmiştir. Çalışmada ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır. Bu sebeple agregalar karışımlara doğal halleri ile değil de tane sınıflarına ayrılmış olarak kullanılmıştır. Geopolimer betonlarda kullanılan agreganın %45'i 0-2 mm, %25'i 2-4 mm ve %30'u 4-8 mm tane çaplarına sahip agregalardan alınmıştır. Geopolimer beton üretiminde kullanılan agregaya ait elek analizi sonuçları Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Geopolimer beton üretiminde kullanılan agreganın elek analizi sonuçları

Elek açıklığı, (mm)	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
Elekten geçen, (%)	100	99	70	45	30	18	10	5	2



Şekil 4.2. Geopolimer beton üretiminde kullanılan agreganın granülometri eğrisi

Kullanılan agregalar üzerinde yapılan deneylerde, malzeme üzerinde kalan sıvılarda herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir. Böylece çalışmada kullanılan agregaların geopolimer beton üretimi için organik madde içeriği açısından uygun olduğu kararlaştırılmıştır.

Dere agregası üzerinde özgül ağırlık ve su emme oranları deneyleri yapılmıştır. Kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık ve su emme oranları tayini her agregas tane sınıfı için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri

Özellik	Dere agregası		
	0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm
Kuru özgül ağırlık	2.34	2.45	2.50
Doymun kuru yüzey özgül ağırlık	2.40	2.50	2.55
Su emme oranı, (%)	2.60	2.00	1.90

4.3. Geopolimer Hamur ile ilgili Bulgular ve Tartışma

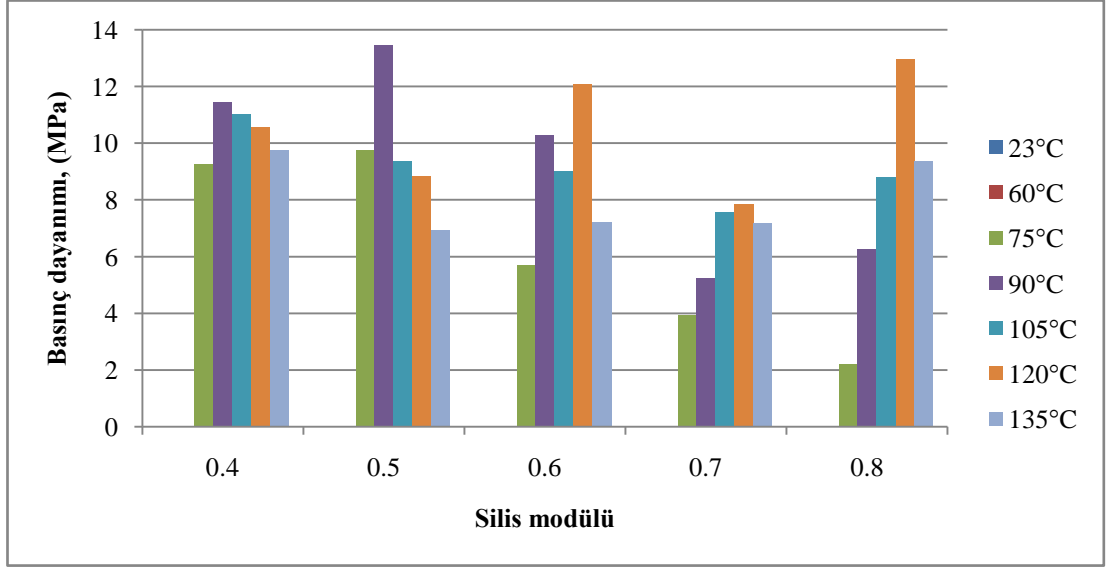
Geopolimer hamur numuneleri öğütülmüş volkanik tüfün NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ve yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmesi sonucu üretilmiştir. Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı (3, 7 ve 28 günlük) değerleri, priz süreleri, hidrasyon ısıları ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen hamur numunelere ait deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.3.1. Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı

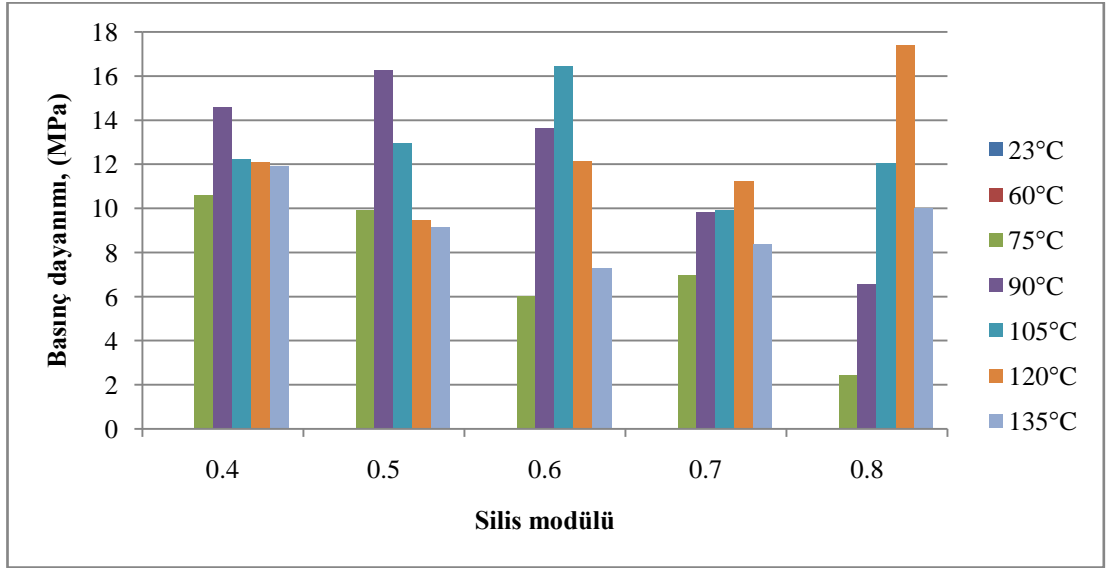
İki farklı alkali aktivatör çözeltisi ile üretilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımları önemli farklılıklar göstermiştir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş olan geopolimer hamur numunelerinde değişken parametre olarak silis modülü belirlenmiş ve hazırlanan karışımlar farklı sıcaklıklarda kür edilmiştir. Geopolimer hamur numunelerin farklı silis modülü ve kür koşullarına göre elde edilmiş 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.4'de ve Şekil 4.3-4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri

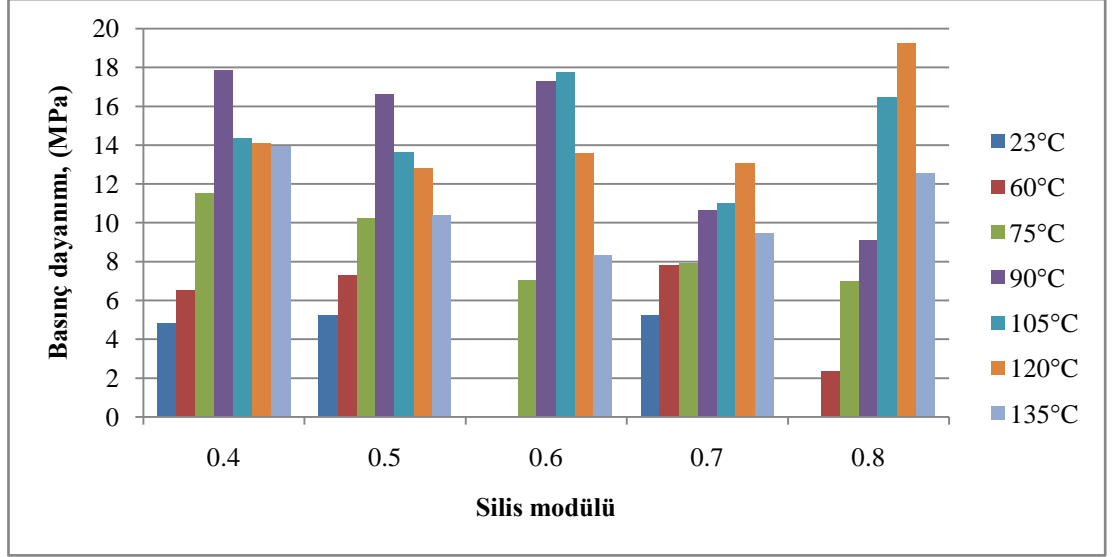
Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		Basınç dayanımı, (MPa)		
		Silis modülü	Kür sıcaklığı, (°C)	3 Gün	7 Gün	28 Gün
Geopolimer hamur	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.4	23 (Lab.)	0	0	4.80
			60	0	0	6.50
			75	9.25	10.60	11.50
			90	11.44	14.58	17.84
			105	11.02	12.21	14.34
			120	10.56	12.10	14.06
			135	9.76	11.88	13.94
		0.5	23 (Lab.)	0	0	5.20
			60	0	0	7.30
			75	9.75	9.90	10.20
			90	13.44	16.26	16.58
			105	9.36	12.96	13.60
			120	8.84	9.44	12.80
			135	6.92	9.16	10.40
		0.6	23 (Lab.)	0	0	0
			60	0	0	0
			75	5.70	6.00	7.00
			90	10.30	13.64	17.26
			105	9.00	16.44	17.76
			120	12.08	12.12	13.54
			135	7.23	7.29	8.33
		0.7	23 (Lab.)	0	0	5.20
			60	0	0	7.77
			75	3.92	6.94	7.93
			90	5.23	9.81	10.63
			105	7.56	9.92	10.98
			120	7.86	11.23	13.03
			135	7.19	8.36	9.46
		0.8	23 (Lab.)	0	0	0
			60	0	0	2.35
			75	2.19	2.44	6.97
			90	6.27	6.56	9.10
			105	8.80	12.04	16.46
			120	12.97	17.4	19.22
			135	9.35	10.01	12.56



Şekil 4.3. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.4. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.5. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

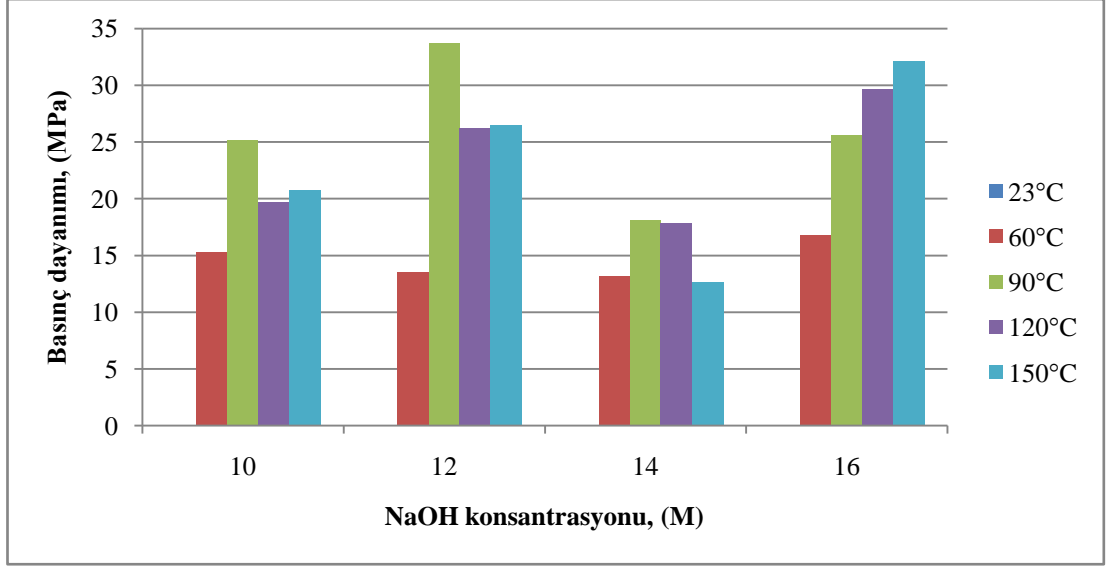
NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, kür işleminin mukavemet gelişimine önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. Kür sıcaklığının artması bütün silis modülü gruplarında basınç dayanımının artmasını sağlamıştır. Ancak belirli bir sıcaklıktan sonra uygulanan kür işleminin basınç dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, silis modülünün 0.8 ve 0.7 olduğu karışımlarda maksimum basınç dayanımı 120°C sıcaklıkta, silis modülünün 0.6 olduğu karışımda 105°C sıcaklıkta, silis modülünün 0.5 ve 0.4 olduğu karışımlarda ise 90°C sıcaklıkta kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir. Silis modülünün yüksek olduğu karışımlarda optimum kür koşulu 120°C iken, silis modülünün azalması ile beraber optimum kür sıcaklığı 90°C sıcaklığa kadar düşmüştür. Yüksek kür sıcaklığı hammaddenin çözünmesini ve polikondenzasyonunu arttırdığı için mukavemet gelişimine neden olmaktadır (van Deventer vd. 2006). Maksimum basınç dayanımı, silis modülünün 0.8, kür sıcaklığının ise 120°C olduğu 28 günlük numunelerde 19.22 MPa olarak elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında kür edilen numunelerde, 3 ve 7. günlerde basınç dayanımı elde edilemediği halde, 28. günde bazı numunelerde basınç dayanımı elde edilmiştir. Bütün silis modülü değerlerinde ve kür koşullarında numune yaşı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Silis modülü ile basınç dayanımı arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. Farklı silis modüllerinde ve farklı kür sıcaklıklarında değişken basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Yadollahi vd. (2015) Hasankale pomzasının geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılabilirliğini

araştırdığı çalışmada, su/bağlayıcı oranı, silis modülü ve kür sıcaklığının optimizasyonu ile 40 MPa'a ulaşan basınç dayanımı değerleri elde etmişlerdir. Silis modülünün 0.52, 0.60 ve 0.68 olarak ayarlandığı karışımlarda, silis modülü arttıkça basınç dayanımının arttığını ifade etmişlerdir. Soutsos vd. (2016) tarafından uçucu kül esaslı geopolimer karışımlar üzerine yapılan çalışmada, laboratuvar koşullarında önemli bir mukavemet gelişimi elde edilememiştir. Chi (2015) silis modülü arttıkça basınç dayanımının arttığını ifade etmiştir.

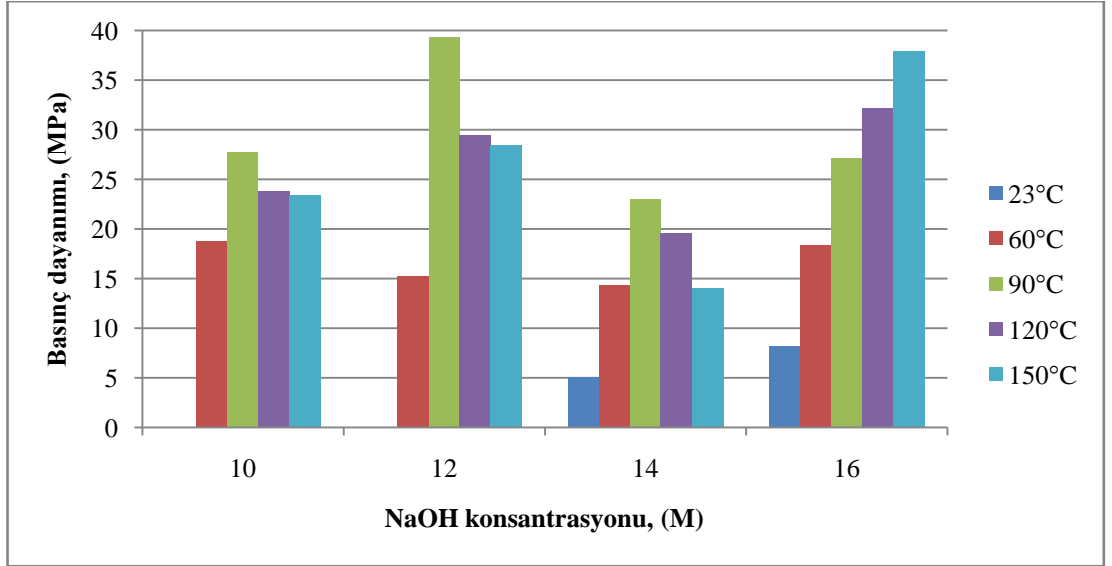
Volkanik tüfün yalnız NaOH çözeltisi ile alkali aktive edilmesi sonucu geopolimer hamur numuneleri üretilmiştir. NaOH çözeltisi ile alkali aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı incelenirken değişken parametre olarak NaOH konsantrasyonu seçilmiştir. Hazırlanan karışımlar farklı sıcaklıklarda kür işlemine tabi tutulmuştur. Geopolimer hamur numunelerin farklı NaOH konsantrasyonu ve kür koşullarına göre elde edilen 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.5 ve Şekil 4.6-4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri

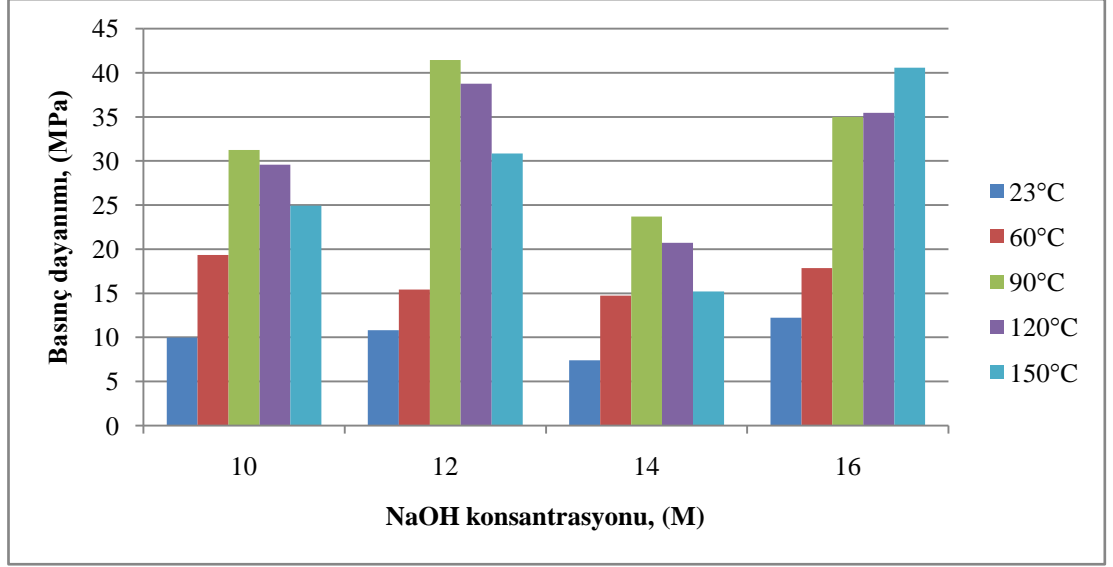
Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		Basınç dayanımı, (MPa)		
		NaOH konsantrasyonu, (M)	Kür sıcaklığı, (°C)	3 Gün	7 Gün	28 Gün
Geopolimer hamur	NaOH	10	23 (Lab.)	0	0	9.98
			60	15.33	18.73	19.33
			90	25.16	27.76	31.25
			120	19.72	23.82	29.56
			150	20.80	23.40	24.94
		12	23 (Lab.)	0	0	10.81
			60	13.54	15.23	15.42
			90	33.68	39.34	41.43
			120	26.25	29.42	38.76
			150	26.53	28.46	30.83
		14	23 (Lab.)	0	5.10	7.41
			60	13.14	14.38	14.74
			90	18.16	22.96	23.68
			120	17.88	19.55	20.73
			150	12.61	14.00	15.22
		16	23 (Lab.)	0	8.21	12.24
			60	16.83	18.34	17.86
			90	25.56	27.16	35.00
			120	29.62	32.14	35.44
			150	32.10	37.93	40.57



Şekil 4.6. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.7. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.8. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin araştırma bulguları incelendiğinde, kür sıcaklığının ve NaOH konsantrasyonunun değiştirilmesi sonucunda basınç dayanımı önemli bir artış olduğu gözlenmiştir. Kür sıcaklığı geopolimerizasyon reaksiyonlarında bağlayıcı jelin oluşması ve yoğunlaşmasında önemli etkiye sahiptir (Djobo vd. 2016). 10, 12 ve 14 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımına göre optimum kür sıcaklığı bütün numune yaşlarında 90°C olarak elde edilmiştir. 16 M NaOH ile aktive edilmiş numunelerde ise kür sıcaklığı arttıkça bütün numune yaşlarında basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Bu durumun artan kür sıcaklığının ve NaOH konsantrasyonunun silis ve alümin bağlarının çözünmesini kolaylaştırarak geopolimerizasyon işlemini hızlandırmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Hanjitsuwan vd. 2014; Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009). Maksimum basınç dayanımı ise aktivatör konsantrasyonunun 12 M, kür sıcaklığının ise 90°C olduğu 28 günlük numunelerde 41.43 MPa olarak elde edilmiştir. 16 M NaOH ile alkali aktive edilmiş ve 150°C'de kür edilmiş geopolimer numunelerin maksimum basınç dayanımı vermemesinin yüksek sıcaklığın geopolimer hamurunda bulunan sıvıları buharlaştırmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, alüminosilikat jelinin çökmesine neden olan aşırı hidroksit iyonlarının etkili olduğu söylenebilir (Somna vd. 2011; Ken vd. 2015). Bütün NaOH konsantrasyonları ve kür sıcaklıklarında numune yaşı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Bu

artışın devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. NaOH konsantrasyonu ile basınç dayanımı arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. Farklı NaOH konsantrasyonlarında ve farklı kür sıcaklıklarında değişken basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.

Volkanik tufün yalnız NaOH çözeltisi ile alkali aktivasyonu sonucu üretilen geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri daha önce yapılan bazı çalışmalar tarafından desteklenmektedir. Tekin (2016) yaptığı çalışmada, farklı konsantrasyonlarda NaOH çözeltisi ile Bayburt yöresinden topladığı mermer, traverten ve volkanik tuf atıklarını kullanarak geopolimer hamur numuneleri üretmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda NaOH konsantrasyonunun ve kür sıcaklığının volkanik tuf ile üretilen geopolimer hamurların basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir. Benzer şekilde Hanjitsuwan vd. (2014) NaOH konsantrasyonunun geopolimer hamurların elektriksel ve fiziksel özellikleri üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Laboratuvar ortamında basınç dayanımı elde edilemeyen geopolimer hamur numunelerinden kür sıcaklığının, alkali aktivatör tipinin ve konsantrasyonunun modifikasyonu sonucunda 41.43 MPa'ya varan basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Saf alümin-silikat esaslı hammaddelerin alkali aktivasyonu için ısıtılma için gerekli olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. Kalsiyum içeriği zengin hammaddelerin geopolimerizasyon reaksiyonlarının laboratuvar koşullarında da gerçekleşebileceği belirtilmiştir (Tennakoon, 2016; Bakharev, 2005b). Volkanik tufün kimyasal yapısı göz önünde bulundurulduğunda, laboratuvar ortamında yavaş ve yetersiz dayanım kazanmasının az miktarda kalsiyum içeriğinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca zengin alümin-silikat içeriğinin, ısıtılma sonucunda basınç dayanımında meydana gelen artış üzerinde etkili olduğu kanaatine varılmıştır. Noushini ve Castel (2016) laboratuvar koşullarında kür işleminin düşük kalsiyum içerikli geopolimer numuneler için uygun ve pratik bir seçenek olmadığını ifade etmişlerdir.

Basınç dayanımı üzerine yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, volkanik tufün alkali aktivasyon yöntemi kullanılarak geopolimer hamur üretiminde kullanılabilmesi ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, volkanik tufün yalnız NaOH çözeltisi

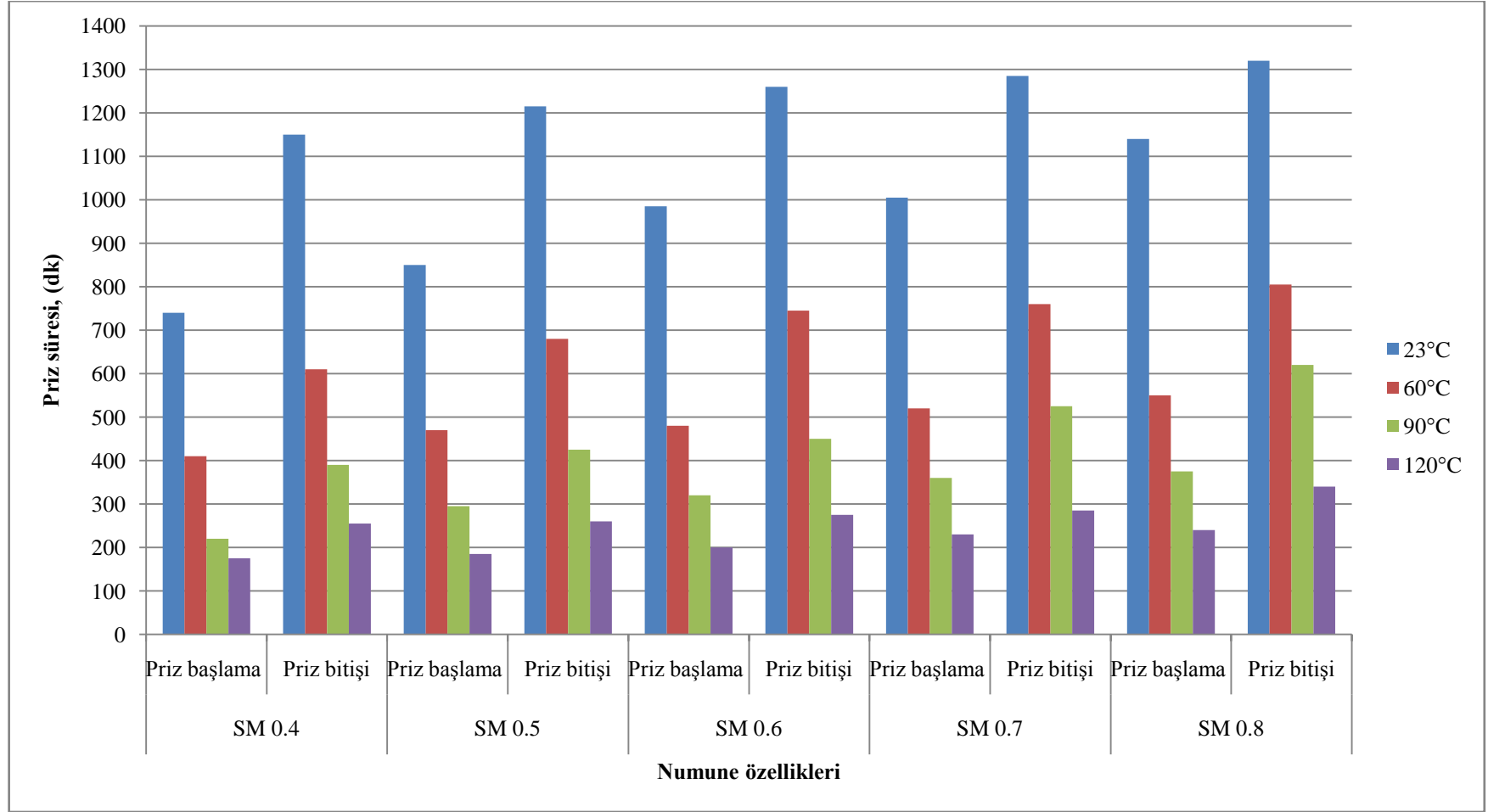
ile alkali aktive edilmesinin NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile alkali aktive edilmesine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

4.3.2. Geopolimer hamur numunelerin priz süreleri

Geopolimer hamur numunelerin priz süreleri iki farklı alkali aktivatör için tayin edilmiştir. Öğütülmüş volkanik tüfün NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ve yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmesi sonucu üretilen geopolimer numunelerin priz sürelerine kür sıcaklığının etkisi incelenmiştir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş olan geopolimer hamur numunelerinde değişken parametre olarak silis modülü belirlenmiştir. Geopolimer hamur numunelerin farklı silis modülü ve kür sıcaklıklarına göre elde edilen priz süreleri Çizelge 4.6'da ve Şekil 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		Priz süresi, (dk)	
		Silis modülü	Kür sıcaklığı, (°C)	Priz başlama	Priz bitiş
Geopolimer hamur	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.4	23 (Lab.)	740	1150
			60	410	610
			90	220	390
			120	175	255
		0.5	23 (Lab.)	850	1215
			60	470	680
			90	295	425
			120	185	260
		0.6	23 (Lab.)	985	1260
			60	480	745
			90	320	450
			120	200	275
		0.7	23 (Lab.)	1005	1285
			60	520	760
			90	360	525
			120	230	285
		0.8	23 (Lab.)	1140	1320
			60	550	805
			90	375	620
			120	240	340



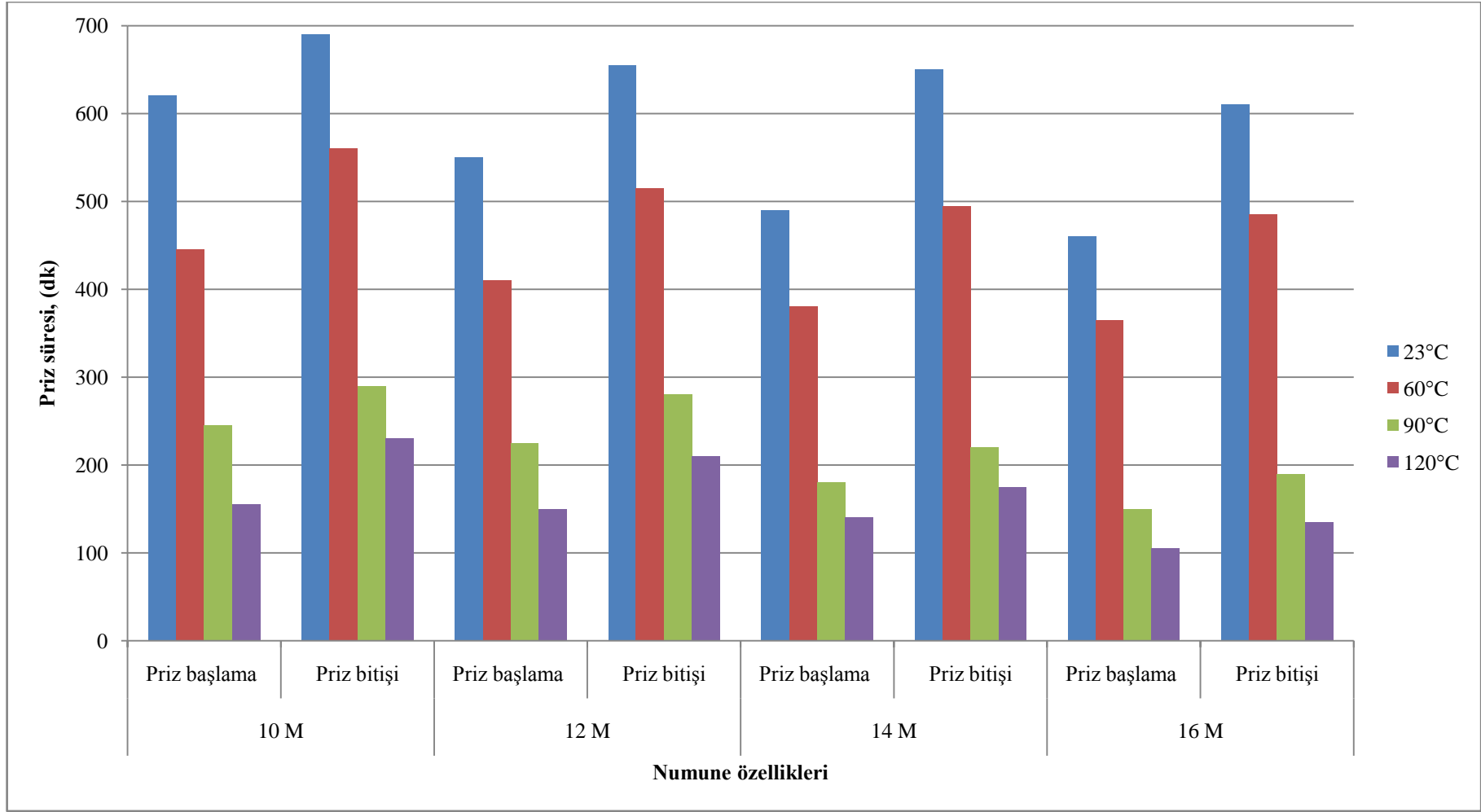
Şekil 4.9. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri incelendiğinde, kür işleminin ve silis modülünün priz sürelerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Kür sıcaklığının artması ile bütün silis modülü grupları için priz başlama ve bitiş sürelerinde belirgin bir düşüş tespit edilmiştir. Priz başlama ve bitiş sürelerindeki düşüşün sıcaklığın geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ancak silis modülünün artması ile beraber priz başlama ve bitiş sürelerinin arttığı gözlenmiştir. Benzer şekilde Bernal vd. (2011) yüksek fırın cürufu ve uçucu kül esaslı geopolimer hamur numuneleri üzerine yaptığı çalışmada silis modülü arttıkça priz sürelerinin genellikle arttığını ifade etmişlerdir. Priz sürelerindeki artışın volkanik tüf bünyesindeki bağların çözünmesini sağlayan NaOH içeriğinin silis modülü arttıkça azalmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. OH⁻ varlığının hammadde bünyesindeki silis ve alümin iyonlarının çözünmesini sağladığı için aktivasyon reaksiyonlarını hızlandırdığı literatürde belirtilmiştir (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 2001). Silis modülü daha düşük olan (daha fazla OH⁻ içeren) aktivatörlerin daha hızlı çözünmesi ve daha hızlı priz alması bu durumdan kaynaklanmaktadır (Bernal vd. 2011). Sadece NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz sürelerinin daha düşük olması da bu görüşü desteklemektedir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerde en kısa priz başlama ve bitiş süreleri silis modülünün 0.4, kür sıcaklığının 120°C olduğu karışımdan sırasıyla 175 ve 255 dakika olarak elde edilmiştir. En uzun priz başlama ve bitiş süreleri ise silis modülünün 0.8 olduğu, laboratuvar ortamında kür edilen numunelerden sırasıyla 1140 ve 1320 dakika olarak elde edilmiştir.

Geopolimer hamur numunelerin farklı NaOH konsantrasyonu ve kür koşullarına göre elde edilen priz süreleri Çizelge 4.7'de ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.7. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler		Priz süresi, (dk)	
		NaOH konsantrasyonu, (M)	Kür sıcaklığı, (°C)	Priz başlama	Priz bitiş
Geopolimer hamur	NaOH	10	23 (Lab.)	620	690
			60	445	560
			90	245	290
			120	155	230
		12	23 (Lab.)	550	655
			60	410	515
			90	225	280
			120	150	210
		14	23 (Lab.)	490	650
			60	380	495
			90	180	220
			120	140	175
		16	23 (Lab.)	460	610
			60	365	485
			90	150	190
			120	105	135



Şekil 4.10. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri

Yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunelerin priz süreleri incelendiğinde, kür işleminin ve NaOH konsantrasyonunun priz sürelerini önemli ölçüde değiştirdiği gözlenmiştir. Kür sıcaklığının artması ile bütün NaOH konsantrasyonu değerleri için priz başlama ve bitiş sürelerinde belirgin bir düşüş tespit edilmiştir. Ayrıca NaOH konsantrasyonunun artması ile beraber priz başlama ve bitiş sürelerinin düştüğü gözlenmiştir. Kür sıcaklığının artması geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırdığı için, NaOH konsantrasyonunun artması ise alüminosilikat hammadde bünyesindeki bağların çözünmesini kolaylaştırdığı için priz başlama ve bitiş sürelerinin kışalmasına yol açmıştır. Bu çıkarımlar ile uyumlu olarak en kısa priz başlama ve bitiş süreleri NaOH konsantrasyonunun 16 M, kür sıcaklığının 120°C olduğu karışımdan sırasıyla 105 ve 135 dakika olarak elde edilmiştir. En uzun priz başlama ve bitiş süreleri ise NaOH konsantrasyonunun 10 M olduğu, laboratuvar ortamında kür edilen numunelerden sırasıyla 620 ve 690 dakika olarak elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen priz süresi ölçümlerinde, kimyasal reaksiyonların bu ortamda yavaş ilerlemesinden dolayı priz sürelerinin oldukça uzun olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir (Fernandez-Jimenez vd. 2006b; Davidovits, 2008a; Nath, 2014).

Silis modülünün, aktivatör tipinin ve konsantrasyonunun geopolimerlerin priz sürelerine önemli etkisi olduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir (Siyal vd. 2016; Al Bakri vd. 2011; Karakoç vd. 2014). Tekin (2016) farklı konsantrasyonlarda NaOH çözeltisi ile Bayburt yöresinden topladığı mermer, traverten ve volkanik tüf atıklarını kullanarak ürettiği geopolimer hamur numunelerin priz sürelerini incelemiştir. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça priz başlama ve bitiş sürelerinin kısaldığı görülmüştür. Benzer şekilde Xin vd. (2012) hammadde olarak cüruf ve uçucu külün, NaOH ve Na₂CO₃ ile aktive edilmesi sonucu ürettikleri geopolimer hamur numunelerin priz sürelerini tayin etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda NaOH içeriği arttıkça priz süresinin kısaldığı ifade edilmiştir. Cheng ve Chiu (2003) yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerlerin priz süreleri üzerine yaptığı çalışmada alkali aktivatör olarak KOH kullanmışlardır. 60°C'de kür edilen karışımların priz sürelerinin laboratuvar koşullarında kür edilen karışımlardan daha kısa olduğu gözlenmiştir.

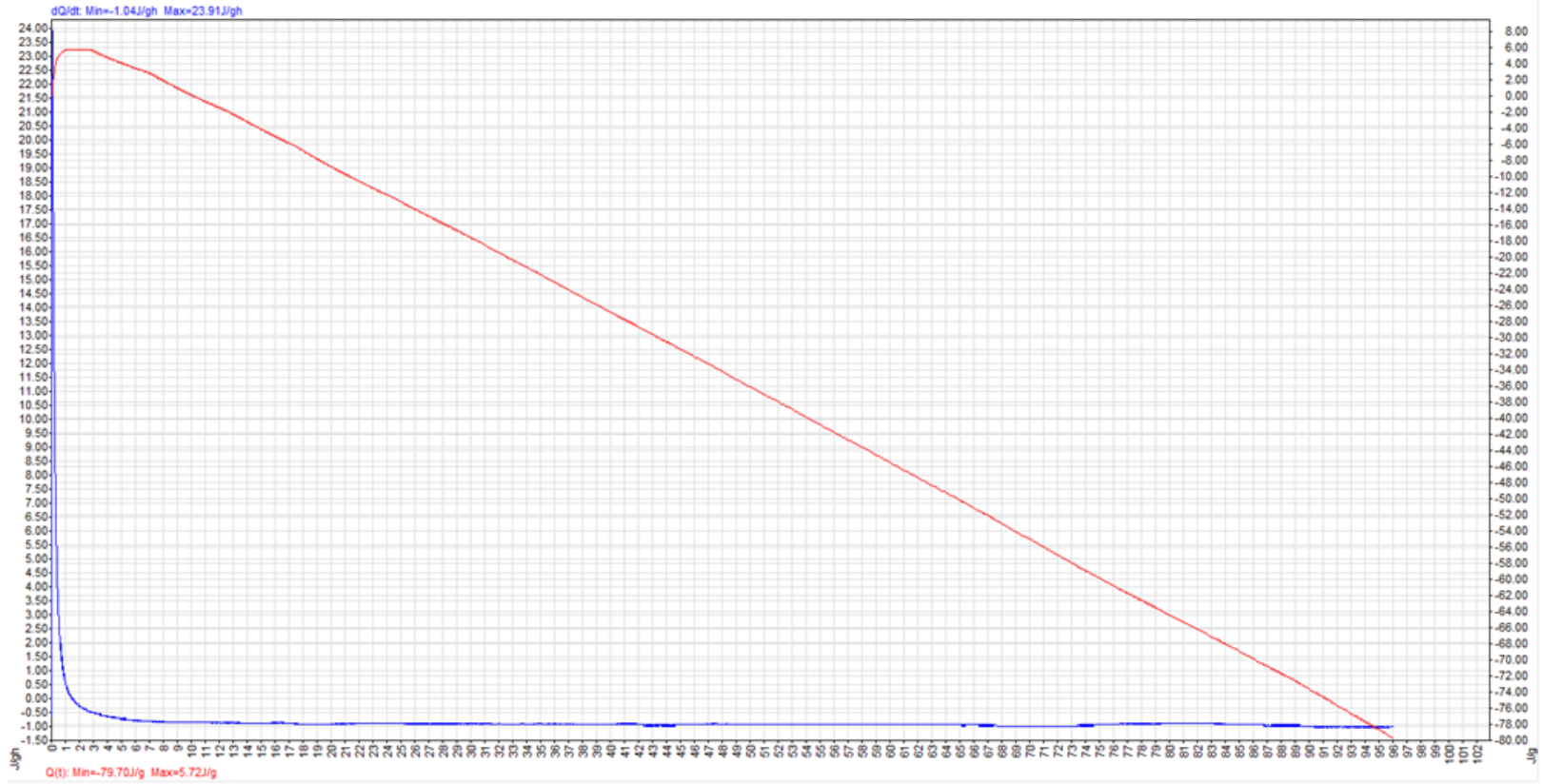
Volkanik tuf esaslı geopolimer hamur numunelerin priz sürelerine aktivatör tipinin etkisi irdelendiğinde, yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş karışımların priz sürelerinin NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş karışımlara kıyasla daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Artan kür sıcaklığı her iki aktivatör tipi için priz sürelerini belirgin ölçüde düşürmüştür.

4.3.3. Geopolimer hamur numunelerin hidrasyon ısıları

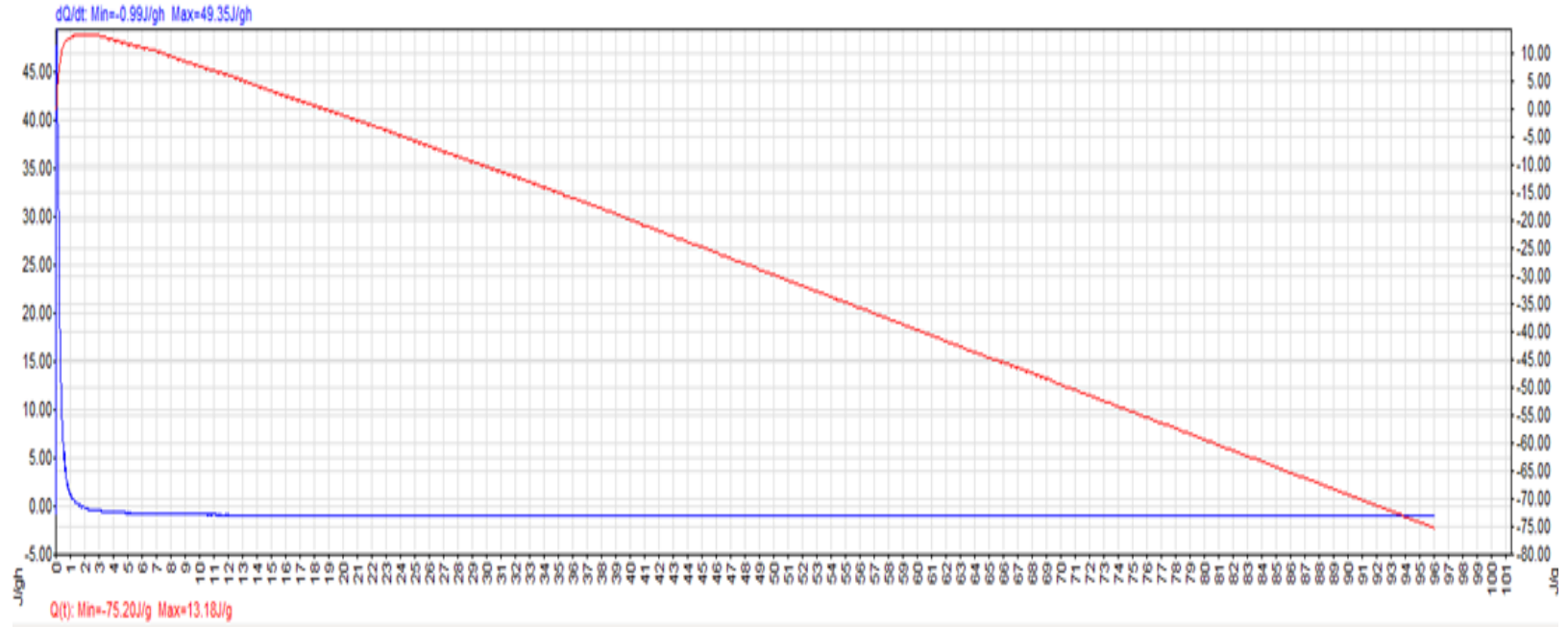
Geopolimer hamur numunelerin iki farklı alkali aktivatör çözeltisi için elde edilmiş olan hidrasyon ısıları değerleri Çizelge 4.8’de ve Şekil 4.11-4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Geopolimer hamur numunelerin hidrasyon ısıları değerleri

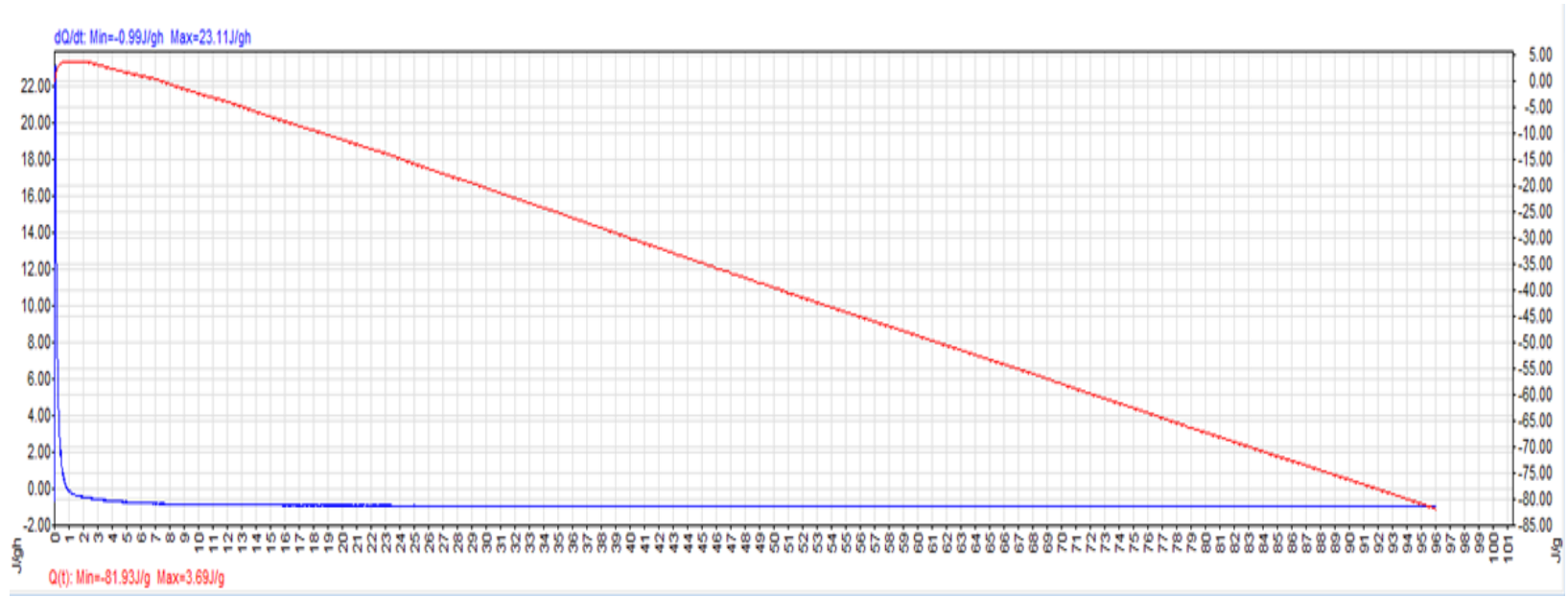
Alkali aktivatör tipi	Aktivatörün değişken parametresi		Hidrasyon ısıları
	Silis modülü	NaOH konsantrasyonu, (M)	Q(t), (J/g)
NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.4	-	5.72
	0.5	-	13.18
	0.6	-	3.69
	0.7	-	3.97
	0.8	-	1.29
NaOH	-	10	8.76
	-	12	8.81
	-	14	4.45
	-	16	12.51



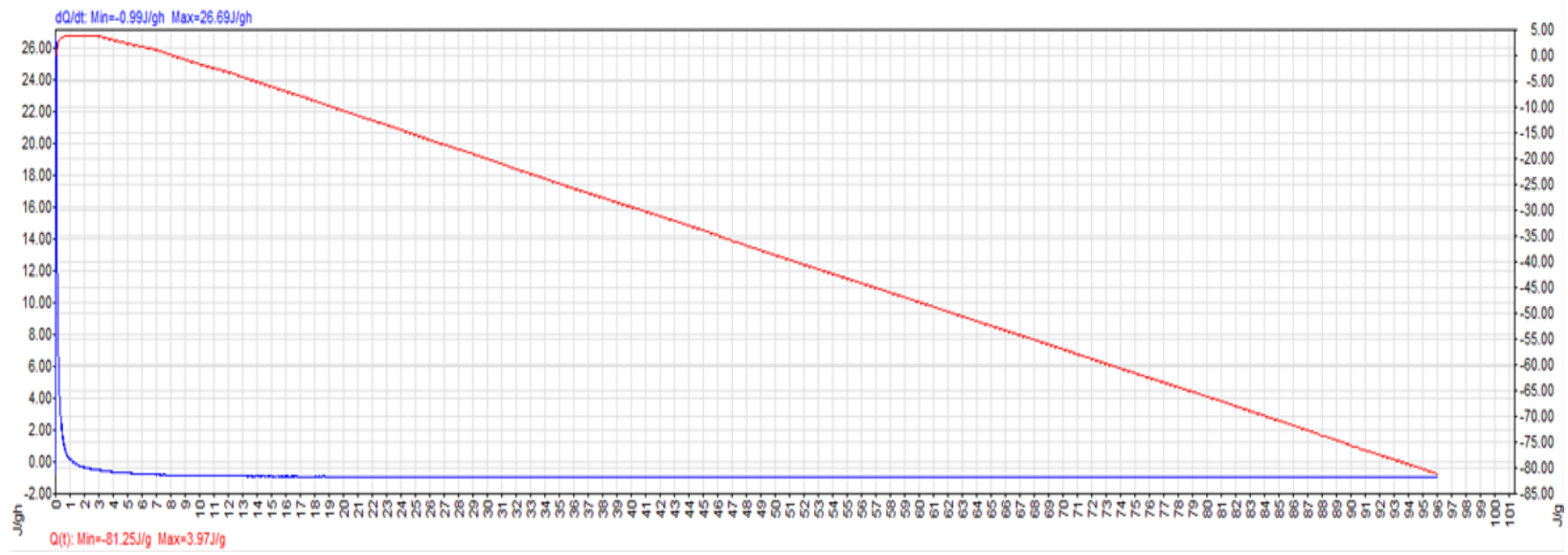
Şekil 4.11. Silis modülü 0.4 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



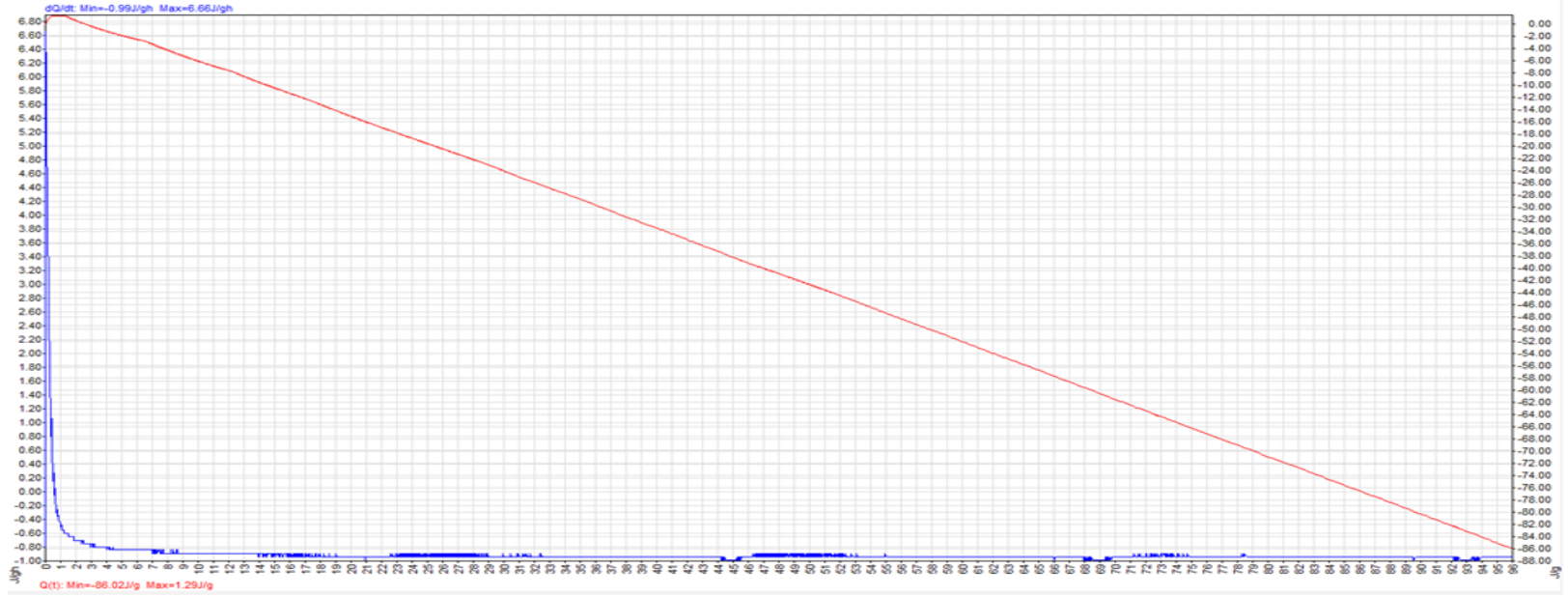
Şekil 4.12. Silis modülü 0.5 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



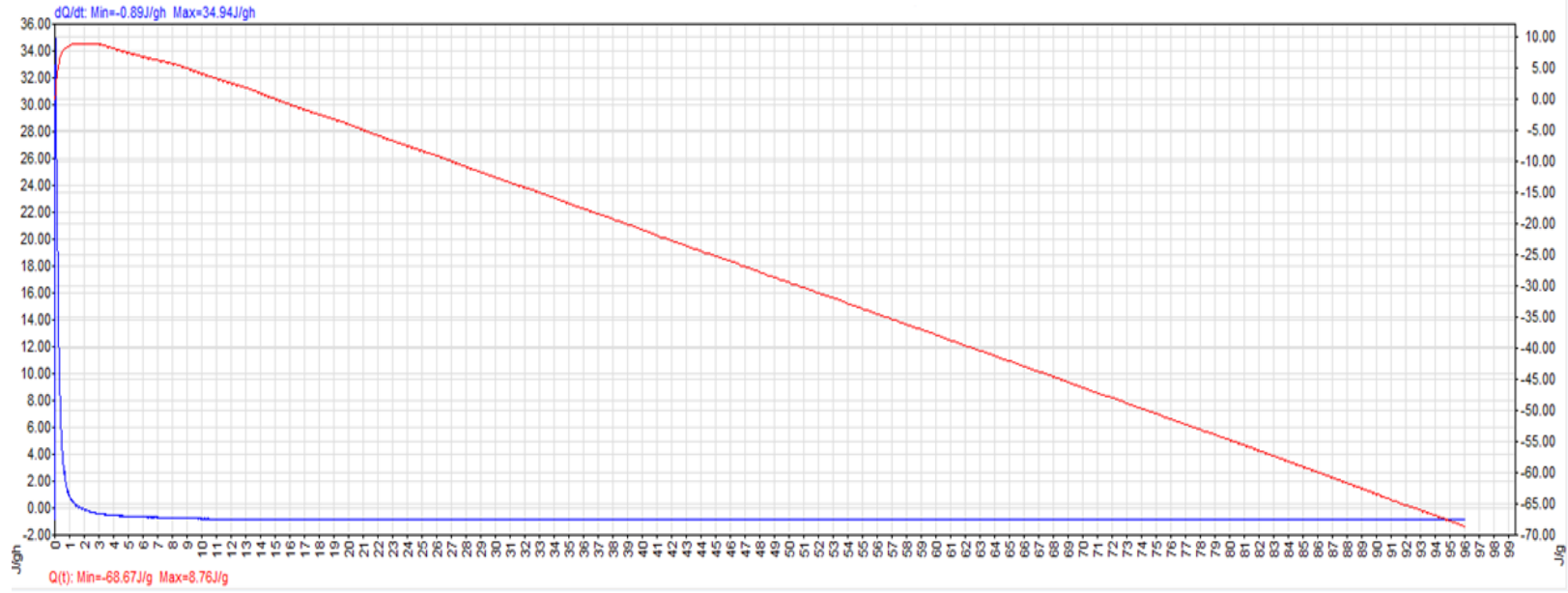
Şekil 4.13. Silis modülü 0.6 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



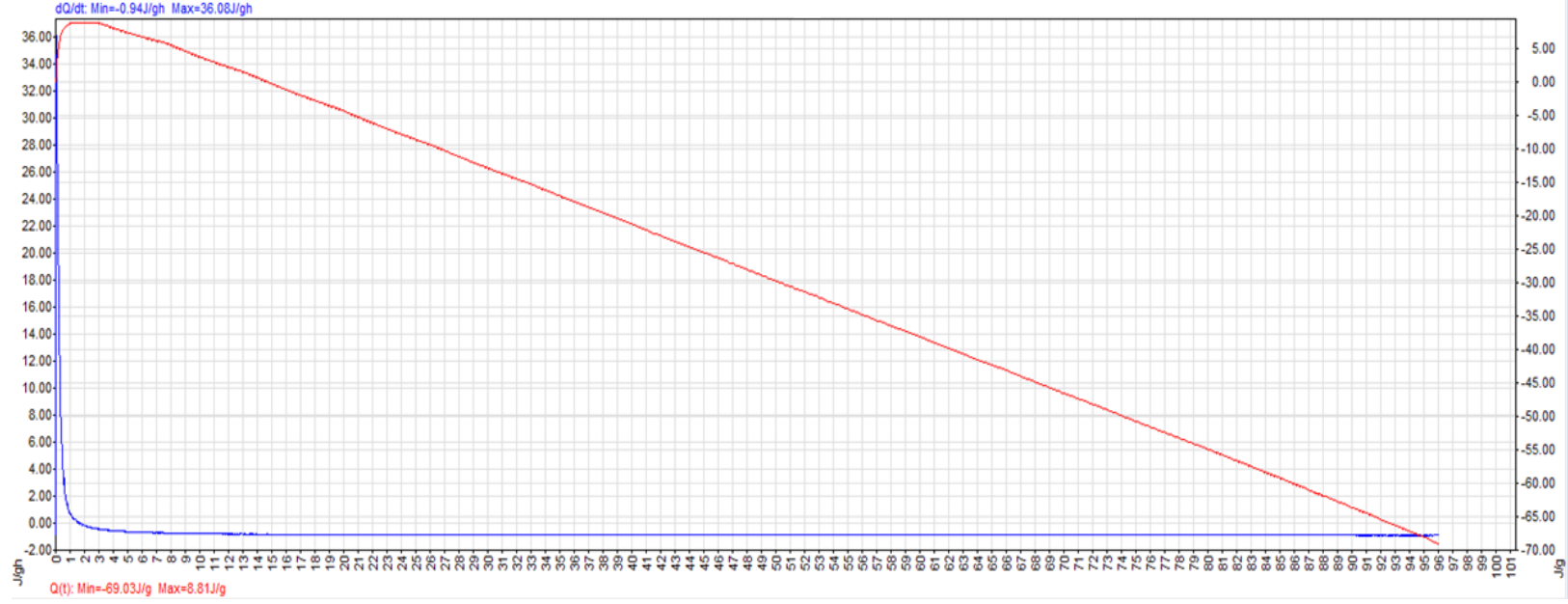
Şekil 4.14. Silis modülü 0.7 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



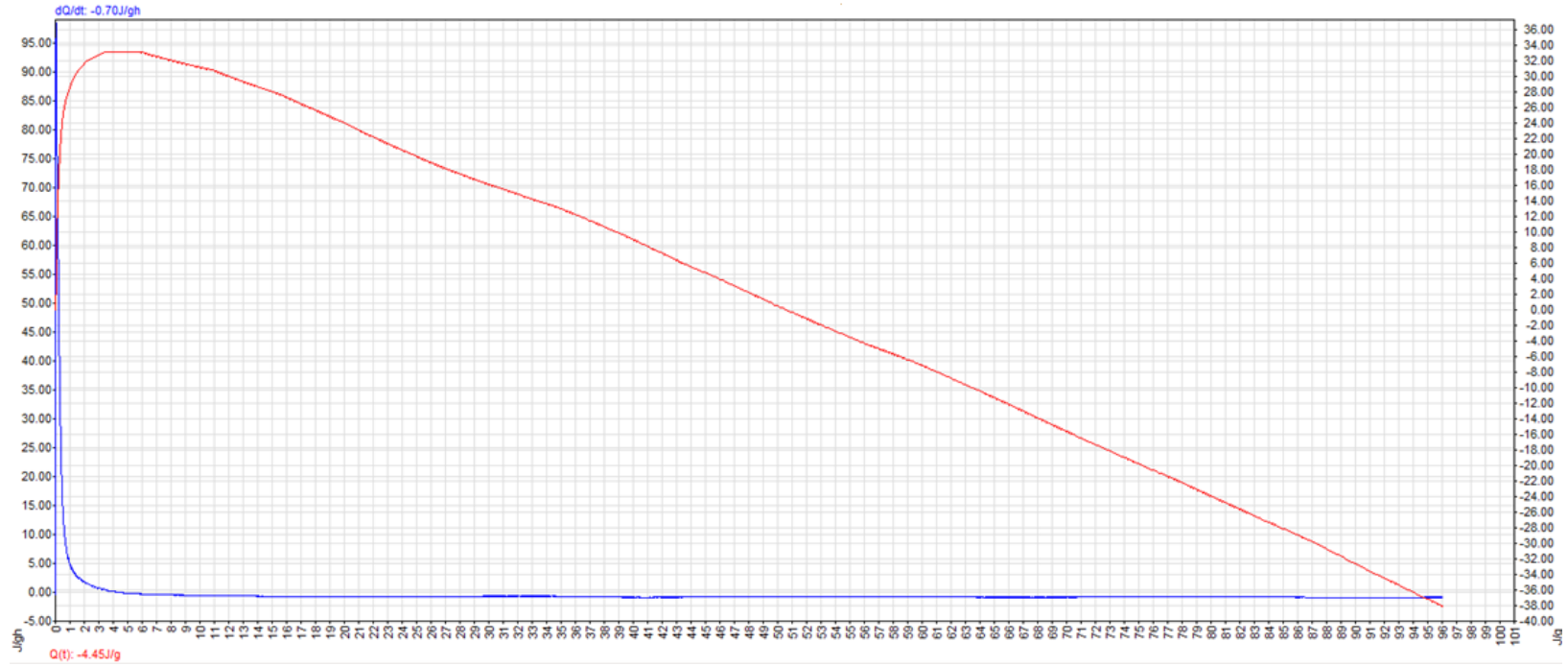
Şekil 4.15. Silis modülü 0.8 olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



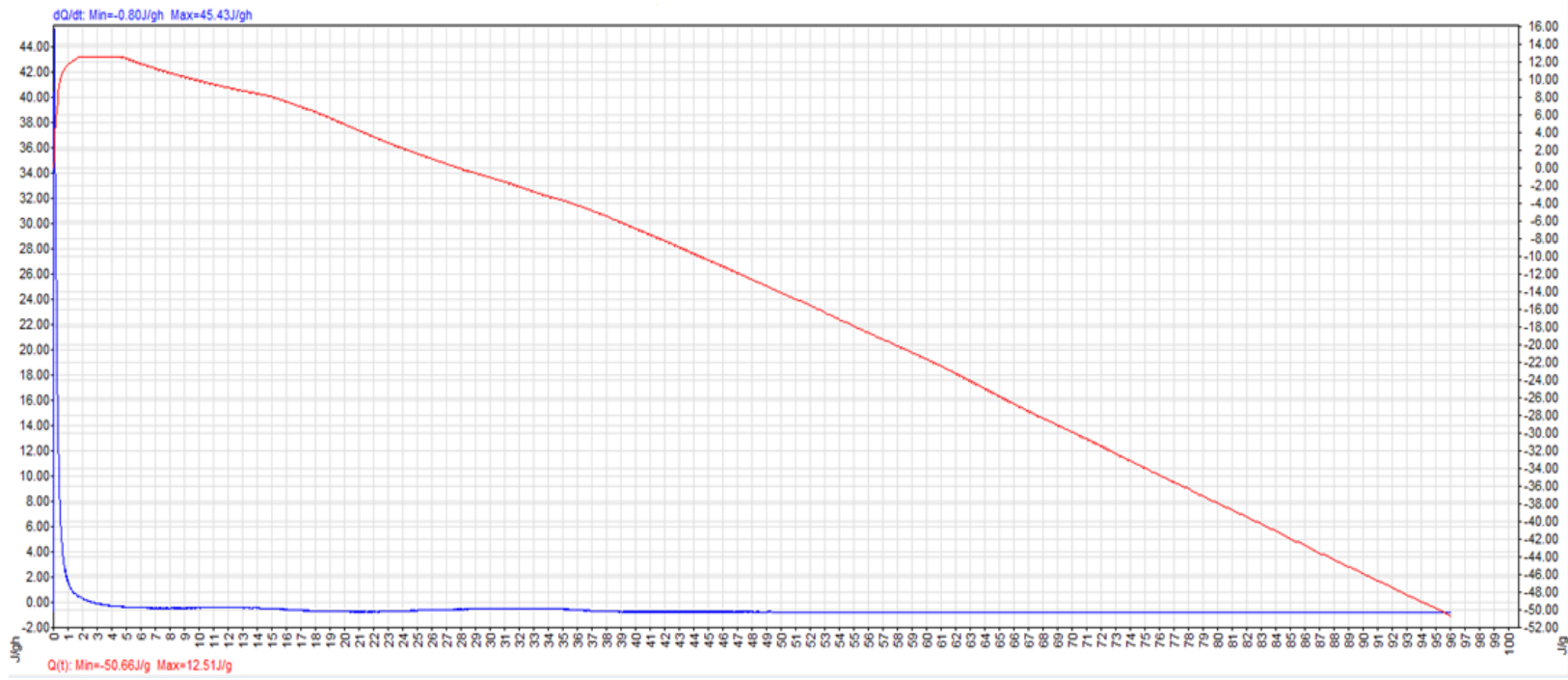
Şekil 4.16. NaOH konsantrasyonu 10 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



Şekil 4.17. NaOH konsantrasyonu 12 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



Şekil 4.18. NaOH konsantrasyonu 14 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



Şekil 4.19. NaOH konsantrasyonu 16 M olan geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı

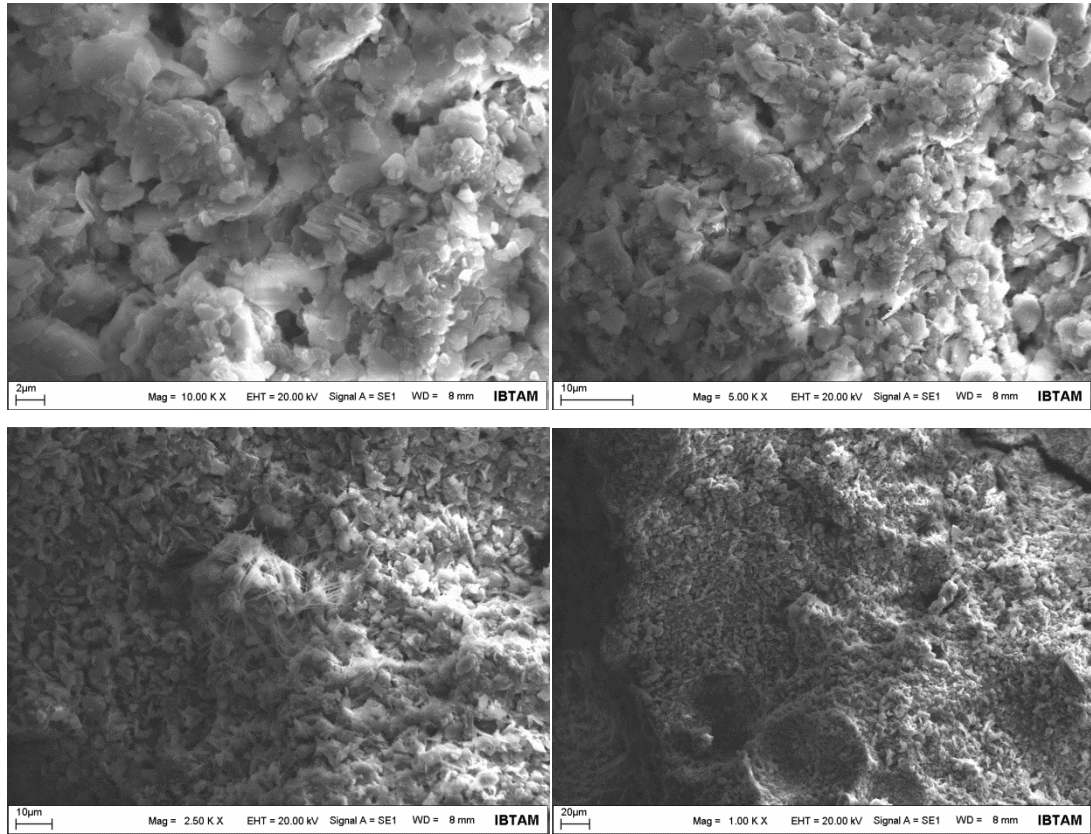
Elde edilen deneysel bulgular incelendiğinde, 1.29 J/g ile 13.18 J/g arasında değişen hidrasyon ısıları değerlerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Bu durum volkanik tüf esaslı geopolimer karışımların geopolimerizasyon reaksiyonlarının laboratuvar ortamında oldukça yavaş ilerlediğini göstermektedir. Geopolimer hamur numunelerinden 3 ve 7 günlük basınç dayanımı değeri elde edilememesi, ancak bazı karışımlarda 28 günlük basınç dayanımı değeri elde edilmesi bu tespiti doğrulamaktadır. Nocun-Wczelik (2006) yaptığı çalışmada öğütülmüş cürufu farklı konsantrasyonlarda NaOH çözeltisi ile alkali aktive ederek geopolimer hamur karışımları üretmiştir. Geopolimer numunelerin 24 saatlik hidrasyon ısıları değerleri 50 J/g ile 170 J/g arasında değişkenlik göstermiştir. Karakoç vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, normal Portland çimentosunun ve Elazığ ferrokrom cürufu esaslı geopolimer hamur karışımlarının hidrasyon ısıları değerleri izotermal kalorimetre ile tayin edilmiştir. 96 saatlik hidrasyon ısıları değerleri normal Portland çimentosu için 251 J/g, geopolimer karışımlar için ise maksimum 56.25 J/g olarak ölçülmüştür. Singh vd. (2016) yaptıkları çalışmada uçucu kül/cüruf esaslı geopolimerlerin hidrasyon ısıları değerlerini 73 J/g ile 86 J/g arasında elde etmişlerdir. Volkanik tüf esaslı geopolimer hamur karışımlarının hidrasyon ısıları değerlerinin yukarıda belirtilen bulgularla kıyaslandığında oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Hidrasyon ısıları ile silis modülü ve NaOH konsantrasyonu arasında ilişki kurulamamıştır. Her iki aktivatör ile aktive edilmiş olan geopolimer hamur numunelerin hidrasyon ısılarının normal Portland çimentosuna kıyasla çok düşük olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, Nath ve Kumar (2013) tarafından elde edilen cüruf esaslı geopolimer hamur karışımlarının 24 saatlik toplam hidrasyon ısıları değerlerinin volkanik tüf esaslı geopolimer karışımlarının 96 saatlik toplam hidrasyon ısıları değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Geopolimer bağlayıcıların normal Portland çimentosundan daha az hidrasyon ısıları açığa çıkardığı çeşitli araştırmalarda ifade edilmiştir (Angulo-Ramirez vd. 2017). Ancak volkanik tüf esaslı geopolimer karışımların hidrasyon ısılarının diğer geopolimer karışımlarından oldukça düşük çıkmasının volkanik tüfün geopolimerizasyon reaksiyonların laboratuvar koşullarında yavaş ilerlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

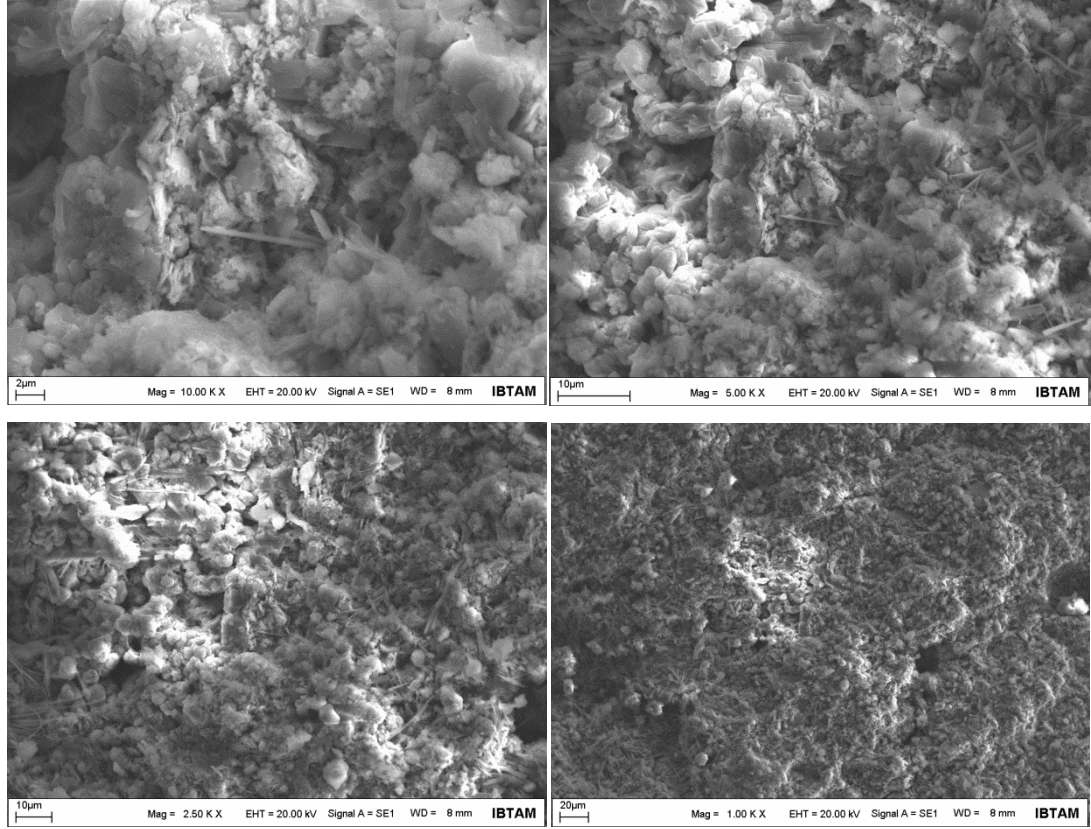
4.3.4. Geopolimer hamur numunelerin mikroyapıları

4.3.4.1. Geopolimer hamur numunelerin SEM analizleri

Geopolimer hamur karışımlarının SEM analizleri, her iki alkali aktivatör tipi için ($\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ve NaOH çözeltisi) maksimum basınç dayanımının elde edildiği numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ve NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük numunelerden farklı ölçeklerde alınmış SEM görüntüleri Şekil 4.20-4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Silis modülü 0.8, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer hamur numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri



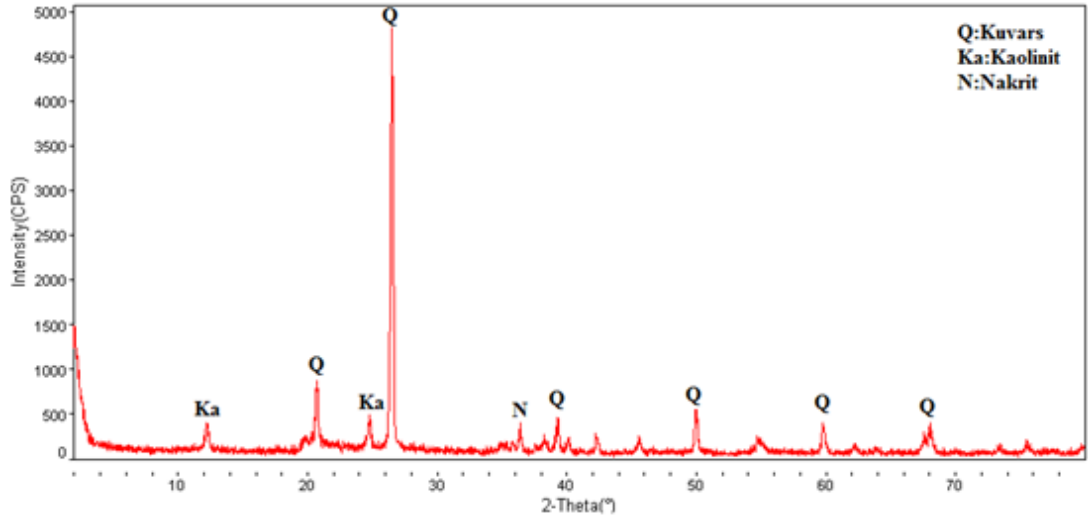
Şekil 4.21. NaOH konsantrasyonu 12 M, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer hamur numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri

Alkali aktivasyon yöntemiyle elde edilen reaksiyon ürünleri hammaddenin kimyasal bileşimine bağlıdır (Lecomte vd. 2006). Volkanik tüf gibi Si ve Al bakımından zengin hammaddelerin alkali aktivasyon reaksiyonu ürünü SiO_4 ve AlO_4 'in oksijen atomlarını paylaşarak oluşturduğu üç boyutlu tetrahedral bir yapı olan alüminosilikat jeldir (Lee ve Lee, 2015). SEM görüntüleri incelendiğinde her iki numunede yoğun ve sıkı bir mikroyapı tespit edilmiştir. Bununla birlikte NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer numunelerin mikroyapılarının daha dolu ve ağsı jel yapısına sahip olduğu söylenebilir. Bu durum NaOH miktarındaki artış sonucu geopolimerizasyon reaksiyonlarında meydana gelen artıştan kaynaklı olabilir (Girgin, 2016). Daha yoğun mikroyapı sonucu görülen daha yüksek basınç dayanımı Zhou vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada doğrulanmıştır. NaOH+ Na_2SiO_3 çözeltisi ile aktive edilmiş numunede küre şeklinde boşluklar ve mikro çatlaklar görülmektedir. NaOH+ Na_2SiO_3 çözeltisi ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımının daha düşük çıkmasında Şekil 4.20'de görülen boşluk ve mikro çatlakların etkili olduğu söylenebilir. Hwang ve Huynh (2015) çatlakların kür işlemi esnasında su buharlaşması sonucu meydana gelen büzülme nedeniyle, boşlukların ise

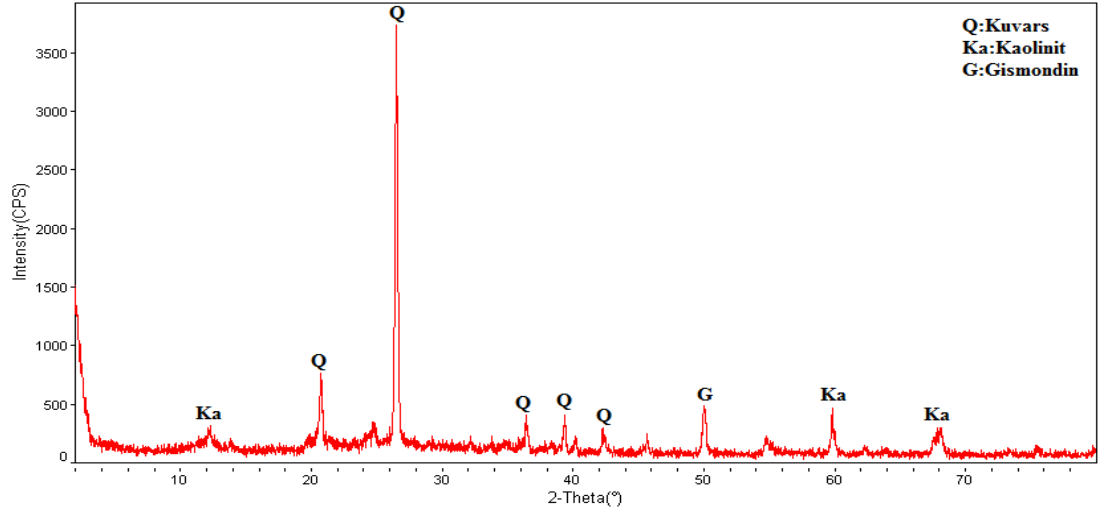
karıştırma esnasında hapsolan hava kabarcıkları ve buharlaşma nedeniyle oluştuğunu belirtmişlerdir. SEM görüntülerinde tespit edilen kusurlar ve ağsı yapı daha önce yapılmış çalışmalarda da belirtilmiştir (Tekin, 2016; Angulo-Ramírez vd. 2017).

4.3.4.2. Geopolimer hamur numunelerin XRD analizleri

Geopolimer hamur numunelerin XRD analizleri, her iki alkali aktivatör çözeltisi için (NaOH+Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltisi) maksimum basınç dayanımının elde edildiği 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geopolimer hamur numunelerin XRD analizleri Şekil 4.22-4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.22. Silis modülü 0.8, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer hamur numunesinin XRD analizi



Şekil 4.23. NaOH konsantrasyonu 12 M, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer hamur numunesinin XRD analizi

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur numunesinde kuvars (SiO₂), kaolinit (Al₂Si₂O₅(OH)₄), nakrit (Al₂Si₂O₅(OH)₄) mineralleri, NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş numunede ise kuvars (SiO₂), kaolinit (Al₂Si₂O₅(OH)₄), gismondin (CaAl₂Si₂O₈(H₂O)) mineralleri tespit edilmiştir. Kuvars minerali her iki alkali tipi için belirgin pik olarak ortaya çıkmıştır.

4.4. Geopolimer Harç ile ilgili Bulgular ve Tartışma

Geopolimer harç numunelerin deneysel parametreleri belirlenirken hamur aşamasının deneysel bulguları göz önünde tutulmuştur. Geopolimer hamur aşamasında olduğu gibi, harç aşamasında da iki farklı alkali aktivatör çözeltisi kullanılmıştır. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç karışımlarının silis modülü 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1.0, yalnız NaOH çözeltisi ise aktive edilmiş karışımların aktivatör konsantrasyonu 10, 12, 14 ve 16 M olarak seçilmiştir. Kür sıcaklıklarının belirlenmesinde, hamur aşamasında daha yüksek basınç dayanımının elde edildiği sıcaklıklar tercih edilmiştir. Buna göre NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilmiş harç karışımları 90, 105 ve 120°C'de, yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş harç karışımları ise 90, 120 ve 150°C'de kür işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca geopolimer harç karışımlarında ilave bir parametre olarak ç/b oranı eklenmiştir. Hazırlanan karışımlar 0.35 ve 0.45 ç/b oranı olmak üzere iki farklı oranda dökülmüştür.

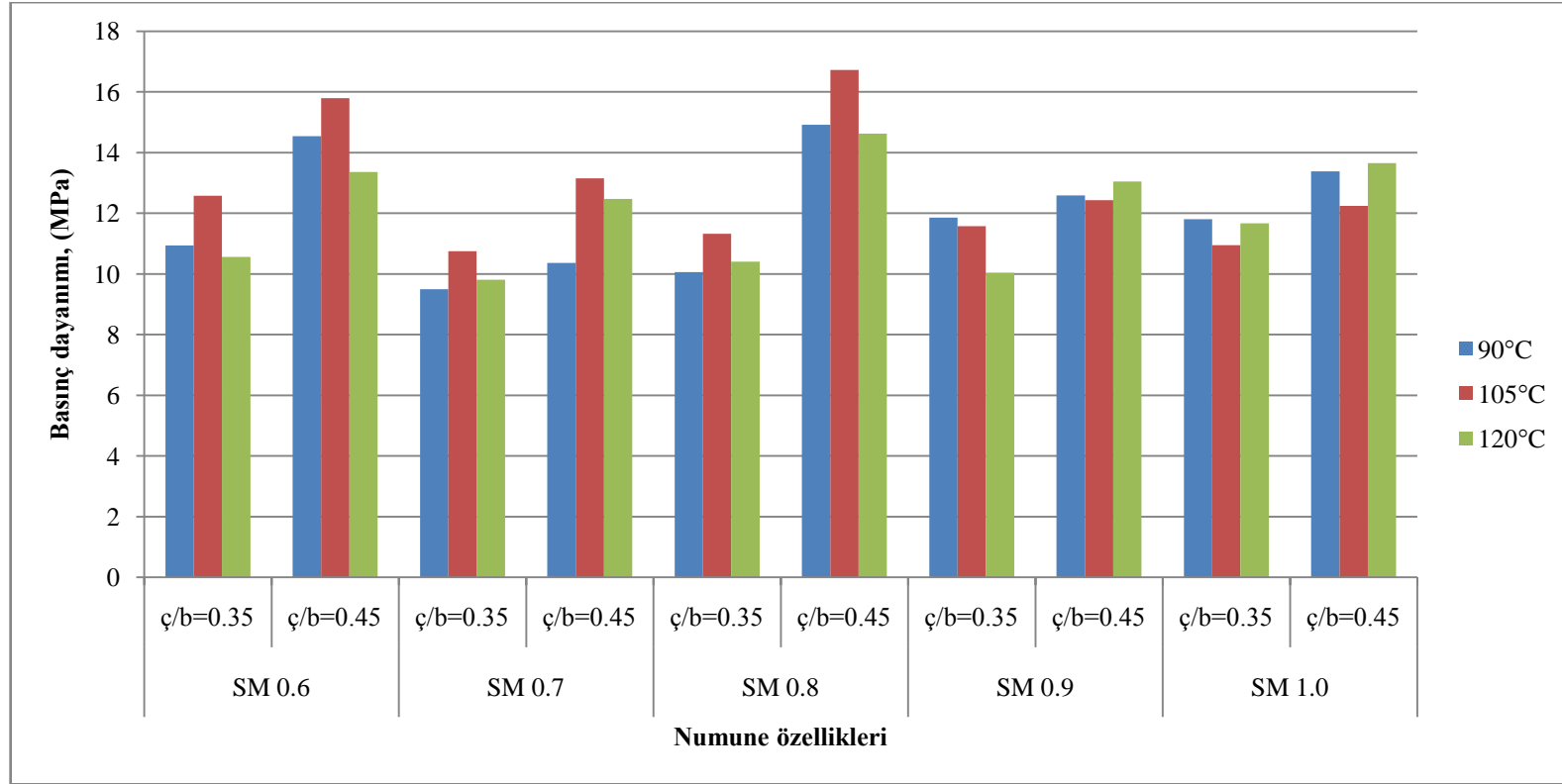
Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı (3, 7 28 ve 90 günlük) değerleri, UPV değerleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen harç numunelere ait deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.4.1. Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı

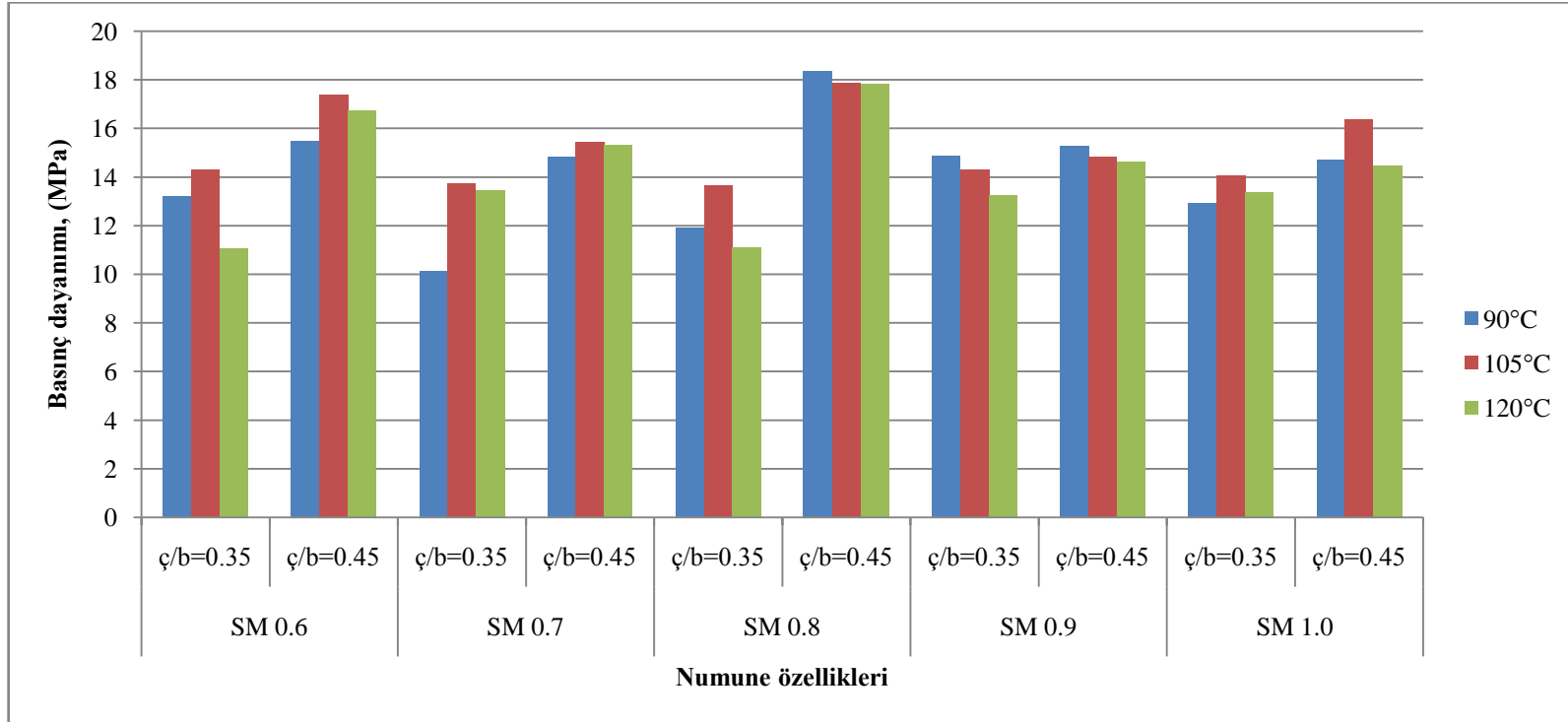
NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ve yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç karışımlarının basınç dayanımı değerleri önemli farklılıklar göstermiştir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç karışımlarının farklı silis modülü, ç/b oranları ve kür koşullarına göre elde edilmiş 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.9 ve Şekil 4.24-4.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerleri

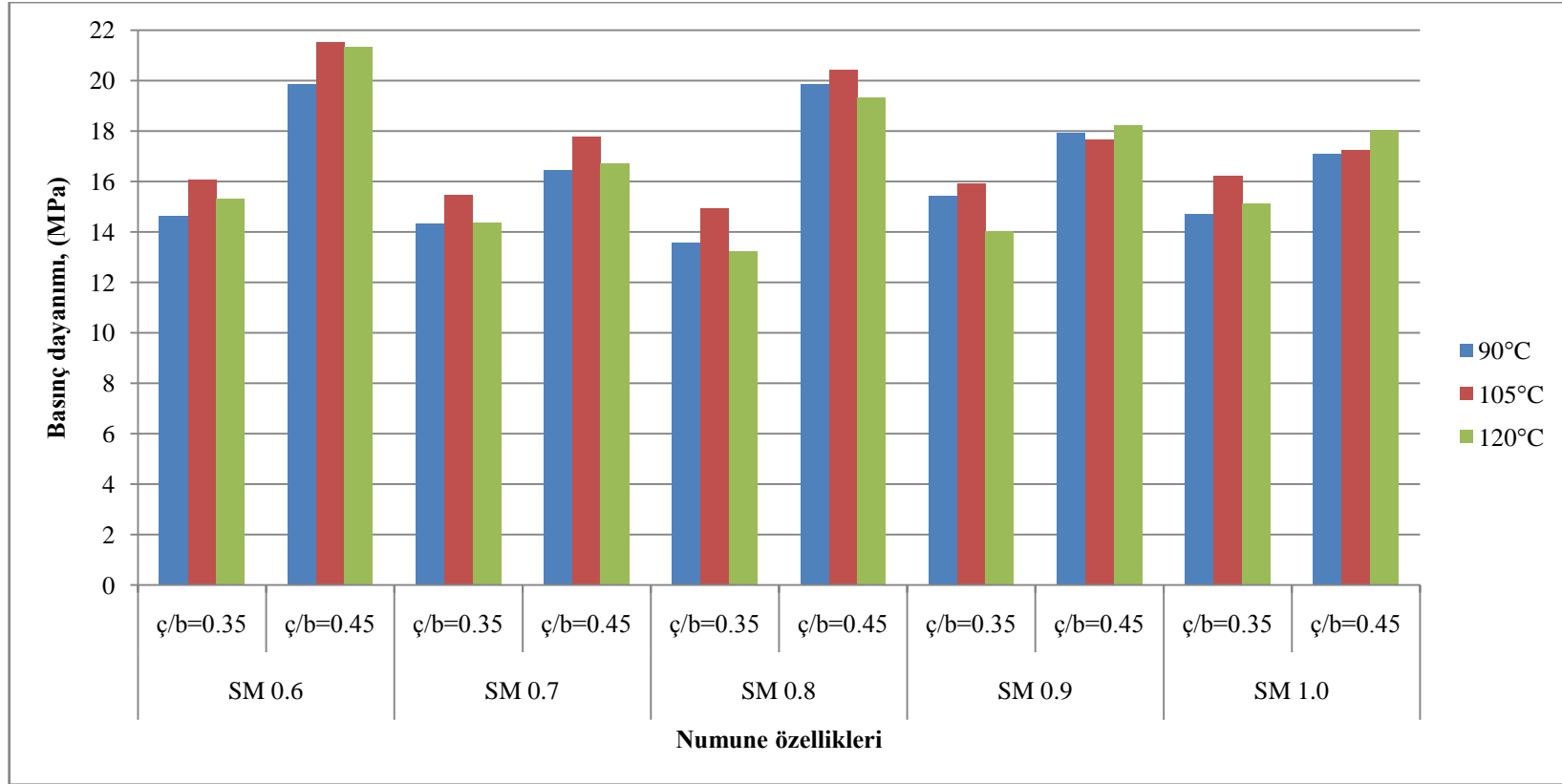
Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			Basınç dayanımı, (MPa)			
		Silis modülü	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Geopolimer harç	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.6	0.35	90	10.94	13.20	14.64	16.94
				105	12.58	14.31	16.08	20.07
				120	10.56	11.06	15.32	18.18
			0.45	90	14.54	15.48	19.88	23.88
				105	15.80	17.37	21.52	25.83
				120	13.36	16.72	21.33	23.92
		0.7	0.35	90	9.50	10.11	14.32	14.86
				105	10.75	13.73	15.45	18.90
				120	9.81	13.46	14.38	16.95
			0.45	90	10.36	14.82	16.45	17.76
				105	13.15	15.44	17.76	21.42
				120	12.47	15.33	16.71	19.03
		0.8	0.35	90	10.06	11.91	13.58	16.11
				105	11.32	13.65	14.96	16.35
				120	10.41	11.09	13.23	19.43
			0.45	90	14.92	18.33	19.85	24.46
				105	16.73	17.88	20.41	23.45
				120	14.63	17.82	19.32	24.48
		0.9	0.35	90	11.86	14.87	15.43	20.04
				105	11.58	14.31	15.94	18.52
				120	10.04	13.25	14.02	15.07
			0.45	90	12.59	15.26	17.94	21.68
				105	12.43	14.84	17.65	20.47
				120	13.05	14.61	18.22	21.13
		1.0	0.35	90	11.81	12.91	14.72	15.22
				105	10.95	14.06	16.24	17.41
				120	11.67	13.35	15.11	16.45
			0.45	90	13.38	14.72	17.10	19.53
				105	12.24	16.36	17.25	18.94
				120	13.65	14.44	18.06	19.06



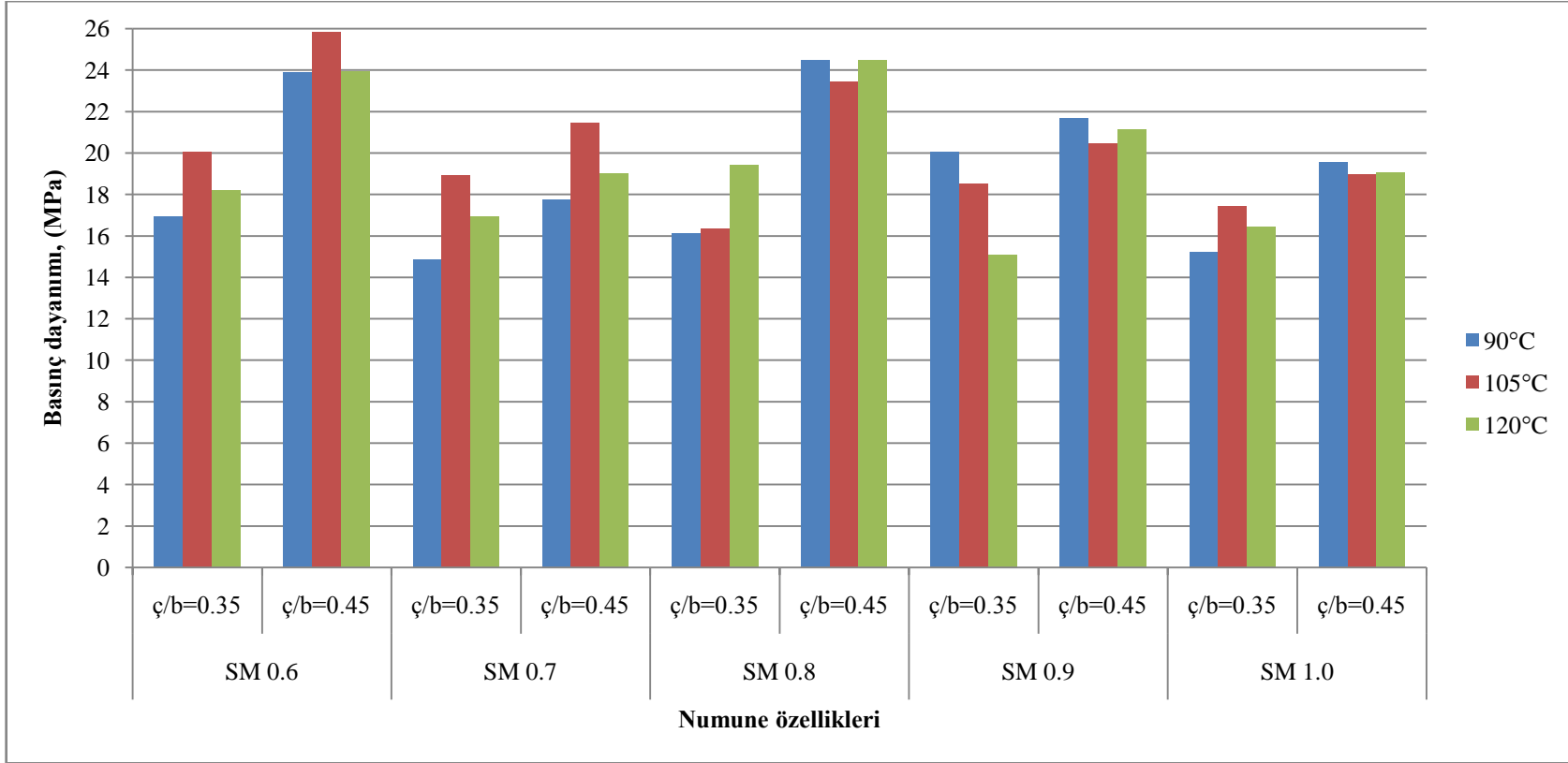
Şekil 4.24. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.25. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.26. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.27. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin deneysel bulguları incelendiğinde, silis modülü, kür sıcaklığı ve ç/b oranının basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Ç/b oranının etkisi göz önünde bulundurulduğunda, bütün silis modülü, kür sıcaklığı ve numune yaşlarında 0.45 ç/b oranının, 0.35 ç/b oranına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte numune yaşı arttıkça bütün karışımlarda basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir.

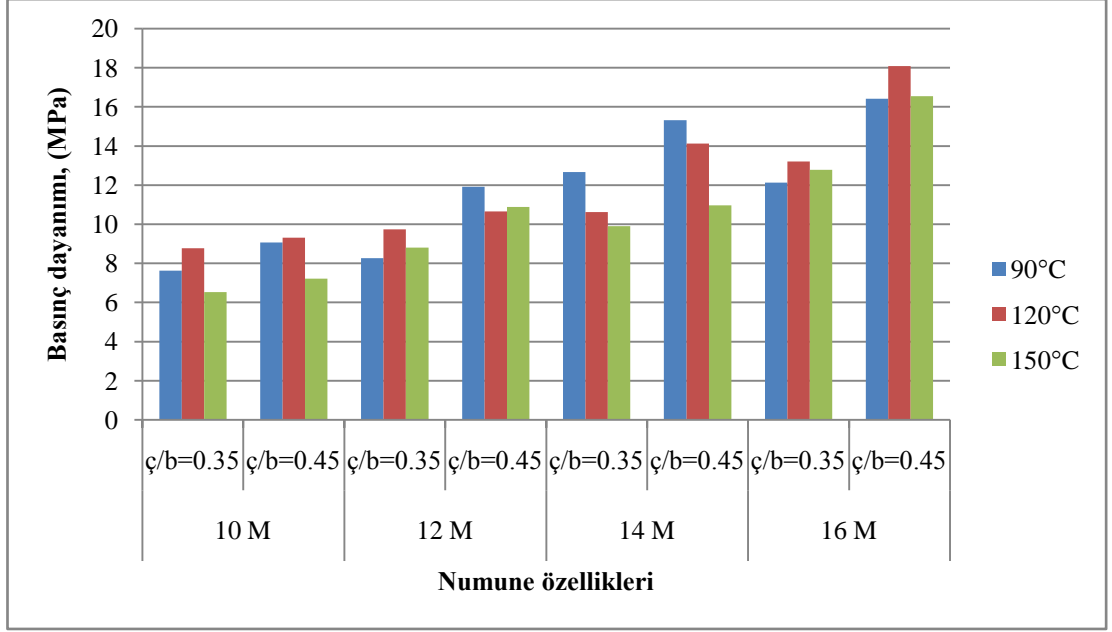
Silis modülü geopolimer harçların basınç dayanımı üzerinde önemli etkiye sahiptir (Chi, 2015). Volkanik tüf esaslı geopolimer harçlarda 0.6 ve 0.8 silis modülü değerlerinin bütün numune yaşlarında daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. Ancak silis modülü ile basınç dayanımı arasında doğrudan bir ilişki elde edilememiştir. Kür sıcaklığının etkisi irdelendiğinde, 90, 105 ve 120°C kür sıcaklıklarının farklı silis modülü ve numune yaşlarında değişken sonuçlar gösterdiği görülmüştür. Ancak aynı silis modülü, ç/b oranı ve yaş gruplarında farklı kür sıcaklıkları için yakın basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç karışımlarında maksimum basınç dayanımı, silis modülünün 0.6, ç/b oranının 0.45 ve kür sıcaklığının 105°C olduğu 90 günlük numunede, 25.83 MPa olarak elde edilmiştir. Minimum basınç dayanımı ise silis modülünün 0.7, ç/b oranının 0.35 ve kür sıcaklığının 90°C olduğu 3 günlük numunede, 9.50 MPa olarak elde edilmiştir. Djobo vd. (2016) NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive ettikleri volkanik kül esaslı geopolimer harç numunelerinde maksimum basınç dayanımını 37.9 MPa olarak elde etmişlerdir.

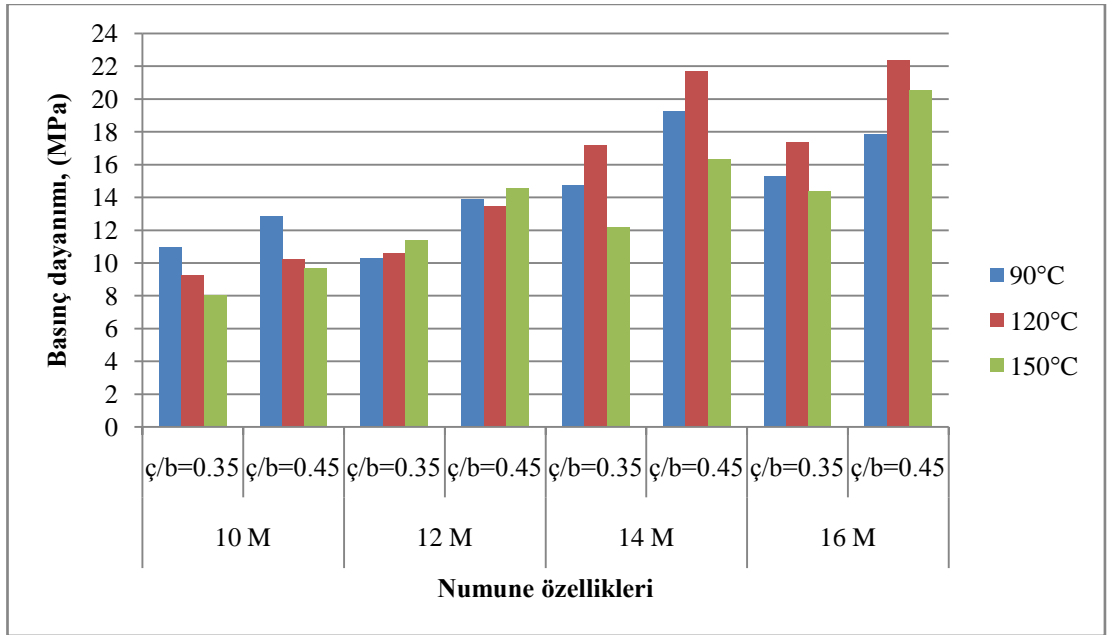
NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç karışımlarının farklı NaOH konsantrasyonu, ç/b oranı ve kür koşullarına göre elde edilmiş 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.10'da verilmiş olup, Şekil 4.28-4.31'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerleri

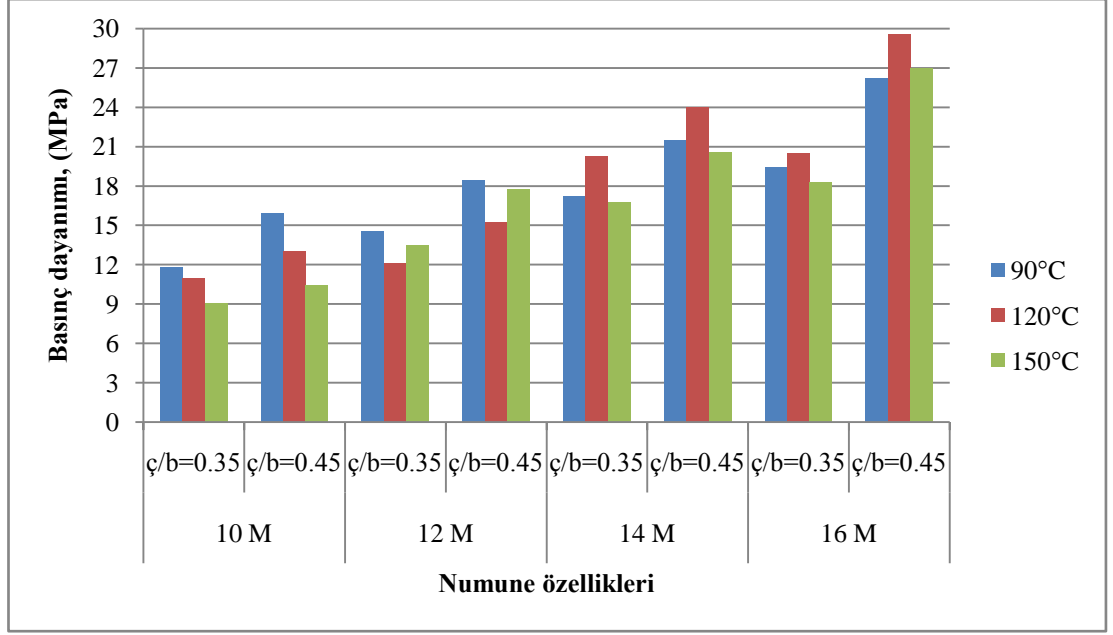
Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			Basınç dayanımı, (MPa)			
		NaOH kons. (M)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Geopolimer harç	NaOH	10	0.35	90	7.62	10.93	11.76	13.24
				120	8.78	9.26	10.92	12.36
				150	6.53	8.04	9.04	10.53
			0.45	90	9.06	12.84	15.91	17.63
				120	9.32	10.23	13.04	16.68
				150	7.21	9.64	10.44	12.12
		12	0.35	90	8.27	10.24	14.56	19.78
				120	9.74	10.58	12.12	15.48
				150	8.81	11.36	13.48	17.11
			0.45	90	11.92	13.86	18.43	24.22
				120	10.66	13.42	15.22	18.34
				150	10.88	14.55	17.77	22.15
		14	0.35	90	12.66	14.73	17.18	20.33
				120	10.63	17.16	20.24	25.94
				150	9.90	12.18	16.72	19.11
			0.45	90	15.32	19.25	21.46	26.15
				120	14.13	21.71	23.96	31.58
				150	10.97	16.34	20.56	23.19
		16	0.35	90	12.12	15.29	19.38	24.63
				120	13.21	17.36	20.49	28.62
				150	12.78	14.36	18.26	25.18
			0.45	90	16.41	17.82	26.23	30.42
				120	18.08	22.34	29.54	37.09
				150	16.54	20.53	26.95	32.33



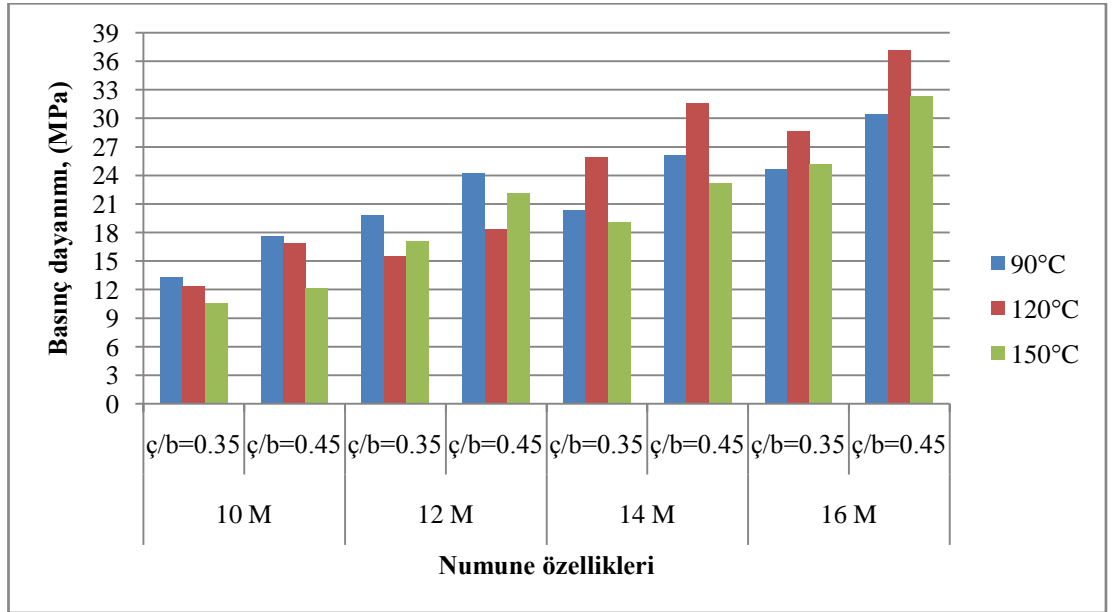
Şekil 4.28. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.29. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.30. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.31. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri

NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin araştırma bulguları incelendiğinde, NaOH konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve ç/b oranının basınç dayanımını önemli oranda etkilediği görülmüştür. Ayrıca 3. günden 90. güne kadar bütün numunelerde basınç dayanımı artmıştır. Numune yaşı arttıkça basınç

dayanımının artması, devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Ç/b oranı geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı üzerinde önemli etkiye sahiptir (Kürklü, 2016). Volkanik tüf esaslı geopolimer harçlarda ç/b oranının etkisine bakıldığında, bütün NaOH konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve numune yaşlarında 0.45 ç/b oranının 0.35 ç/b oranına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bağlayıcı fazın fazla olması agrega yüzeylerinin sarılmasını kolaylaştırmış ve ara yüzey bölgelerinde iyi bir aderans oluşmasına neden olmuştur (Djobo vd. 2016; Tchadjie vd. 2016; Lee ve van Deventer, 2004). 0.45 ç/b oranının basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek olmasının bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

NaOH konsantrasyonunun etkisi incelendiğinde bütün numune yaşları, kür sıcaklığı ve ç/b oranı değerlerinde NaOH konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Benzer şekilde Balczar vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, metakaolin esaslı geopolimer harçların basınç dayanımına 4-18 M arasında değişen NaOH konsantrasyonunun etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda NaOH konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımında belirgin bir iyileşme meydana geldiği belirtilmiştir (Balczar vd. 2015). NaOH konsantrasyonunun artması ortamın alkalinitesini arttırmaktadır. Bunun sonucunda hammadde bünyesindeki alümin ve silis bağlarının çözünmesinin kolaylaşmakta ve geopolimerizasyon reaksiyonlarında artış meydana gelmektedir (Ken vd. 2015). Volkanik tüf esaslı geopolimer harçların basınç dayanımındaki artışın da bu durumdan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. NaOH konsantrasyonunun artması ile basınç dayanımında görülen artış birçok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır (Adak vd. 2014; Balczar vd. 2015; Swaddle vd. 1994; Blum ve Lasaga, 1988; Görhan ve Kürklü, 2014; Ahmari ve Zhang, 2012; Somna vd. 2011; Sathonsaowaphak vd. 2009).

Kür sıcaklığının etkisi irdelendiğinde, 90, 120 ve 150°C'de kür işleminin farklı parametreler altında değişken sonuçlar gösterdiği görülmüştür. Kür sıcaklığı ile basınç dayanımı arasında belirgin bir ilişki kurulamamıştır.

NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerinde maksimum basınç dayanımı 16 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş, 120°C'de kür edilmiş, 0.45 ç/b oranına sahip 90 günlük numunede 37.09 MPa olarak elde edilmiştir. Minimum basınç dayanımı ise 10 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş, 150°C'de kür edilmiş, 0.35 ç/b oranına sahip 3 günlük numunede 6.53 MPa olarak elde edilmiştir. Nevşehir volkanik tüfünden elde edilen basınç dayanımı değerleri, Ndjock vd. (2017) tarafından Kamerun volkanik külünün alkali aktivasyonu sonucu üretilmiş harç numunelerin basınç dayanımı değerlerine (maksimum 12.6 MPa) kıyasla oldukça yüksektir.

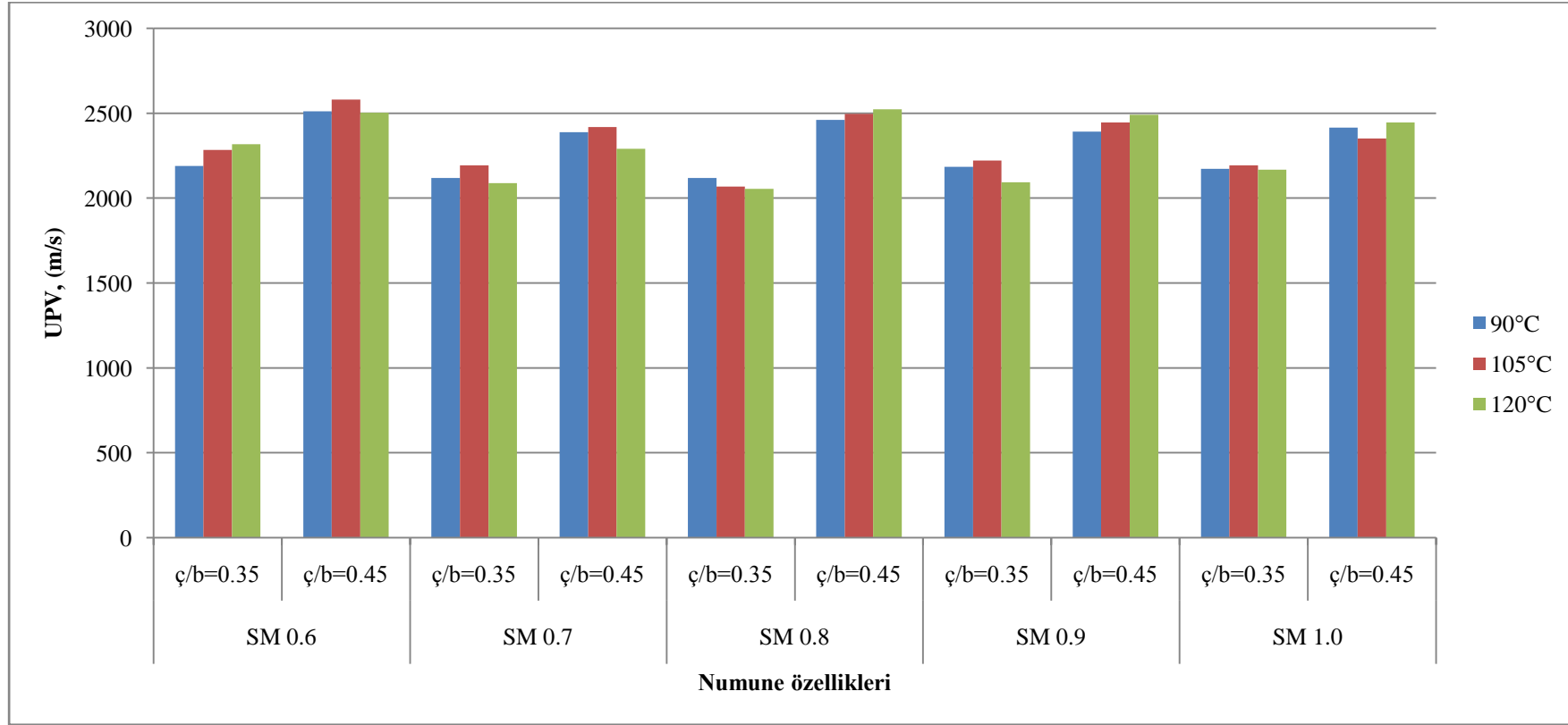
NaOH çözeltisi ile alkali aktivasyon yönteminin NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisine kıyasla volkanik tüf esaslı geopolimer harç numunelerinde daha iyi mekanik sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Ndjock vd. (2017) tarafından Kamerun volkanik külleri üzerine yapılan çalışmada NaOH çözeltisi ile aktive edilen geopolimer harç karışımların basınç dayanımının daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Geopolimer harç numunelerinde aktivatör tipinin, ç/b oranının ve kür sıcaklığının modifikasyonu ile iyi bir mukavemet gelişimi elde edilmiştir.

4.4.2. Geopolimer harç numunelerin UPV değerleri

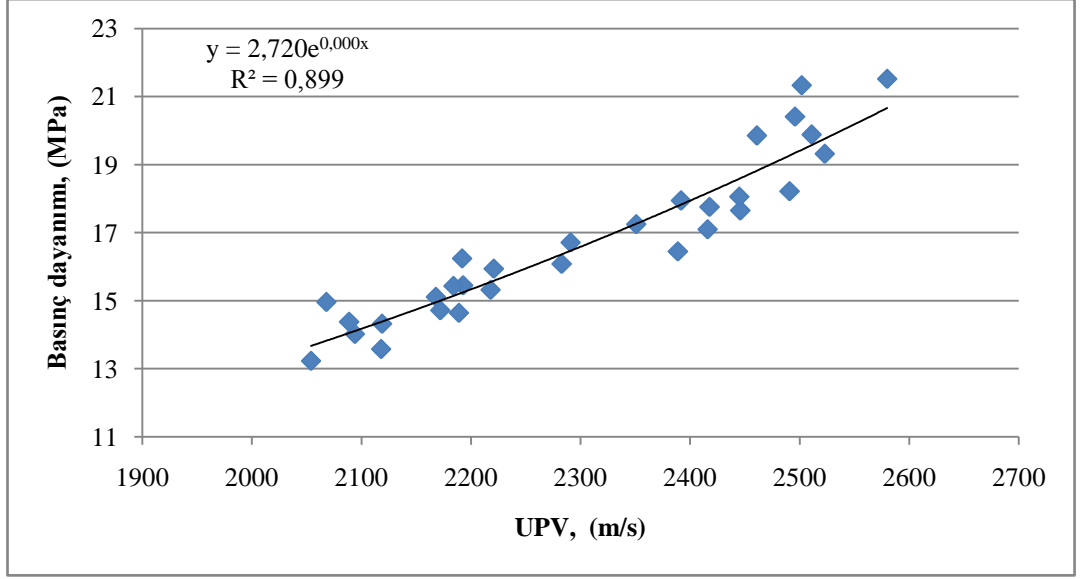
Volkanik tüf esaslı geopolimer harç numunelerin UPV ölçümleri her iki alkali aktivatör tipi için 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin UPV değerleri Çizelge 4.11'de verilmiş olup ve Şekil 4.32'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.33'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			UPV, (m/s)
		Silis modülü	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	
Geopolimer harç	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.6	0.35	90	2189
				105	2283
				120	2218
		0.6	0.45	90	2511
				105	2580
				120	2502
		0.7	0.35	90	2119
				105	2193
				120	2089
		0.7	0.45	90	2389
				105	2418
				120	2291
		0.8	0.35	90	2118
				105	2068
				120	2054
		0.8	0.45	90	2461
				105	2496
				120	2523
		0.9	0.35	90	2184
				105	2221
				120	2094
		0.9	0.45	90	2392
				105	2446
				120	2491
		1.0	0.35	90	2172
				105	2192
				120	2168
		1.0	0.45	90	2416
				105	2351
				120	2445



Şekil 4.32. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri



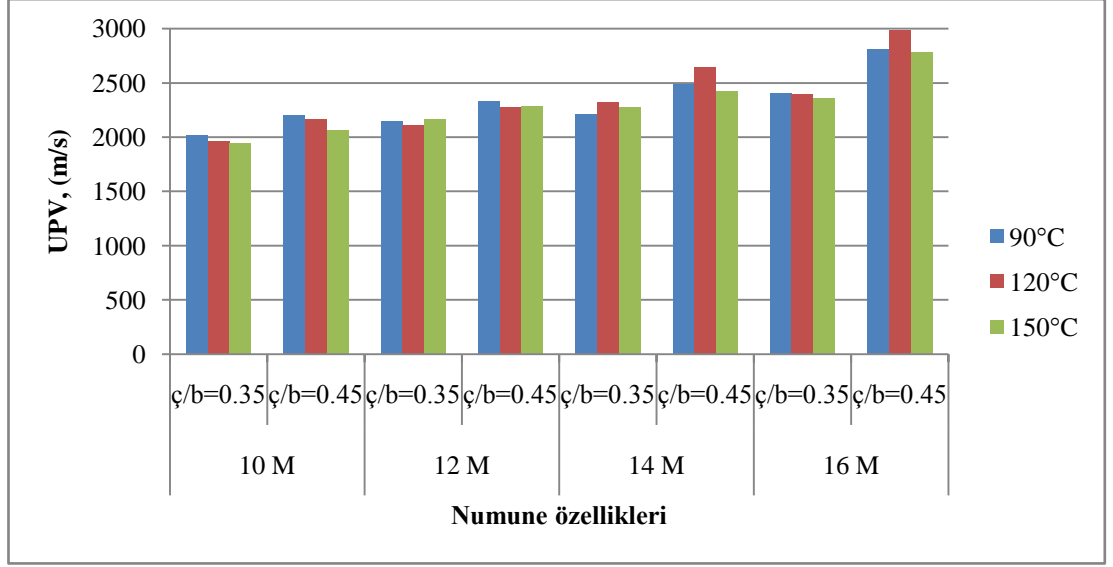
Şekil 4.33. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin UPV değerleri aynı tip aktivatör ile aktive edilmiş karışımların basınç dayanımı bulguları ile benzerlik göstermektedir. UPV değerleri 2054 m/s ile 2580 m/s arasında değişkenlik göstermektedir. Ç/b oranı değişkeni göz önünde bulundurulduğunda, bütün silis modülü ve kür sıcaklığı gruplarında 0.45 ç/b oranının, 0.35 ç/b oranına kıyasla daha yüksek UPV değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun daha yüksek ç/b oranının daha yoğun ve kompakt bir mikroyapı oluşturmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Basınç dayanımı bulgularında olduğu gibi 0.6 ve 0.8 silis modülüne sahip harç numunelerin UPV değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak silis modülü ile UPV değerleri arasında doğrudan bir ilişki elde edilememiştir. Basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir korelasyon ($R^2=0.899$) elde edilmiştir.

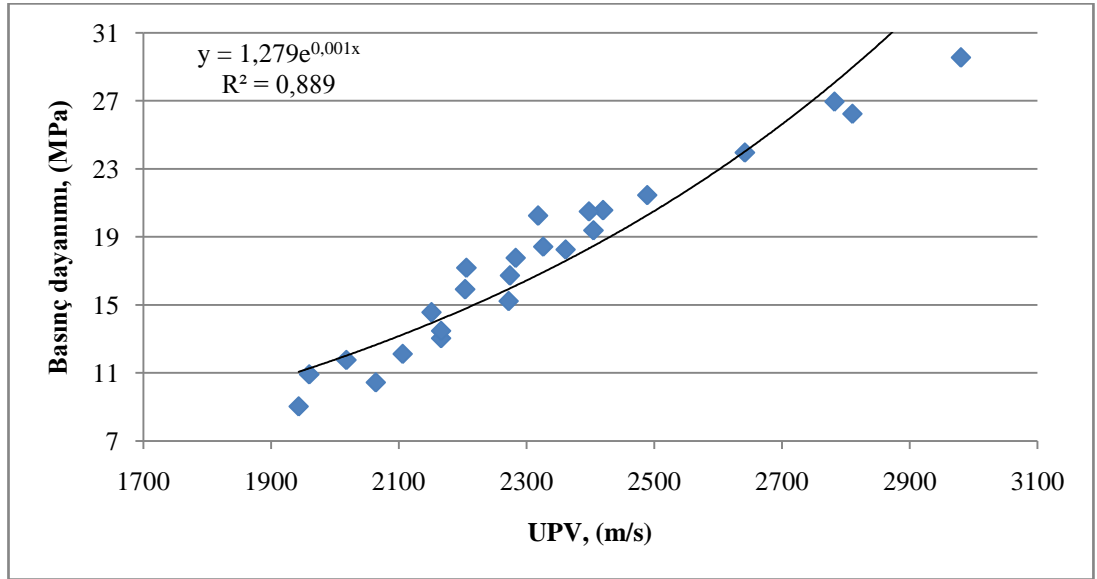
NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri Çizelge 4.12'de verilmiş olup ve Şekil 4.34'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.35'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			UPV, (m/s)
		NaOH kons. (M)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	
Geopolimer harç	NaOH	10	0.35	90	2018
				120	1960
				150	1943
			0.45	90	2204
				120	2166
				150	2064
		12	0.35	90	2151
				120	2106
				150	2166
			0.45	90	2326
				120	2272
				150	2283
		14	0.35	90	2206
				120	2318
				150	2274
			0.45	90	2489
				120	2642
				150	2420
		16	0.35	90	2405
				120	2398
				150	2361
			0.45	90	2810
				120	2980
				150	2782



Şekil 4.34. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri



Şekil 4.35. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki

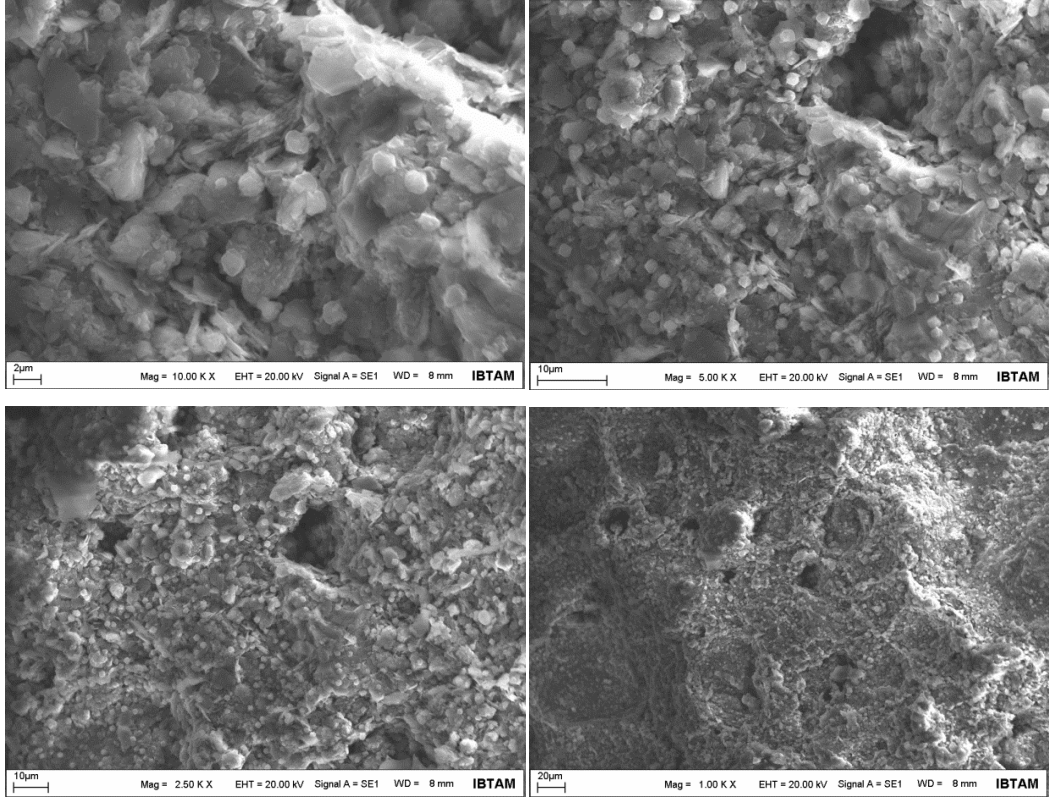
NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunelerin UPV değerleri aynı tip aktivatör ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımı sonuçları ile benzerlik göstermektedir. NaOH konsantrasyonu ve ç/b oranı UPV değerlerini etkilemiştir. 0.45 ç/b oranına sahip karışımlar, daha dolu bir mikroyapıya sahip olması nedeniyle 0.35 ç/b oranına kıyasla daha yüksek UPV değerine sahiptirler. NaOH konsantrasyonu arttıkça aynı ç/b oranı için UPV değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu durum basınç dayanımı bulguları ile örtüşmektedir. Aynı NaOH

konsantrasyonu ve ç/b oranı için 90, 120 ve 150°C kür sıcaklıklarında yakın UPV değerleri elde edilmiştir. Maksimum UPV değeri, basınç dayanımı bulguları ile uyumlu olarak NaOH konsantrasyonunun 16 M, ç/b oranının 0.45 ve kür sıcaklığının 120°C olduğu karışımda 2980 m/s olarak elde edilmiştir. Minimum UPV değeri, NaOH konsantrasyonunun 10 M, ç/b oranının 0.35 ve kür sıcaklığının 150°C olduğu karışımda 1943 m/s olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir korelasyon ($R^2=0.889$) elde edilmiştir. Volkanik tüf esaslı geopolimer harç numunelerinden elde edilen UPV değerleri, daha önceden yapılmış çalışmalar tarafından desteklenmektedir (Ghosh vd. 2018; Colangelo vd. 2017).

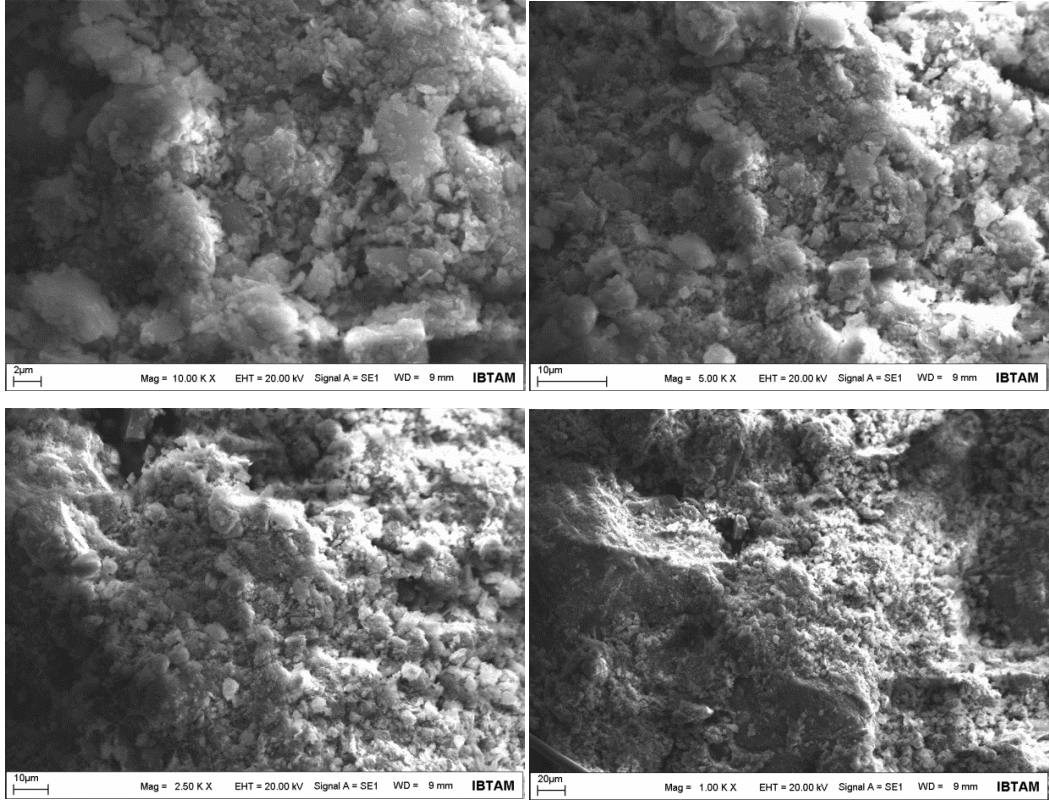
4.4.3. Geopolimer harç numunelerin mikroyapı özellikleri

4.4.3.1. Geopolimer harç numunelerin SEM analizleri

Geopolimer harç karışımlarının SEM analizleri, her iki alkali aktivatör tipi için (NaOH+Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltisi) 28 günlük numunelerde maksimum basınç dayanımının elde edildiği örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. NaOH+Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş numunelerden farklı ölçeklerde alınmış SEM görüntüleri Şekil 4.36-4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.36. Silis modülü 0.6, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 105°C olan geopolimer harç numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri

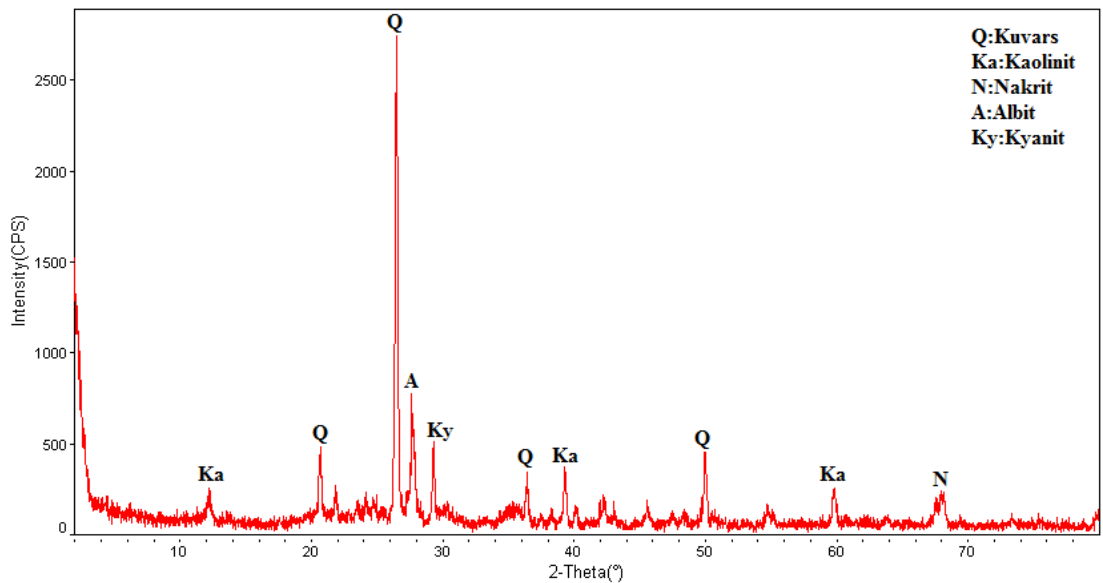


Şekil 4.37. NaOH konsantrasyonu 16 M, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer harç numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri

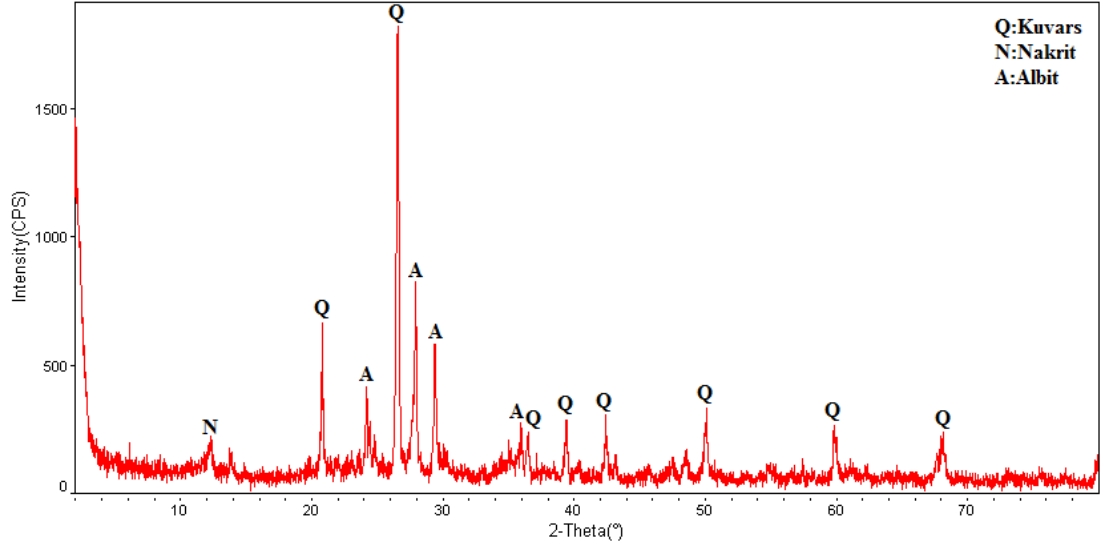
SEM görüntüleri incelendiğinde NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunesinin yoğun ve sıkı jel yapısına sahip olduğu söylenebilir. Bu durum NaOH miktarındaki artış sonucu geopolimerizasyon reaksiyonlarında meydana gelen artıştan kaynaklı olabilir (Hanjitsuwan vd. 2014). Benzer şekilde Chi (2015) yoğun mikroyapının geopolimerizasyon reaksiyonları sonucu oluşan amorf alüminosilikat yapıdan kaynaklandığını ifade etmiştir. Zhou vd. (2016) daha yoğun mikroyapıya sahip numunelerin basınç dayanımının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Djobo vd. (2016) volkanik kül esaslı geopolimer harçlar üzerine yaptıkları çalışmada yoğun bir mikroyapı tespit etmiş ve bu durumun basınç dayanımı ile uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş numunede ise dağınık halde farklı çaplarda boşluklar görülmektedir (Şekil 4.36). Geopolimer harçların mikroyapısında tespit edilen boşluklar çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Balczar vd. 2015).

4.4.3.2. Geopolimer harç numunelerin XRD analizleri

Geopolimer harç numunelerin XRD analizleri, her iki alkali aktivatör çözeltisi için (NaOH+Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltisi) maksimum basınç dayanımının elde edildiği 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harç numunelerin XRD analizleri Şekil 4.38-4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.38. Silis modülü 0.6, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 105°C olan geopolimer harç numunesinin XRD analizi



Şekil 4.39. NaOH konsantrasyonu 16 M, ç/b oranı 0.45, kür sıcaklığı 120°C olan geopolimer harç numunesinin XRD analizi

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer harç numunesinde kuvars (SiO₂), kaolinit (Al₂Si₂O₅(OH)₄), nakrit (Al₂Si₂O₅(OH)₄), albit (Na(Si₃Al)O₈), kyanit (Al₂SiO₅) mineralleri, NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş numunede ise kuvars (SiO₂), nakrit (Al₂Si₂O₅(OH)₄), albit (Na(Si₃Al)O₈) mineralleri tespit edilmiştir. Kuvars minerali her iki alkali aktivatör tipi için belirgin pik göstermiştir.

4.5. Katkısız Geopolimer Beton ile ilgili Bulgular ve Tartışma

Geopolimer beton numunelerin deneysel parametreleri belirlenirken geopolimer hamur ve harç aşamasının deneysel bulguları referans alınmıştır. Geopolimer beton numunelerin üretiminde alkali aktivasyon için NaOH+Na₂SiO₃ ve yalnız NaOH çözeltisi olmak üzere iki çeşit alkali aktivatör kullanılmıştır. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilen geopolimer beton numunelerinde, hamur ve harç bulguları ışığında daha yüksek basınç dayanımının elde edildiği silis modülü 0.6 ve 0.8 olan parametreler tercih edilmiştir. Benzer şekilde, Law vd. (2014) silis modülünün 1.0'den yüksek olmasının geopolimerizasyon reaksiyonlarında bir artış meydana getirmedini ifade etmişlerdir. Yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilen geopolimer beton karışımlarında ise, hamur ve harç aşamasının basınç dayanımı değerlerinin yüksek olması sebebiyle, aktivatör konsantrasyonu aralığı daraltılmamış, 10, 12, 14 ve 16 M olarak belirlenmiştir. Kür sıcaklığı harç aşamasında olduğu gibi,

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilen karışımlar için 90, 105 ve 120°C, yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş karışımlar için 90, 120 ve 150°C olarak seçilmiştir. ç/b oranı değişkeni geopolimer beton karışımlarında da irdelenmiş ve her iki alkali aktivatör tipi için 0.5 ve 0.6 olarak seçilmiştir.

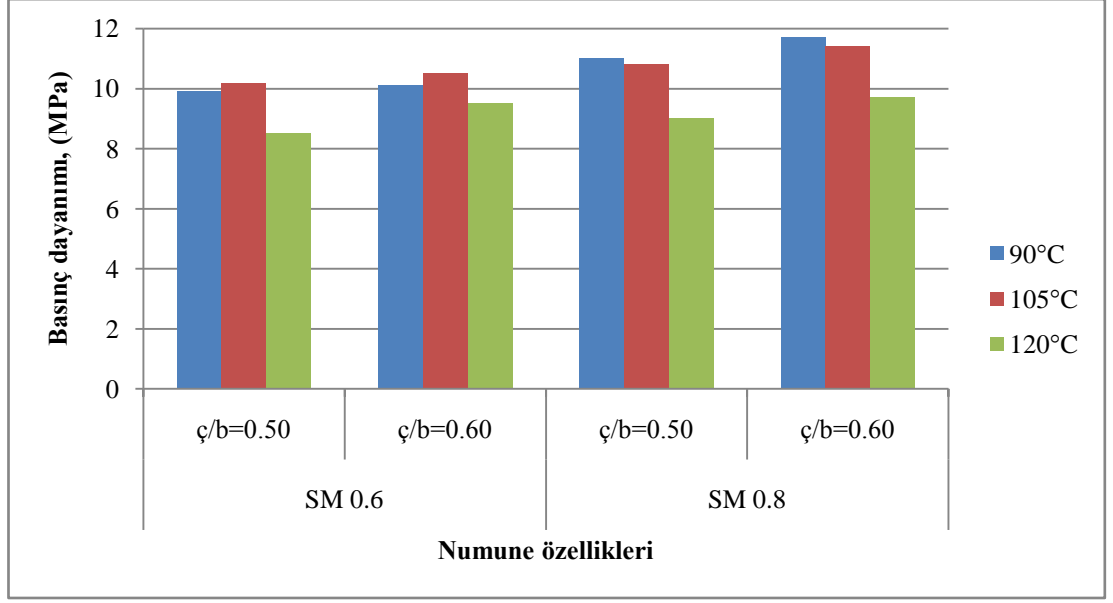
Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı (3, 7, 28 ve 90 günlük) değerleri, UPV değerleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen katkısız geopolimer beton numunelere ait deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.5.1. Katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı

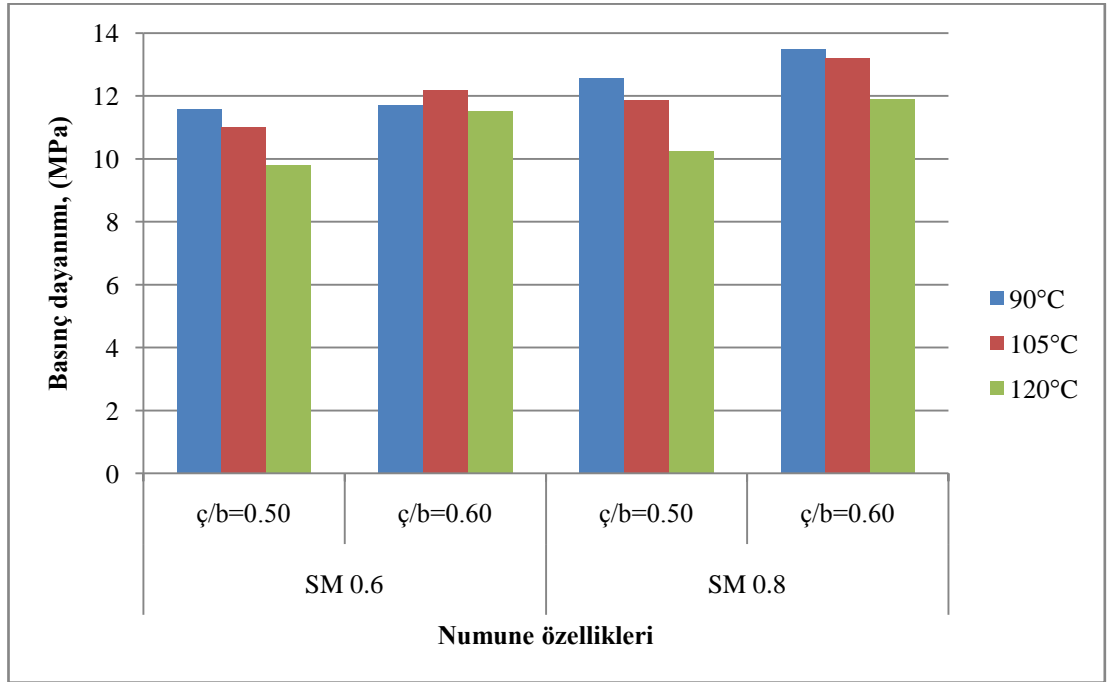
NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ve yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri önemli farklılıklar göstermiştir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunelerin farklı silis modülü, ç/b oranı ve kür koşullarına göre elde edilmiş 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.13'de verilmiş olup ve Şekil 4.40-4.43'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri

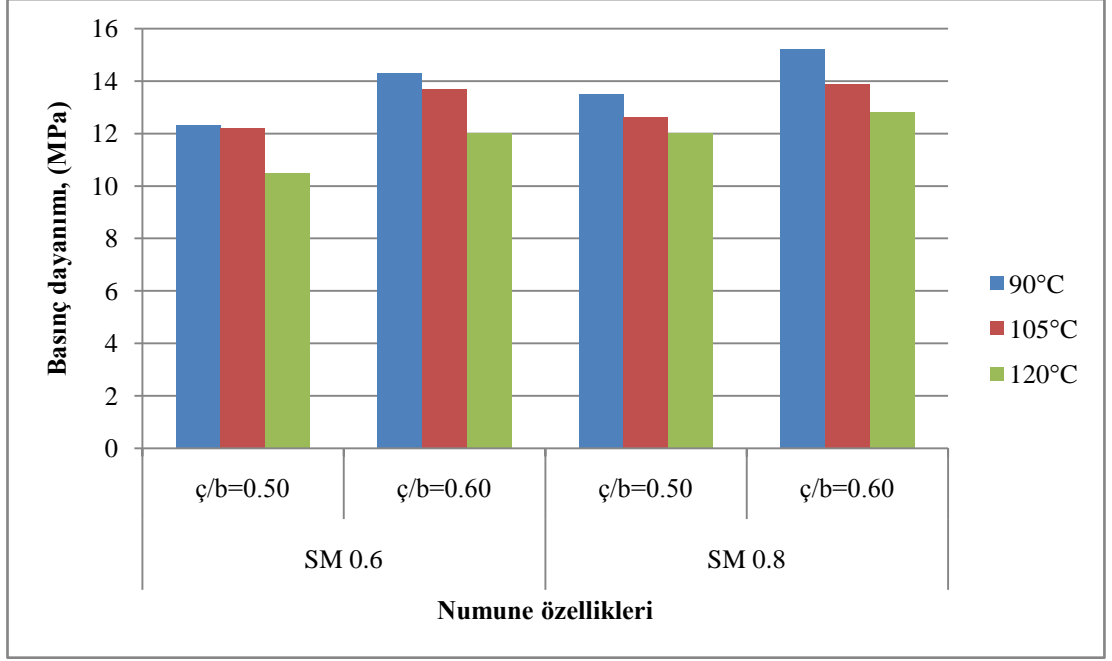
Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			Basınç dayanımı, (MPa)			
		Silis modülü	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Geopolimer beton	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.6	0.50	90	9.90	11.59	12.33	13.10
				105	10.18	11.00	12.20	15.90
				120	8.50	9.80	10.50	12.00
			0.60	90	10.10	11.70	14.30	16.26
				105	10.50	12.20	13.70	16.40
				120	9.50	11.52	12.00	12.90
		0.8	0.50	90	11.00	12.55	13.50	15.10
				105	10.80	11.87	12.60	16.33
				120	9.00	10.25	12.00	12.50
			0.60	90	11.70	13.50	15.20	16.80
				105	11.40	13.20	13.90	17.10
				120	9.70	11.90	12.80	13.20



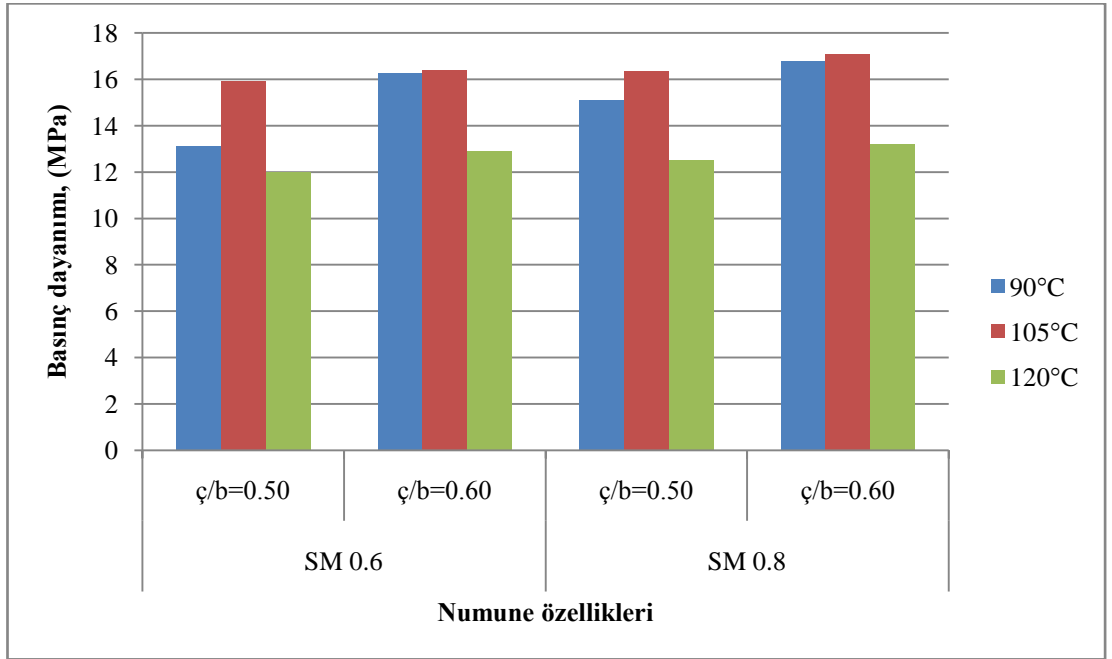
Şekil 4.40. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.41. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.42. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri



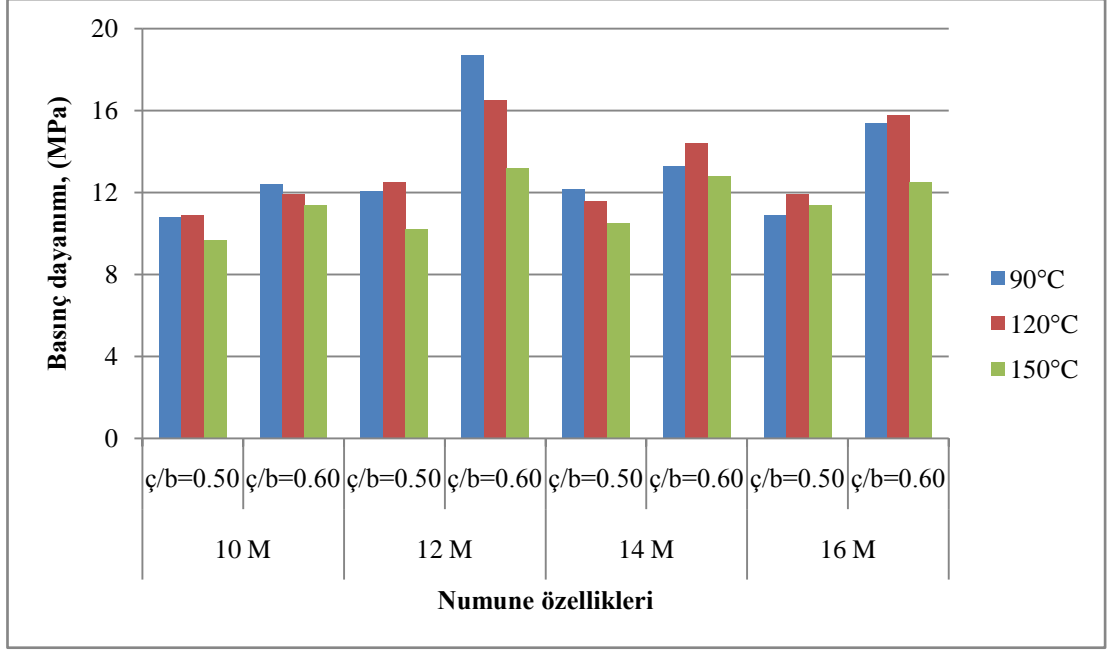
Şekil 4.43. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri

NaOH+Na₂SiO₃ çözültisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunelerin deneysel bulguları incelendiğinde, silis modülü, kür sıcaklığı ve ç/b oranı parametrelerinin basınç dayanımı değerlerini önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür. Numune yaşı arttıkça bütün değişken gruplarında basınç dayanımı artmıştır. Basınç dayanımındaki iyileşme artan reaksiyon ürünleri miktarıyla açıklanabilir (Cho vd. 2017). Ç/b oranının basınç dayanımına etkisi irdelendiğinde, 0.60 ç/b oranının 0.50 ç/b oranına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaştığı görülmüştür. 0.60 ç/b oranına sahip beton karışımların işlenebilirliği daha yüksek olduğu için kalıba daha rahat yerleşmiş ve daha homojen yapı elde edilmiştir. Silis modülü değerleri kıyaslandığında, silis modülü 0.80 olan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Kür sıcaklığı açısından belirgin bir ilişki kurulamamıştır, ancak 120°C kür sıcaklığının her koşulda daha düşük basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun artan kür sıcaklığı etkisi ile alkali aktivatörün buharlaşmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Maksimum basınç dayanımı, silis modülünün 0.80, ç/b oranının 0.60 ve kür sıcaklığının 105°C olduğu 90 günlük numunede, 17.10 MPa olarak elde edilmiştir. Minimum basınç dayanımı ise silis modülünün 0.6, ç/b oranının 0.50 ve kür sıcaklığının 120°C olduğu 3 günlük numunede, 8.50 MPa olarak elde edilmiştir. Haddad ve Alshbuol (2016) tarafından Ürdün doğal puzolanı üzerinde yapılan çalışmada 120°C üzerindeki kür işleminin geopolimer betonların mekanik dayanımını olumsuz etkilediği ifade edilmiştir. Soutsos vd. (2016) uçucu kül esaslı geopolimer numunelerin basınç dayanımını etkileyen parametreleri inceledikleri çalışmada, maksimum basınç dayanımını Na₂O/SiO₂ olarak belirlediği alkali modülünün 1.25 (Silis modülü 0.8), kür sıcaklığının ise 70°C olduğu karışımdan elde etmişlerdir.

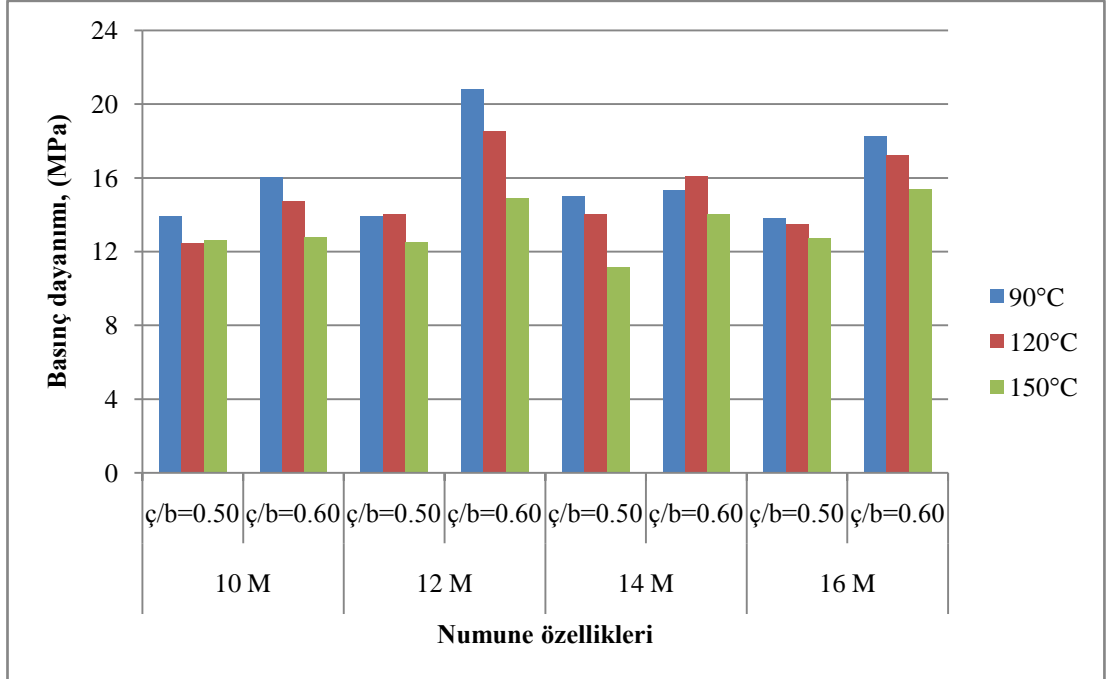
Yalnız NaOH çözültisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunelerin farklı NaOH konsantrasyonu, ç/b oranı ve kür koşullarına göre elde edilmiş 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.14'de gösterilmiş olup ve Şekil 4.44-4.47'de grafiksel olarak çizilmiştir.

Çizelge 4.14. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri

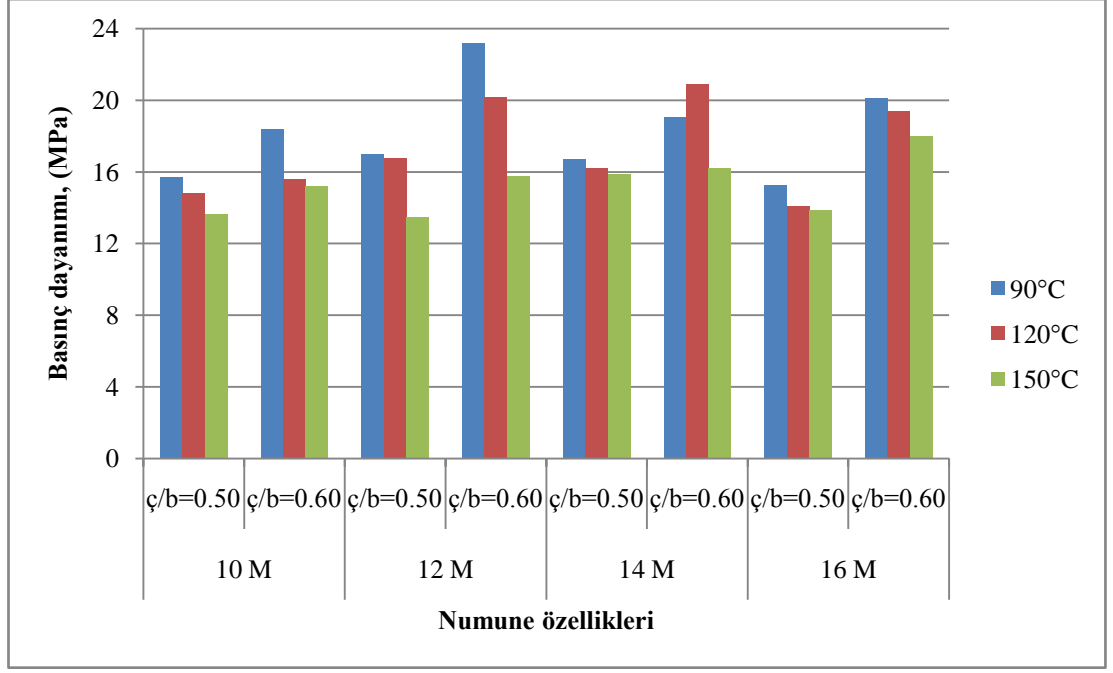
Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			Basınç dayanımı, (MPa)			
		NaOH kons. (M)	Çözelti/ bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Geopolimer beton	NaOH	10	0.50	90	10.80	13.90	15.70	17.30
				120	10.90	12.42	14.80	16.00
				150	9.70	12.60	13.67	14.10
			0.60	90	12.40	16.00	18.40	21.00
				120	11.90	14.70	15.60	16.20
				150	11.41	12.80	15.20	16.50
		12	0.50	90	12.10	13.92	17.00	20.75
				120	12.50	14.00	16.80	18.55
				150	10.20	12.50	13.45	15.90
			0.60	90	18.70	20.80	23.20	25.70
				120	16.50	18.50	20.15	23.90
				150	13.20	14.90	15.80	16.65
		14	0.50	90	12.18	15.00	16.70	22.25
				120	11.60	14.03	16.20	22.60
				150	10.50	11.15	15.90	18.53
			0.60	90	13.30	15.30	19.05	22.70
				120	14.40	16.10	20.90	23.85
				150	12.80	14.05	16.20	21.10
		16	0.50	90	10.90	13.80	15.25	16.20
				120	11.90	13.45	14.10	19.40
				150	11.40	12.70	13.85	16.70
			0.60	90	15.40	18.23	20.10	23.26
				120	15.76	17.20	19.40	23.60
				150	12.50	15.40	18.00	22.73



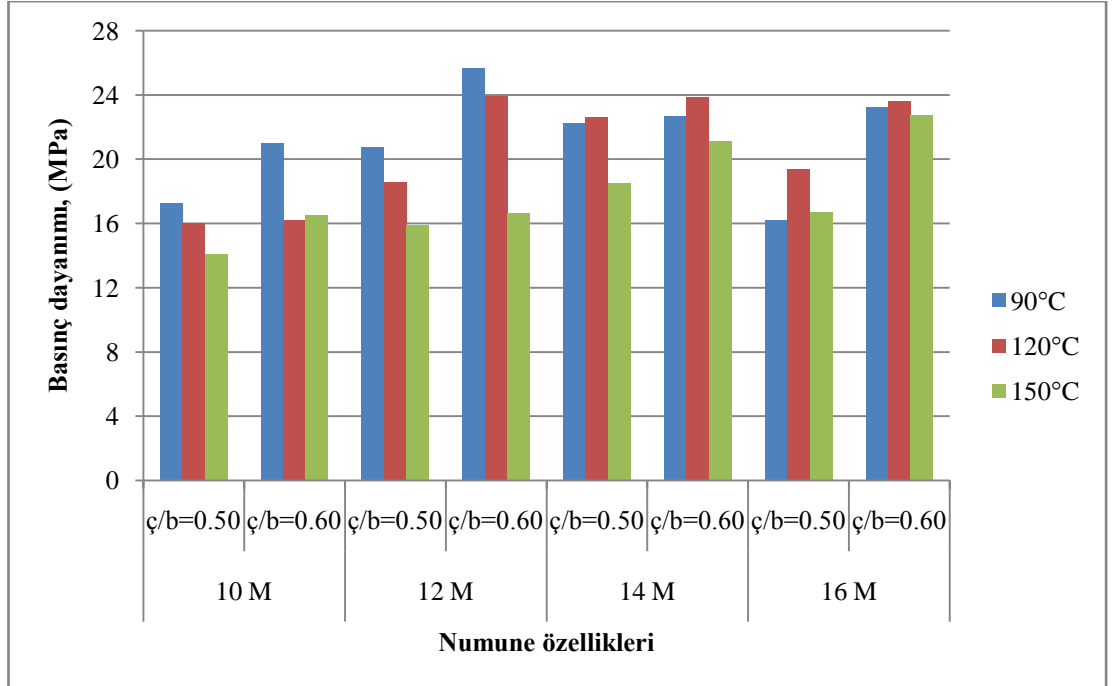
Şekil 4.44. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.45. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.46. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.47. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş katkısız geopolimer beton numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri

NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunelerinde, NaOH konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve ç/b oranı parametrelerinin modifikasyonu ile basınç dayanımı değerlerinde önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Numune yaşının artmasıyla devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından kaynaklı olarak basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. 0.60 ç/b oranı ile üretilen numunelerin basınç dayanımı değerleri bütün koşullar altında 0.50 ç/b oranından daha yüksek çıkmıştır. Daha fazla bağlayıcı faz daha yoğun ve kompakt bir beton üretilmesini sağlamıştır. NaOH konsantrasyonu ile basınç dayanımı arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. 12 M NaOH ile aktive edilmiş karışımların genellikle daha yüksek basınç dayanımına ulaştığı görülmüştür. Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi üzerine belirgin bir çıkarım yapılamamıştır, ancak 150°C kür edilmiş numunelerin daha düşük basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Geopolimer üretiminde kür işlemi belirli bir sıcaklıktan sonra nem kaybına neden olduğu için mukavemet gelişimini olumsuz etkilemektedir (Joseph, 2015). Maksimum basınç dayanımı NaOH konsantrasyonunun 12 M, ç/b oranının 0.60 ve kür sıcaklığının 90°C olduğu 90 günlük numunede 25.70 MPa olarak elde edilmiştir. Minimum basınç dayanımı ise NaOH konsantrasyonunun 10 M, ç/b oranının 0.50, kür sıcaklığının 150°C olduğu 3 günlük numunede 9.70 MPa olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde Haddad ve Alshbuol (2016) yaptıkları çalışmada Ürdün doğal puzolanının NaOH ve Na₂SiO₃ ile alkali aktivasyonu sonucu üretilen geopolimer betonun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Ç/b oranı ve kür sıcaklığı parametrelerinin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir. 12 M NaOH çözeltisinin geopolimer beton numunelerin özellikleri üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Geopolimer betonda optimum kür sıcaklığını 80°C olarak elde etmişlerdir. Nazari vd. (2011) NaOH konsantrasyonunun uçucu kül ve pirinç kabuğu külü esaslı geopolimerlerin mekanik özelliklerine etkilerini inceledikleri çalışmada, maksimum basınç dayanımını 12 M NaOH ile aktive edilmiş karışımdan elde etmişlerdir. Noushini ve Castel (2016) F sınıfı uçucu kül kullanarak ürettikleri geopolimer beton numunelerini 60-90°C sıcaklıklarda kür işlemine maruz bırakmış ve maksimum basınç dayanımını 90°C kür edilen numunelerden elde etmişlerdir. Ahmari ve Zhang (2012) tarafından yapılan çalışmada ise 60-120°C sıcaklıklarda uygulanan kür işleminde optimum kür sıcaklığı 90°C olarak elde edilmiştir. Rajarajeswari ve Dhinakaran (2016) tarafından yapılan çalışmada, üretilen cüruf esaslı geopolimer

beton numuneleri 60-100°C sıcaklıklarda kür edilmiş, maksimum basınç dayanımı ise 80°C'de kür edilen numunelerden elde edilmiştir.

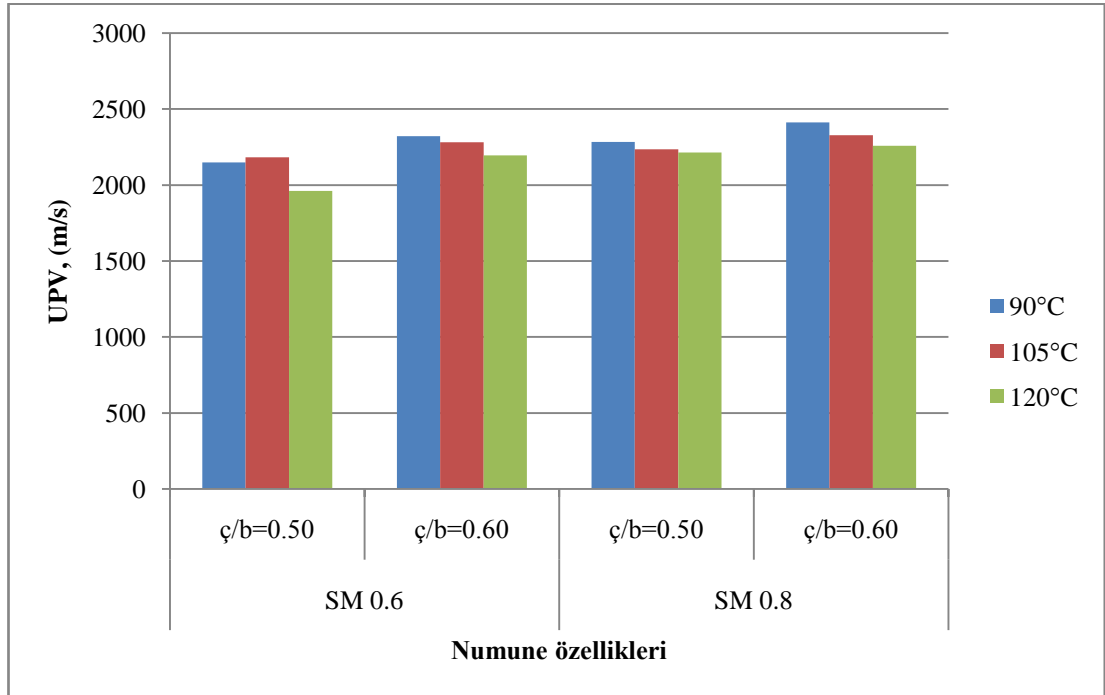
Nevşehir yöresinden temin edilmiş olan volkanik tüfün aktivatör tipinin, aktivatör konsantrasyonunun ve kür koşullarının modifikasyonu sonucunda geopolimer hamur, harç ve beton hammaddesi olarak kullanılabilceği ortaya çıkarılmıştır. Benzer şekilde Ndjock vd. (2017) Kamerun volkanik külünün geopolimer üretiminde kullanılabilceğini ortaya çıkarmışlardır. Tez çalışmasının bundan sonraki aşaması nano silis, mikro silis ve SB lateks katkısının volkanik tüf esaslı geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisini incelemektir. Bu sebeple, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş optimum karışım oranı ve kür koşulları ile devam edilmiştir. Yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur, harç ve beton numuneleri NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş karışımlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Bakharev (2005a) NaOH ile aktive edilmiş ve yüksek sıcaklıkta kür edilmiş geopolimer numunelerin daha yüksek performans sergilediklerini ifade etmiştir (Edouard, 2011). Bununla birlikte NaOH çözeltisinin Na₂SiO₃ çözeltisine kıyasla daha ucuz olması deneysel bulguların ekonomik bir avantajı olarak not edilmiştir (Aliabdo vd. 2016). Yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda NaOH konsantrasyonunun 12 M, ç/b oranının 0.60 ve kür sıcaklığının 90°C olduğu geopolimer beton üzerinde durabilite deneylerinin yapılması kararlaştırılmıştır.

4.5.2. Katkısız geopolimer beton numunelerin UPV değerleri

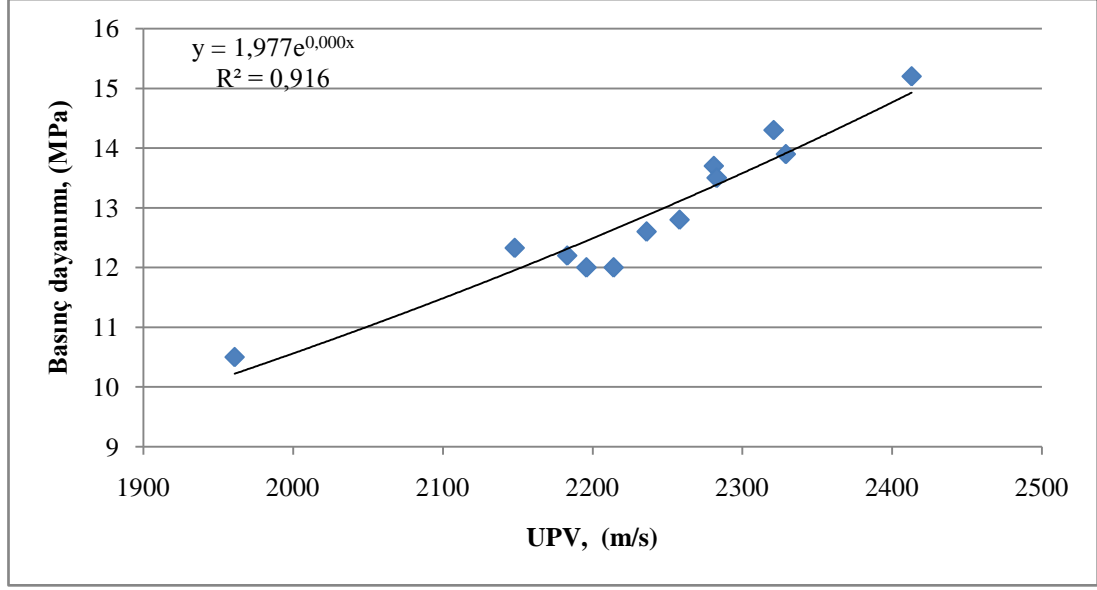
Geopolimer beton numunelerin UPV ölçümleri her iki alkali aktivatör için 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri Çizelge 4.15'de verilmiş olup ve Şekil 4.48'de gösterilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.49'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerinin UPV değerleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			UPV, (m/s)
		Silis modülü	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	
Geopolimer beton	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0.6	0.50	90	2148
				105	2183
				120	1961
			0.60	90	2321
				105	2281
				120	2196
		0.8	0.50	90	2283
				105	2236
				120	2214
			0.60	90	2413
				105	2329
				120	2258



Şekil 4.48. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerinin UPV değerleri



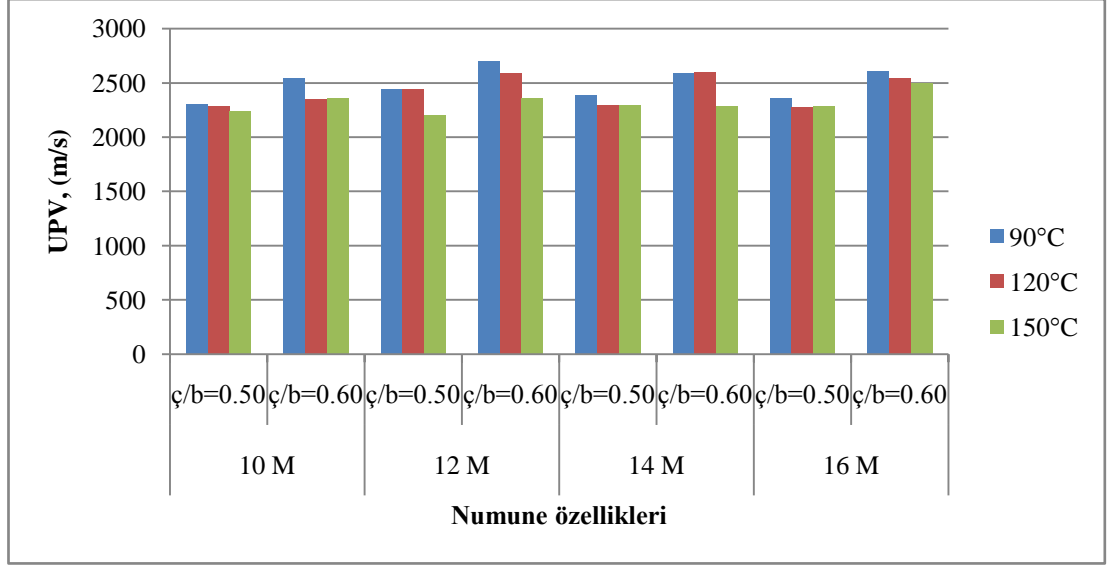
Şekil 4.49. NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki

NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunelerin UPV değerleri basınç dayanımı bulguları ile uyumludur. UPV değerleri 1961 m/s ile 2413 m/s arasında değişkenlik göstermektedir. Basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi 0.60 ç/b oranına sahip numunelerin UPV değerleri, 0.50 ç/b oranına kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde 0.8 silis modülüne sahip beton numunelerin UPV değerlerinin 0.6 silis modülüne kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir korelasyon ($R^2=0.916$) elde edilmiştir. Yadollahi vd. (2015) pomza esaslı geopolimer kompozitler üzerine yaptıkları çalışmada, silis modülü arttıkça UPV değerlerinin genellikle arttığını ifade etmişlerdir. Basınç dayanımı ile UPV arasında R^2 değerinin 0.9634 olduğu iyi bir ilişki elde etmişlerdir.

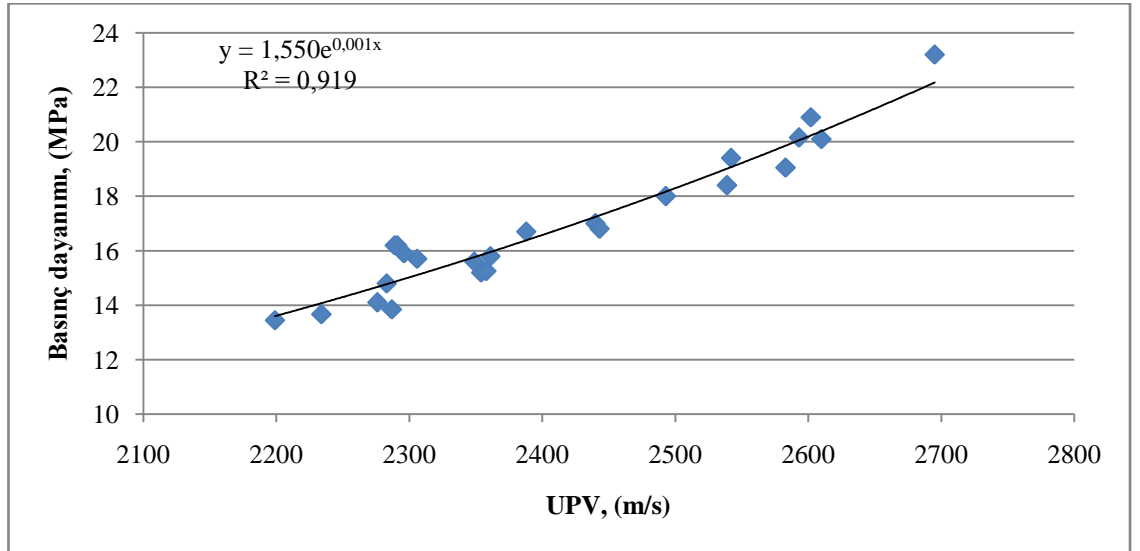
NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri Çizelge 4.16'da verilmiş olup ve Şekil 4.50'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.51'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri

Numune tipi	Alkali aktivatör tipi	Değişken parametreler			UPV, (m/s)
		NaOH kons. (M)	Çözelti/bağlayıcı oranı	Kür sıcaklığı, (°C)	
Geopolimer beton	NaOH	10	0.50	90	2306
				120	2283
				150	2234
			0.60	90	2539
				120	2349
				150	2354
		12	0.50	90	2440
				120	2443
				150	2199
			0.60	90	2695
				120	2593
				150	2361
		14	0.50	90	2388
				120	2291
				150	2296
			0.60	90	2583
				120	2602
				150	2289
		16	0.50	90	2358
				120	2276
				150	2287
			0.60	90	2610
				120	2542
				150	2493



Şekil 4.50. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin UPV değerleri



Şekil 4.51. NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki

NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunelerin UPV değerleri aynı alkali aktivatör ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımı bulguları ile uyumludur. 0.60 ç/b oranına sahip karışımlar, daha yoğun bir mikroyapıya sahip olması nedeniyle 0.50 ç/b oranına kıyasla daha yüksek UPV değerine sahiptirler. Basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek olması bu görüşü desteklemektedir. Aynı NaOH konsantrasyonu ve ç/b oranı için 90, 120 ve 150°C kür sıcaklıklarında yakın UPV değerleri elde edilmiştir. Maksimum UPV değeri, basınç dayanımı bulguları ile

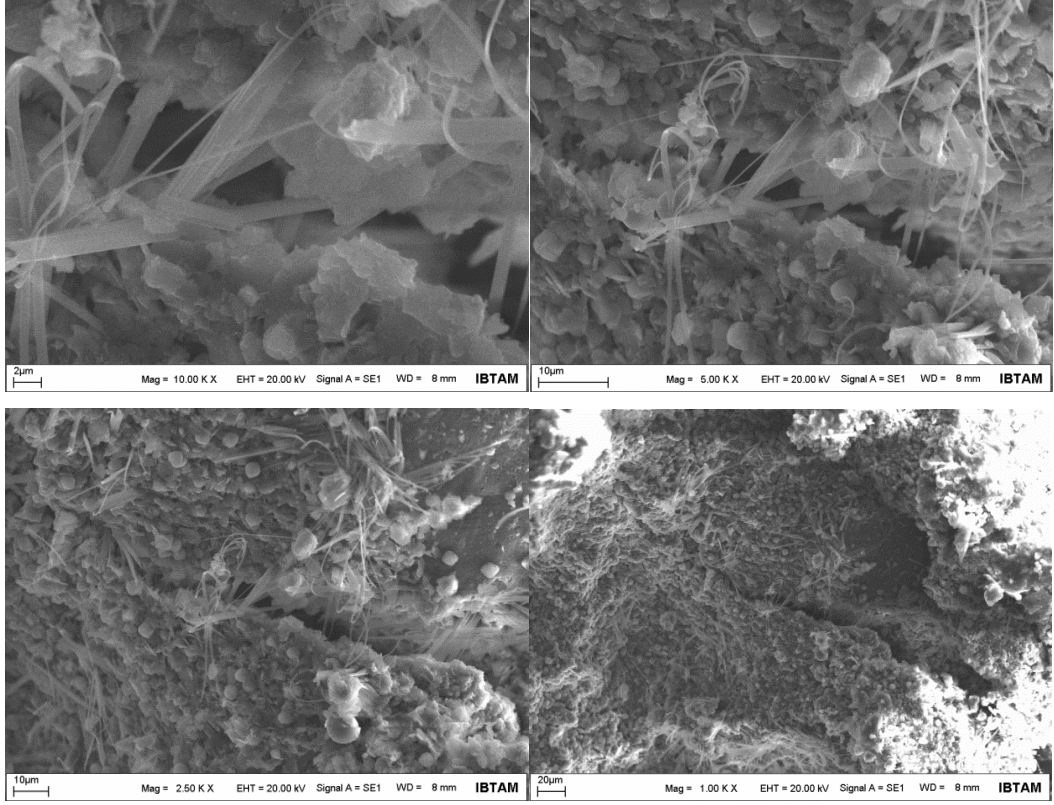
uyumlu olarak NaOH konsantrasyonunun 12 M, ç/b oranının 0.60 ve kür sıcaklığının 90°C olduğu numunede 2695 m/s olarak elde edilmiştir. Minimum UPV değeri, NaOH konsantrasyonunun 12 M, ç/b oranının 0.50 ve kür sıcaklığının 150°C olduğu karışımda 2199 m/s olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir korelasyon ($R^2=0.919$) elde edilmiştir. Benzer şekilde Noushini ve Castel (2016) uçucu kül esaslı geopolimer betonlar üzerinde yaptıkları UPV ölçümlerinde R^2 değerini 0.925 olarak elde etmişlerdir. Geopolimer betonların basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir korelasyon elde edildiği için ultrasonik hız yönteminin geopolimer betonların basınç dayanımını tahmininde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Volkanik tüf esaslı geopolimer beton numunelerden elde edilen UPV değerlerinin daha önce yapılmış çalışmalarda elde edilmiş değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür (Noushini ve Castel, 2016; Yadollahi vd. 2015; Gümüş, 2016). Bu durumun volkanik tüf esaslı geopolimer numunelerin nispeten düşük yoğunluklu ve boşluklu yapısından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

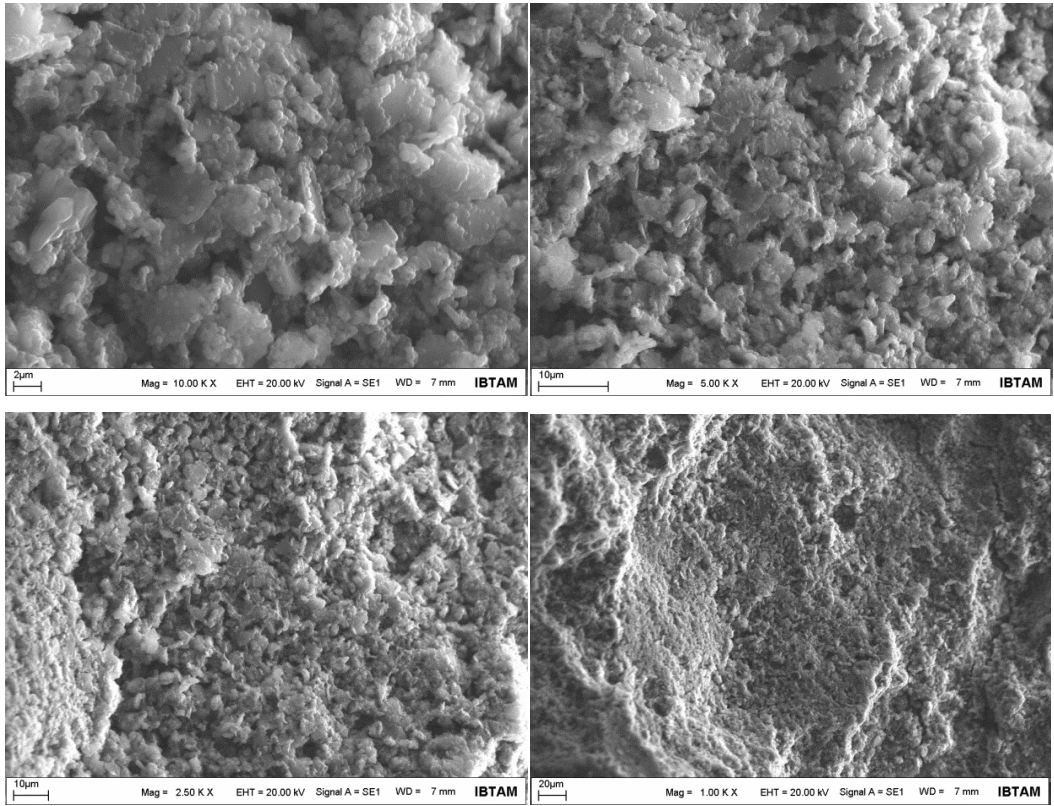
4.5.3. Katkısız geopolimer beton numunelerin mikroyapı özellikleri

4.5.3.1. Katkısız geopolimer beton numunelerin SEM analizleri

Katkısız geopolimer beton numunelerin SEM analizleri 28 günlük numunelerde maksimum basınç dayanımının elde edildiği örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. NaOH+Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş numunelerden farklı ölçeklerde alınmış SEM görüntüleri Şekil 4.52-4.53'de verilmiştir.



Şekil 4.52. Silis modülü 0.8, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer beton numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri

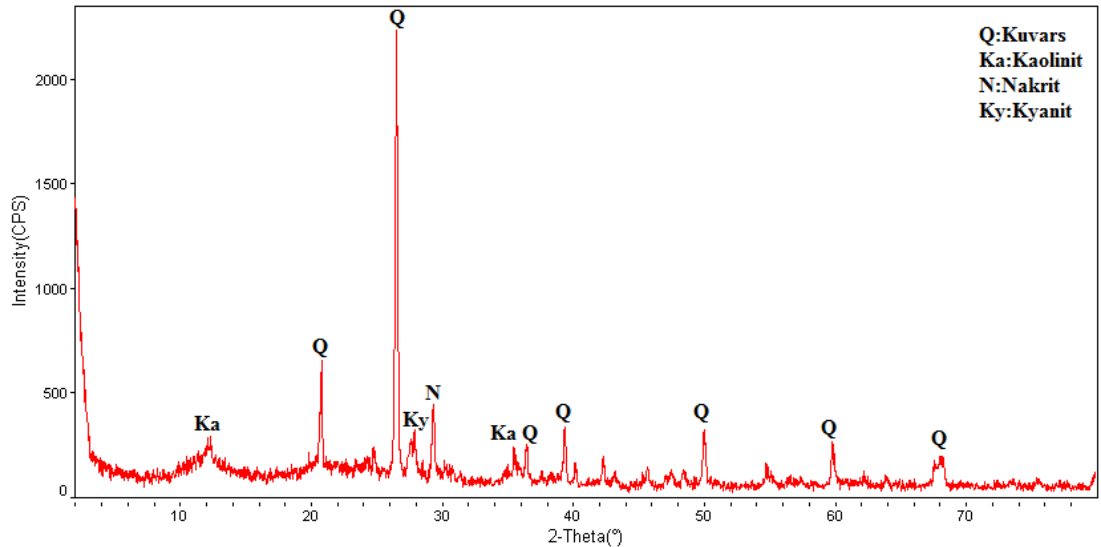


Şekil 4.53. NaOH konsantrasyonu 12 M, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan geopolimer beton numunesinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri

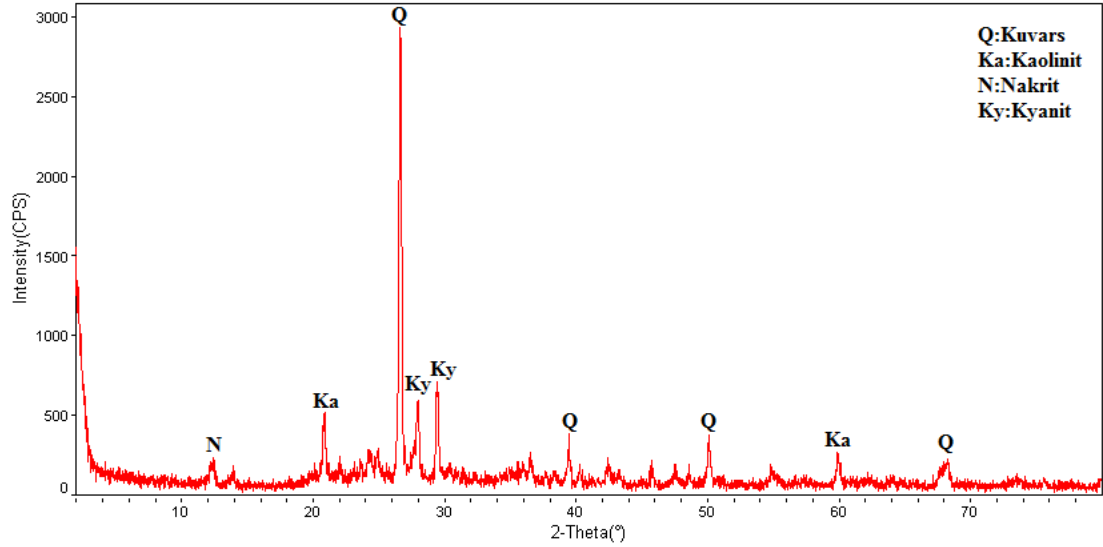
SEM görüntüleri incelendiğinde her iki alkali aktivatör tipi için yoğun jel yapıları tespit edilmiştir. Isıl kür uygulanması nedeniyle birbirleriyle daha az bağlantılı ve daha kıvrımlı gözenek ağı oluşmuştur. Ancak NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer beton numunede belirgin bir çatlak oluşumu görülmüştür. Bu durumun basınç dayanımı üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde Wardhono vd. (2017) geopolimer beton numuneleri üzerinde yaptıkları mikroyapı incelemesinde jel matrisi boyunca dağılmış çatlaklar tespit etmiş, bu durumun ısı kür etkisiyle meydana gelen kuruma ve suyun buharlaşmasından kaynaklı olduğunu ifade etmişlerdir. SEM görüntülerinde tespit edilen ağsı görünüme sahip amorf jeller daha önce yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Zhang vd. 2005; Singh vd. 2016).

4.5.3.2. Katkısız geopolimer beton numunelerin XRD analizleri

Katkısız geopolimer beton numunelerin XRD analizleri, hem NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş karışımlar için hem de NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş karışımlar için maksimum basınç dayanımının elde edildiği 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Katkısız geopolimer beton numunelerin XRD analizleri Şekil 4.54-4.55'de verilmiştir.



Şekil 4.54. Silis modülü 0.8, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan katkısız geopolimer beton numunesinin XRD analizi



Şekil 4.55. NaOH konsantrasyonu 12 M, ç/b oranı 0.60, kür sıcaklığı 90°C olan katkısız geopolimer beton numunesinin XRD analizi

Alkali aktivatör tipi katkısız geopolimer beton numunelerin geopolimerizasyon reaksiyonları sonucu oluşan mineral tipini değiştirmemiştir. Her iki alkali aktivatör çözeltisi için kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), nakrit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), kyanit (Al_2SiO_5) mineralleri tespit edilmiştir. Ayrıca her iki numunede belirgin kuvars piki görülmüştür.

4.6. Katkılı Geopolimer Beton Deneylei ile ilgili Bulgular ve Tartışma

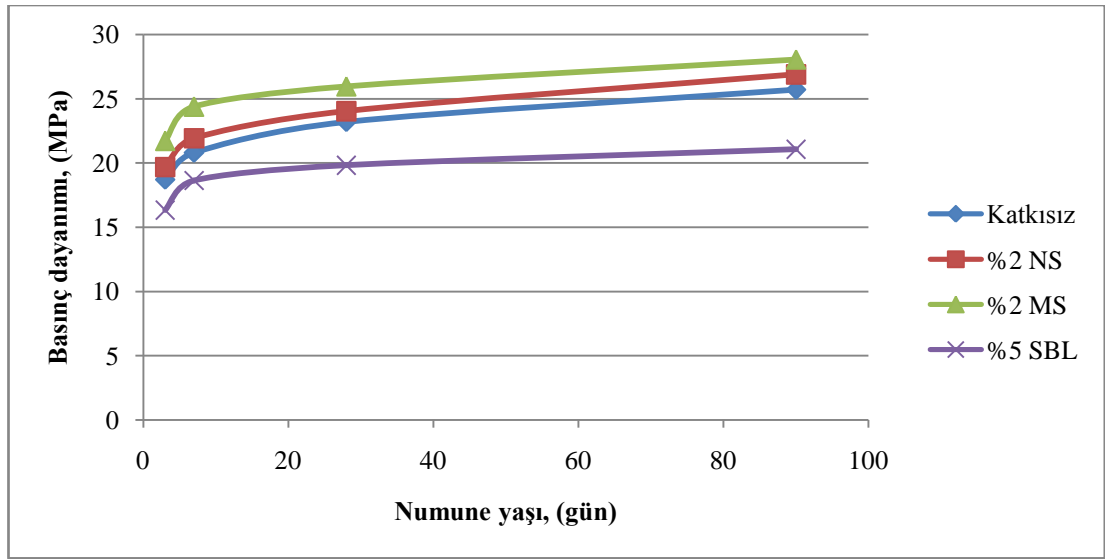
Deneysel olarak elde edilmiş optimum özelliklere sahip volkanik tüf esaslı geopolimer beton numunelere %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıları ilave edilerek mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Katkı oranları detaylı literatür taramaları sonucunda belirlenmiş olup, kuru bağlayıcı (volkanik tüf) ağırlığına göre hesaplanmıştır. Katkılı geopolimer beton numuneler üzerinde basınç dayanımı (3, 7, 28 ve 90 gün), asit direnci (%3, %5 ve %7 HCl), yüksek sıcaklık direnci (100, 300, 500 ve 700°C) testleri gerçekleştirilmiştir. Su emme oranı ve hacimsel yoğunluk gibi bazı fiziksel özellikleri incelenmiştir. Ayrıca SEM ve XRD analizleri ile mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular literatürde verilen çalışmalarla kıyaslanmıştır.

4.6.1. Katkılı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı

Nano silis, mikro silis, SB lateks katkıların geopolimer betonların basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Katkılı geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.17'de verilmiş olup ve Şekil 4.56'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Katkılı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri

Katkı türü	Basınç dayanımı, (MPa)			
	3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Katkısız	18.70	20.80	23.20	25.70
%2 Nano silis	19.68	21.93	24.03	26.89
%2 Mikro silis	21.71	24.38	25.96	28.06
%5 SB lateks	16.33	18.64	19.82	21.06



Şekil 4.56. Katkılı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri

Katkıların geopolimer betonların basınç dayanımına etkisi incelendiğinde, nano silis ve mikro silis katkıların basınç dayanımını arttırdığı, SB lateks katkısının ise basınç dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir. 90 günlük numunelerde, nano silis ve mikro silis ilavesi basınç dayanımını sırasıyla %4.63 ve %9.18 oranlarında arttırmış, SB lateks ilavesi ise %18.05 oranında düşürmüştür. SB lateks katkısının basınç dayanımını olumsuz etkilemesi, polimer katkının hammadde üzerinde kaplama etkisi yapması ve bağlayıcının reaktivitesini düşürmesinden kaynaklı olabilir (Zhang vd. 2010). Mikro

silis ilavesi nano silise kıyasla basınç dayanımını daha çok arttırmıştır. Benzer şekilde Behfarnia ve Rostami (2017) nano silis ve mikro silis ilavesinin cüruf esaslı geopolimer beton özelliklerine etkilerini inceledikleri çalışmada, mikro silis ilavesinin nano silis ilavesine kıyasla daha yüksek basınç dayanımına yol açtığını ifade etmişlerdir. Nano silis ve mikro silis ilavesi reaktif silika kaynağı ve dolgu etkisi sağladığı için basınç dayanımını arttırmıştır (Gao vd. 2015). Adak vd. (2014) ise nano silis ilavesi ile basınç dayanımında meydana gelen artışın amorf yapıların kristal yapılara dönüşmesinden kaynaklı olduğunu ifade etmişlerdir. Volkanik tüf esaslı geopolimer betonlarda numune yaşı arttıkça basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımı değerleri baz alındığında 3 günlük numunelerin dayanım kazanma oranları katkısız, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılı betonlarda sırasıyla, %80.60, %81.90, %83.63 ve %82.39 olarak tespit edilmiştir. Isıl küren etkisiyle geopolimer betonların erken yaşlarda yüksek oranda basınç dayanım kazandığı görülmüştür.

Nano silis, yüksek yüzey alanı nedeniyle erken yaştan itibaren reaksiyon sürecine dahil olur. Alüminosilikat hammaddenin daha fazla reaksiyon yapması sonucu daha yüksek mukavemet kazandırması beklenir (Fernandez-Jimenez vd. 2008). Bununla birlikte, mukavemet artışı sağlayan nano silis yüzdesinin sınır değeri vardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda optimum nano silis içeriği %2 olarak bulunmuştur. Belkowitz vd. (2015) reaksiyona girmemiş nano silisin matriste kuruma ve çatlamaya yol açtığını ve sonuç olarak mukavemeti azalttığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle, %3 nano silis ilavesinin, %2 nano silis ilavesine kıyasla daha az mukavemet gelişimine yol açması, kusurlu bölgeler olarak işlev gören reaksiyona girmemiş parçacıkların varlığına atfedilir (Deb vd. 2016). Deb vd. (2015) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer numunelere nano silis ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Nano silisin mukavemet ve mikroyapısal gelişim üzerindeki etkisini anlamak için toplam bağlayıcı ağırlığının %3'üne kadar bir oranda ilave etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda geopolimer karışımlarına nano silis ilavesi ile mukavemet ve mikroyapısal özelliklerin geliştirilebileceğini belirtmişlerdir. Basınç dayanımı, nano silis içeriğinin %2'ye kadar artması ile artmış ancak %2'den fazla nano silis ilavesi durumunda düşmüştür. %2 oranında nano silis katkısının, sahip olduğu yüksek yüzey alanının polimerizasyon işlemi için yeterli olduğunu, %2'den fazla kullanılan nano

silisin reaksiyona girmemesi sebebiyle dayanımın düştüğünü ifade etmişlerdir. Benzer şekilde Gao vd. (2015) nano silis ilavesinin uçucu kül-cüruf esaslı geopolimer karışımların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada optimum nano silis katkı oranını %2 olarak tespit etmişlerdir. Daha yüksek oranlarda nano silis ilavesinin kıvam ve reaksiyon kinetiğini düşürmesi sebebiyle mukavemet üzerinde olumsuz bir etki gösterdiğini ifade etmişlerdir.

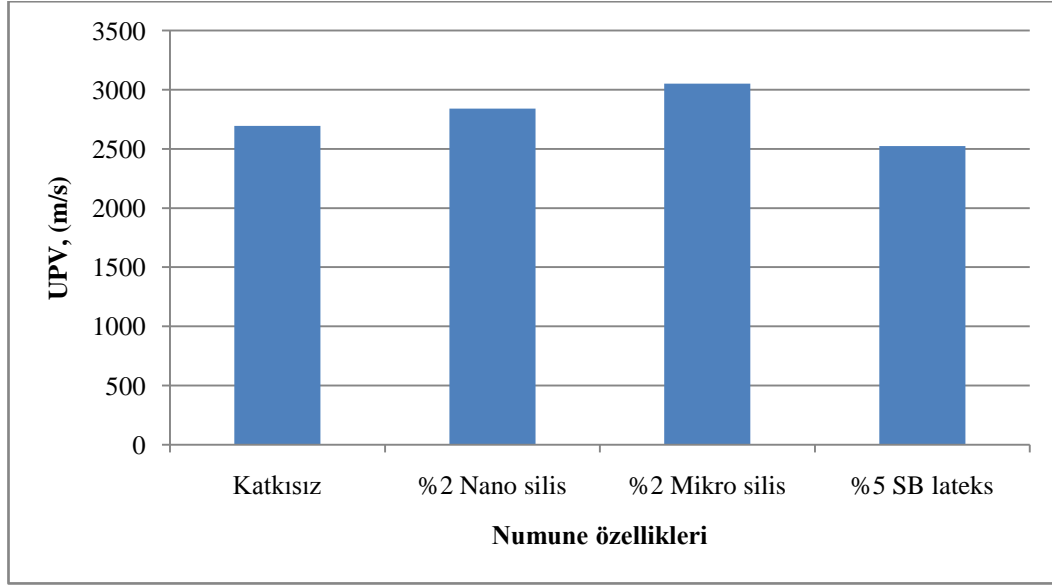
Assaedi vd. (2016b) yaptıkları çalışmada, nano kil ilavesinin uçucu kül esaslı geopolimer betonların mekanik ve termal özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Kuru bağlayıcı ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranlarında nano kil eklenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, nano kil ilavesi ile birlikte geopolimerlerin mekanik özelliklerinin geliştiğini ortaya çıkarmıştır. Basınç dayanımı açısından optimum nano kil oranı %2 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, mikro analiz sonuçları nano kil partiküllerinin sadece geopolimerlerin mikroyapısını iyileştirmek için kullanılan bir dolgu malzemesi olmadığını aynı zamanda meydana gelen reaksiyonu hızlandırmak için bir aktivatör olarak görev yaptığını göstermiştir. Assaedi vd. (2016c) yaptıkları çalışmada, %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında nano silikanın karışım metotlarının, geopolimer kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçları, nano silika ilavesinin genel olarak mikroyapıyı geliştirerek geopolimer kompozitlerin eğilme ve basınç dayanımlarını arttırdığını göstermiştir. Kuru karışım yöntemi kullanılarak hazırlanan geopolimer numunelerin, yaş karışım örneklerine göre daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler sergilediğini ifade etmişlerdir. Kuru karışımda artan nano ilavesi ile dayanımın düşüş göstermesinin sebebini geopolimer matrislerdeki artan nano silisin nispeten zayıf dağılımı ve topak oluşumunun yol açtığı mikro gözenekler büyüklüğünde zayıf bölgeler olarak açıklamışlardır.

4.6.2. Katkılı geopolimer beton numunelerin UPV değerleri

Nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıların geopolimer betonların UPV değerlerine etkisini incelemek amacıyla 28 günlük numuneler üzerinde UPV ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Geopolimer beton numunelerin UPV değerleri Çizelge 4.18'de verilmiş olup, Şekil 4.57'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. 28 günlük katkılı geopolimer beton numunelerin UPV değerleri

Katkı türü	UPV, (m/s)
Katkısız	2695
%2 Nano silis	2840
%2 Mikro silis	3050
%5 SB lateks	2523



Şekil 4.57. 28 günlük katkılı geopolimer beton numunelerin UPV değerleri

Katkılı geopolimer beton numunelerin UPV değerleri 2523 m/s ile 3050 m/s arasında değişkenlik göstermektedir. Basınç dayanımı bulguları ile uyumlu olarak nano silis ve mikro silis katkıları UPV değerlerini arttırmış SB lateks katkısı ise UPV değerlerini düşürmüştür. Maksimum UPV değeri %2 mikro silis katkıli numunede 3050 m/s olarak elde edilmiştir. Nano silis ve mikro silis ilavesi ile UPV değerlerinin artması, bu katkıların reaktif silika kaynağı ve dolgu etkisi yaparak mikroyapıyı güçlendirmesinden kaynaklı olabilir (Gao vd. 2015; Assaedi vd. 2016b, c). SB lateks ilavesi ile UPV değerlerinin düşmesi ise, bu katkıının ultrases dalgalarının iletilmesini zorlaştırmasından ve hammaddenin reaktivitesini düşürmesinden kaynaklı olabilir (Zhang vd. 2010).

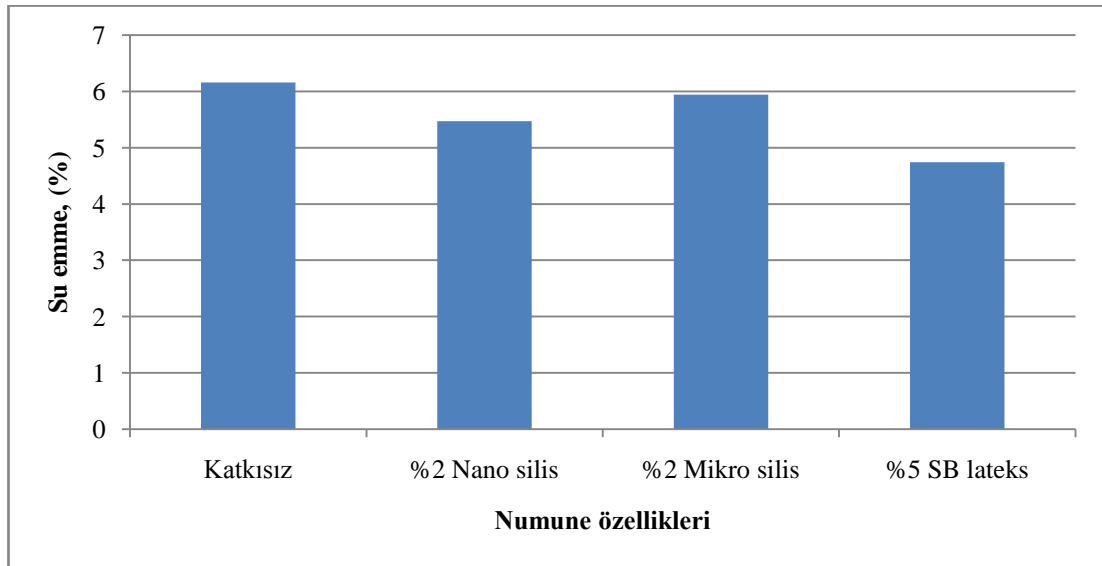
4.6.3. Katkılı geopolimer beton numunelerin fiziksel özellikleri

4.6.3.1. Katkılı geopolimer beton numunelerin su emme değerleri

Nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıları içeren geopolimer betonların su emme oranları tayini 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geopolimer beton numunelerin su emme değerleri Çizelge 4.19'da verilmiş olup ve Şekil 4.58'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. Katkılı geopolimer beton numunelerin su emme oranları

Katkı türü	Su emme oranı, (%)
Katkısız	6.16
%2 Nano silis	5.47
%2 Mikro silis	5.94
%5 SB lateks	4.74



Şekil 4.58. Katkılı geopolimer beton numunelerin su emme oranları

Katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıları içeren geopolimer beton numunelerin su emme oranları sırasıyla, %6.16, %5.47, %5.94 ve %4.74 olarak elde edilmiştir. Katkıların geopolimer betonların su emme oranına etkisi incelendiğinde, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıların su emme oranlarını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Geopolimer beton numunelerin su emmesi geopolimer mikroyapısında bulunan açık ve kapalı gözeneklerin varlığıyla ilişkilidir. Bu gözenekler

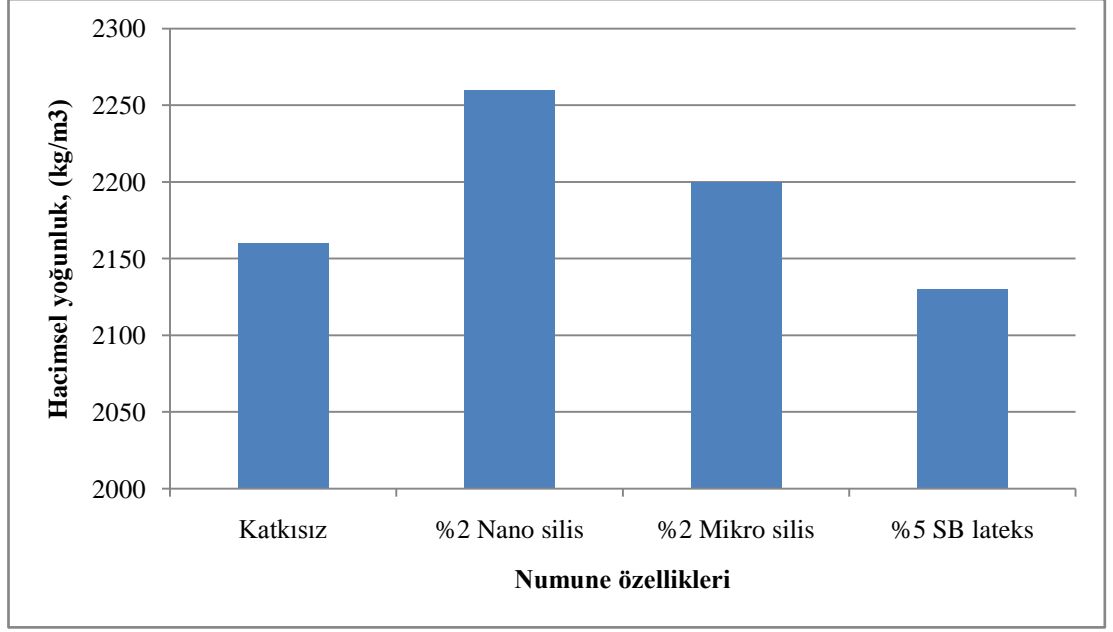
geopolimerizasyon reaksiyonlarında yer almayan sudan kaynaklanmaktadır (Djobo vd. 2016). Nano silis ve mikro silis katkı içeren numunelerde su emme oranının düşmesi, bu katkıların hem geopolimerizasyon reaksiyonlarını arttırması hem de dolgu malzemesi olarak görev yapmasından kaynaklanmaktadır (Zhang vd. 2017; Deb vd. 2016; Assaedi vd. 2016b, c). Nano ve mikro katkıların su emme oranını düşürmesi daha önce yapılan çalışmalarda doğrulanmıştır (Behfarnia ve Rostami, 2017; Assaedi vd. 2016b). Minimum su emme oranının SB lateks içeren numunelerde elde edilmesi ise polimer katkıların yüzeyde su geçişini azaltan bir kaplama görevi görmesinden kaynaklanmaktadır (Zhang vd. 2010). Volkanik tüf esaslı geopolimer betonların su emme değerleri literatürde bulunan normal Portland çimentolu numunelerden daha düşük çıkmıştır (Türkmen vd. 2016). Bu durumun suyun kolaylıkla nüfuz edemediği daha ince, kıvrımlı ve kapalı gözeneklerin varlığıyla ilişkili olduğu kanaatine varılmıştır (Hossain vd. 2015; Bernal vd. 2011). Volkanik tüf esaslı geopolimer betonların su emme değerleri daha önce yapılan çalışmalar tarafından desteklenmektedir (Djobo vd. 2016; Türkmen vd. 2016; Noushini ve Castel, 2016).

4.6.3.2. Katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri

Katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri Çizelge 4.20'de verilmiş olup, Şekil 4.59'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. Katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri

Katkı türü	Hacimsel yoğunluk, (kg/m ³)
Katkısız	2160
%2 Nano silis	2260
%2 Mikro silis	2200
%5 SB lateks	2130



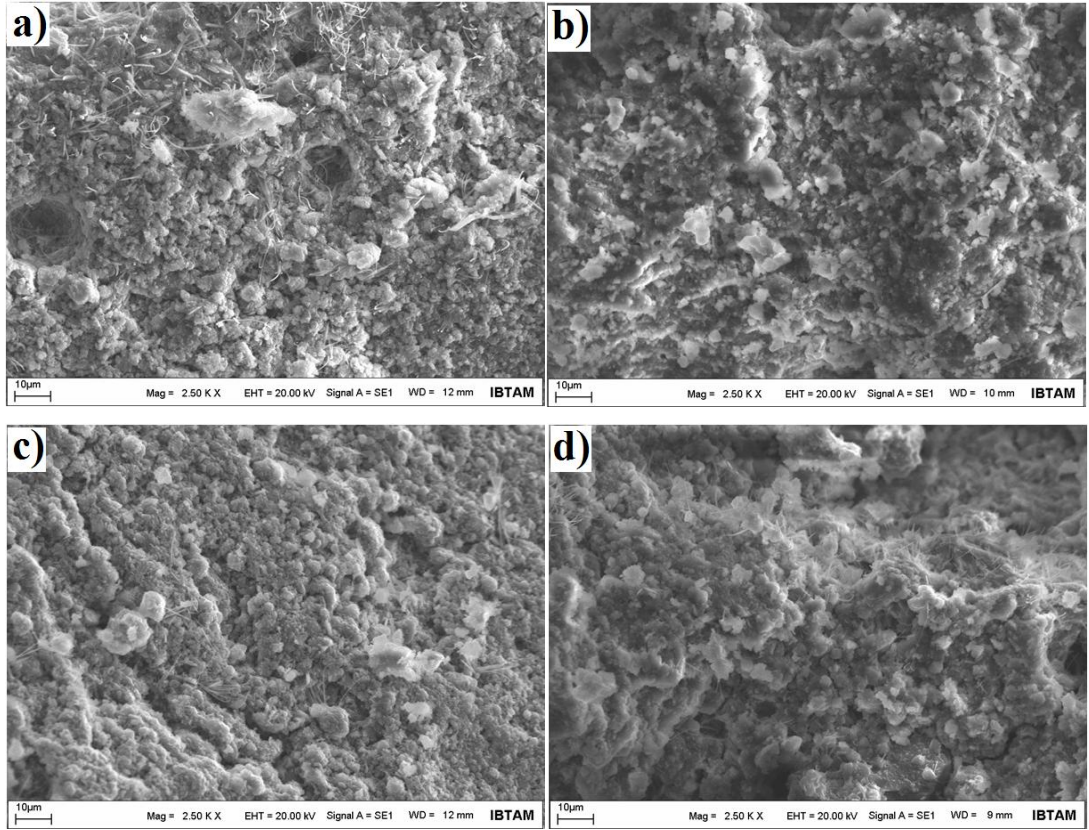
Şekil 4.59. Katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri

Katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri sırasıyla, 2160 kg/m³, 2260 kg/m³, 2200 kg/m³ ve 2130 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Katkıların geopolimer betonların hacimsel yoğunluğuna etkisi incelendiğinde, nano silis ve mikro silis katkıların hacimsel yoğunluk değerlerini sırasıyla %4.6 ve %1.8 oranlarında arttırdığı, SB lateks katkının ise %1.4 oranında düşürdüğü gözlenmiştir. Geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri mikroyapıda bulunan boşluklar ile ilişkilidir. Nano silis ve mikro silis katkıların hacimsel yoğunluk değerlerini arttırması, bu katkıların geopolimerizasyon reaksiyonlarını arttırması ve dolgu malzemesi olarak görev yapmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Zhang vd. 2017; Deb vd. 2016; Assaedi vd. 2016b, c). SB lateks içeren numunelerde hacimsel yoğunluk değerlerinin daha düşük çıkması, polimer katkının geopolimerizasyon reaksiyonlarına pozitif etkisinin kısıtlı olmasından kaynaklı olabilir. SB lateks katkıli numunelerin basınç dayanımının daha düşük çıkması bu görüşü desteklemektedir. Deneysel olarak elde edilen hacimsel yoğunluk değerleri daha önce yapılan çalışma tarafından desteklenmektedir (Djobo vd. 2016).

4.6.4. Katkılı geopolimer beton numunelerin mikroyapı incelemeleri

4.6.4.1. Katkılı geopolimer beton numunelerin SEM analizleri

Katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerinden aynı ölçekte alınmış SEM görüntüleri Şekil 4.60'da verilmiştir.



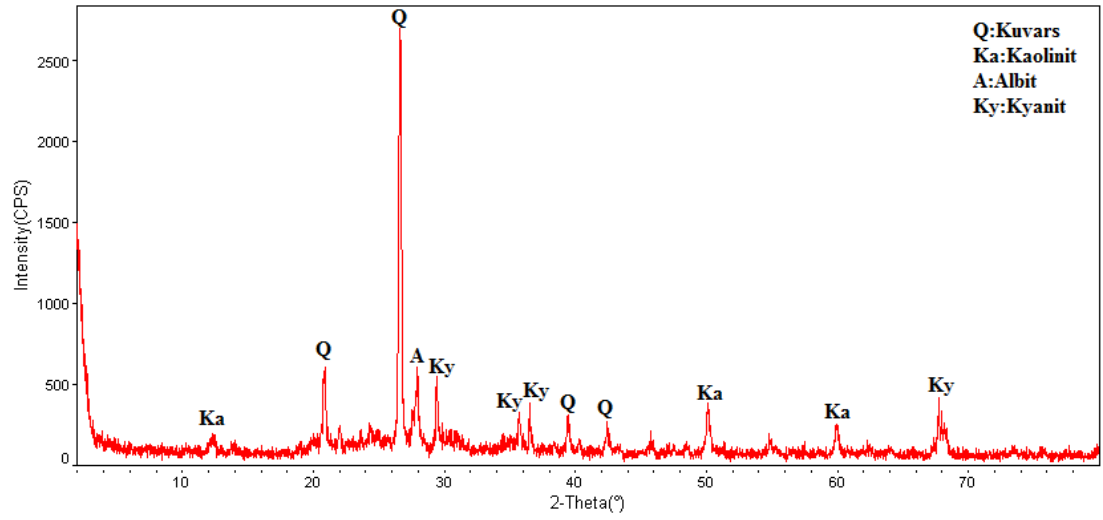
Şekil 4.60. Katkılı geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri, a) Katkısız, b) Nano silis katkıli, c) Mikro silis katkıli, d) SB lateks katkıli

SEM görüntüleri incelendiğinde katkı tipinden bağımsız olarak bütün numunelerde ağ şeklinde dağılmış jel matrisi tespit edilmiştir. Nano silis ve mikro silis katkıli numunelerde daha yoğun bir mikroyapının elde edildiği söylenebilir. Özellikle nano silis katkıli numunede dolu bir mikroyapı tespit edilmiştir. Benzer şekilde Deb vd. (2016) yaptıkları çalışmada, nano silis katkıli geopolimer numunelerin mikroyapılarını incelemiş ve optimum nano silis içeriğinde iyi kenetlenmiş morfolojiye sahip yoğun mikroyapılar oluştuğunu belirtmişlerdir. Nano silis ve mikro silis katkıların geopolimerlerde daha sıkı ve yoğun bir mikroyapıya yol açtığı daha önce yapılan çalışmalarda doğrulanmıştır (Behfarnia ve Rostami, 2017; Assaedi vd. 2016b; Deb vd. 2015). Katkısız geopolimer numunede küre şeklinde boşluklar,

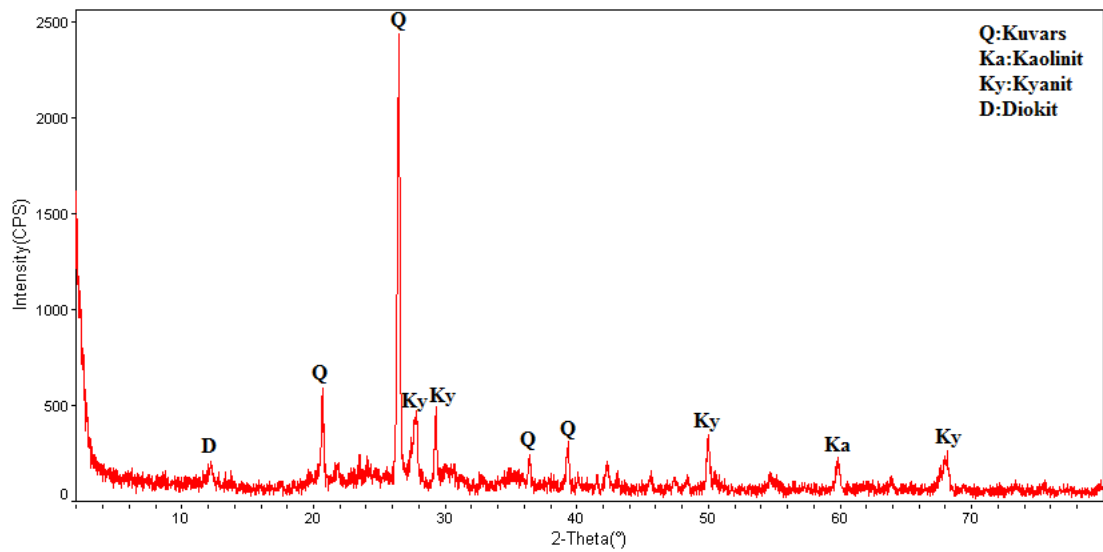
SB lateks katkıli numunede ise mikro çatlaklar görülmüştür (Şekil 4.60a, d). Katkısız ve SB lateks katkıli numunelerin basınç dayanımlarının göreceli olarak daha düşük çıkması söz konusu boşluk ve çatlaklardan kaynaklı olabilir.

4.6.4.2. Katkıli geopolimer beton numunelerin XRD analizleri

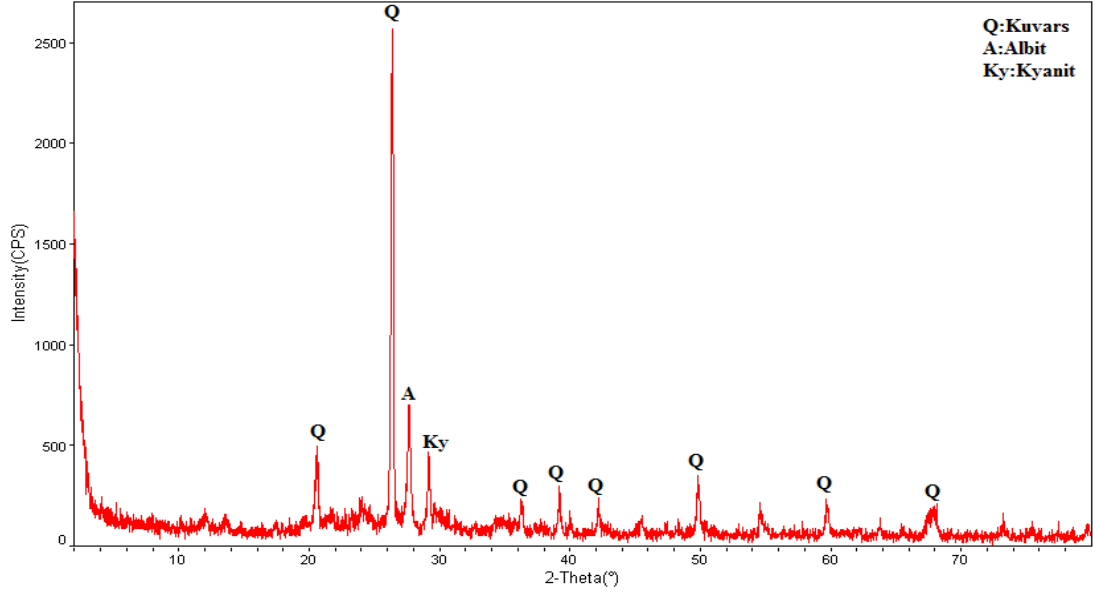
Katkılı geopolimer beton numunelerin XRD analizleri 28 günlük numuneler üzerinde yapılmış olup Şekil 4.61-4.63'de gösterilmiştir.



Şekil 4.61. %2 nano silis katkıli geopolimer beton numunesinin XRD analizi



Şekil 4.62. %2 mikro silis katkıli geopolimer beton numunesinin XRD analizi



Şekil 4.63. %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinin XRD analizi

%2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$), kyanit (Al_2SiO_5) mineralleri, %2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), kyanit (Al_2SiO_5), diokit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) mineralleri, %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$), kyanit (Al_2SiO_5) mineralleri tespit edilmiştir. Katkı türünden bağımsız olarak bütün numunelerde belirgin bir kuvars piki elde edilmiştir.

4.6.5. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık direnci

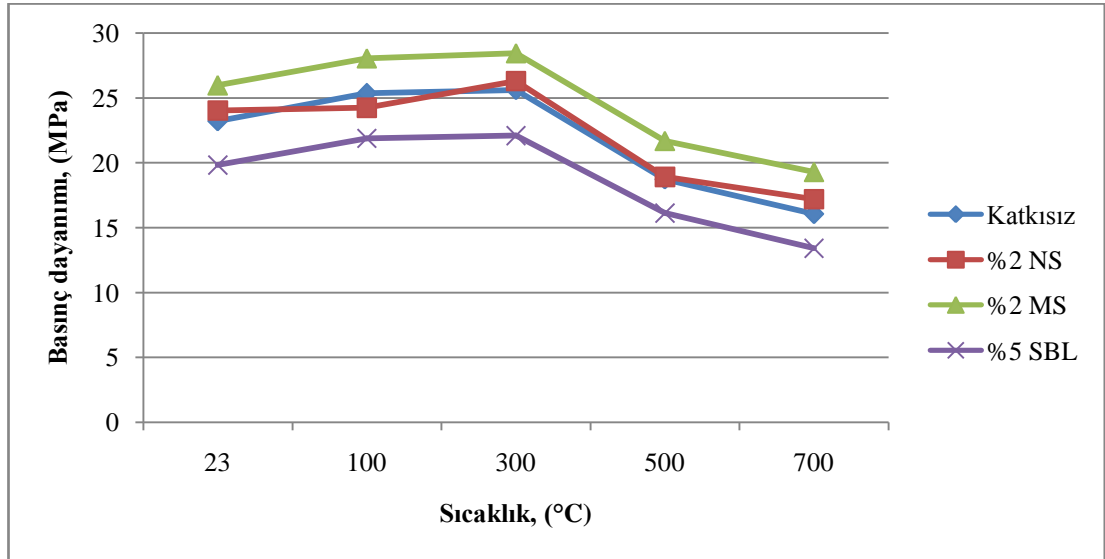
Volkanik tüf esaslı geopolimer beton numunelerine %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıları ilave edilerek yüksek sıcaklık etkisinde davranışı araştırılmıştır. 100, 300, 500 ve 700°C sıcaklıklara bir saat boyunca maruz bırakılan numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı, ağırlık, su emme oranı ve görsel görünüm değişimleri incelenmiştir. Ayrıca SEM ve XRD analizleri ile mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular aşağıda verilmiştir.

4.6.5.1. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

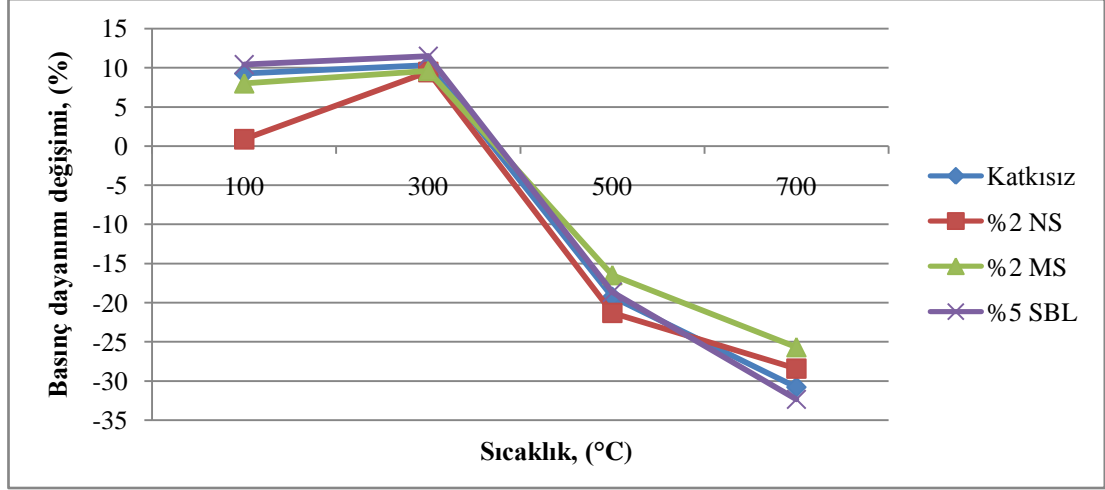
Katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.21'de verilmiş olup Şekil 4.64'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinde artan sıcaklık etkisi ile laboratuvar ortamında bekletilen numunelere kıyasla meydana gelen değişim Şekil 4.65'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerleri

Katkı türü	Basınç dayanımı, (MPa)				
	23°C (Lab.)	100°C	300°C	500°C	700°C
Katkısız	23.20	25.35	25.60	18.73	16.05
%2 Nano silis	24.03	24.24	26.30	18.91	17.20
%2 Mikro silis	25.96	28.04	28.45	21.68	19.29
%5 SB lateks	19.82	21.88	22.09	16.12	13.41



Şekil 4.64 Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.65. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değişimleri

Deneysel bulgular incelendiğinde, geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinin katkı türünden bağımsız olarak 300°C sıcaklığa kadar artış gösterdiği bu sıcaklıktan sonra düştüğü görülmüştür. Duan vd. (2015) basınç dayanımındaki bu artışın geopolimer bünyesinde biriken sudan kaynaklı olduğunu ifade etmişlerdir. Su ısınma işlemi sırasında geopolimer matristen dışarı atılır ve matris boyunca süresiz nano gözeneklere neden olur ve böylece basınç dayanımı artar. Xu vd. (2001) ise basınç dayanımındaki artışın kuruma ve daha fazla hidrasyon sonucu meydana gelen geopolimer hamurunun sertleşmesinden kaynaklı olabileceğini belirtmişlerdir (Duan vd. 2015). Katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri 100°C ve 300°C sıcaklıklarda sırasıyla %9.26 ve %10.34 oranlarında artmış, 500°C ve 700°C sıcaklıklarda ise sırasıyla %19.27 ve %30.82 oranlarında azalmıştır. %2 nano silis katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri 100°C ve 300°C sıcaklıklarda sırasıyla %0.87 ve %9.45 oranlarında artmış, 500°C ve 700°C sıcaklıklarda ise sırasıyla %21.31 ve %28.42 oranlarında azalmıştır. %2 mikro silis katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri 100°C ve 300°C sıcaklıklarda sırasıyla %8.01 ve %9.59 oranlarında artmış, 500°C ve 700°C sıcaklıklarda ise sırasıyla %16.49 ve %25.69 oranlarında azalmıştır. %5 SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri ise 100°C ve 300°C sıcaklıklarda sırasıyla %10.39 ve %11.45 oranlarında artmış, 500°C ve 700°C sıcaklıklarda ise sırasıyla %18.67 ve %32.34 oranlarında azalmıştır. 700°C sıcaklık etkisi sonrasında katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri sırasıyla %30.82, %28.42,

%25.69 ve %32.34 oranlarında düşüş göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen basınç dayanımı düşüşü, arayüzey bölgelerinde meydana gelen mikro çatlaklara ve geopolimer hamuru ile agrega arasındaki termal uyumsuzluğa bağlanmaktadır (Kong ve Sanjayan, 2010; Singh vd. 2015; Zhang vd. 2016)

Normal Portland çimentolu numunelerin basınç dayanımı Ca(OH)_2 varlığından dolayı 400°C sıcaklıktan sonra önemli ölçüde düşüş gösterir. Geopolimerlerde ise alüminosilikat jel kuvvetli bir bağ yapısı oluşturduğu için basınç dayanımları yüksektir (Duan vd. 2015). Geopolimerler hidrat fazı ve özellikle Ca(OH)_2 içermez. Portland çimentosu, yüksek sıcaklığa ($>400^\circ\text{C}$) maruz bırakıldığında, yapısal su iç gerilmelere neden olur. Ayrıca Ca(OH)_2 CaO 'ya dönüşür. CaO soğutulduğunda, hacim değişimi ile tekrar hidrate olur, bu da matrisler üzerinde olumsuz etkilere neden olur. Buna karşın geopolimerler, yüksek sıcaklıkta çok dengeli olan kararlı susuz alüminosilikat malzemeler halinde tekrar kristalleşirler (Saxena vd. 2017).

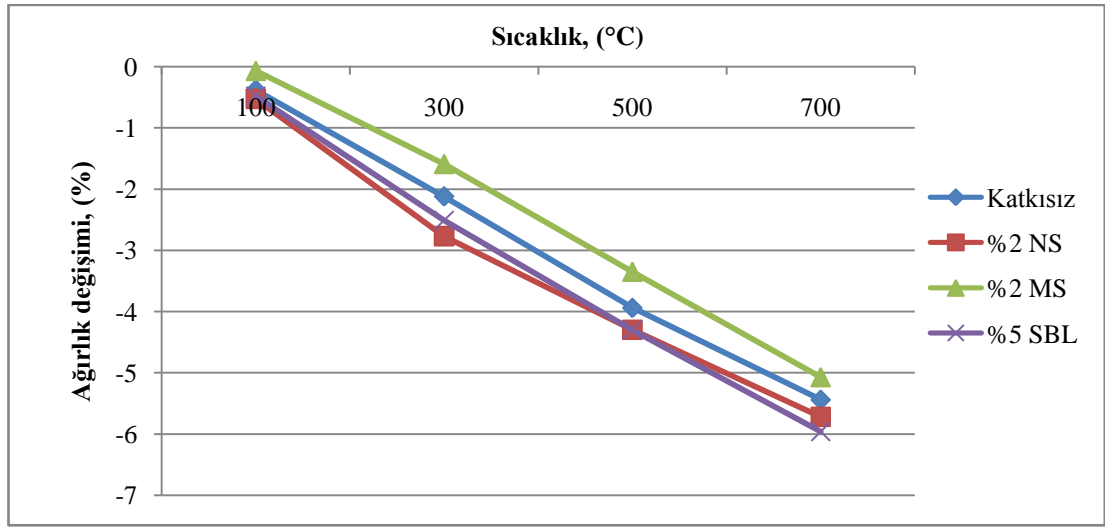
Zhao ve Sanjayan (2011) 40-100 MPa basınç dayanımına sahip uçucu kül esaslı geopolimer numunelerini, 850°C sıcaklığa maruz bırakmış ve numunelerin parçalanmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, normal Portland çimentosu ile aynı basınç dayanımı değerine sahip geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık etkisine daha dirençli olduğunu ifade etmiş ve bu durumun artan gözenekliliğin etkisiyle meydana geldiğini belirtmişlerdir. Duan vd. (2015) uçucu kül ve metakaolin esaslı geopolimer numuneler üzerine yaptıkları 400°C 'ye kadar uygulanan sıcaklık etkisinin basınç dayanımını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. 1000°C sıcaklıktan sonra basınç dayanımı değerlerinde %25 oranında düşüş tespit etmişlerdir. Volkanik tüf esaslı geopolimer betonların yüksek sıcaklık etkisi sonucu basınç dayanımında meydana gelen kısmi artış farklı araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır (Türkmen vd. 2016; Martin vd. 2015; Hosan vd. 2016).

4.6.5.2. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimleri

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış geopolimer beton numunelerin ağırlık değişimleri Çizelge 4.22'de verilmiş olup, Şekil 4.66'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.22. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimleri

Katkı türü	Ağırlık değişimleri, (%)			
	100°C	300°C	500°C	700°C
Katkısız	-0.38	-2.12	-3.94	-5.44
%2 Nano silis	-0.53	-2.77	-4.30	-5.72
%2 Mikro silis	-0.07	-1.59	-3.35	-5.07
%5 SB lateks	-0.48	-2.51	-4.30	-5.96



Şekil 4.66. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimleri

Geopolimer beton numunelerin ağırlıkları artan sıcaklık etkisi ile azalmıştır. Ağırlık kayıpları katkısız numunelerde %0.38 ile %5.44 arasında, nano silis katkılı numunelerde %0.53 ile %5.72 arasında, mikro silis katkılı numunelerde %0.07 %5.07 arasında, SB lateks katkılı numunelerde %0.48 ile %5.96 arasında değişkenlik göstermiştir. Bütün numune gruplarının ağırlık kayıpları katkı türünden bağımsız olarak artan sıcaklık etkisi ile artmıştır. Mikro silis içeren numunelerin ağırlık kayıpları bütün sıcaklık değerlerinde diğer numunelere kıyasla daha az olmuştur. Benzer şekilde Duan vd. (2017) yaptığı çalışmada mikro silis ilavesinin geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybını azalttığını ifade etmişlerdir. Yüksek sıcaklık etkisi sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları alüminosilikat jellerinin dehidrasyonu, çatlak oluşumu ve köşe noktalarının kırılmasından kaynaklı olabilir (Saxena vd. 2017). Volkanik tüf esaslı geopolimer

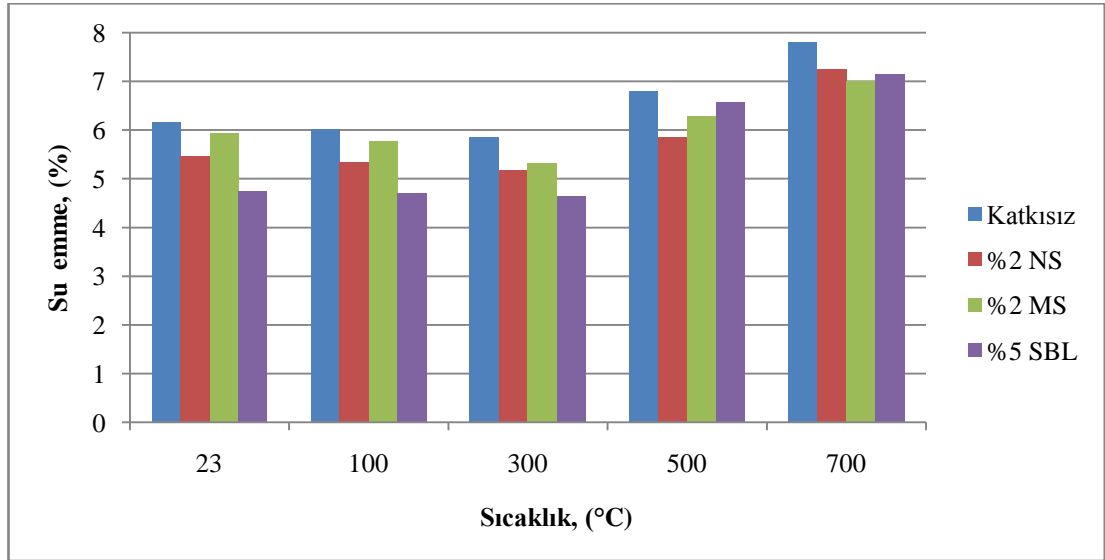
betonların ağırlık kaybı değerleri daha önce yapılan çalışmalar tarafından desteklenmektedir (Duan vd. 2015; Hosan vd. 2016).

4.6.5.3. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme değerleri

Geopolimer betonların yüksek sıcaklık sonrası su emme değerleri Çizelge 4.23'de verilmiş olup Şekil 4.67'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.23. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme değerleri

Katkı türü	Su emme, (%)				
	23°C (Lab.)	100°C	300°C	500°C	700°C
Katkısız	6.16	6.02	5.86	6.80	7.81
%2 Nano silis	5.47	5.34	5.17	5.86	7.25
%2 Mikro silis	5.94	5.77	5.31	6.28	6.99
%5 SB lateks	4.74	4.69	4.65	6.57	7.15



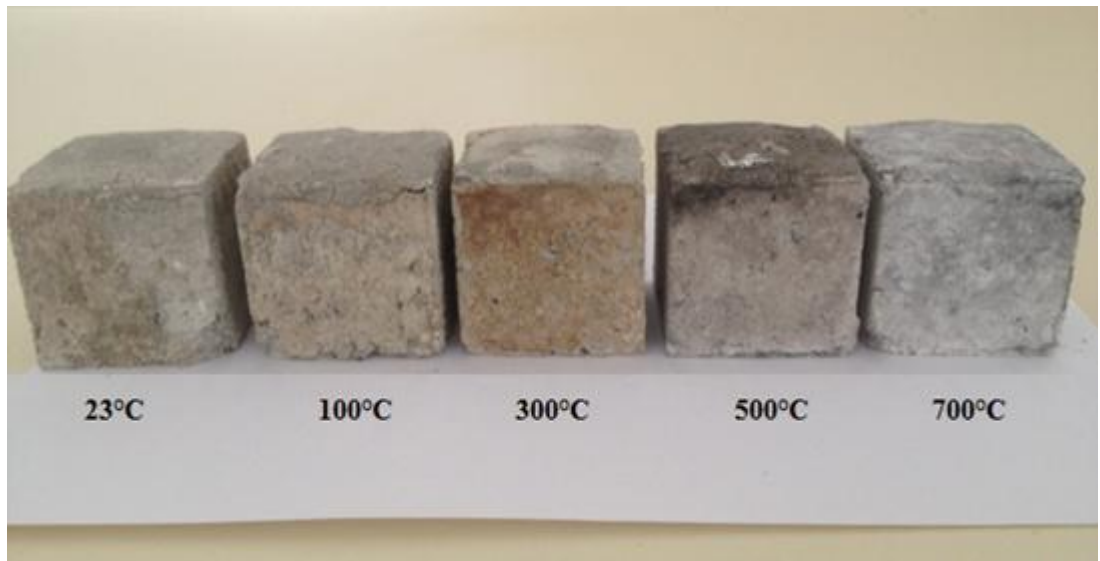
Şekil 4.67. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme değerleri

Geopolimer betonların deneysel bulguları incelendiğinde, su emme değerlerinde 300°C sıcaklığa kadar hafif bir düşüş tespit edilmiştir. Söz konusu düşüş, basınç

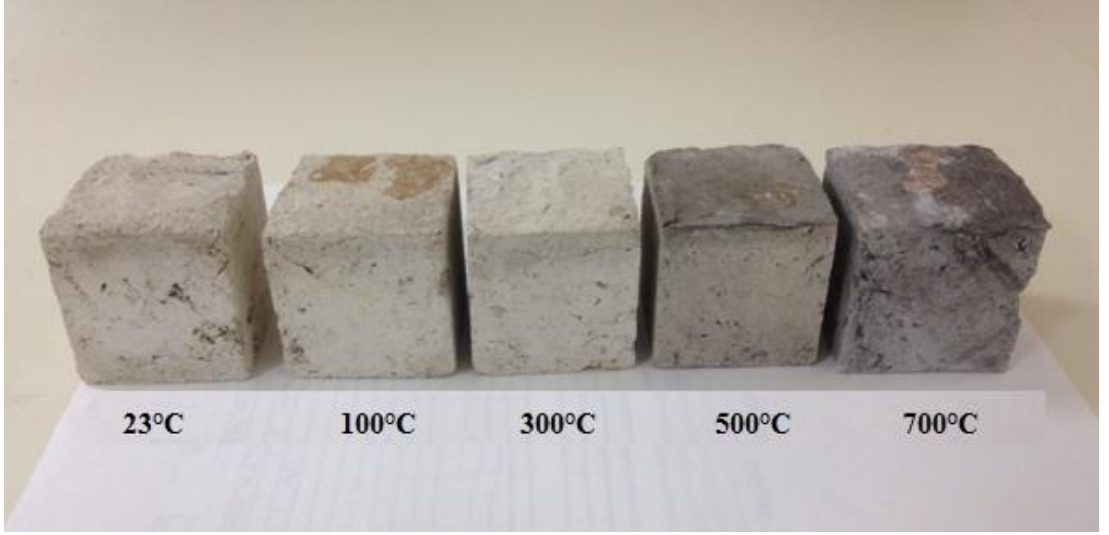
dayanımı değerlerinde görülen artış ile örtüşmektedir. 300°C sıcaklığa kadar artan basınç dayanımının beraberinde daha yoğun ve kompakt bir matris meydana getirmesi nedeniyle su emme oranı düşmüş olabilir (Xu vd. 2001). Su emme oranlarında görülen kısmi düşüş çeşitli araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır (Kürklü, 2016; Türkmen vd. 2016). Su emme oranları 500 ve 700°C sıcaklıklarda belirgin bir artış göstermiştir (şekil 4.67). Yüksek sıcaklıklarda (500°C, 700°C) alüminosilikat jellerinin dehidrasyonu sonucu artan gözeneklilik ve çatlak oluşumu nedeniyle su emme oranlarında artış gözlenmiştir (Duan vd. 2015; Saxena vd. 2017). Ayrıca nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme değerlerinin katkısız numunelerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 700°C sıcaklığa maruz bırakılan katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin su emme değerlerinin (sırasıyla %7.81, %7.25, %6.99 ve %7.15) literatürde yer alan normal Portland imentolu ve geopolimer betonların su emme değerlerinden daha düşük olduğu grlmştir (Türkmen vd. 2016).

4.6.5.4. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görsel görünümü

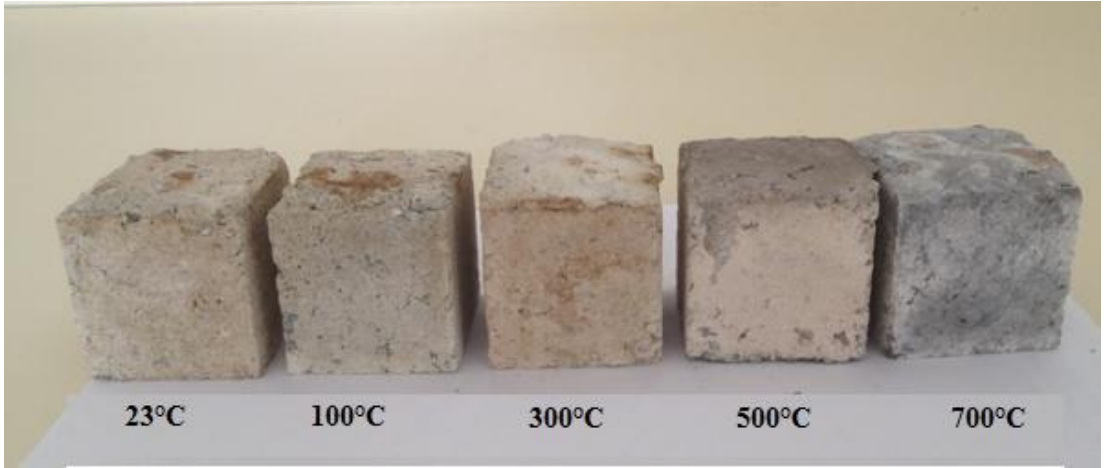
Yüksek sıcaklık etkisi sonucu geopolimer beton numunelerin dış yüzeyinde meydana gelen görsel değişimler şekil 4.68-4.71'de verilmiştir.



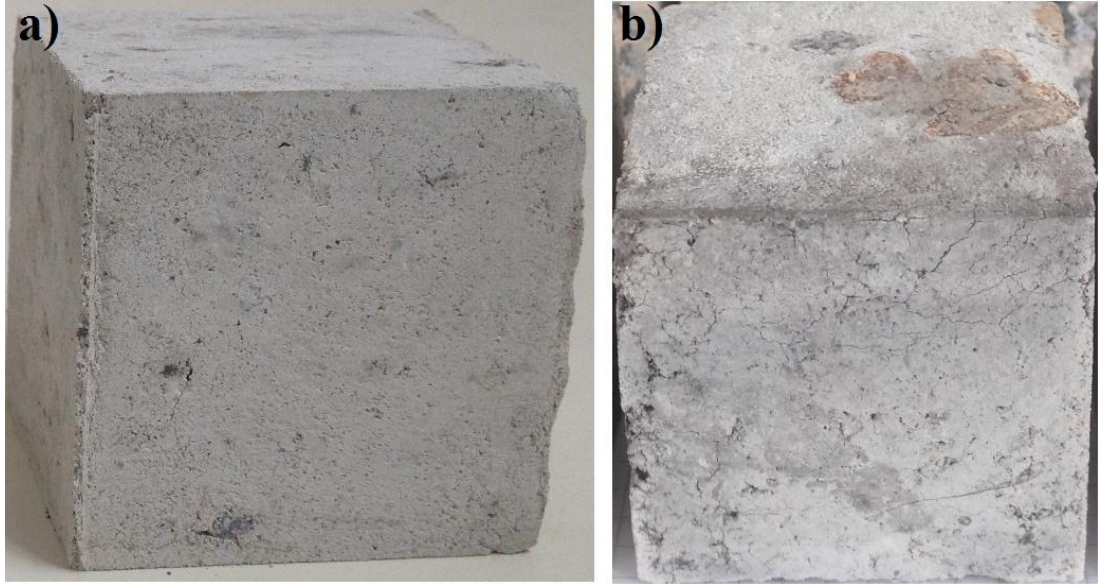
şekil 4.68. %2 nano silis katkılı geopolimer beton numunelerin renk değişimi



Şekil 4.69. %2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunelerin renk değişimi



Şekil 4.70. %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin renk değişimi



Şekil 4.71. Katkısız geopolimer beton numunede görülen mikro çatlaklar, a) 23°C, b) 700°C

Nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerde artan sıcaklık etkisi ile 300°C sıcaklığa kadar belirgin bir renk değişimi görülmemiştir. Numune yüzeylerinde az miktarda parlaklık meydana gelmiştir. Ancak 500 ve 700°C sıcaklıklarda, numunelerin gri renk tonuna dönüştüğü görülmüştür. Yüksek sıcaklık sonrası numune renklerinin griye dönüşmesi numunenin 600-900°C arasında bir sıcaklığa maruz kaldığını göstermektedir (Kızıllkanat ve Yüzer, 2008; Neville, 1997; Georgali ve Tsakiridis, 2005). Geopolimer beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisi sonucu görülen renk değişimi geopolimer bağlayıcının dehidrasyonu ve agrega içerisinde meydana gelen mikroyapısal dönüşümlerden kaynaklanmaktadır. Türkmen vd. (2016) yaptıkları çalışmada Elazığ ferrokrom cürufunun alkali aktivasyonu ile ürettikleri geopolimer beton numuneleri 700°C'ye varan sıcaklıklara maruz bırakmışlardır. Artan sıcaklık etkisi ile numunelerin daha parlak bir görünüm kazandığını tespit etmişlerdir.

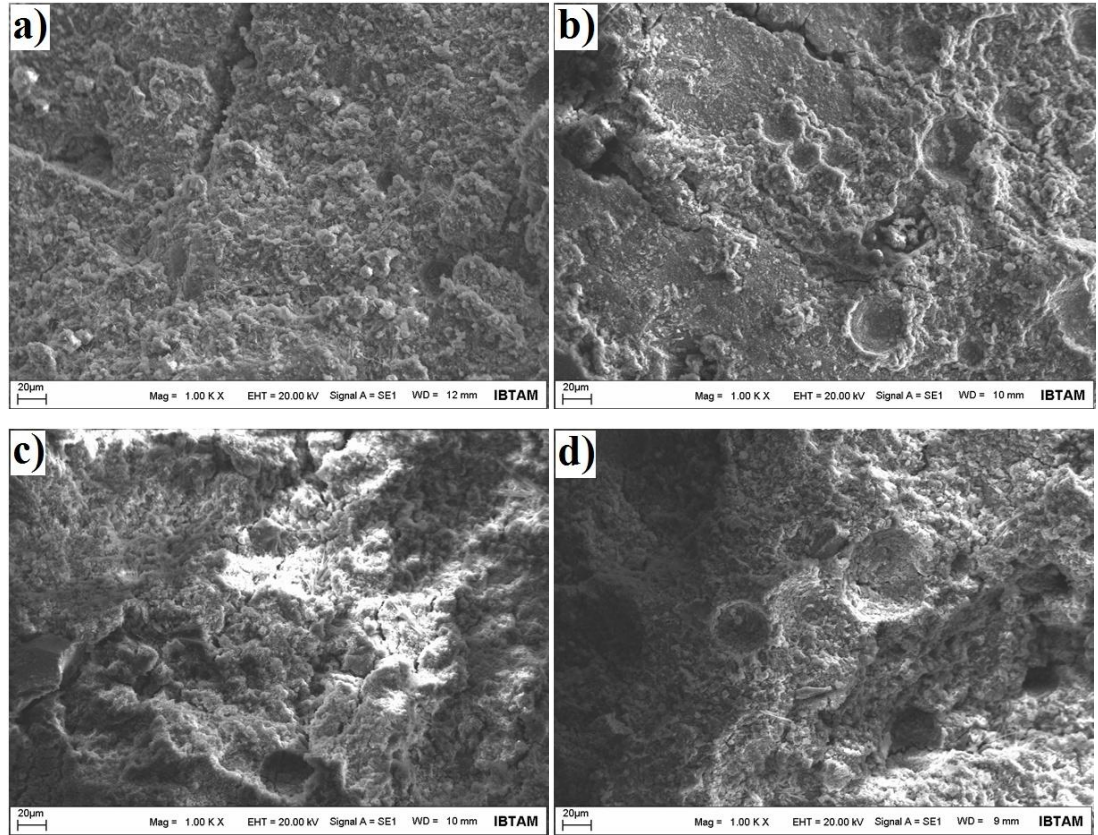
Yüksek sıcaklık sonrası bütün numune gruplarında gözle görülür boyutsal bir değişiklik olmamıştır. Ancak 700°C sıcaklığa maruz bırakılan katkısız numunelerin dış yüzeyinde ağ şeklinde dağılmış saç teli inceliğinde çatlaklar tespit edilmiştir (Şekil 4.71). Normal Portland çimentolu betonlarda 400°C'de çatlak oluşumu başladığı için, geopolimer betonların daha yüksek çatlak oluşumu direncine sahip olduğu söylenebilir (Joseph, 2015). Yüksek sıcaklık (700-800°C) etkisine maruz

bırakılan geopolimer numunelerde çatlak oluşumu çeşitli çalışmalarda doğrulanmıştır (Hosan vd. 2016; Joseph, 2015).

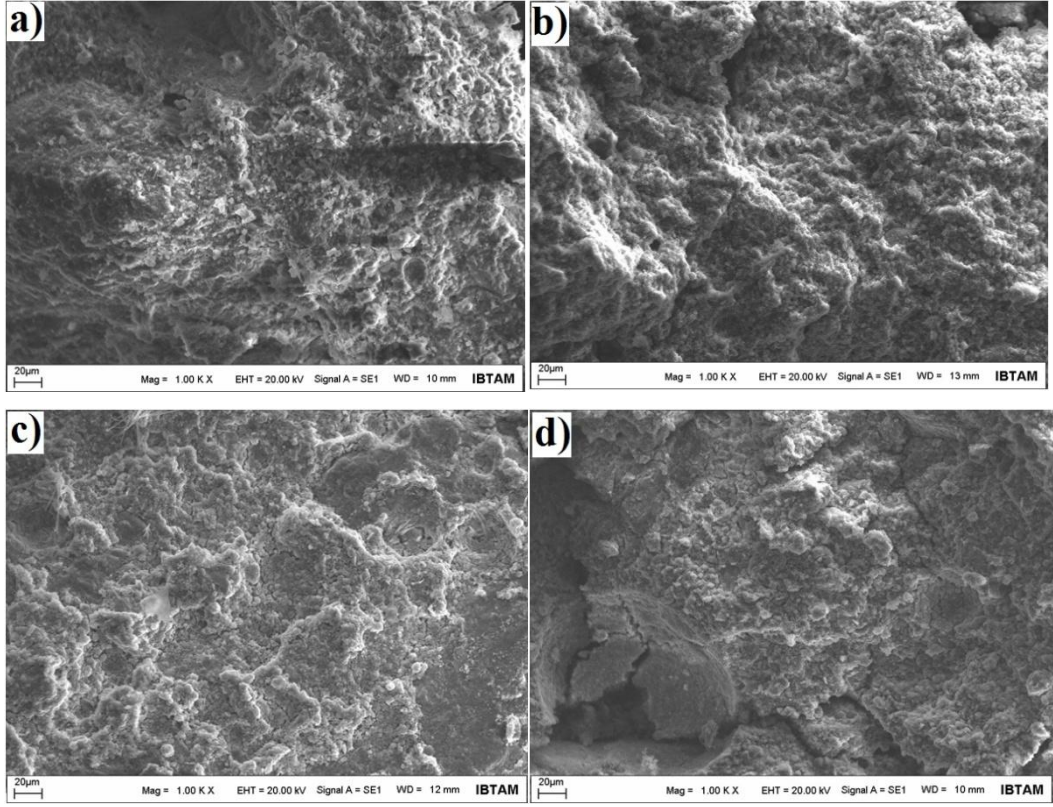
4.6.5.5. Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası mikroyapı özellikleri

a) Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM analizleri

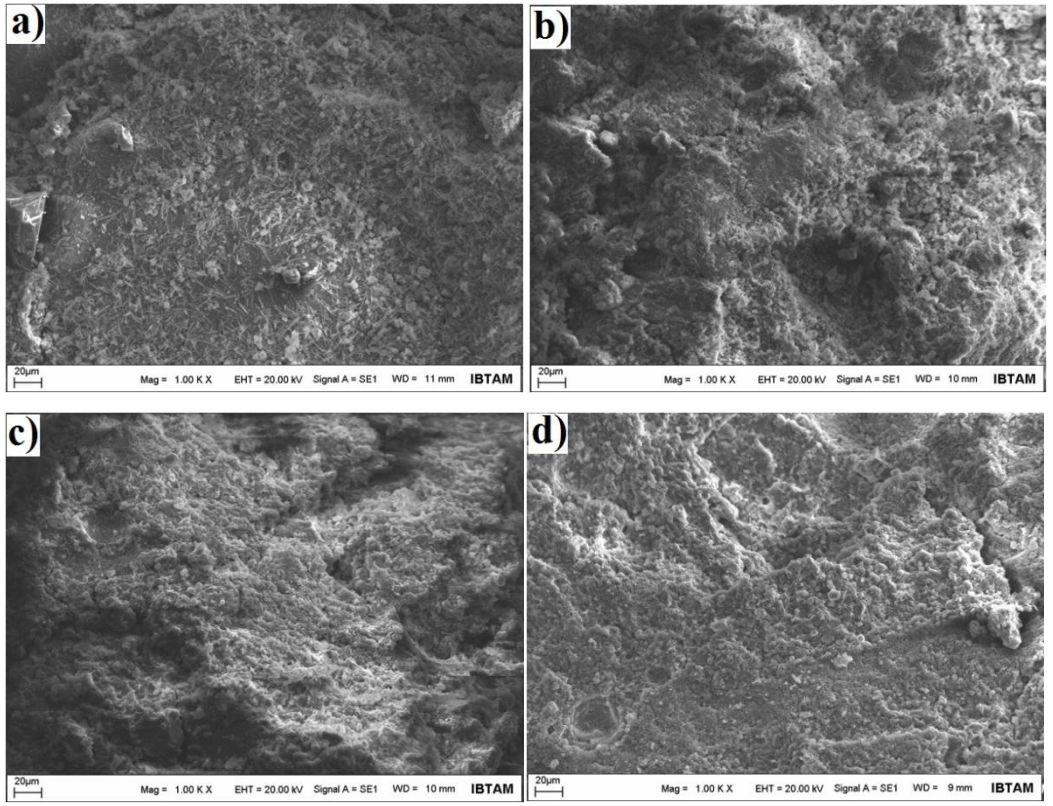
Katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.72-4.75'de verilmiştir.



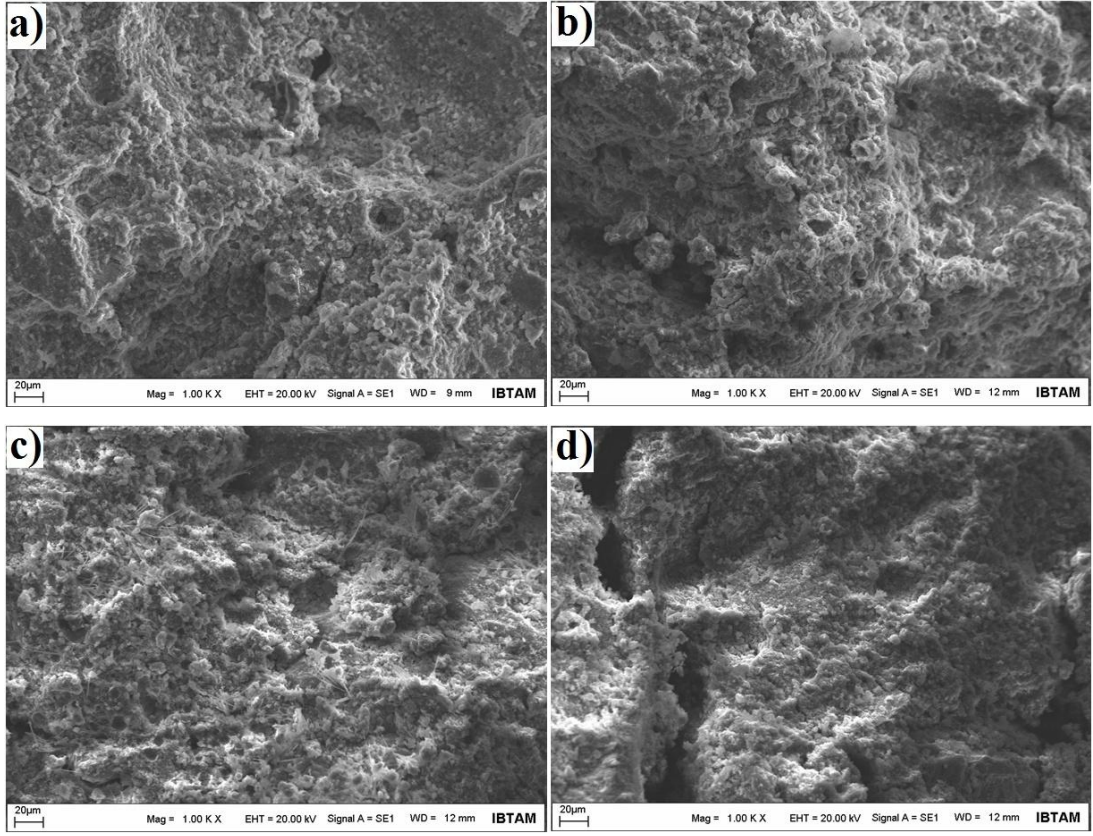
Şekil 4.72. Katkısız geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C



Şekil 4.73. Nano silis katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C



Şekil 4.74. Mikro silis katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C



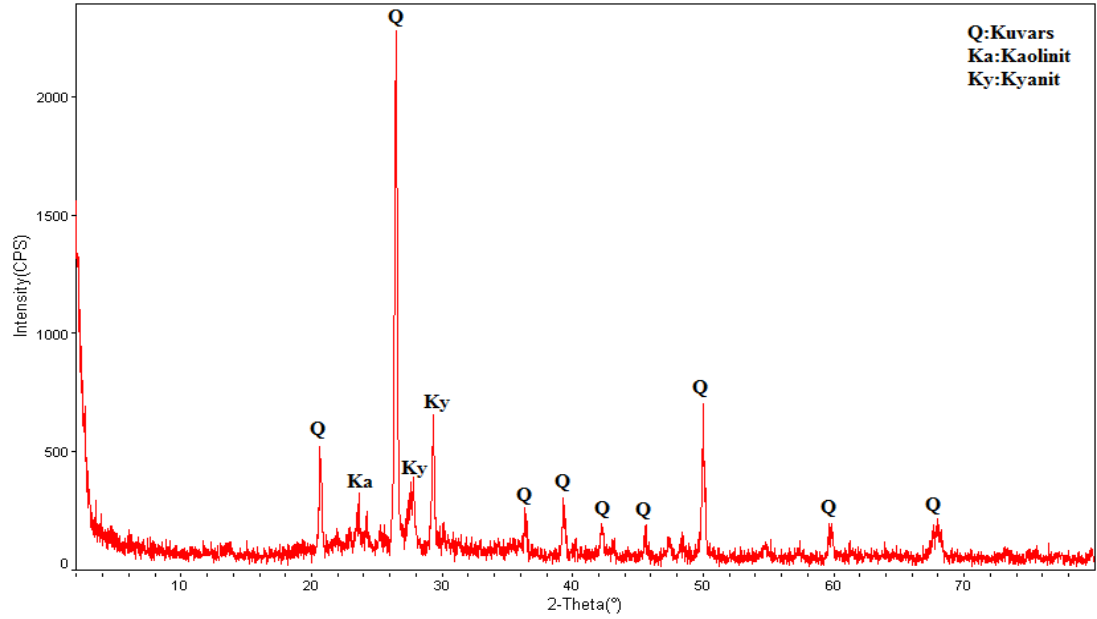
Şekil 4.75. SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası SEM görüntüleri, a) 23°C, b) 300°C, c) 500°C, d) 700°C

Katkısız geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, laboratuvar ortamında bekletilen referans numunede görülen çatlak ve boşlukların sıcaklık arttıkça çoğaldığı ve belirginleştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.72). Artan sıcaklık etkisi sonucu jel yapıda belirgin bir görünüm kazanan mikro çatlaklar Chu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada rapor edilmiştir. Nano silis katkıli numunelerin 300°C sıcaklıkta dolu görünümünü koruduğu, 500°C sıcaklıkta yoğun yapısının zayıfladığı, 700°C sıcaklıkta ise belirgin boşluk ve çatlakların oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.73). Mikro silis katkıli numunelerin ise 300°C sıcaklıkta yoğun mikroyapısını koruduğu, 500 ve 700°C sıcaklıkta belirgin çatlak ve boşluk oluşmadığı görülmüştür (Şekil 4.74). Mikro silis katkıli numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonucu basınç dayanımı kayıplarının daha düşük olması, SEM görüntülerini doğrulamaktadır. Duan vd. (2015) 400°C sıcaklığa kadar uygulanan sıcaklık etkisinin geopolimerizasyon reaksiyonlarını arttırması sebebiyle mikroyapıyı güçlendirdiğini ifade etmişlerdir. SB lateks katkıli numunelerde ise artan sıcaklık etkisi ile jel yapının zayıfladığı, belirgin boşluk ve çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.75). Bu durum SB lateks katkıli numunelerde yüksek sıcaklık etkisi sonucu görülen belirgin basınç

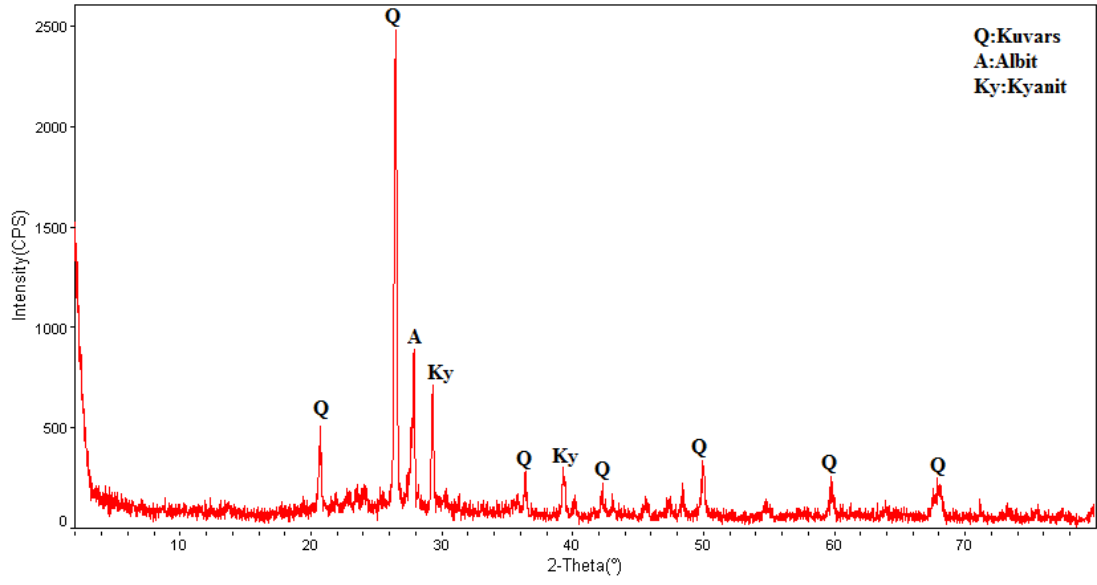
dayanımı kaybı ile örtüşmektedir. Joseph (2015) yaptığı çalışmada ürettiği geopolimer numunelerini 200°C ile 800°C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakmış ve sıcaklık arttıkça geopolimer matris yapısında görülen mikro çatlakların büyüdüğünü ifade etmiştir. Duan vd. (2017) yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan bu çatlakların kararsız olduğunu ve hızla yayılabileceğini açıklamış, bu durumun basınç dayanımında düşüşe yol açtığını belirtmişlerdir.

b) Katkılı geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası XRD analizleri

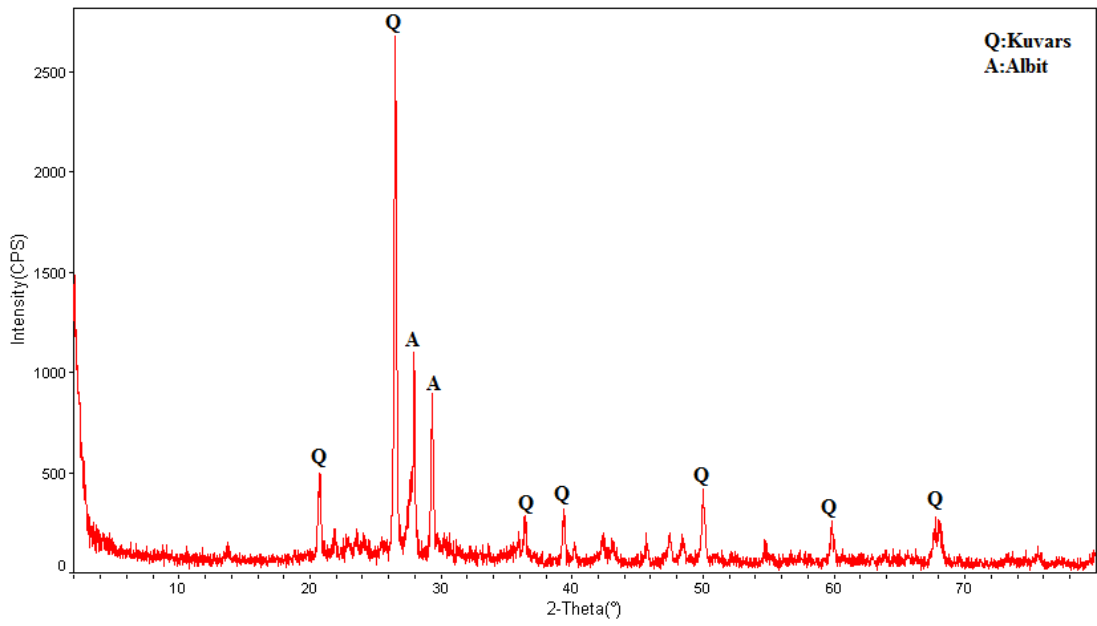
700°C sıcaklıkta yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan katkısız, %2 nano silis katkılı, %2 mikro silis katkılı ve %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin XRD kırınım desenleri Şekil 4.76-4.79'da gösterilmiştir.



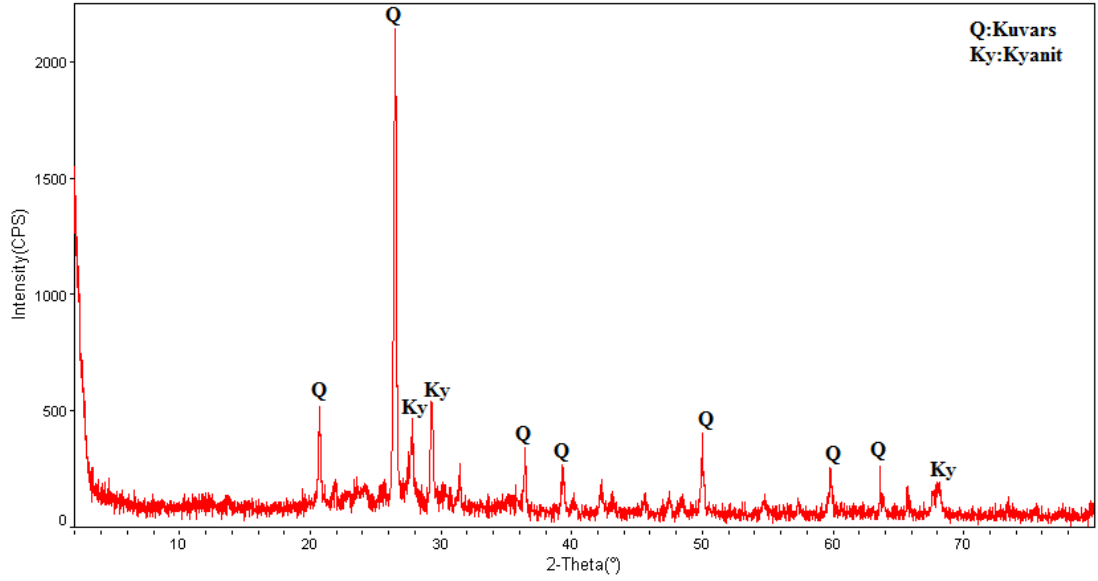
Şekil 4.76. Katkısız geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi



Şekil 4.77. %2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi



Şekil 4.78. %2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi



Şekil 4.79. %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinin 700°C sıcaklık sonrası XRD analizi

Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında katkısız numunede kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), kyanit (Al_2SiO_5) mineralleri, %2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$), kyanit (Al_2SiO_5) mineralleri, %2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$) mineralleri, %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinde ise kuvars (SiO_2), kyanit (Al_2SiO_5) mineralleri tespit edilmiştir. Katkı tipine bakılmaksızın bütün numunelerde belirgin kuvars piki elde edilmiştir.

4.6.6. Katkılı geopolimer beton numunelerin asit direnci

Volkanik tüf esaslı geopolimer beton numunelerine, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıları ilave edilerek asit etkisine direnci incelenmiştir. 180 güne kadar %3, %5 ve %7 HCl ortamlarında bekletilen geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası basınç dayanımı, ağırlık ve görsel görünümündeki değişimler incelenmiştir. SEM ve XRD analizleri ile mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular aşağıda verilmiştir.

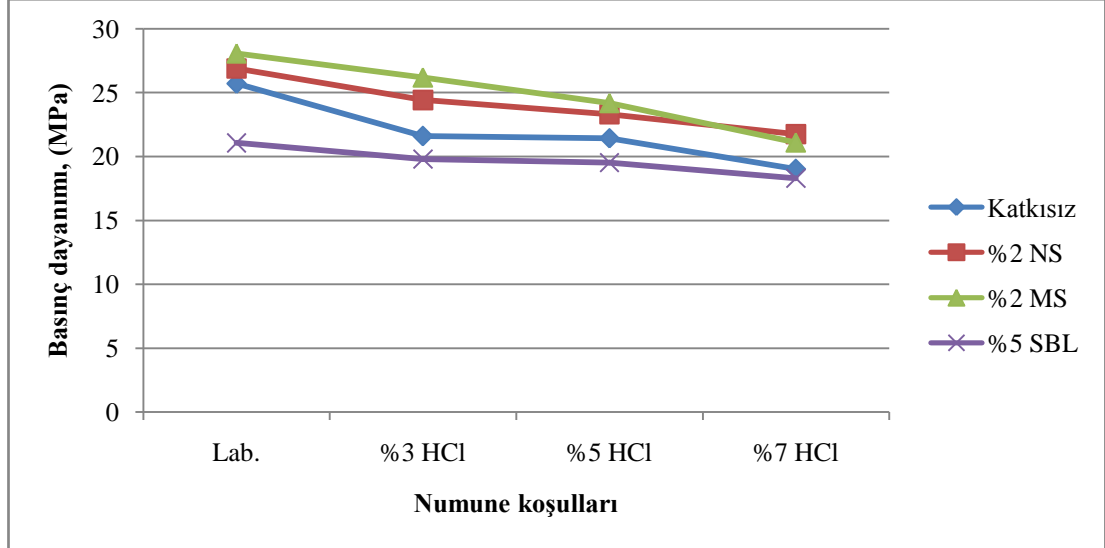
4.6.6.1 Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası basınç dayanımı

Geopolimer beton numuneleri %3, %5 ve %7 HCl ortamlarında 180 güne kadar bekletilmiştir. Katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkı

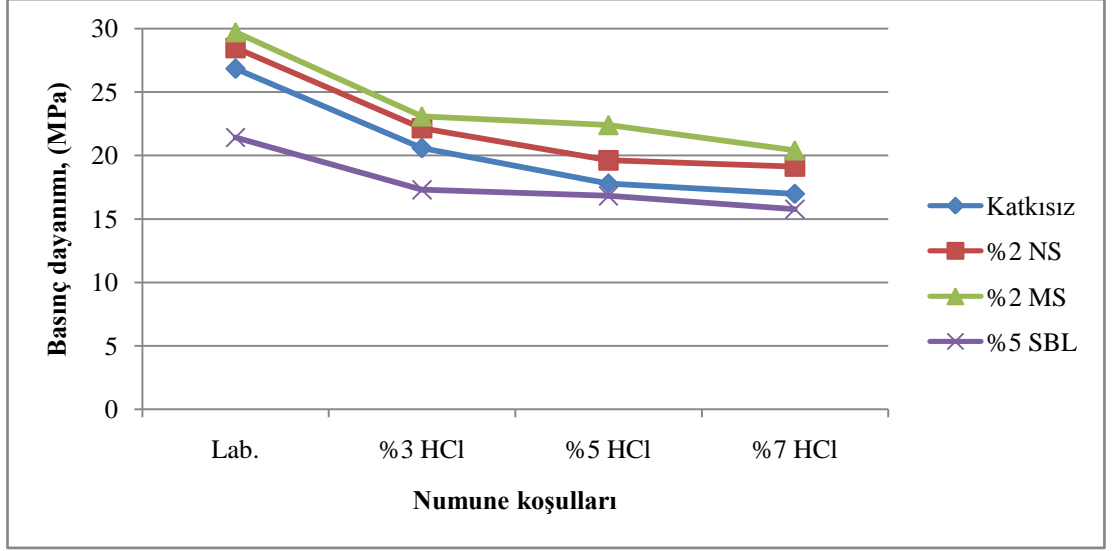
geopolimer beton numunelerin 90 ve 180 günlük asit etkisi sonrası basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.24'de verilmiş olup, Şekil 4.80-4.81'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Aynı koşullarda üretilmiş ve laboratuvar ortamında bekletilmiş numunelere kıyasla basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen kayıp ise Şekil 4.82-4.83'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.24. Katkılı geopolimer beton numunelerin 90 ve 180 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı değerleri

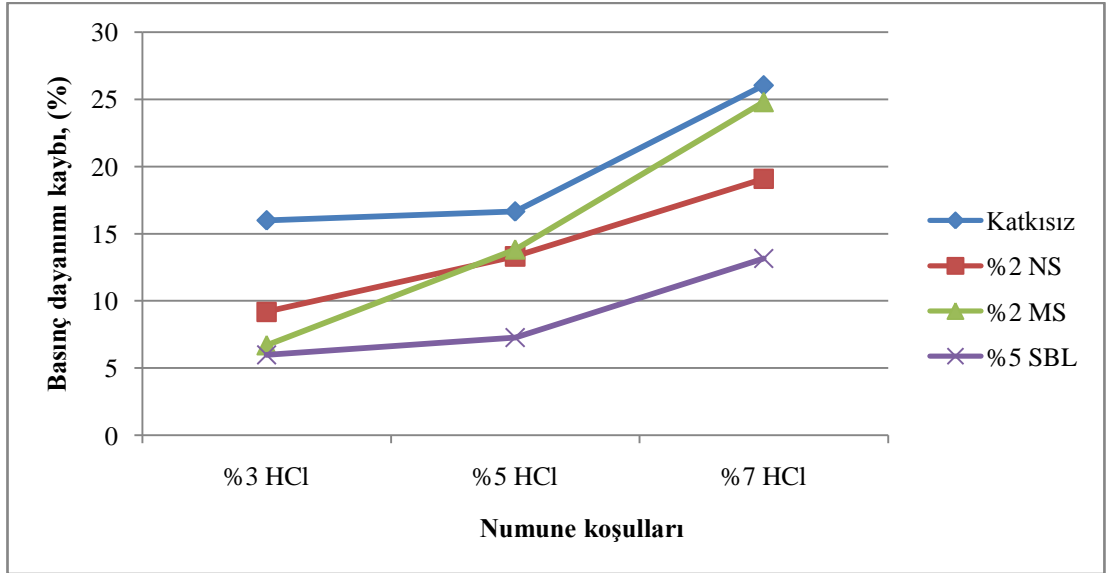
Katkı türü	Basınç dayanımı, (MPa)							
	90 Gün				180 Gün			
	Lab.	%3 HCl	%5 HCl	%7 HCl	Lab.	%3 HCl	%5 HCl	%7 HCl
Katkısız	25.70	21.59	21.42	19.01	26.83	20.58	17.79	16.98
%2 Nano silis	26.89	24.42	23.31	21.76	28.47	22.16	19.62	19.13
%2 Mikro silis	28.06	26.18	24.18	21.10	29.72	23.09	22.41	20.41
%5 SB lateks	21.06	19.80	19.53	18.29	21.42	17.30	16.82	15.77



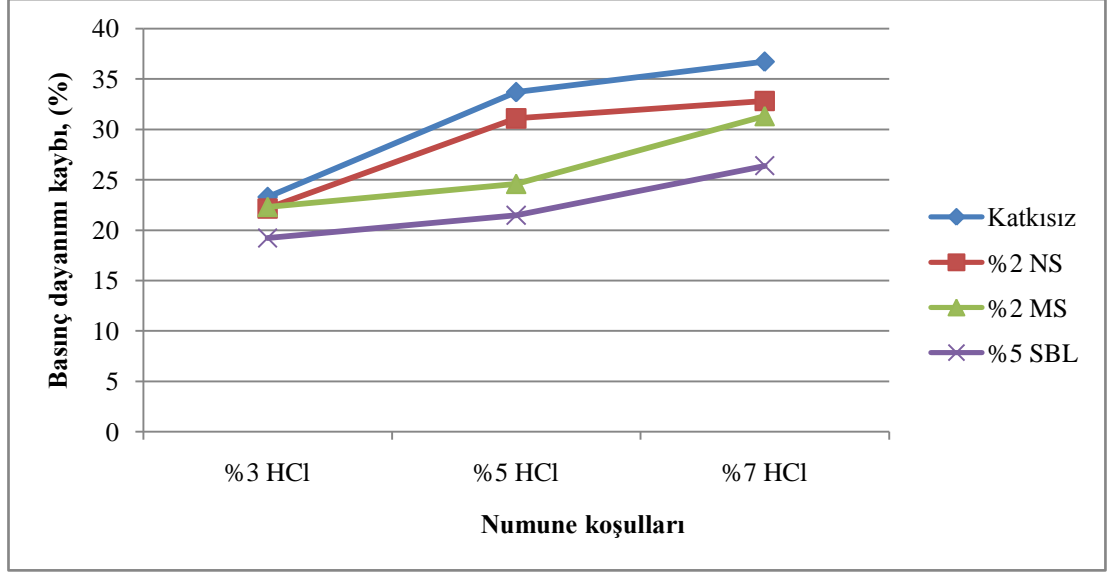
Şekil 4.80. Katkılı geopolimer beton numunelerin 90 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.81. Katkılı geopolimer beton numunelerin 180 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.82. Katkılı geopolimer beton numunelerin 90 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı kaybı



Şekil 4.83. Katkılı geopolimer beton numunelerin 180 günlük asit etkisi sonucu basınç dayanımı kaybı

Asit ortamlarında bekletilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri etki süresi arttıkça düşmüştür. Katkısız geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri %3, %5 ve %7 HCl ortamları için 90 gün sonunda sırasıyla %15.99, %16.65 ve %26.03 oranlarında, 180 günün sonunda ise sırasıyla %23.29, %36.69 ve %36.71 oranlarında düşmüştür. %2 nano silis katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri %3, %5 ve %7 HCl ortamları için 90 gün sonunda sırasıyla %9.19, %13.31 ve %19.08 oranlarında, 180 günün sonunda ise sırasıyla %22.16, %31.09 ve %32.81 oranlarında düşmüştür. %2 mikro silis katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri %3, %5 ve %7 HCl ortamları için 90 gün sonunda sırasıyla %6.7, %13.83 ve %24.80 oranlarında, 180 günün sonunda ise sırasıyla %22.31, %24.60 ve %31.33 oranlarında düşmüştür. %5 SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri %3, %5 ve %7 HCl ortamları için 90 gün sonunda sırasıyla %5.98, %7.26 ve %13.15 oranlarında, 180 günün sonunda ise sırasıyla %19.23, %21.48 ve %26.38 oranlarında azalmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen basınç dayanımı kaybı oranları, Djobo vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada %5 sülfürik asit ortamlarına maruz bırakılan volkanik kül esaslı geopolimer numunelerin dayanım kaybı değerleri ile örtüşmektedir. Asit etkisine maruz kalma süresi ile basınç dayanımı arasındaki ters orantı çeşitli araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır (Duan vd. 2015). Geopolimer numunelerin basınç dayanımında görülen düşüş esas olarak alüminosilikat yapının

asit etkisi sonrası kırılması ile ilişkilidir. Asit ortamında geopolimer bağlayıcıların bozulması Si-O-Al bağlarının kırılması ile Si-OH ve Al-OH bağlarının sayısının artması ve geopolimer matrisindeki silisik asit miktarının artması sonucu meydana gelmektedir (Bakharev, 2005c; Djobo vd. 2016). Benzer şekilde Singh vd. (2015) asit etkisi sonucu basınç dayanımında görülen düşüşün esas olarak agregadan ziyade geopolimer matrisindeki bozulmadan kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Grafikler incelendiğinde, hem 90 hem 180 günlük etki süresinde HCl asit konsantrasyonu (%3, %5, %7) arttıkça basınç dayanımında meydana gelen azalmanın arttığı görülmektedir. Katkı tipinin etkisi irdelendiğinde nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıların basınç dayanımında meydana gelen kaybı azalttığı tespit edilmiştir. 90 ve 180 günlük etki süresinin sonunda bütün HCl asit konsantrasyonlarında minimum basınç dayanımı kaybı SB lateks katkılı numunelerde, maksimum basınç dayanımı kaybı ise katkısız numunelerde görülmüştür. SB lateks içeren numunelerde mukavemet kaybının daha az olması polimer katkının asit çözeltisinin alüminosilikat yapısının iç bölgelerine ulaşmasını zorlaştırmasından kaynaklı olabilir. Deb vd. (2016) yaptıkları çalışmada %2 oranında nano silis ilavesinin asit saldırısı sonucu meydana gelen basınç dayanımı kaybını azalttığını tespit etmişlerdir. Benzer şekilde Belkowitz vd. (2015) nano silis ilavesi ile iyileşen gözenek yapısının agresif elementlerin hidrate jel yapısının daha derin katmanlarına geçmesini engellediğini ifade etmişlerdir. Geopolimer karışımına ilave edilen optimum miktarda nano silisin asit etkisi sonucu bozulmayı azaltan daha yoğun bir yapı oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Okoye vd. (2017) silis dumanı ilavesinin geopolimer betonların durabilite özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada, ürettikleri numuneleri %2 H₂SO₄ ortamlarına 90 gün boyunca maruz bırakmışlardır. Portland çimentolu kontrol numunelerinde basınç dayanımı kaybı %36 iken, silis dumanı ilaveli numunelerde %8 olarak elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda silis dumanı katkılı geopolimer beton numunelerin sülfürik asit direncinin normal Portland çimentolu numunelerden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Duan vd. (2015) ürettikleri geopolimer hamur numunelerini %2 H₂SO₄ + %2 HCl ortamlarına maruz bırakmışlardır. 56. günün sonunda basınç dayanımı kayıpları geopolimer

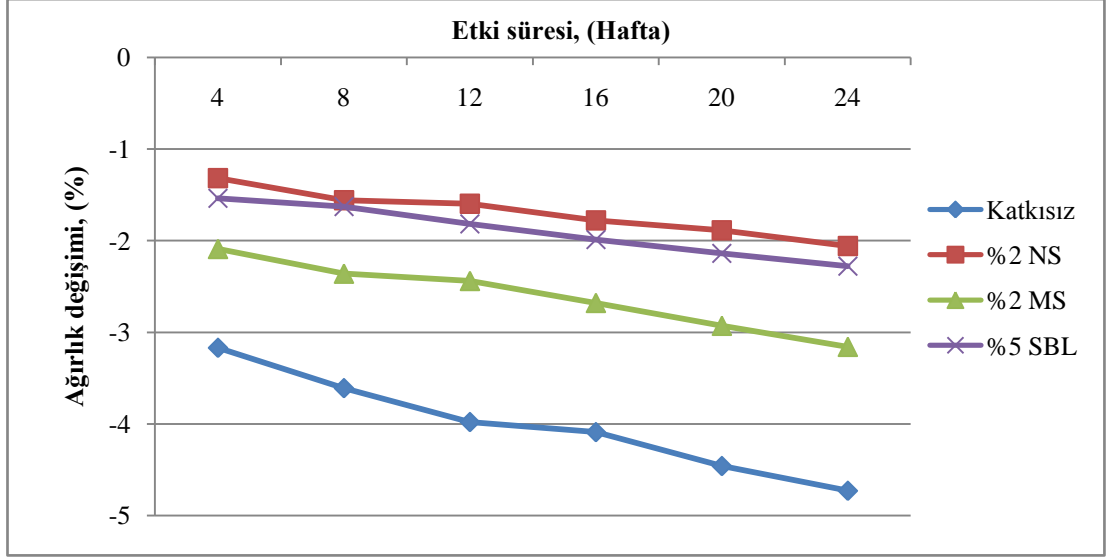
numunelerde %22.2, normal Portland çimentolu numunelerde %57.8 olarak elde edilmiştir. Fernandez-Jimenez vd. (2007) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer harçları 0.1Normal HCl (pH=1.0) ortamlarına maruz bırakmışlardır. 90 günün sonunda geopolimer harçlarda basınç dayanımı kaybı %23-%25 iken, normal Portland çimentolu numunelerde %47 olarak tespit edilmiştir. Geopolimer betonların asit etkilerine karşı normal Portland çimentolu betonlardan daha dayanıklı olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır (Edouard, 2011; Ariffin vd. 2013).

4.6.6.2. Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası ağırlık değişimi

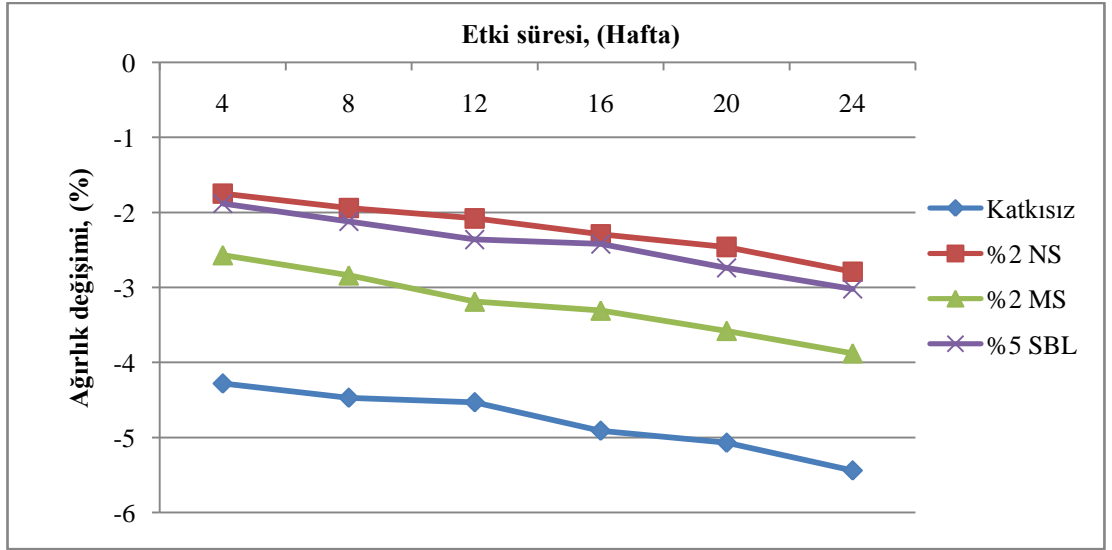
%3, %5 ve %7 HCl ortamlarında bekletilen geopolimer beton numunelerin 24 haftalık ağırlık değişimleri, başlangıç ağırlıklarına göre yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Ağırlık değişimleri Çizelge 4.25'de verilmiş olup Şekil 4.84-4.86'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.25. Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisinde ağırlık değişimleri

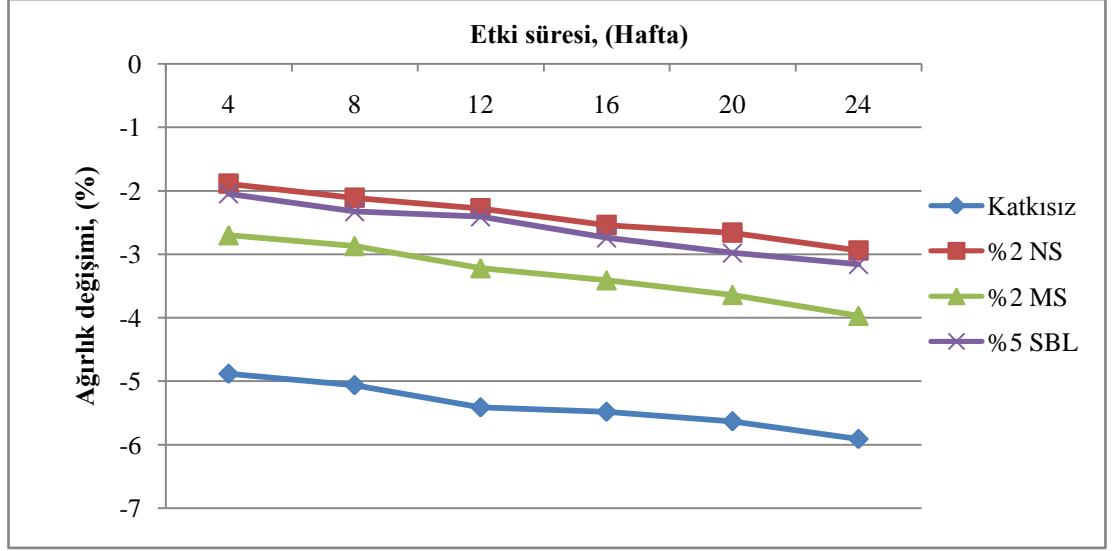
Asit ortamı	Katkı türü	Ağırlık değişimi, (%)					
		4	8	12	16	20	24
%3 HCl	Katkısız	-3.17	-3.61	-3.98	-4.09	-4.46	-4.73
	%2 Nano silis	-1.32	-1.56	-1.60	-1.78	-1.89	-2.06
	%2 Mikro silis	-2.09	-2.36	-2.44	-2.68	-2.93	-3.16
	%5 SB lateks	-1.54	-1.63	-1.82	-1.99	-2.14	-2.28
%5 HCl	Katkısız	-4.28	-4.47	-4.53	-4.91	-5.07	-5.44
	%2 Nano silis	-1.75	-1.94	-2.08	-2.29	-2.46	-2.79
	%2 Mikro silis	-2.57	-2.84	-3.19	-3.31	-3.58	-3.88
	%5 SB lateks	-1.88	-2.12	-2.36	-2.42	-2.74	-3.02
%7 HCl	Katkısız	-4.88	-5.06	-5.41	-5.48	-5.63	-5.91
	%2 Nano silis	-1.89	-2.11	-2.28	-2.54	-2.66	-2.94
	%2 Mikro silis	-2.70	-2.87	-3.22	-3.41	-3.64	-3.97
	%5 SB lateks	-2.05	-2.33	-2.41	-2.74	-2.98	-3.16



Şekil 4.84. Katkılı geopolimer beton numunelerin %3 HCl etkisinde ağırlık değişimi



Şekil 4.85. Katkılı geopolimer beton numunelerin %5 HCl etkisinde ağırlık değişimi



Şekil 4.86. Katkılı geopolimer beton numunelerin %7 HCl etkisinde ağırlık değişimi

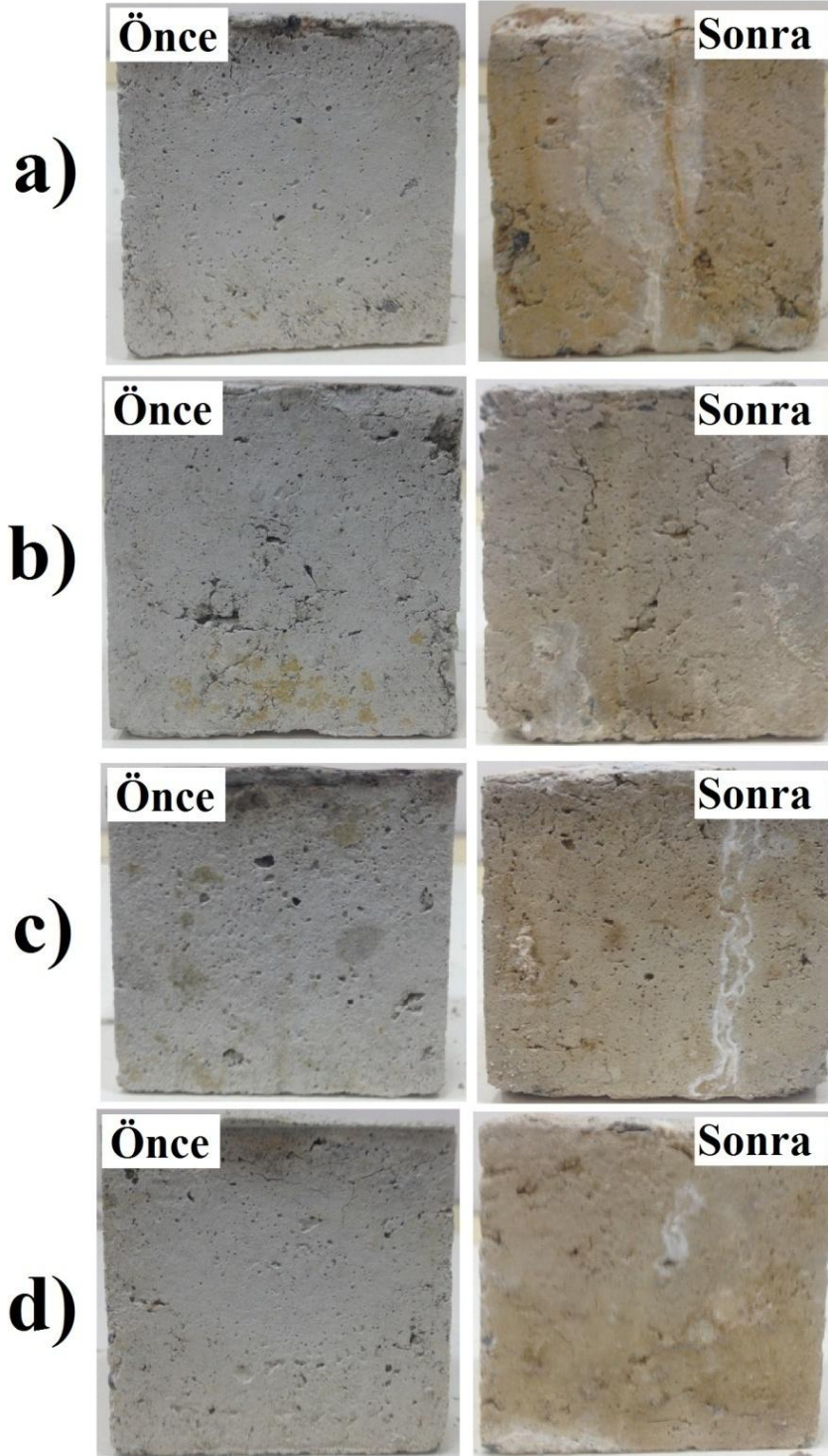
Asit etkisi altında tahribatın derecesi asit çözeltisinin konsantrasyonu ve maruz kalma süresine bağlıdır (Singh vd. 2015). Asit etkisi sonucunda volkanik tüf esaslı geopolimer beton numunelerin ağırlıkları düşmüştür. Numunelerin ağırlık kayıpları katkı tipinden bağımsız olarak asit çözeltisinin konsantrasyonunu ve maruz kalma süresi arttıkça artmıştır. 24 hafta boyunca %3, %5 ve %7 HCl çözeltisinde bekletilen katkısız numunelerin ağırlıkları sırasıyla %4.73, %5.44 ve %5.91 oranlarında, %2 nano silis katkılı numunelerin ağırlıkları sırasıyla %2.06, %2.79 ve %2.94 oranlarında, %2 mikro silis katkılı numunelerin ağırlıkları sırasıyla %3.16, %3.88 ve %3.97 oranlarında, %5 SB lateks katkılı numunelerin ağırlıkları ise sırasıyla %2.28, %3.02 ve %3.16 oranlarında düşmüştür. Elde edilen değerler, Fernandez-Jimenez vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada HCl asit etkisi sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları ile uyumludur. Geopolimer numunelerde ağırlık kaybı asit etkisi ile Si-O-Al bağlarının kırılması sonucu geopolimer jelinin dealüminasyonundan kaynaklanmaktadır (Djobo vd. 2016; Bakharev, 2005c). Kim vd. (2014) ise ağırlık kaybının Ca(OH)_2 varlığı ile alakalı olduğunu belirtmiş, geopolimerlerde Ca(OH)_2 bulunmadığı için asit dirençlerinin yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıların ağırlık kayıplarına etkisi incelendiğinde, her üç katkının da %3, %5 ve %7 HCl ortamlarında numunelerin ağırlık kaybı oranlarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Bununla birlikte minimum ağırlık

kaybı her üç asit konsantrasyonunda da %2 nano silis katkıli numunelerde meydana gelmiştir. Deb vd. (2016) yaptıkları çalışmada 90 gün boyunca %3 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan geopolimer harç numunelerin ağırlık değişimlerine %2 nano silis ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda nano silis katkısının harç numunelerin ağırlık kayıplarını önemli ölçüde düşürdüğünü belirtmişlerdir. Benzer şekilde silis dumanı ilavesinin asit ortamında meydana gelen ağırlık kaybını düşürdüğü Okoye vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada doğrulanmıştır. Geopolimer numunelerin asit ortamlarında meydana gelen ağırlık kayıplarının normal Portland çimentolu numunelerden daha az olduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir (Davidovits, 1991; Huseien vd. 2017; Ariffin vd. 2013; Bhutta vd. 2014).

4.6.6.3 Katkıli geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası görsel görünümü

Geopolimer beton numunelerin 180 gün boyunca %7 HCl çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra dış yüzeyinde meydana gelen görsel değişimler Şekil 4.87'de verilmiştir.



Şekil 4.87. Geopolimer beton numunelerin %7 HCl çözeltisi etkisi öncesi ve sonrasında görsel görünümü, a) Katkısız, b) %2 Nano silis katkılı, c) %2 Mikro silis katkılı, d) %5 SB lateks katkılı

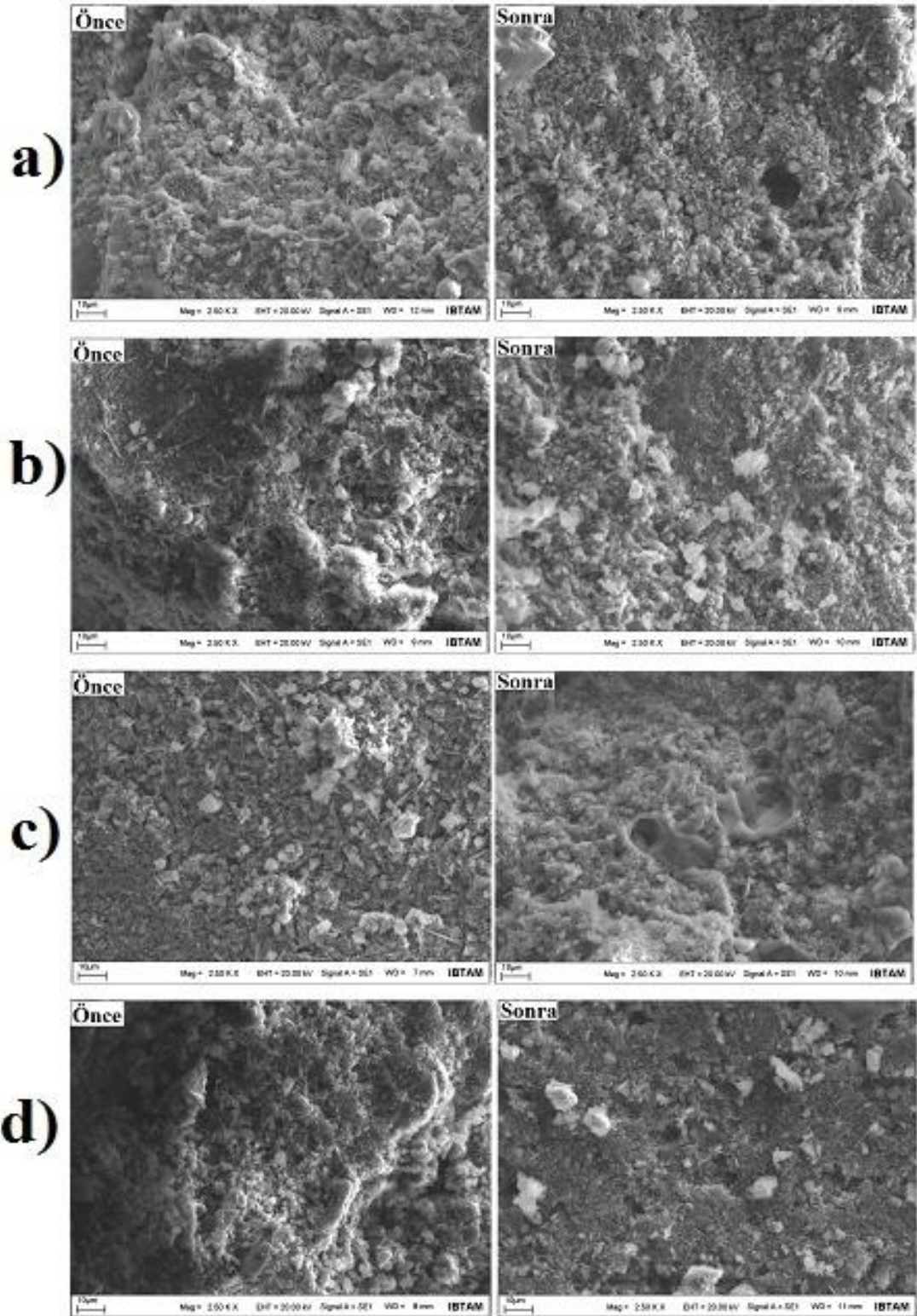
Asit etkisi sonucunda geopolimer beton numunelerin yüzeyinde belirgin bir hasar oluşmamıştır. Ancak, numunelerin renginde az miktarda sararma tespit edilmiş ve yer yer beyaz renkli tabakalar görülmüştür. Benzer şekilde Guo vd. (2016) ürettikleri

geopolimer numuneleri %5 HCl çözeltisine maruz bırakmış ve renklerinin parlak sarıya dönüştüğünü belirtmişlerdir. Fernandez-Jimenez vd. (2007) ise ürettikleri uçucu kül esaslı geopolimer harç numunelerini bir yıl boyunca 0.1 Normal HCl (pH=1) asit çözeltisine maruz bırakmış ve numune yüzeyinde bozulma oluşmadığını ifade etmişlerdir. Volkanik tüf esaslı geopolimer beton numunelerin yüzeyinde görülen beyaz renkli tabakanın geopolimer jel ile asit arasında meydana gelen çökeltme reaksiyonu sonucu oluştuğu düşünülmektedir (Djobo vd. 2016). Çökelmiş tuz ürünlerinin yüzeye çıkması sonucu meydana gelen çiçeklenme, Kani vd. (2012) tarafından volkanik kül esaslı geopolimerler üzerinde yapılan çalışmada da tespit edilmiştir. Araştırmacılar bu durumun hammadde bünyesindeki Al içeriği ile kontrol edilebileceğini ifade etmiş, Al içeriği bakımından zengin mineral katkıları ilave edilmesi gerektiğini veya kür koşullarının optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Djobo vd. 2014; Tchakoute vd. 2012; Djobo vd. 2016).

4.6.6.4. Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası mikroyapı özellikleri

a) Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası SEM analizleri

%7 HCl çözeltisi içerisinde 180 gün boyunca bekletilen katkısız, %2 nano silis, %2 mikro silis ve %5 SB lateks katkıları katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi öncesi ve sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.88'de verilmiştir.

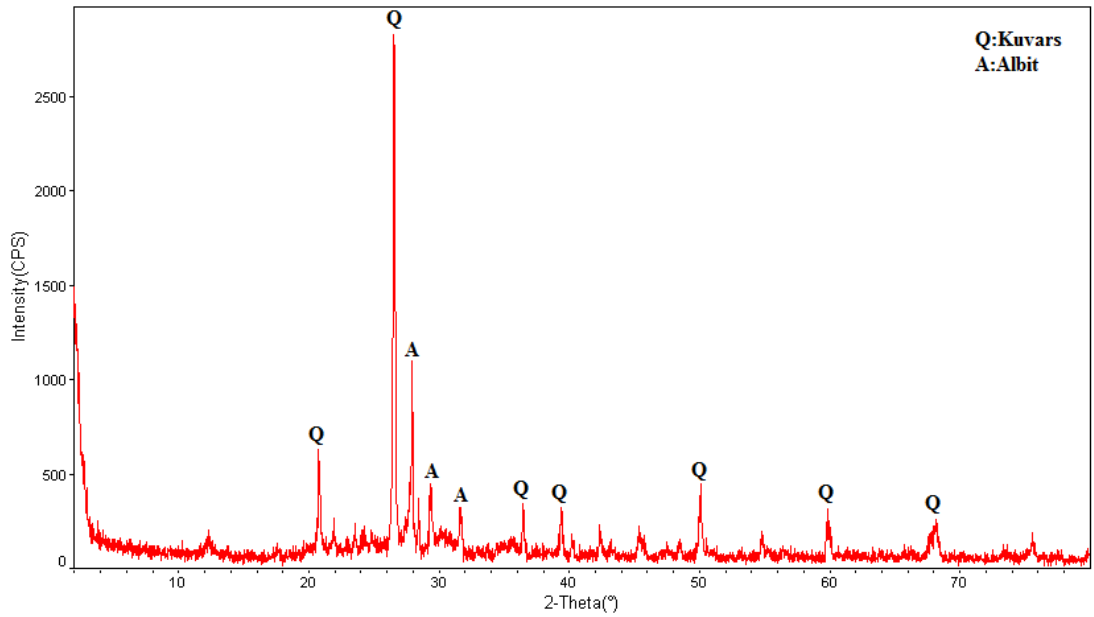


Şekil 4.88. 180 gün boyunca %7 HCl etkisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri, a) Katkısız, b) %2 nano silis katkı, c) %2 mikro silis katkı, d) %5 SB lateks katkı

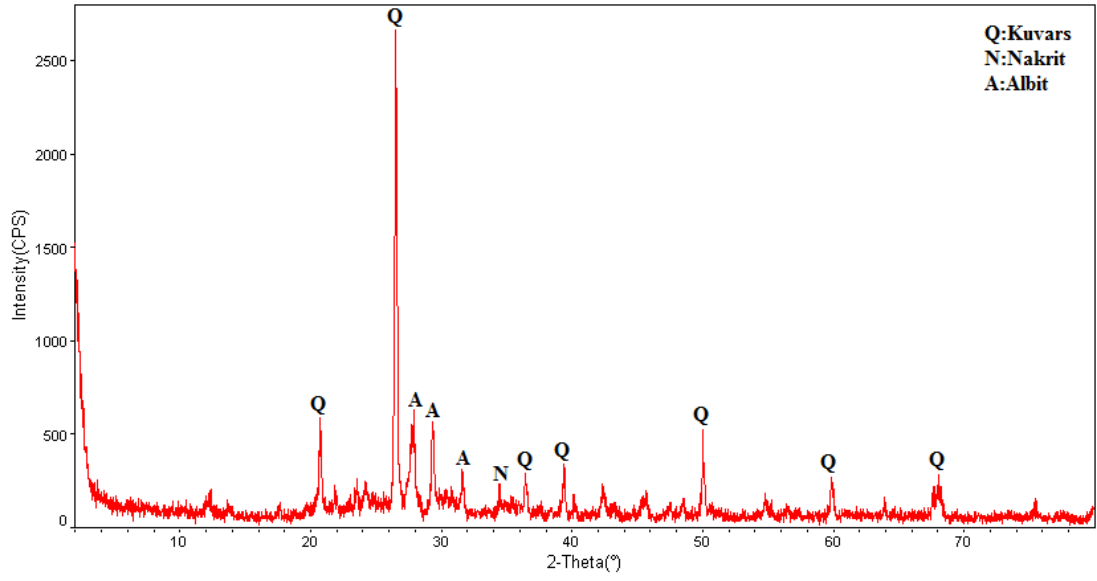
Volkanik tuf esaslı geopolimer beton numunelerin asit etkisine maruz bırakılmasından sonra mikroyapılarında değişim gözlenmiştir. Asit etkisi öncesinde nispeten dolu ve yoğun bir mikroyapıya sahip numunelerin, asit etkisi sonrasında daha gözenekli hale geldiği tespit edilmiştir. Bu durum özellikle katkısız ve SB lateks katkılı numunelerde daha belirgindir. Nano silis ve mikro silis katkılı numunelerin nispeten daha az bozulma gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Deb vd. (2016) yaptığı çalışmada nano silis katkılı geopolimer numunelerin asit etkisi sonrasında daha az bozulduğunu ifade etmişlerdir. Fernandez-Jimenez vd. (2007) pH değerinin düşük olduğu agresif ortamlarda alüminosilikat jelinin depolimerizasyona (küçük monomere ayrılma) uğradığını ifade etmişlerdir. Gözenekli yapılar asit çözeltisinin numune içyapısına nüfuz etmesini kolaylaştırdığı için daha fazla çökeltme reaksiyonu meydana gelmektedir (Jo vd. 2017).

b) Katkılı geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası XRD analizleri

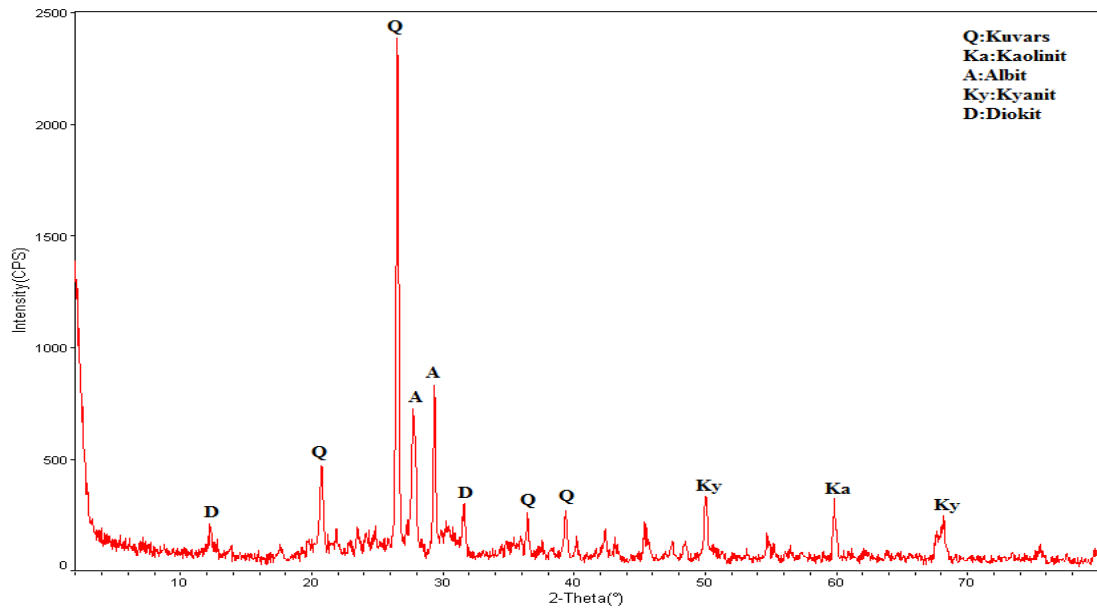
180 gün boyunca %7 HCl çözeltisine maruz bırakılan katkısız, %2 nano silis katkılı, %2 mikro silis katkılı ve %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait XRD kırınım desenleri Şekil 4.89-4.92'de verilmiştir.



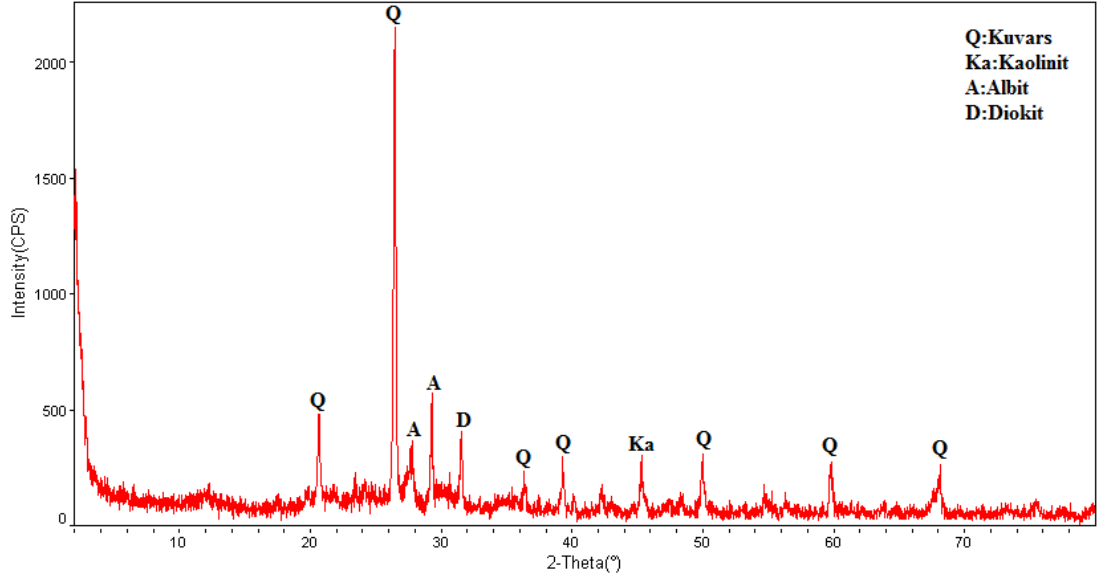
Şekil 4.89. Katkısız geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi



Şekil 4.90. %2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi



Şekil 4.91. %2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi

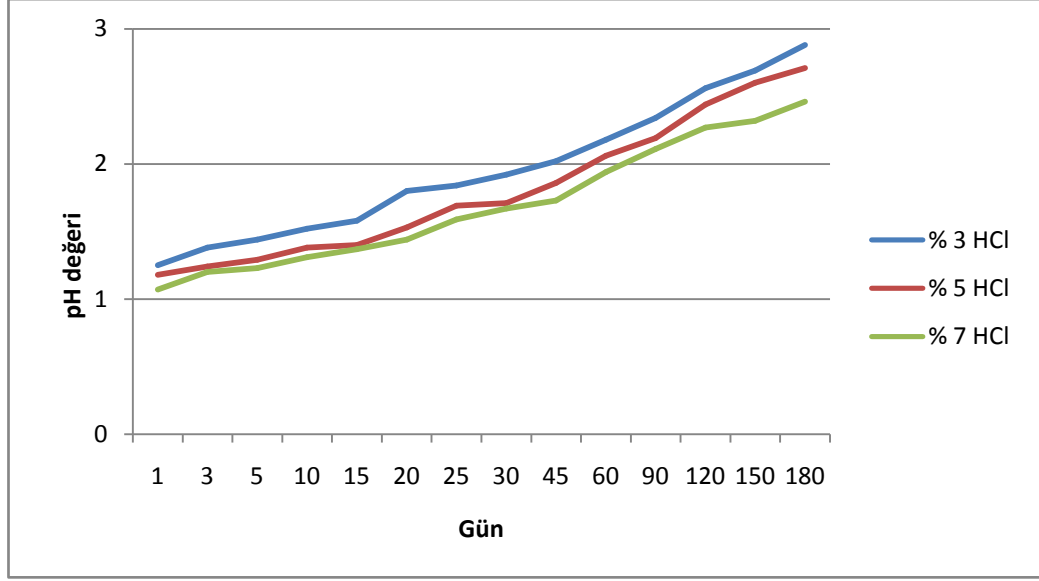


Şekil 4.92. %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinin %7 HCl etkisi sonrası XRD analizi

Asit etkisi sonrasında katkısız numunede kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$) mineralleri, %2 nano silis katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), nakrit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$) mineralleri, %2 mikro silis katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$), kyanit (Al_2SiO_5), diokit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) mineralleri, %5 SB lateks katkılı geopolimer beton numunesinde kuvars (SiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), albit ($\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$), diokit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) mineralleri tespit edilmiştir. Asit etkisi sonrası bütün numunelerde belirgin kuvars piki elde edilmiştir.

4.6.6.5. Asit ortamının zamana göre pH değişimi

Geopolimer beton numunelerin bekletildiği asit ortamlarının pH değerleri ölçülmüştür. %3, %5 ve %7 HCl çözeltilerinin pH değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.93'de verilmiştir.



Şekil 4.93. Asit ortamlarının zamana bağlı pH değerleri

Grafik incelendiğinde HCl konsantrasyonu arttıkça pH değerlerinin beklendiği gibi düştüğü görülmüştür. Ayrıca her üç asit çözeltisinin pH değerlerinin zamanla arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun geopolimer jel tabakası ile asit çözeltisi arasında meydana gelen çökeltme reaksiyonu sonucu oluştuğu düşünülmektedir (Djobo vd. 2016). Asit etkisine maruz bırakılmış geopolimer beton numunelerin dış yüzeyinde görülen beyaz tabakalar bu görüşü desteklemektedir (Şekil 4.87).

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasının amacı, Nevşehir yöresinden temin edilmiş olan volkanik tüfün geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu amaçla, aktivatör tipi, aktivatör konsantrasyonu ve kür sıcaklığı parametrelerinin modifikasyonu ile optimum özelliklere sahip geopolimer hamur, harç ve beton numuneler üretilmiştir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen optimum özelliklere sahip geopolimer beton numunelerin bazı mekanik, durabilite ve mikroyapı özelliklerine nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılarının etkisi araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- 1) Laboratuvar ortamında basınç dayanımı elde edilemeyen geopolimer hamur numunelerinden kür sıcaklığının, alkali aktivatör tipinin ve konsantrasyonunun değiştirilmesi sonucunda, NaOH konsantrasyonunun 12 M, kür sıcaklığının 90°C olduğu numunede 41.43 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Volkanik tüfün yalnız NaOH çözeltisi ile alkali aktive edilmesinin NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile alkali aktive edilmesine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- 2) Yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş geopolimer hamur karışımlarının priz sürelerinin NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş karışımlara kıyasla daha kısa olduğu görülmüştür. Artan kür sıcaklığı her iki aktivatör tipi için priz sürelerini belirgin ölçüde düşürmüştür.
- 3) Geopolimer hamur karışımlarından elde edilen, 1.29 J/g ile 13.18 J/g arasında değişen çok düşük hidrasyon ısıları değerleri, volkanik tüfün geopolimerizasyon reaksiyonlarının laboratuvar ortamında yavaş ilerlemesinden kaynaklanmaktadır.
- 4) Geopolimer hamur numunelerin mikroyapı incelemelerinde her iki alkali aktivatör tipi için yoğun ve ağsı matris tespit edilmiştir. Bununla birlikte NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş numunede küre şeklinde boşluklar ve mikro çatlaklar görülmüştür.
- 5) Geopolimer harç numunelerinde aktivatör tipinin, ç/b oranının ve kür sıcaklığının değiştirilmesi sonucunda, NaOH konsantrasyonunun 16 M, ç/b oranının 0.45, kür sıcaklığının 120°C olduğu numunede 37.09 MPa basınç dayanımı değeri elde

edilmiştir. Volkanik tüfün yalnız NaOH çözeltisi ile alkali aktive edilmesinin NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile alkali aktive edilmesine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca her iki alkali aktivatör tipi için ç/b oranı 0.45 olan karışımların basınç dayanımı değerleri, ç/b oranı 0.35 olan karışımlardan daha yüksek çıkmıştır.

6) 28 günlük geopolimer harç numunelerin UPV değerleri 1943 m/s ile 2980 m/s aralığında olup, basınç dayanımı değerleri ile iyi bir korelasyon ($R^2=0.899$, $R^2=0.889$) göstermiştir.

7) Geopolimer harç karışımlarının mikroyapı incelemelerinde, yalnız NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş numunede yoğun ve sıkı jel yapısı tespit edilmiştir.

8) Katkısız geopolimer beton numunelerinde maksimum basınç dayanımı NaOH konsantrasyonunun 12 M, ç/b oranının 0.60 ve kür sıcaklığının 90°C olduğu 90 günlük numunede 25.70 MPa olarak elde edilmiştir. Numune yaşının artmasıyla devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından kaynaklı olarak basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Yalnız NaOH çözeltisi ile alkali aktive edilmiş geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile alkali aktive edilmiş numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki alkali aktivatör tipi için ç/b oranı 0.60 olan karışımların basınç dayanımı değerleri, ç/b oranı 0.50 olan karışımlardan daha yüksek çıkmıştır.

9) 28 günlük katkısız geopolimer beton numunelerin UPV değerleri 1961 m/s ile 2695 m/s aralığında olup, basınç dayanımı değerleri ile iyi bir korelasyon ($R^2=0.916$, $R^2=0.919$) göstermiştir.

10) Katkısız geopolimer beton karışımlarının mikroyapı incelemelerinde, NaOH+Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilmiş numunede belirgin bir çatlak oluşumu tespit edilmiştir.

11) Katkıların geopolimer betonların basınç dayanımına etkisi incelendiğinde, nano silis ve mikro silis katkıların 90 günlük basınç dayanımı değerlerini sırasıyla %4.60 ve %9.18 oranlarında arttırdığı, SB lateks katkısının ise %18.05 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

12) Katkıların 28 günlük geopolimer betonların UPV değerlerine etkisi incelendiğinde, basınç dayanımı bulguları ile uyumlu olarak nano silis ve mikro silis katkıların UPV değerlerini arttırdığı, SB lateks katkısının ise UPV değerlerini azalttığı tespit edilmiştir.

13) Katkısız, nano silis katkılı, mikro silis katkılı ve SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin su emme oranları sırasıyla %6.16, %5.47, %5.94 ve %4.74 olarak elde edilmiştir. Katkıların su emme oranını düşürdüğü tespit edilmiştir.

14) Katkısız, nano silis katkılı, mikro silis katkılı ve SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri sırasıyla 2160 kg/m³, 2260 kg/m³, 2200 kg/m³ ve 2130 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Nano silis ve mikro silis katkıların hacimsel yoğunluk değerlerini arttırdığı, SB lateks katkısının ise azalttığı tespit edilmiştir.

15) Nano silis ve mikro silis katkılı geopolimer beton numunelerin SEM görüntülerinde daha yoğun bir mikroyapı elde edilmiştir. Katkısız numunede küre şeklinde boşluklar, SB lateks katkılı numunede ise mikro çatlaklar tespit edilmiştir.

16) Geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerleri katkı türünden bağımsız olarak 300°C sıcaklığa kadar artmış, bu sıcaklıktan sonra düşmüştür. 700°C sıcaklık sonrasında katkısız, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerleri sırasıyla %30.82, %28.42, %25.69 ve %32.34 oranlarında düşüş göstermiştir.

17) 700°C sıcaklık sonrasında katkısız, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin ağırlıkları %5.44, %5.72, %5.07 ve %5.96 oranlarında düşüş göstermiştir.

18) 700°C sıcaklık sonrasında katkısız, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin su emme değerleri sırasıyla %7.81, %7.25, %6.99 ve %7.15 olarak elde edilmiştir.

19) 700°C sıcaklık sonrasında katkısız, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkılı geopolimer beton numunelerin gri renk tonuna dönüştüğü görülmüştür.

20) 700°C sıcaklık sonrasında katkısız, nano silis ve SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin SEM görüntülerinde çeşitli boşluk ve mikro çatlaklar görülmesine rağmen, mikro silis katkıli numunede çatlak oluşmadığı tespit edilmiştir.

21) %7 HCl ortamında 180 gün bekletilen katkısız, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %36.71, %32.81, %31.33 ve %26.38 oranlarında düşmüştür. SB lateks katkıli numunenin asit sonrası basınç dayanımı kaybı daha az olmuştur.

22) %7 HCl ortamında 24 hafta bekletilen katkısız, nano silis, mikro silis ve SB lateks katkıli geopolimer beton numunelerin ağırlıkları sırasıyla %5.91, %2.94, %3.97 ve %3.16 oranlarında düşmüştür. Nano silis katkıli numunenin asit sonrası ağırlık kaybı daha az olmuştur.

23) Asit etkisi sonucunda geopolimer beton numunelerin yüzeyinde belirgin bir hasar oluşmamıştır. Ancak, numunelerin renginde az miktarda sararma tespit edilmiş ve yer yer beyaz renkli tabakalar tespit edilmiştir.

24) Asit etkisi öncesinde nispeten dolu ve yoğun bir mikroyapıya sahip olan katkıli ve katkısız geopolimer beton numunelerin, asit etkisi sonrasında daha gözenekli hale geldiği tespit edilmiştir.

25) Bütün geopolimer hamur, harç ve beton numunelerin XRD kırınım desenlerinde belirgin kuvars (SiO₂) piki elde edilmiştir.

Sonuç olarak volkanik tüfün geopolimer hamur, harç ve beton üretiminde kullanılabileceği söylenebilir. Ayrıca nano silis, mikro silis ve SB lateks gibi katkıli volkanik tüf esaslı geopolimer betonların bazı mekanik ve durabilite özelliklerini belirgin bir şekilde etkilemektedir. Ancak geopolimer bağlayıcıların normal Portland çimentosunun yerini alabilmesi için özel olarak tasarlanmış standart ve test yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Geopolimer hamur, harç ve betonların tasarım ve imalat aşamasında dikkate alınması gereken önemli parametreleri ve faktörleri açıklayan genel bir kılavuz oluşturulmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Acar, M.C. (2011). *Kayseri Tüflerinin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması ve Yapay Zeka Tekniğiyle Modellenmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Adak, D., Sarkar, M., Mandal, S. (2014). Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Constr. Build. Mater.* **70**, 453–459.
- Ahmari, S., Zhang, L. (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Constr. Build. Mater.* **29**, 323–331.
- Akgül, E. (2006). *Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Degerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Al Bakri, M.M., Mohammed, H., Kamarudin, H., Niza, I.K., Zarina, Y. (2011). Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement. *J. Eng. Technol. Res.* **3(1)**, 1-4.
- Aliabdo, A.A., Elmoaty, A.E.M.A., Salem, H.A. (2016). Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Constr. Build. Mater.* **121**, 694–703.
- Alonso, S., Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Mater. Lett.* **47(1-2)**, 55–62.
- Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., Font, O., Moreno, T., Diez, S., Vazquez, E., Barra, M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. *J. Hazard. Mater.* **154(1-3)**, 175-183.
- Aly, M., Hashmi, M.S.J., Olabi, A.G., Messeiry, M., Hussain, A.I. (2011). Effect of nano clay particles on mechanical, thermal and physical behaviours of waste-glass cement mortars. *Mater. Sci. Eng., A.* **528(127)**, 7991–7998.
- Angulo-Ramirez, D.E., de Gutierrez, R.M., Puertas, F. (2017). Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. *Constr. Build. Mater.* **140**, 119-128.
- Aredes, F.G.M., Campos, T.M.B., Machado, J.P.B., Sakane, K.K., Thim, G.P., Brunelli, D.D. (2015). Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. *Ceram. Int.* **41(6)**, 7302–7311.
- Ariffin, M.A.M., Bhutta, M.A.R., Hussin, M.W., Tahir, M.M., Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **43**, 80–86.
- Assaedi, H., Shaikh, F.U.A., Low, I.M. (2016a). Characterizations of flax fabric reinforced nanoclay-geopolymer composites. *Composites Part B.* **95**, 412-422.
- Assaedi, H., Shaikh, F.U.A., Low, I.M. (2016b). Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer. *J. Asian Ceram. Soc.* **4(1)**, 19-28.

- Assaedi, H., Shaikh, F.U.A., Low, I.M. (2016c). Influence of mixing methods of nano silica on the microstructural and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.* **123**, 541-552.
- ASTM C186-17. (2017). *Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C187-16. (2016). *Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C191-01. (2001). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Atıcı, E. (2016). *Kapadokya Bölgesinde Yapı Taşı Olarak Üretilen Tüflerdeki Doğal Radyoaktivitenin Gama Spektrometrik Yöntemle Ölçülmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir.
- Atiş, C.D., Görür, E.B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., Luga, E. (2015). Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Constr. Build. Mater.* **96**, 673–678.
- Autef, A., Joussein, E., Gasgnier, G., Rossignol, S. (2012). Role of the silica source on the geopolymerization rate. *J. Non-Cryst. Solids.* **358(21)**, 2886-2893.
- Bakharev, T. (2005a). *Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack*. Research Report, Monash University, Victoria, Australia.
- Bakharev, T. (2005b). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cem. Concr. Res.* **35(6)**, 1224–1232.
- Bakharev, T. (2005c). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cem. Concr. Res.* **35(4)**, 658–670.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B. (2003). Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cem. Concr. Res.* **33(10)**, 1607–1611.
- Balczar, I., Korim, T., Dobradi, A. (2015). Correlation of strength to apparent porosity of geopolymers – Understanding through variations of setting time. *Constr. Build. Mater.* **93**, 983–988.
- Bayrak, N. (2005). *Pomza Taşlarının X-Isını Toz Kırınım Yöntemi ile Nitel Analizi ve Yapısal Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Behfarnia, K., Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Constr. Build. Mater.* **48**, 580–584.
- Behfarnia, K., Rostami, M. (2017). Effects of micro and nanoparticles of SiO₂ on the permeability of alkali activated slag concrete. *Constr. Build. Mater.* **131**, 205–213.

- Bekar, M., Şapcı, N., Gündüz, L. (2006). Aksaray Bölgesi Volkanik Tüf Serilerinin Sıva Malzemesi Olarak Kullanımı. *IV.Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, 2-4 Aralık, İstanbul.
- Belkowitz, J.S., Belkowitz, W.B., Nawrocki, K., Fisher, F.T. (2015). The impact of nano silica size and surface area on concrete properties. *ACI Mater. J.* **112(3)**, 419-427.
- Bernal, S.A., Provis, J.L., Rose, V., de Gutierrez, R.M. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cem. Concr. Compos.* **33(1)**, 46–54.
- Bhutta, M.A.R., Hussin, W.M., Azreen, M., Tahir, M.M. (2014). Sulphate resistance of geopolymer concrete prepared from blended waste fuel ash. *J. Mater. Civ. Eng.* **26(11)**, 04014080.
- Bing-hui, M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H., Si-yu, G. (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* **99**, 144–148.
- Blaszczynski, T., Krol, M. (2015). Usage of green concrete technology in civil engineering. *Procedia Eng.* **122**, 296 – 301.
- Blum, A., Lasaga, A. (1988). Role of Surface speciation in the low-temperature dissolution of minerals. *Nature.* **331**, 431–433.
- Bouguermouh, K., Bouzidi, N., Mahtout, L., Perez-Villarejo, L., Martinez-Cartas, M.L. (2017). Effect of acid attack on microstructure and composition of metakaolin-based geopolymers: The role of alkaline activator. *J. Non-Cryst. Solids.* **463**, 128-137.
- Chen, B., Liu, J. (2007). Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. *Constr. Build. Mater.* **21(1)**, 7–11.
- Cheng, T.W., Chiu, J.P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Miner. Eng.* **16(3)**, 205–210.
- Chen-Tan, N.W., van Riessen, A., Ly, C.V., Southam, D.C. (2009). Determining the reactivity of a fly ash for production of geopolymer. *J. Am. Ceram. Soc.* **92(4)**, 881-887.
- Chi, M. (2015). Effects of modulus ratio and dosage of alkali-activated solution on the properties and micro-structural characteristics of alkali-activated fly ash mortars. *Constr. Build. Mater.* **99**, 128–136.
- Chindapasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cem. Concr. Compos.* **29(3)**, 224–229.
- Chindapasirt, P., Rattanasak, U. (2017). Characterization of the high-calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing systems for sustainable application. *Adv. Powder Technol.* **28(9)**, 2317–2324.

- Cho, Y.K., Yoo, S.W., Jung, S.H., Lee, K.M., Kwon, S.J. (2017). Effect of Na₂O content, SiO₂/Na₂O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* **145**, 253–260.
- Choate, W.T. (2003). *Energy and Emission Reduction Opportunities for the Cement Industry*. Report: Industrial Technological Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, USA.
- Colangelo, F., Cioffi, R., Roviello, G., Capasso, I., Caputo, D., Aprea, P., Liguori, B., Ferone, C. (2017). Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars. *Composites Part B.* **129**, 11-17.
- Colella, C., de Gennaro, M., Aiello, R. (2001). Use of zeolitic tuff in the building industry. *Rev. Mineral. Geochem.* **45 (1)**, 551–587.
- Comrie, D.C., Davidovits, J. (1988). Long Term Durability of Hazardous Toxic and Nuclear Waste Disposals. *Geopolymer88; First European Conference on Soft Mineralurgy*, June 2-3, Compiègne.
- Damilola, O.M. (2013). Syntheses, characterization and binding strength of geopolymers: a review. *Int. J. Mater. Sci. Appl.* **2(6)**, 185–193.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *J. Therm. Anal.* **37(8)**, 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). High-Alkali Cements for 21st Century Concretes. *ACI Special Publication.* **144**, 383-398.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology (pp: 9-40). *Proc. Geopolymer '99 International Conference*, June 30-July 2, Saint-Quentin.
- Davidovits, J. (2008a). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institut Géopolymère, Saint-Quentin.
- Davidovits, J. (2008b). Road map for geopolymer technologies. Global roadmap for ceramics. *Proc. 2nd International Congress on Ceramics*, June 29-July 4, Verona.
- Davidovits, J., Comrie, D.C., Paterson, J.H., Ritcey, D.J. (1990). Geopolymeric concretes for environmental protection. *Concr. Int.* **12(7)**, 30–40.
- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cem. Concr. Res.* **37(4)**, 512–518.
- De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., Da Silva, F.J., Pavao, B., Veit, H. (2011). The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cem. Concr. Compos.* **33(6)**, 653–660.
- Deb, P.S., Sarker, P.K., Barbhuiya, S. (2015). Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. *Constr. Build. Mater.* **101**, 675-683.

- Deb, P.S., Sarker, P.K., Barbhuiya, S. (2016). Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cem. Concr. Compos.* **72**, 235-245.
- Demir, İ., Başpınar, M.S., Görhan, G., Kahraman, E. (2008). Seyitömer Uçucu Külü Ve Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Tüflerinin Puzolanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi.* **4(1)**, 39-46.
- Demirdağ, S., Gündüz, L. (2003). Volkanik Cürüfların İnşaat Endüstrisinde Hafif Beton Agregası Olarak Değerlendirilme Kriterleri. *III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, 3-4 Aralık, İstanbul.
- Detphan, S., Chindapasirt, P. (2009). Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* **16(6)**, 720–726.
- Dimas, D., Giannopoulou, I., Panias, D. (2009). Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. *J. Mater. Sci.* **44(14)**, 3719–3730.
- Djobo, J.N.Y., Tchadjie, L.N., Tchakoute, H.K., Kenne, B.B.D., Elimbi, A., Njopwouo, D. (2014). Synthesis of geopolymer composites from a mixture of volcanic scoria and metakaolin. *J. Asian Ceram. Soc.* **2(4)**, 387–398.
- Djobo, J.N.Y., Elimbi, A., Tchakoute, H.K., Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Constr. Build. Mater.* **124**, 606–614.
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W. (2017). Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle. *Cem. Concr. Compos.* **78**, 108-119
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Luo, W., Shen, C. (2015). An investigation of the microstructure and durability of a fluidized bed fly ash–metakaolin geopolymer after heat and acid exposure. *Mater. Des.* **74**, 125-137.
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Ren, D. (2016). Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle. *Constr. Build. Mater.* **118**, 76–88.
- Duran, F. (2009). *Erciyes volkanizmasının oluşumu, Koçcağız Köyü (Kayseri) dolayının stratigrafisi ve tüflerin yapı - kaplama taşı olarak kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer J.S.J. (2007a). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cem. Concr. Res.* **37(12)**, 1590–1597.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J. (2007b). Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* **42(9)**, 2917–2933.
- Edouard, J.B. (2011). *Experimental Evaluation of the Durability of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete in the Marine Environment*. Master of Science Thesis, Florida Atlantic University, Florida.

- El-Gamal, S.M.A., Selim, F.A. (2017). Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production. *Sustainable Mater.Technol.* **12**, 9–17.
- Ene, E., Okagbue, C. (2009). Some basic geotechnical properties of expansive soil modified using pyroclastic dust. *Eng. Geol.* **107(1-2)**, 61-65.
- Fernandez-Jimenez, A., Puertas, F. (2001). Setting of alkali-activated slag cement. Influence of activator nature. *Adv. Cem. Res.* **13(3)**, 115–121.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel.* **82(18)**, 2259–2265.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Sobrados, I., Sanz, J. (2006a). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous Mesoporous Mater.* **91(1-3)**, 111-119.
- Fernandez-Jimenez, A.M., Palomo, A., Lopez-Hombrados, C. (2006b). Engineering Properties of Alkali-activated Fly Ash Concrete. *ACI Mater J.* **103(2)**, 106–112.
- Fernandez-Jimenez, A., Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A. (2007). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *J. Mater. Sci.* **42(9)**, 3055–3065.
- Fernandez-Jimenez, A., Monzo, M., Vicent, M., Barba, A., Palomo, A. (2008). Alkaline activation of metakaolin–fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. *Microporous Mesoporous Mater.* **108(1–3)**, 41-49.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A. (2014). An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders (pp: 1-29). *In: Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Elsevier Science, London.
- Gao, X., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. (2015). Characterization of alkali activated slag–fly ash blends containing nano-silica. *Constr. Build. Mater.* **98**, 397–406.
- Gasparini, E., Tarantino, S.C., Conti, M., Biesuz, R., Ghigna, P., Auricchio, F., Riccardi, M.P., Zema, M. (2015). Geopolymers from low-T activated kaolin: Implications for the use of alunite-bearing raw materials. *Appl. Clay Sci.* **114**, 530–539.
- Ghosh, R., Sagar, S.P., Kumar, A., Gupta, S.K., Kumar, S. (2018). Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. *J. Build. Eng.* **16**, 39–44.
- Girgin, S. (2016). *NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Gomaa, E., Sargon, S., Kashosi, C., ElGawady, M. (2017). Fresh properties and compressive strength of high calcium alkali activated fly ash mortar. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* **29(4)**, 356–364.
- Görhan, G., Kürklü, G. (2014) The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B.* **58**, 371–377.

- Gualtieri, A.F., Veratti, L., Tucci, A., Esposito, L. (2012). Recycling of the product of thermal inertization of cement-asbestos in geopolymers. *Constr. Build. Mater.* **31**, 47–51.
- Guo, C., Wang, K., Liu, M., Li, X., Cui, X. (2016). Preparation and characterization of acid-based geopolymer using metakaolin and disused polishing liquid. *Ceram. Int.* **42(7)**, 9287–9291.
- Guo, X., Shi, H., Dick, W.A. (2010). Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer. *Cem. Concr. Compos.* **32(2)**, 142–147.
- Gümüş, A. (2016). *Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Gündüz, L., Ulusoy, M., Başpınar, E. (2006). Volkanik doğal kayaçların dış mimari kaplamada kullanımı üzerine teknik inceleme. 3. *Ulusal Yapı Malzemeleri Kongresi*, 15-17 Kasım, İstanbul.
- Haddad, R.H., Alshbuol, O. (2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Constr. Build. Mater.* **114(1)**, 699-707.
- Hajimohammadi, A., Provis, J.L., van Deventer, J.S.J. (2011a). The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation. *Cem. Concr. Res.* **41(3)**, 210-216.
- Hajimohammadi, A. Provis, J.L. van Deventer, J.S.J. (2011b). Time-resolved and spatially-resolved infrared spectroscopic observation of seeded nucleation controlling geopolymer gel formation. *J. Colloid Interface Sci.* **357(2)**, 384–392.
- Hamidi, R.M., Man, Z., Azizli, K.A. (2016). Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *Procedia Eng.* **148**, 189-193.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cem. Concr. Compos.* **45**, 9–14.
- Hardjito, D. (2005). *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Doctor Of Philosophy Thesis, Curtin University of Technology, Perth.
- Hardjito, D., Rangan, B.V. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Research Report GCI, Curtin University of Technology, Perth.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cem. Concr. Compos.* **37**, 108–118.
- Helmy, A.I.I. (2016). Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar. *Constr. Build. Mater.* **110**, 54–64.

- Hewayde, E., Nehdi, M., Allouche, E., Nakhla, G. (2006). Effect of geopolymer cement on microstructure, compressive strength and sulphuric acid resistance of concrete. *Mag. Concr. Res.* **58**, 321-331.
- Hlavacek, P. (2014). *Engineering properties of alkali activated composites*. Doctor Of Philosophy Thesis, Czech Technical University In Prague, Prague.
- Hosan, A., Haque, S., Shaikh, F. (2016). Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. *J. Build. Eng.* **8**, 123–130.
- Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Easa, S., (2007). Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea. *Resour. Conserv. Recycl.* **51(4)**, 711-731.
- Hossain, M.M., Karim, M.R., Hossain, M.K., Islam, M.N., Zain, M.F.M. (2015). Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: A review. *Constr. Build. Mater.* **93**, 95–109.
- Hou, Y., Wang, D., Zhou, W., Lu, H., Wang, L. (2009). Effect of Activator and Curing Mode on Fly Ash-based Geopolymers. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* **24(5)**, 711-715.
- Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., Hussein, A.A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **80**, 54–74.
- Hwang, C.L., Huynh, T.P. (2015). Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Constr. Build. Mater.* **101**, 1–9.
- Islam, A., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Bashar, I.I. (2014). The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. *Mater. Des.* **56**, 833–841.
- Jo, B.W., Sikandar, M.A., Chakraborty, S., Baloch, Z. (2017). Investigation of the acid and sulfate resistance performances of hydrogen-rich water based mortars. *Constr. Build. Mater.* **137**, 1–11.
- Joseph, B. (2015). *Behaviour Of Geopolymer Concrete Exposed To Elevated Temperatures*. Doctor Of Philosophy Thesis, Cochin University of Science and Technology, Kerala.
- Kajaste, R., Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions-management options and abatement cost. *J. Cleaner Prod.* **112**, 4041-4052.
- Kani, E.N., Allahverdi, A., Provis, J.L. (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cem. Concr. Compos.* **34(1)**, 25–33.
- Karakoç, M.B., Türkmen, İ., Maraş, M.M., Kantarci, F., Demirboğa, R., Toprak, M.U. (2014). Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Constr. Build. Mater.* **72**, 283-292.

- Kaya, A. Durukan, S. (2004). Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner. *Appl. Clay Sci.* **25(1-2)**, 83-91.
- Ken, P.W., Ramli, M., Ban, C.C. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Constr. Build. Mater.* **77**, 370–395.
- Khater, H.M. (2012). Effect of calcium on geopolymerization of aluminosilicate wastes. *J. Mater. Civ. Eng.* **24(1)**, 92–101.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., Chutubtim, S. (2001). A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. *Cem. Concr. Compos.* **23(4-5)**, 335-343.
- Kim, Y.Y., Lee, B.J., Saraswathy, V., Kwon, S.J. (2014). Strength and durability performance of alkali-activated rice husk ash geopolymer mortar. *Sci. World J.* **2014**, 1-10.
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Bradic, V. (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *J. Hazard. Mater.* **181(1-3)**, 35-42.
- Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cem. Concr. Res.* **40(2)**, 334–339.
- Kouamo, H.T, Elimbi, A., Mbey, J.A., Sabouang, C.J. N., Njopwouo, D. (2012). The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on geopolymer products: A comparative study. *Constr. Build. Mater.* **35**, 960–969.
- Kovalchuk, G., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II. *Fuel.* **86(3)**, 315-322.
- Kumar, S., Kumar, R. (2010). Tailoring Geopolymer Properties Trough Mechanical activation of Fly ash. *Proc. Second International Conference on Sustainable construction*. June 28-30, Ancona.
- Law, D.W, Adam, A.A., Molyneaux, T.K., Patnaikuni, I., Wardhono, A. (2015). Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete. *Mater. Struct.* **48(3)**, 721-731.
- Lecomte, I., Henrist, C., Liegeois, M., Maseri, F., Rulmont, A., Cloots, R. (2006). (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. *J. Eur. Ceram. Soc.* **26(16)**, 3789–3797.
- Lee, N.K., Kim, E.M., Lee, H.K. (2016). Mechanical properties and setting characteristics of geopolymer mortar using styrene-butadiene (SB) latex. *Constr. Build. Mater.* **113**, 264-272.
- Lee, N.K., Lee, H.K. (2015). Reactivity and reaction products of alkali-activated, fly ash/slag paste. *Constr. Build. Mater.* **81**, 303–312.

- Lee, W.K.W., van Deventer, J.S.J. (2002). The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements. *Cem. Concr. Res.* **32(4)**, 577-584.
- Lee, W.K.W., van Deventer, J.S.J. (2004). The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers. *Cem. Concr. Res.* **34(2)**, 195–206.
- Lemounga, P.N., MacKenzie, K.J.D., Melo, U.F.C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceram. Int.* **37(8)**, 3011–3018.
- Lemounga, P.N., Wang, K., Tang, Q., Melo, U.C., Cui, X. (2016). Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. *Ceram. Int.* **42(14)**, 15142–15159
- Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cem. Concr. Res.* **34(6)**, 1043–1049.
- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y. (2004). Development of Sustainable Cementitious Materials (pp. 55-76). *Proc. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. May 20-21, Beijing.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Al Bakri, M.M., Hussin, K. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Prog. Mater Sci.* **83**, 595–629.
- Ma, B. Li, H. Li, X. Mei, J. Lv, Y. (2016a). Influence of nano-TiO₂ on physical and hydration characteristics of fly ash–cement systems. *Constr. Build. Mater.* **122**, 242–253.
- Ma, X., Zhang, Z., Wang, A. (2016b). The transition of fly ash-based geopolymer gels into ordered structures and the effect on the compressive strength. *Constr. Build. Mater.* **104**, 25–33.
- Malhotra, V.M. (1999). Making Concrete “Greener” With Fly Ash. *Concr. Int.* **21(5)**, 61-66.
- Massazza, F. (2001). Properties and applications of natural pozzolans (pp. 326–352). In: Bensted, J., Barnes P. (Ed.), *Structure and Performance of Cements*, Spon Press, London.
- McCaffrey, R. (2002). Climate Change and the Cement Industry. *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*. 15–19.
- McNulty E., (2009). *Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement*. Senior Comprehensive Paper, Department of Chemistry, The Catholic University Of America.
- Mehta, P.K. (1987). Natural pozzolans (pp. 3–20.). In: Malhotra V.M. (Ed.), *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Canadian Government Publishing Center, Ottawa.
- Mehta, P.K., Burrows, R.W. (2001). *Building durable structures in the 21st century*. *Indian Concr. J.* **75(7)**, 437–443.

- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cem. Concr. Compos.* **31(8)**, 601-605.
- Mijarsh, M.J.A., Johari, M.A.M., Ahmad, Z.A. (2014). Synthesis of geopolymer from large amounts of treated palm oil fuel ash: application of the Taguchi method in investigating the main parameters affecting compressive strength. *Constr. Build. Mater.* **52**, 473–481.
- Mingyu, H., Xiaomin, Z., Fumei, L. (2009). Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives. *Cem. Concr. Compos.* **31(10)**, 762–768.
- Miranda, J.M., Fernandez-Jimenez, A., Gonzalez, J.A., Palomo, A. (2005). Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cem. Concr. Res.* **35(6)**, 1210-1217.
- Montes, C., Allouche, E.N. (2012). Influence of activator solution formulation on fresh and hardened properties of low calcium fly ash geopolymer concrete. *Coal Combust. Gasif. Prod.* **4**, 1–9.
- Narayanan, A., Shanmugasundaram, P. (2017). An Experimental Investigation on Flyash-based Geopolymer Mortar under different curing regime for Thermal Analysis. *Energy Build.* **138**, 539–545.
- Nath, P. (2014). *Study of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition*. Doctor Of Philosophy Thesis, Curtin University, Perth.
- Nath, S.K., Kumar S. (2013). Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. *Constr. Build. Mater.* **38**, 924–930.
- Nazari, A., Bagheri, A., Riahi, S. (2011). Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. *Mater. Sci. Eng., A.* **528(24)**, 7395–7401.
- Nazari, A., Riahi, S. (2011). The effects of Cr₂O₃ nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media. *Mater. Sci. Eng., A.* **528(3)**, 1173–1182.
- Ndjock, B.I.D.L., Elimbi, A., Cyr, M. (2017). Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation. *J. Non-Cryst. Solids.* **463**, 31–39.
- Neville, A.M. (1997). *Properties of concrete*. 4th ed. India: Dorling Kindersley Publishing, Inc.
- Nocun-Wczelik, W. (2006). Heat evolution in alkali activated synthetic slag–metakaolin mixtures. *J. Therm. Anal. Calorim.* **86(3)**, 739–743.
- Noushini, A., Castel, A. (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **112**, 464–477.
- Okoye, F.N., Prakash, S., Singh, N.B. (2017). Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *J. Cleaner Prod.* **149**, 1062-1067.

- Okoye, F.N., Durgaprasad, J., Singh, N.B. (2015). Mechanical properties of alkali activated fly ash / Kaolin based geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **98**, 685–691.
- Okoye, F.N., Durgaprasad, J., Singh, N.B. (2016). Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceram. Int.* **42(2)**, 3000–3006.
- Omer, S.A., Demirboga, R., Khushefati, W.H. (2015). Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **94**, 189-195.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Constr. Build. Mater.* **22(7)**, 1305–1314.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. *Cem. Concr. Res.* **29(8)**, 1323-1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I.P., Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids Surf., A.* **301(1–3)**, 246–254.
- Park, S.M., Jang, J.G., Lee, N.K., Lee, H.K. (2016). Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures. *Cem. Concr. Res.* **89**, 72-79.
- Pavithra, P., Reddy, M.S., Dinakar, P., Rao, B.H., Satpathy, B.K., Mohanty, A.N. (2016). A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. *J. Cleaner Prod.* **133**, 117-125.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Peris-Mora, E. (1995). Mechanical treatment of fly ashes. Part I: Physico-chemical characterization of ground fly ashes. *Cem. Concr. Res.* **25(7)**, 1469-1479.
- Perna, I., Hanzlicek, T. (2016). The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method. *J. Cleaner Prod.* **112**, 1150-1155.
- Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Hatanaka, S. (2014). The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Mater. Des.* **55**, 58–65.
- Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer. *Constr. Build. Mater.* **91**, 1–8.
- Provis J.L. (2014). Introduction and Scope. In: Provis, J., van Deventer, J. *Alkali Activated Materials*. RILEM State-of-the-Art Reports, vol 13. Springer, Dordrecht.

- Provis, J.L. 2017. Alkali-activated materials. *Cem. Concr. Res.* (Accepted, In Press) <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Provis, J.L., Bernal, S.A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annu. Rev. Mater. Res.* **44**, 299–327.
- Provis, J.L., Palomo, A., Shi, C. (2015). Advances in understanding alkali-activated materials. *Cem. Concr. Res.* **78**, 110–125.
- Provis, J.L., van Deventer J.S.J. (2014). *Alkali Activated Materials: State of the Art Report*. RILEM TC 224-AAM, Springer/RILEM, Dordrecht.
- Provis, J.L., Yong, C.Z., Duxson, P., van Deventer, J.S.J. (2009). Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers. *Colloids Surf., A.* **336(1-3)**, 57-63.
- Rafeet, A., Vinai, R., Soutsos, M., Sha, W. (2017). Guidelines for mix proportioning of fly ash/GGBS based alkali activated concretes. *Constr. Build. Mater.* **147**, 130–142.
- Raijiwala, D.B., Patil, H.S., Kundan, I.U. (2012). Effect of alkaline activator on the strength and durability of geopolymer concrete. *J. Eng. Res. Stud.* **3(1)**, 18-21.
- Rajarajeswari, A., Dhinakaran, G. (2016). Compressive strength of GGBFS based GPC under thermal curing. *Constr. Build. Mater.* **126**, 552–559.
- Rangan, B.V. (2010). Fly Ash-Based Geopolymer Concrete (pp 68-106). International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete, December 7, Mumbai.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z. (2014a). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Mater. Des.* **59**, 532–539.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Alengaram, U.J., Metselaar, H.S.C., Jumaat, M.Z. (2014b). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **65**, 114–121.
- Rashad, A.M. (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Mater. Des.* **53**, 1005-1025.
- Rashad, A.M., Zeedan, S.R. (2011). The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Constr. Build. Mater.* **25(7)**, 3098–3107.
- Rattanasak, U., Chindapasirt, P., Suwanvitaya, P. (2010). Development of high volume rice husk ash alumino silicate composites. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* **17(5)**, 654-659.
- Rattanasak, U., Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner. Eng.* **22(12)**, 1073–1078.

- Ravikumar, D., Peethamparan, S., Neithalath, N. (2010). Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder. *Cem. Concr. Compos.* **32(6)**, 399–410.
- Reddy, M.S., Dinakar, P., Rao, B.H. (2016). A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete. *Microporous Mesoporous Mater.* **234**, 12-23.
- Rivera, O.G., Long, W.R., Weiss Jr, C.A., Moser, R.D., Williams, B.A., Torres-Cancel, K., Gore, E.R., Allison, P.G. (2016). Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders. *Cem. Concr. Res.* **90**, 43–51.
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* **24(7)**, 1176–1183.
- Roy, D.M. (1999). Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cem. Concr. Res.* **29(2)**; 249-254.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Constr. Build. Mater.* **47**, 409–18.
- Saltan, M., Findik, F.C. (2008). Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. *Build. Environ.* **43(4)**, 415-421.
- Sanchez, F. Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete-A review. *Constr. Build. Mater.* **24(11)**, 2060–2071.
- Sarker, P.K., Meillon, T. (2007). Geopolymer Concrete After Exposure To High Temperature Heat (pp. 1566-1571). *Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics And Computation*. Millpress, Rotterdam, the Netherlands.
- Sata, V., Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cem. Concr. Compos.* **34(5)**, 700–708.
- Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K. (2009). Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *J. Hazard. Mater.* **168(1)**, 44–50.
- Saxena, S.K., Kumar, M., Singh, N.B. (2017). Fire Resistant Properties of Alumino Silicate Geopolymer cement Mortars. *Mater. Today: Proc.* **4(4)**, 5605–5612.
- Shaikh, F.U.A., Supit, S.W.M., Sarker, P.K. (2014). A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes. *Mater. Des.* **60**, 433–442.
- Shi, C., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cem. Concr. Res.* **41(7)**, 750–763.

- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D.M. (2006). *Alkali-activated Cements and Concretes*. Taylor & Francis, Abingdon.
- Shi, C., Qian, J. (2000). High performance cementing materials from industrial slags—a review. *Resour. Conserv. Recycl.* **29(3)**, 195–207.
- Shi, X.S., Wang, Q.Y., Zhao, X.L., Collins, F. (2012). Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate. *Adv. Mater. Res.* **450-451**, 1577-1583.
- Shrestha, P. (2013). *Development Of Geopolymer Concrete For Precast Structures*. Master Of Science Thesis, The University Of Texas At Arlington, Texas.
- Sınıksaran, M. (2012). *Volkanik Tüf Tozları ile Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Constr. Build. Mater.* **85**, 78–90.
- Singh, B., Rahman, M.R., Paswan, R., Bhattacharyya, S.K. (2016). Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **118**, 171–179.
- Siyal, A.A., Azizli, K.A., Man, Z., Ullah, H. (2016). Effects of Parameters on the Setting Time of Fly Ash Based Geopolymers Using Taguchi Method. *Procedia Eng.* **148**, 302–307.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., Chindaprasirt, P. (2011). NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel.* **90(6)**, 2118–2124.
- Soutsos, M., Boyle, A.P., Vinai, R., Hadjierakleous, A., Barnett S.J. (2016). Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. *Constr. Build. Mater.* **110**, 355–368.
- Speight, J.G. (2002) *Chemical and Process Design Handbook*. McGraw-Hill, USA, 633 p.
- Stevenson, M., Sagoe-Crentsil, K. (2005). Relationship between composition, structure and strength of inorganic polymers: Part 1-metakaolin-derived inorganic polymers. *J. Mater. Sci.* **40(16)**, 4247-4259.
- Stutzman, P.E., Centeno, L. (1995). *Compositional analysis of beneficiated fly ashes*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.L. (2013). Strength development in clay-fly ash geopolymer. *Constr. Build. Mater.* **40**, 566–574.
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P., Arulrajah, A. (2015). Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Constr. Build. Mater.* **82**, 20–30.

- Sumesh, M., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Mo, K.H., Alnahhal, M.F. (2017). Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar–A review. *Constr. Build. Mater.* **148**, 62–84.
- Swaddle, T.W., Salerno, J., Tregloan, P.A. (1994). Aqueous aluminates, silicates, and aluminosilicates. *Chem. Soc. Rev.* **23**, 319–325.
- Swanepoel, J.C., Strydom, C.A. (2002). Utilisation of Fly Ash in A Geopolymeric Material. *Appl. Geochem.* **17(8)**, 1143-1148.
- Tchadjie, L.N., Djobo, J.N.Y., Ranjbar, N., Tchakoute, H.K., Kenne, B.B.D., Elimbi, A., Njopwouo, D. (2016). Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. *Ceram. Int.* **42(2)**, 3046-3055.
- Teixeira-Pinto, A., Fernandes, P., Jalali, S. (2002). Geopolymer manufacture and application-Main problems when using concrete technology. *Proc. Geopolymers 2002 International Conference*, October 28-29, Melbourne.
- Tekin, İ. (2016). Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Constr. Build. Mater.* **127**, 607–617.
- Temuujin, J., Minjigmaa, A., Lee, M., Chen-Tan, N., van Riessen, A. (2011). Characterisation of class F fly ash geopolymer pastes immersed in acid and alkaline solutions. *Cem. Concr. Compos.* **33(10)**, 1086–1091.
- Tennakoon, C.K. (2016). *Assessment of Properties of Ambient Cured Geopolymer Concrete for Construction Applications*. Doctor Of Philosophy Thesis, Swinburne University of Technology, Melbourne.
- Thokchom S., Ghosh P., Ghosh S. (2009) Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid. *Int. J. Civil Environ. Eng.* **3(3)**, 193-199.
- Tippayasam, C., Balyore, P., Thavorniti, P., Kamseu, E., Leonelli, C., Chindaprasirt, P., Chaysuwan, D. (2016). Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* **104**, 293–297.
- TS 706 EN 12620+A1. (2009). *Beton agregları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802. (2016). *Beton karışım hesap esasları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1008. (2003). *Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097–6. (2013). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3. (2010). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7. (2010). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 1744-1:2009+A1. (2013). *Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler – Bölüm 1: Kimyasal analiz*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1. (2016). *Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-2. (1996). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler kısım 2: Tane boyutu dağılım tayini-Deney elekleri, elek göz açıklıklarını anma büyüklükleri*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkmen, İ., Karakoç, M.B., Kantarcı, F., Maraş, M.M., Demirboğa, R. (2016). Fire resistance of geopolymer concrete produced from Elazığ ferrochrome slag. *Fire Mater.* **40**, 836–847.
- USGS, (2014). United States Geological Survey Mineral Commodity Summaries - Cement. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>
- van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chem. Eng. J.* **89(1-3)**, 63-73.
- van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C., Xu, H. (2006). Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization. *Ind. Eng. Chem. Res.* **45(10)**, 3559–3568.
- Wallah, S.E. Rangan, B.V. (2006), *Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties*. Research Report GC₂, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D.W., Setunge, S. (2017). Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Constr. Build. Mater.* **143**, 272–279.
- Weng, L., Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., Song, S. (2005). Effects of aluminates on the formation of geopolymers. *Mater. Sci. Eng., B.* **117(2)**, 163-168.
- Xu, H., van Deventer, J.S.J. (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *Int. J. Miner. Process.* **59(3)**, 247–266.
- Xu, Y., Wong, Y.L., Poon, C.S., Anson, M. (2001). Impact of high temperature on PFA concrete. *Cem. Concr. Res.* **31(7)**, 1065–1073.
- Yadollahi, M.M. (2013). *Hasankale Pomzasından Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Geopolimer Çimentosunun Üretilebilirliğinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Yadollahi, M.M., Benli, A., Demirboğa, R. (2015). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.* **94**, 767-774.
- Yang, K.H., Song, J.K., Lee, K.S., Ashour, A.F. (2009). Flow and compressive strength of alkali activated mortars. *ACI Mater. J.* **106(1)**, 50–58.

- Yaşar, E., Erdoğan, Y. (2005a). Asidik (Nevşehir) ve Bazik (Osmaniye) Pomzaların Yapı Sektöründe Değerlendirilmesi. *19. Uluslararası Madencilik Kongresi*, 09-12 Haziran, İzmir.
- Yaşar, E., Erdoğan, Y. (2005b). Nevşehir Pomzasından Üretilen Briketlerin Isı ve Ses İletkenlikleri Açısından Değerlendirilmesi. *19. Uluslararası Madencilik Kongresi*, 09-12 Haziran, İzmir.
- Yip, C.B.C. (2004). *The role of calcium in geopolymerisation*. Doctor Of Philosophy Thesis, The University of Melbourne, Melbourne.
- Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., Wang, F. (2016). Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **109**, 17–24.
- Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., Ou, Z. (2017). Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Constr. Build. Mater.* **152**, 598–613.
- Zhang, Y.J., Wang, Y.C., Xu, D.L., Li, S. (2010). Mechanical performance and hydration mechanism of geopolymer composite reinforced by resin. *Mater. Sci. Eng., A.* **527(24–25)**, 6574–6580.
- Zhang, Y.S., Sun, W., Li, J.Z. (2005). Hydration process of interfacial transition in potassium polysialate (K-PSDS) geopolymer concrete. *Mag. Concr. Res.* **57**, 33–38.
- Zhao, R., Sanjayan, J.G. (2011). Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Mag. Concr. Res.* **63(3)**, 163–173.
- Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qiu, X., Li, D. (2016). A comparative study of high- and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. *Mater. Des.* **95**, 63–74.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Fatih KANTARCI

Doğum Tarihi: 29/05/1988

Doğum Yeri: Malatya

Öğrenim Durumu:

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007-2011
Yüksek Lisans	İnşaat Mühendisliği	İnönü Üniversitesi	2011-2013
Doktora	İnşaat Mühendisliği	İnönü Üniversitesi	2013-2018

Akademik Unvanlar :

Araştırma Görevlisi : 2011-

Yüksek Lisans Tezi : Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla

Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması