

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

**VOLKANİK TÜF KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN
BAZI MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

ENES EKİNCİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

ARALIK 2017

Tezin Başlığı: Volkanik Tuf Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Enes EKİNCİ

Sınav Tarihi: 25.12.2017

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Ragıp İNCE

Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

İnönü Üniversitesi



Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum ‘Volkanik Tüf Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Bazı Mekanik ve Fiziksel 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.

Enes Ekinci

İmza

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

VOLKANİK TÜF KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN BAZI MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Enes Ekinci

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

106 + xv sayfa

2017

Danışman: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Bu çalışmada, Nevşehir Yöresi'nden temin edilen volkanik tüfün geopolimer beton üretiminde kullanılabilirliği ve volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların bazı mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. İki farklı grup halinde üretilen geopolimer betonlardan; birinci grup silis modülü (Ms) 0.8 ve 0.6, ikinci grup ise 10, 12, 14 ve 16 M NaOH kullanılarak aktive edilmiştir. Her iki grup numunenin üretim aşamasında üç farklı kür sıcaklığı ve iki farklı alkali sıvı/bağlayıcı (w/b) oranı kullanılmıştır. Daha sonra, üretilen her iki grup numune için maksimum basınç dayanımına sahip olan numuneler belirlenmiş ve bu iki numuneye farklı oranlarda nano silika (% 1, 2, 3), mikro silika (% 1, 3, 5) ve Stiren-Bütadien (SB) Lateks katkısının (%5, 10, 15) etkisi incelenmiştir. Çeşitli katkıları ilave edilerek elde edilen geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı, donma çözülme (DÇ) dayanıklılığı, mikro yapıları, su emme ve yoğunluk gibi özellikleri incelenmiştir.

Deney sonuçları, NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların Ms kullanılarak aktive edilen benzerlerine göre daha yüksek basınç dayanım değerlerine

sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Birinci ve ikinci grup numuneler için optimum kür sıcaklık değerleri sırasıyla 105 °C ve 90 °C olarak elde edilmiştir. Her iki gruptaki numuneler için, w/b oranının 0,6'dan 0,5'e düşmesi basınç dayanımlarında düşüşe sebep olmuştur. Ayrıca, her iki gruptaki numunelerde katkısız geopolimer betonlara göre meydana gelen maksimum basınç dayanım artışının mikro silika katkıları ile sağlandığı belirlenmiştir. Diğer yandan, 300 DÇ çevrimi sonunda numunelerde gözlenen en yüksek basınç dayanım kayıpları her iki grupta da katkısız numunelerde gerçekleşmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi ve su emme deney sonuçları, mikro silika ilavesinin kompakt bir yapının oluşmasına yardımcı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, volkanik tüf, basınç dayanımı, donma-çözülme direnci, alkali aktivatör

ABSTRACT

Master of Science Thesis

THE INVESTIGATION OF SOME MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF GEOPOLIMER CONCRETE PRODUCED BY USING VOLCANIC TUFF

Enes Ekinçi

Inönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

106+ xv pages

2017

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim TURKMEN

In this study, some mechanical and physical properties and the availability of geopolymer concrete production of volcanic tuff obtained from Nevşehir Region were investigated. Geopolymer concrete was produced in two different groups; the first group was activated by silica module (Ms) 0.8 and 0.6 and the second group was activated by using 10, 12, 14 and 16 molarities of NaOH. For both groups, during the production phase of the sample, three different cure temperatures and two different alkali liquid / binder (w/ b) ratio were used. Then, samples having a maximum compressive strength for both groups were determined and for these two samples, the effect of different amounts of nano-silica (1%, 2, 3), micro silica (1%, 3, 5) and styrene butadiene (SB) latex (5, 10, 15%) were investigated. The compressive strength, freeze-thaw (FT) resistance, microstructure, water absorption and density properties of geopolymer concrete specimens obtained by adding various additives were investigated.

Experimental results show that geopolymer concrete activated with NaOH has higher compressive strength values than similar ones activated using Ms. The optimum curing temperature values for the first and second group of samples were determined as 105 ° C and 90 ° C, respectively. For samples in both groups, a decrease in the w / b ratio of 0.6 to 0.5 causes a decrease in compressive strength. Additionally, it has been observed that the maximum compressive strength value in the samples for each group was provided by the use of micro silica additive. At the end of the 300 FT cycles, the highest compressive strength losses occurring in the specimens were observed in pure samples of both two groups. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis and the water absorption test results showed that the addition of micro silica helped to formation of the more compact microstructure.

Keywords: Geopolymer concrete, volcanif tuff, compressive strength, freze-thaw resistance, alkali activator

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konu tespitini gerçekleştiren ve çalışmanın her aşamasında tecrübelerinden yararlandığım, yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek tez çalışmamı tamamlamamı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e;

Tez çalışmama bilgi ve tecrübeleriyle büyük katkı sağlayarak çalışmanın tüm aşamalarında desteğini gördüğüm Sayın Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a;

Çalışmalarımıza yardımcı olan beraber çalıştığım arkadaşım Sayın Arş. Gör. Fatih KANTARCI'ya

Çalışmalarımıza 2016/96 numaralı proje ile maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne,

Çalışmalarımıza volkanik tüf temin etmemizi sağlayan BÖLTAŞ Madencilik ve Yapı Elemanları yetkililerine,

Laboratuar çalışmalarımıza yardımcı olan İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuar Teknisyenimiz Sayın İlhami BAYSAL'a,

Deneysel çalışmalarımızda yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Talha SARICI'ya

teşekkür ederim.

Ayrıca, bugüne kadar hayatımın her döneminde olduğu gibi, yüksek lisans eğitimim süresince de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	ÖZET	iii
	ABSTRACT.....	v
	TEŞEKKÜR.....	vii
	İÇİNDEKİLER.....	viii
	SİMGELER ve KISALTMA DİZİNİ.....	x
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
	ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1.	GİRİŞ.....	1
2.	KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1.	Volkanik Tüf.....	3
2.1.1.	Yapı Malzemesi Olarak Volkanik Tüf.....	3
2.1.2.	Volkanik Tüfün Fiziksel ve Kimyasal Bileşimi.....	4
2.1.3.	Volkanik Tüfün Kullanım Alanları.....	5
2.1.4.	Ülkemizdeki Volkanik Tüf Rezervleri.....	7
2.2.	Volkanik Tüf Kullanılarak Yapılan Çalışmalar.....	8
2.3.	Çimento Üretiminden Kaynaklanan Çevre Sorunları.....	8
2.4.	Alkali Aktivatör Tipleri.....	10
2.5.	Geopolimer Malzemeler.....	13
2.5.1.	Geopolimer malzemelerin kimyasal yapısı.....	19
2.5.2.	Geopolimer beton özelliklerine kür sıcaklığı ve süresinin etkisi.....	23
2.5.3.	Geopolimer beton özelliklerine w/b oranının etkisi.....	28
2.5.4.	Geopolimer beton özelliklerine aktivatör oranının etkisi.....	28
2.5.5.	Geopolimer beton özelliklerine aktivatör tipinin etkisi.....	29
2.5.6.	Geopolimer beton özelliklerine nano ilavenin etkisi.....	31
2.5.7.	Geopolimer beton özelliklerine mikro ilavesinin etkisi.....	33
2.5.8.	Geopolimer beton özelliklerine Sterin Bütadien Lateks ilavesinin etkisi	35
2.5.9.	Geopolimer beton özelliklerine sodyum hidroksit konsantrasyonunun etkisi.....	36
2.5.10.	Geopolimer betonların basınç dayanımı.....	37
2.5.11.	Geopolimerlerde pH etkisi.....	38
2.5.12.	Geopolimerlerin uygulama alanları.....	38
2.6.	Betonlarda Donma Çözülme olayı.....	40
2.6.1.	Donma çözülme olayının taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi...	41
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	45

3.1.	Materyal.....	45
3.1.1.	Volkanik tuf ve özellikleri.....	45
3.1.2.	Alkali aktivatörler.....	46
3.1.3.	Nano, mikro ve polimer katkıları.....	46
3.1.4.	Agrega.....	47
3.1.5.	Su.....	48
3.2.	Yöntem.....	48
3.2.1.	Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi.....	48
3.2.2.	Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi.....	48
3.2.3.	Geopolimer beton üretim ve kür işlemi.....	50
3.2.4.	Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	51
3.2.4.1.	Basınç Dayanımı.....	51
3.2.4.2.	Donma Çözülme Deneyi.....	53
3.2.4.3.	Ultrasonik Hız Ölçümü.....	54
3.2.4.4.	Su Emme.....	57
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	58
4.1.	Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı.....	59
4.1.1.	Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımına silis modülünün (Ms) etkisi.....	59
4.1.2.	Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımına NaOH molaritesinin etkisi.....	65
4.1.3.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların basınç dayanımına w/b oranının etkisi.....	69
4.1.4.	Ms 0,8 ve yalnız NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların basınç dayanımına farklı katkı tiplerinin etkisi.....	72
4.2.	Geopolimer betonların donma çözülme direnci.....	78
4.2.1.	Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi sonucu özelliklerine farklı katkıların etkisi.....	78
4.2.2.	NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi altındaki özellikleri.....	80
4.2.3.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi altındaki UPV değişimleri.....	84
4.2.4.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi altındaki BDEM değerlerinde meydana gelen azalma.....	86
4.3.	Geopolimer beton numunelerinin mikro yapı analizleri.....	88

4.4.	Geopolimer beton numunelere eklenen katkı maddelerinin geopolimerlerin fiziksel özelliklerine etkisi.....	91
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	96
6.	KAYNAKLAR.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BDEM	Bağlı dinamik elastisite modülü
C	C sınıfı uçucu kül
Cs	Sezyum
CSH	Kalsiyum silika hidrat
DÇ	Donma çözülme
F	F sınıfı uçucu kül
Ms	Silis modülü ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)
NaOH	Sodyum hidroksit
Na_2SiO_3	Sodyum metasilikat
SB Lateks	Stiren-Bütadien Lateks
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SPF	Güneş koruma faktörü
Sr	Stronsiyum
TBHA	Teorik birim hacim ağırlığı, (kg/m^3)
UPV	Ultrasonik hız ölçümü
w/b	Alkali Sıvı / bağlayıcı oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Nevşehir Yöresi'nden elde edilmiş farklı renkteki volkanik tuf örnekleri	7
Şekil 2.2.	Dünyada geopolimer çalışmasının yıllara göre coğrafi dağılımı.....	15
Şekil 2.3.	Geopolimer anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı.....	16
Şekil 2.4.	Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi (Yuan vd., 2016).....	24
Şekil 2.5.	Kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Görhan vd., 2015).....	25
Şekil 2.6.	Kür süresine bağlı basınç dayanım artışı, (Rangan, 2014).....	26
Şekil 2.7.	Nano silikanın karıştırılma metotları , (Assaedi vd., 2016b).....	33
Şekil 2.8.	Artan SB Lateks oranının priz süresine etkisi (Lee vd., 2016).....	36
Şekil 3.9.	Nevşehir Yöresi'nde bulunan volkanik tuf rezervi.....	45
Şekil 3.10.	50x50x50 mm ³ boyutlarında üretilen geopolimer beton numuneler.....	51
Şekil 3.11.	Basınç Dayanımı Test Cihazı.....	53
Şekil 3.12.	Donma Çözülme Test Cihazı.....	54
Şekil 3.13.	UPV test cihazının çalışma prensibi.....	55
Şekil 3.14.	UPV ölçüm yöntemleri.....	55
Şekil 3.15.	SEM'in şematik görünüşü.....	57
Şekil 4.16.	Ms 0,8 ve 0,6 kullanılarak aktive edilen w/b oranı 0,6 olan geopolimer betonların farklı kür sıcaklıklarındaki basınç dayanımlarına kür süresinin etkisi.....	61
Şekil 4.17.	Ms 0,8 ve 0,6 kullanılarak aktive edilen w/b oranı 0,5 olan geopolimer betonların farklı kür sıcaklıklarındaki basınç dayanımları.....	61
Şekil 4.18.	Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların dayanım kazanmasına farklı kür sıcaklıklarının etkisi.....	62
Şekil 4.19.	Ms 0,6 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların dayanım kazanmasına farklı kür sıcaklıklarının etkisi.....	62
Şekil 4.20.	Farklı NaOH konsantrasyonları ve kür sıcaklıklarının w/b oranı 0,5 olan geopolimer betonların basınç dayanımına etkisi.....	68
Şekil 4.21.	Farklı NaOH konsantrasyonları ve kür sıcaklıklarının w/b oranı 0,6 olan geopolimer betonların basınç dayanımına etkisi.....	68
Şekil 4.22.	w/b oranı 0,6 ve 0,5 olan 90°C sıcaklıkta kür edilmiş geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	70
Şekil 4.23.	90°C sıcaklıkta kür edilmiş geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımına w/b oranının etkisi.....	71

Şekil 4.24.	Ms 0.8 kullanılarak aktive edilmiş farklı katkı tipi ve oranlarının katkısız geopolimer betonlara göre 28 günlük basınç dayanımlarındaki değişim...	73
Şekil 4.25.	NaOH kullanılarak aktive edilmiş farklı katkı tipi ve oranlarının katkısız geopolimer betonlara göre 28 günlük basınç dayanımlarındaki değişim...	75
Şekil 4.26.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilmiş farklı katkı tipi ve oranlarının geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımları.....	76
Şekil 4.27.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlara eklenen farklı katkıların katkısız numunelere göre basınç dayanımındaki değişimler.....	77
Şekil 4.28.	Ms 0.8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları.....	79
Şekil 4.29.	Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrası basınç dayanımı kayıpları.....	80
Şekil 4.30.	NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrası basınç dayanımı kayıpları, (%)......	81
Şekil 4.31.	NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları.....	82
Şekil 4.32.	Ms ve yalnızca NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımlarındaki azalmalar....	83
Şekil 4.33.	240 DÇ sonrası N2 numuneleri arasındaki aktivatör tipi farkı.....	84
Şekil 4.34.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen katkılı ve katkısız geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonucunda uğradıkları UPV değeri kaybı.....	85
Şekil 4.35.	Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrasında BDEM değerlerinde meydana gelen azalma.....	86
Şekil 4.36.	NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrasında sahip olduğu BDEM değerleri.....	87
Şekil 4.37.	NaOH ve Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrasında meydana gelen BDEM kayıpları.....	88
Şekil 4.38.	Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen katkısız geopolimer betonların SEM görüntüleri.....	89
Şekil 4.39.	Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen M5 katkılı geopolimer betonların SEM görüntüleri.....	89
Şekil 4.40.	NaOH kullanılarak aktive edilen katkısız ve katkılı geopolimer betonların SEM görüntüleri.....	90
Şekil 4.41.	NaOH kullanılarak aktive edilen M3 katkılı geopolimer betonların SEM görüntüleri.....	90

Şekil 4.42.	Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların su emme özelliklerine farklı katkıların etkisi.....	92
Şekil 4.43.	NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların su emme özelliklerine farklı katkıların etkisi.....	93
Şekil 4.44.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların su emme özelliklerine farklı katkıların etkisi.....	94
Şekil 4.45.	Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların yoğunluk değerleri.....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Alkali ile aktive edilen bağlayıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar.....	14
Çizelge 2.2.	Farklı ham maddeler kullanılarak üretilen geopolimerlerin basınç dayanımına farklı aktivatör tiplerinin etkisi.....	30
Çizelge 2.3.	Geopolimer yapımında kullanılan ham maddelerin kimyasal yapısına göre uygulama alanları.....	39
Çizelge 2.4.	Don olayının taze betona zarar vermemesi için geçmesi gereken süre...	43
Çizelge 3.5.	Volkanik tüfün kimyasal bileşimi.....	45
Çizelge 3.6.	Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri.....	46
Çizelge 3.7.	Mikro silika özellikleri.....	47
Çizelge 3.8.	Nano silika özellikleri.....	47
Çizelge 3.9.	Stiren Bütadien Lateks Özellikleri.....	47
Çizelge 3.10.	1 m ³ beton üretimi için kullanılan malzeme miktarları, (kg/m ³).....	49
Çizelge 3.11.	Optimum karışım oranları belirlendikten sonra geopolimer betonlara eklenen katkı tip ve numune isimlendirilmesi.....	50
Çizelge 4.12.	Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı.....	60
Çizelge 4.13.	Farklı NaOH konsantrasyonları ve kür sıcaklıklarına bağlı basınç dayanımları.....	66
Çizelge 4.14.	Ms 0,8, w/b oranı 0,6, 105°C' de kür edilmiş numunelerin basınç dayanımlarına farklı katkıların etkisi.....	73
Çizelge 4.15.	Ms 0.8 kullanılarak üretilen katkısız ve katkılı geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları.....	79
Çizelge 4.16.	NaOH kullanılarak aktive edilen katkısız ve katkılı geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları.....	81

1.GİRİŞ

Ülkemiz, yaklaşık 155.000 km² genişlikte bir alanla doğal puzolanlara ev sahipliği yapmaktadır (Türkmenoğlu ve Tankut, 2002). Bu geniş alan içerisinde bulunan doğal puzolanlar içerisindeki kullanılabilir rezerv oranı en yüksek olan volkanik tüfler, inşaat ve endüstrinin birçok alanında geniş bir kullanım alanına sahip olmasına rağmen, volkanik tüflerin beton üretimi esnasında çimentonun yerini alarak bağlayıcı malzeme olarak kullanılması bu doğal puzolanların kimyasal yapısı hakkında çok geniş bir bilgi birikimi gerektirmektedir (Sassani, 2014).

Bu çalışmada, Nevşehir Yöresi'nden temin edilen volkanik tüflerin puzolanik özelliğinin artırılması için çimento inceliğinde öğütülmüş ve sonrasında çeşitli alkali aktivatör tipleri (NaOH+Na₂SiO₃ ve sadece NaOH) ile aktive edilerek bağlayıcı malzeme üretilmiştir. Bu şekilde üretilen bağlayıcı malzemeler, belirli bir granülometriye sahip agregalar ile karıştırılarak geopolimer betonlar elde edilmiştir. Silis modülü (Ms) 0,6, 0,8 olan ve yalnızca NaOH kullanılarak üretilen betonlarda NaOH konsantrasyonu 10, 12, 14 ve 16 molar (M) olarak belirlenmiştir. Bu şekilde iki grup halinde şekilde aktive edilen geopolimer betonlar her iki grup için iki farklı w/b oranı (0,5 ve 0,6) ve üç farklı kür sıcaklığı etkisi altında üretilmişlerdir. Üretilen birinci ve ikinci grup numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Elde edilen basınç dayanımı değerleri arasından, her iki grup numune için optimum koşullar belirlenmiş ve bu koşullarda üretilen geopolimer betonlara bağlayıcı ağırlığının belirli oranlarında nano silika (%1, 2, 3), mikro silika (%1, 3, 5) ve SB Lateks (%5, 10, 15) katkıları farklı oranlarda eklenerek katkıli geopolimer betonlar üretilmiştir. Bu şekilde üretilen geopolimer beton numunelerin, basınç dayanımı, donma-çözülme (DÇ) direnci, mikro yapıları, su emme ve yoğunluk değerleri incelenmiştir.

Deney sonuçları, NaOH ile aktive edilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinin, Ms ile aktive edilen özdeşlerinden oldukça yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır. Birinci ve ikinci grup numuneler için optimum kür sıcaklık

değerleri sırasıyla 105 °C ve 90 °C olarak elde edilmiştir. Her iki gruptaki numuneler için, w/b oranının 0,6'dan 0,5'e düşmesi basınç dayanımlarında düşüşe sebep olmuştur. Ayrıca, her iki gruptaki numunelerde katkısız geopolimer betonlara göre meydana gelen maksimum basınç dayanım artışının mikro silika katkıları ile sağlandığı belirlenmiştir. Diğer yandan, 300 DÇ çevrimi sonunda numunelerde gözlenen en yüksek basınç dayanım kayıpları her iki grupta da katkısız numunelerde gerçekleşmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi ve su emme deney sonuçları, mikro silika ilavesinin kompakt bir yapının oluşmasına yardımcı olduğunu göstermiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Volkanik Tüf

Volkanik tüfler, bünyesinde %75'ten fazla volkanik kül ihtiva eden bir kayaç tipidir. Volkanik çökeltme olaylarında 0,2 mm dane boyutlarından daha küçük volkanik kül partiküllerinin zamanla katılaşmış haline volkanik tüf denilmektedir. Volkanik çökeltme (birikme) olayında birleşerek volkanik tüfü oluşturan volkanik küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde zamana bağılı bir değışiklik meydana gelmemesi kaydıyla volkanik tüflerin mineralojik ve puzolanik özellikleri başlangıçtaki volkanik küllerle benzerlik göstermektedir. Esas olarak volkanik tüfler, çeşitli miktarlarda cam ve minerallerden oluşmaktadır. Volkanik çökeltme işleminden sonra maruz kalınacak mevcut şartlara bağılı olarak, volkanik tüf bünyesinde bulunan camsı faz termodinamik istikrarsızlık nedeniyle ikincil bir mineral faza dönüşmektedir (ACI Committee 232, 2012).

2.1.1. Yapı malzemesi olarak volkanik tüf

Colella vd., (2011) yaptıkları çalışmada, puzolanların oluşum şekillerine göre yapay ve doğal olmak üzere iki gruba ayrıldığını ve doğal puzolanlar sınıfı içerisinde bulunan volkanik tüfün, kullanım açısından en eski ve rezerv kapasitesi en bol olan puzolan tipi olduğunu belirtmişlerdir.

Diğer bir çalışmada, doğada bol miktarda bulunan bu volkanik tüf ham maddesinin uygun bir şekilde aktive edilmesi halinde portland çimentosunun yerini tamamen alabilecek yeni bir bağlayıcı malzeme kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Bahsedilen bu olumlu özelliğın yanısıra bu doğal puzolan ham maddesinin portland çimentosu ile birlikte veya tek başına bağlayıcı malzeme olarak kullanılmasının ancak bu puzolanların kimyasal özellikleri hakkında çok kapsamlı

bir bilgi birikimine sahip olunması ile mümkün olacağına altı çizilmiştir (Sassani, 2014).

Benzer şekilde Balog vd., (2014) yaptıkları çalışmada, en önemli doğal puzolanlardan biri olan volkanik tüfün, antik çağlardan bu yana tras hazırlamak için ve kaya tuğla elemanları elde etmek için kullanıldığını ve bugün halen dünyanın birçok bölgesinde duvar taşları, hafif betonlar ve termal akustik yalıtım malzemeleri üretim işlemlerinde sıklıkla kullanıldığını belirtmiştir.

2.1.2. Volkanik Tüfün Fiziksel ve Kimyasal Bileşimi

Mehta ve Monterio, (2006) yaptıkları çalışmada, volkanik tüflerin genellikle hidrotermal koşullar altında volkanik camda değişiklik sonucu oluştuğunu ve meydana gelen bu yapının tectosilikat mineralleri, zeolitler ve feldispatlar bakımından zengin olduğunu belirtmişlerdir.

Diğer bir çalışmada, Türkmenoğlu ve Tankut, (2002) yalnız başlarına kullanıldığında bağlayıcılık özelliği göstermeyen, silis ve alümin bakımından zengin olan doğal puzolanlar sınıfına dahil edilen ve ayrıca bir piroklastik kayaç çeşidi olan volkanik tüflerin, yeterli incelikte öğütülmesi ve ortamda yeterli nem bulunması koşuluyla çimento özelliklerine sahip bileşikler (CSH) oluşturmak için normal sıcaklıklarda çimento hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile kimyasal reaksiyona giren maddeler olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca, volkanik tüflerin yapısında bulunan silis ve alümin kaynaklı malzemelerin özelliği ve miktarının, bu volkanik tüflerin puzolanik aktiviteleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Genel olarak, iyi bir puzolanik reaktiviteye sahip volkanik tüfün düşük miktarlarda kil mineralleri, az miktarda alkali feldispat, yüksek

miktarlarda zeolit mineralleri ve volkanik cam içerdiği belirtilmiştir (Türkmenoğlu ve Tankut, 2002).

Ergul vd., (2011) yaptıkları çalışmada zeolitik volkanik tüflerin kimyasal bileşiminin, ısıtma işlemi sırasında alkali oksitler takviyesi yoluyla sıvı fazının oluşmasını mümkün kıldığını belirtmiştir. Buna benzer olarak, Sheridan ve Wang (2005) volkanik tüfün sahip olduğu özelliklerin, volkanik madde tabakasındaki sıcaklık ve basınç dağılımına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Diğer bir çalışmada ise, volkanik tüfün içerisinde bulunan Al_2O_3 içeriğinin eksikliğini telafi etmek amacıyla ilave alümin kullanımının, volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların özelliklerinin iyileştirildiği belirtilmiştir (Kouamo vd., 2012).

2.1.3. Volkanik Tüfün Kullanım Alanları

Balog vd., (2014) yaptıkları çalışmada, zeolitik volkanik tüflerin, duvar, hafif beton veya otoklavlanmış gazbeton üretiminde sıklıkla kullanılarak yapı malzemeleri endüstrisinin birçok alanında kullanılacak geniş bir rezerv kapasitesine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Benzer şekilde Jana, (2007) çalışmasında, zeolitik tüflerin, sahip oldukları mineralojik bileşime, fiziksel ve mekanik özelliklere bağlı olarak; tarım ve bahçe işlerinde, hafif agrega olarak beton endüstrisinde, atıksu arıtımında, toprakta ağır elementlerin minimizasyonu işleminde, hayvancılıkta, balıkçılıkta, havadan azot ayırma işleminde, nükleer atıkların radyoaktif elementlerinin (Cs ve Sr) eliminasyonunda, deodorant yapımında ve hayvansal besinlerde takviye olarak kullanılmakta olduğunu belirtmiştir.

Toprak ve Arslanbaba, (2016) yaptıkları çalışmada volkanik tüflerin fiziksel ve kimyasal özellikleriyle ilgili olarak çok farklı alanlarda kullanılabildiğini ve ısı ile işleme birlikte bu volkanik tüflerin yapısal değişikliğe uğradığı belirtilmiştir. Yapısal değişikliğe uğratılan volkanik tüflerin yapı taşları, seramik ve porselen malzemeler, çimento üretiminde katkı maddeleri, beton üretiminde hafif agrega gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir.

Öte yandan Yaşar vd., (2009) Nevşehir Bölgesi'nden elde edilen volkanik tüflerin sahip olduğu matrisin bileşen türleri ve kimyasal özelliklerinin farklılığı nedeniyle çeşitli renk ve görünüme sahip olduğunu ve bu çeşitliliğin, volkanik tüflerin inşaat sektörünün birçok aşamasında ve peyzaj mimarisinde kullanılmasına imkan sağladığından söz etmiştir.

Aynı şekilde Balog vd., (2014) yaptıkları çalışma sonucunda tüf esaslı harçların mevcut yapıların, dayanım veya termal iyileştirme için kullanılabildiği belirtilmiştir. Ayrıca volkanik tüflerin, Portland çimento harçlarına göre daha yüksek gözenekliliğe ve daha düşük termal iletkenlik katsayılarına sahip harçlar olduğu söylenmiştir.

Bir diğer çalışmada, Haddad ve Alshbuol, (2016) puzolanik çimentoların üretiminde kullanılacak volkanik tüflerin, takviye olarak kullanılmadan önce 400-500 m²/kg hassasiyetle öğütüldüğünü ve Ürdün' de bulunan büyük kapasitede üretim yapan çimento fabrikalarının genellikle çok büyük rezerv miktarına sahip olan volkanik tüf ocaklarının yakınlarında yer aldığını belirtmiştir. Puzolanik çimento üretiminde kullanılan bu volkanik tüflerin, bileşimindeki sabitlik, oldukça düşük kazi ve ulaşım masrafları da dikkate alınınca, geopolimer beton gibi arzulan kısa ve uzun vadeli özelliklere sahip düşük maliyetli ve çevre dostu beton üretiminde kullanılmasının çok avantajlı olduğu söylenmiştir.

2.1.4. Ülkemizdeki Volkanik Tüf Rezervleri

Ülkemiz çeşitli volkanik tüfler ve mermer kaynakları bakımından zengin doğal taş yataklarına ev sahipliği yapmaktadır. Çelik ve Sabah, (2008) ülkemizde kullanılabilir mermer rezervlerin 3,872,000,000 m³ olduğunu belirtmiştir. Ayrıca Türkmenoğlu ve Tankut, (2002) ülkemizde yaklaşık 155,000 km² doğal puzolan rezervi olduğunu belirtmiştir.

Yaklaşık 1000 km²'lik bir volkanik alana sahip olan Nevşehir Yöresi, riyolitik ve dasitik tüflere sahiptir. Burada bulunan tüfler, matrisin bileşen türleri ve kimyasal özellikleri nedeniyle çeşitli renk ve görünümlere sahiptir. Kaynaklı tüf, riyolit tüfleri, trakit tüfleri, andezitik tüfler, bazaltik tüfler ve ultramafik tüfler bu çeşitliliğe örnek teşkil etmektedirler. Trakit tüfleri çok az veya hiç kuvarz içermemekle birlikte sanidin veya anortoklaz ve bazen de biyokit, ojit ve hornblend ile birlikte oligoklaz feldispat içermektedir ve hava koşullarında çoğunlukla yumuşak kırmızı veya sarı kil taşlarına dönüşürler. Bu tip tüfler, ikincil kuvarz ile kaolin bakımından zengindirler. Diğer bir volkanik tüf çeşidi olan andezitik tüfler çok yaygın olarak bulunmaktadır. Bunlar kırmızı veya kahverengi renge sahip olup, büyük parçalardan toz haline kadar hemen her boyutta yer almaktadır. Bazaltik tüfler hem volkanların aktif olduğu ilçelerde hem de patlamaların çoktan sona erdiği topraklarda yaygındır. Bunlar siyah, koyu yeşil veya kırmızı renktedir; kabaca bir çeşitlilik gösterir; bazıları, yuvarlak süngerimsi bombalarla bir veya daha fazla çapa sahiptir ve genellikle denizaltıdır. Ultramafik tüfler son derece nadirdir; bunlar, olivin veya serpantinlerin bolluğu, feldispat ve kuvarsın kıtlığı veya yokluğu ile karakterize edilebilir (Yasar vd., 2009).



Şekil 2.1. Nevşehir Yöresi'nden elde edilmiş farklı renkteki volkanik tüf örnekleri

2.2. Volkanik Tüf Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Balog vd., (2014) yaptıkları çalışma sonucunda tüf esaslı harçların mevcut binaların hem yapısal hem de termal rehabilitasyonu için ve düşük enerji kullanılarak inşa edilmek istenen binalarda duvar taşı olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Ayrıca kullanılacak bu volkanik tüflerin Portland çimento harçlarına göre daha yüksek gözenekliliğe ve düşük termal iletkenlik katsayılarına sahip harçlar olduğu saptanmıştır.

Diğer bir çalışmada Toprak ve Arslanbaba, (2016) mikro kristal yapının homojen dağılımının ve yapının matrisinin yoğunlaştırılmasının Kütahya Volkanik Tüfünün dayanımını önemli ölçüde arttırdığını belirtmiştir. Bunlara ek olarak, önerilen ısı kürünün uygulanmasının Kütahya Volkanik Tüfüne, yapı taşı olarak kullanılması için sahip olması gereken mukavemeti, makul bir maliyetin yanında (5-8 dolar/m³) tüflerin doğal ve estetik görüntüsünde bir bozulmaya neden olmadan sağlamıştır.

Öte yandan Tekin, (2016) yaptığı çalışmada Bayburt Bölgesi'nde bulunan volkanik tüf atıklarının geopolimer yapı malzemesinin üretiminde kullanımının etkisini araştırmıştır. Basınç dayanımı, mikro yapı gibi parametrelerin incelendiği çalışmada volkanik tüf üretiminde suda kür işleminin kullanılmayacağı ve volkanik tüf oranının artması ile birlikte görünür porozite değerlerinde artış olduğu belirtilmiştir.

2.3. Çimento Üretiminden Kaynaklanan Çevre Sorunları

Çimento dünyada yaygın olarak kullanılan bir bağlayıcı malzemedir. Özellikle son yıllarda dünyamızda meydana gelen hızlı sanayileşme ve kentleşmeye olan büyük bir eğilim mevcuttur. Bu eğilim, geçmişe göre daha çok portland çimentosu kullanımını gerekli hale getirmiştir. Mevcut durumda portland çimentosu dünyada

yıllık 4 milyar ton üretim kapasitesine sahiptir. Bu oran her yıl bir önceki yıla göre %4'lük bir artış göstermektedir (Mineral Commodity Summaries, 2014).

Benzer olarak McCaffrey, (2002) yaptığı çalışmada küresel düzeyde betonun kullanımının sudan sonra ikinci sırada yer aldığını belirtmiştir. Yapı malzemesi olarak kullanılacak betona olan talepteki artışın, portland çimentosuna olan talebi de arttıracığını ifade etmiştir. Öte yandan, küresel ısınma ve çevre korumaya bağlı iklim değişikliğinin büyük endişeler haline geldiği ve CO₂ gibi sera gazlarının insan faaliyetleri yoluyla atmosfere yayılmasının küresel ısınmaya neden olduğu belirtilmiştir. Bahsedilen bu sera gazları içerisinde CO₂'in küresel ısınmaya neden olan gazlar içerisinde %65'lik bir bölüme tekabül ettiği ifade edilmiştir.

Mehta ve Monterio, (2006) 1 ton çimento üretimi için doğaya yaklaşık 1 ton CO₂ gazı salındığını belirtmiştir. Gursel vd., (2013) yaptıkları çalışmada çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ gazı emisyonlarının yaklaşık %60'ının kalkerin kalsinasyon işleminden kaynaklandığını, geri kalan %40'lık kısmın esas olarak ısıtma işlemi ve öğütmeden kaynaklandığını belirtmiştir.

Benzer şekilde, McNulty, (2009) yüksek miktardaki bu CO₂ salınımının, sadece çimento üretiminde kullanılan malzemelerin kalsinasyon işleminden dolayı değil, aynı zamanda bileşenlerin reaksiyona girmesi için gerekli olan yüksek sıcaklığa ulaşmak için kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklı olduğunu belirtmiştir. Yüksek oranlarda doğaya salınan bu CO₂ gazı emisyonları sonucu oluşan sera gazı birikmesinden dolayı meydana gelen küresel ısınma hakkındaki kaygıların, bilim insanlarını geleneksel Portland çimentosuna alternatif bağlayıcılar aramaya yönelttiği ifade edilmiştir.

Sassani, (2014) yapmış olduğu çalışmada, bahsedilen bu ısıtma işlemi ve öğütme tekniklerinin, yıllar içerisinde daha çevre dostu yöntemler ile geliştirilmeye özen gösterildiğini fakat CO₂ salınımının önemli bir bölümünü oluşturan kalker ham

maddesinin kalsinasyon işleminden kaynaklı CO₂ salınımının devam ettiğini belirtmiştir. Bu sebeple, çimento üretiminden kaynaklanan çevreye verilen zararın, sadece üretim teknikleri değiştirilerek minimize edilmesinin imkânsız olduğu söylenmiştir. Bu durum; çimentoya alternatif bağlayıcılar aramanın temel sebebinin oluşturmuştur.

Yapılan araştırmalarda son 800,000 yılda yaklaşık 180 ppm ile 280 ppm arasında değişen ortalama CO₂ konsantrasyonun, 2013 yılı mayıs ayında atmosferdeki ortalama günlük CO₂ konsantrasyonu 400 ppm değerine yaklaştığı ve bu ciddi artışın buzul çağıın son döneminde yaşanmış olan çok büyük bir artış oranına kıyasla günümüzde 100 kat daha fazla olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, aynı yerleşim yeri için 2016 Ekim ayına ait CO₂ salınımı 401.57 ppm değerini alırken, bu salınım miktarının 2017 Ekim ayında yaklaşık %0.05 artarak 403.64 ppm değerine ulaştığı belirtilmiştir (NOAA Earth System Research Laboratory, 2007).

Farklı araştırmacılar da portland çimento üretiminin çevre üzerindeki etkisinin, gelecekte beton sanayi için önemli bir sorun oluşturacağını belirtmişlerdir. Portland çimento üretiminin sera gazı yayma probleminin yanında, bu üretim sürecinin doğal kaynakları tükettiği de ayrı bir sorun olarak belirtilmiştir (McCaffrey, 2002; Davidovits, 1994; Nguyen vd., 2017).

2.4. Alkali Aktivatör Tipleri

Aktivatörler; meydana gelecek kimyasal reaksiyonun yapısına herhangi bir etkisi olmayacak şekilde reaksiyon hızını değiştiren katalizör bir malzeme olarak tanımlanır. Sağlık, (2009) aktivatörü bir reaksiyonun hızını arttıran ve buna göre denklemde yer alan bir madde olarak tanımlamıştır. Benzer bir tanımlama Li vd., (2004) tarafından yapılmış olup bu tanıma göre aktivatörün bir reaksiyonun sonucunu etkilemeden bir bileşiği istenilen reaksiyon oranına getiren bir madde olduğu belirtilmiştir.

Rangan, (2014) yaptığı çalışmada alkali sıvıların genellikle sodyum ve potasyum esaslı çözümler alkali metallere elde edildiğini söylemiştir. Geopolimerizasyon işleminde kullanılan en yaygın alkali sıvı çeşidinin sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum silikat (K_2SiO_3) veya bu alkalilerin birlikte kullanılmış hali olduğu söylenmiştir. Öte yandan, çeşitli kombinasyonlarda kullanılacak bu alkali aktivatörlerin kullanılmadan en az 24 saat önce hazırlanması önerilmiştir.

Benzer şekilde Görhan ve Kürklü, (2014) alkali aktivatör solüsyonlarının geopolimer üretiminde kullanılacak ham maddenin içerisinde bulunan Si ve Al oksitlerinin çözünmesinde önemli bir rol oynadığını belirtmiştir. Aynı zamanda, geopolimerlerin, sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat veya sodyum silikat gibi yaygın olarak kullanılan bu kuvvetli alkali aktivatörler ile alüminosilikat reaktif maddeleri karıştırarak sentezlendiğini belirtmiştir.

Bunun yanında, geopolimer üretim işleminde kullanılacak alkali katyonu tipi ve konsantrasyonu gibi parametrelerin, alüminosilikat ham malzemelerinden içerisindeki Si ve Al atomlarını çözerek geopolimer ürünlerini oluşturmak için hayati önem taşıdığını ve elde edilen geopolimerlerin yapısını ve mekanik performansını belirlemede önemli bir rol oynadığını belirtilmiştir (Görhan ve Kürklü, 2014; Gao vd., 2014).

Öte yandan Yuan vd., (2016) yaptıkları çalışmada alkali aktive edici çözeltinin optimum konsantrasyonunu elde etmenin, ortaya çıkacak ürünlerin performansına katkıda bulunacağını söylemişlerdir. Bununla birlikte, optimum konsantrasyondan bağımsız olarak bazı durumlarda geopolimerin yapısını değiştirebilecek alkali ile aktifleştirilmiş matristeki serbest OH⁻ iyonlarından dolayı geopolimerin mekanik özelliklerinde düşüşler yaşanabileceğinden bahsedilmiştir.

Komljenovic vd., (2010) F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında; alkali aktivatör olarak NaOH, NaOH+Na₂CO₃, KOH ve Na₂SiO₃ (cam suyu) kullanılmıştır. Aynı çalışmada, bu şekilde üretilen geopolimerlerin mekanik ve mikro yapı özelliğini etkileyen en önemli parametrelerin aktivatör özelliği ve yoğunluğu olduğu, ek olarak ham madde özellikleri bakımından da inceliğin çok önemli olduğu belirtilmiştir.

Aktivatör tipinin geopolimerlerin özelliklerine etkinin incelendiği diğer bir çalışmada Hosan vd., (2016), sodyum ve potasyum esaslı aktivatörlerin, yüksek sıcaklıklara maruz kalmış F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerlerin basınç dayanımı ve fiziksel değişimlerine olan etkilerini incelemiştir. Kullanılan aktivatörler Na₂SiO₃/NaOH ve K₂SiO₃/KOH oranı bakımından kütlece 2, 2,5 ve 3 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen numuneler 28 günlük kür işlemine tabi tutulmuş ve yangın etkisi sonucunda kalıntı basınç dayanımını ölçmek için 200, 400, 600 ve 800°C olmak üzere dört farklı yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları, 600°C' ye kadar yaşanan sıcaklık artışlarında potasyum esaslı aktivatörler kullanılarak üretilen geopolimerlerin, sodyum esaslı alkaliler kullanılarak üretilen geopolimerlere göre daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca potasyum esaslı aktivatörler kullanılarak üretilen uçucu kül temelli geopolimerlerin, yüksek yangın dayanımının yanında düşük kütle kaybı, düşük hacimsel değişiklik ve daha az çatlaklara uğrama açısından sodyum esaslı aktivatörler ile sentezlenen benzerlerine göre daha kararlı bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir.

Bu bilgilerin yanı sıra Speight, (2002) aktivatör kullanımı işlemine farklı bir bakış açısı getirerek, yaptığı çalışmada NaOH ve Na₂SiO₃ alkalilerinin üretim aşamasındaki çevreye yayılan CO₂ emisyonlarına göre değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda NaOH alkalisinin Na₂SiO₃ alkalisine göre üretim aşamasında CO₂ salınımı açısından daha çevre dostu bir özelliğe sahip olduğunu söylemiştir. Bu durumun nedenini, NaOH üretiminde tercih edilen tuzlu suyun elektroliz işleminde sadece Cl₂ ve H₂ salınımına yol açmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Diğer yandan Na₂SiO₃

üretiminde kullanılan NaCO_3 ve SiO_2 bileşenlerinin 1200-1400 °C sıcaklıkla işlem görmesinin CO_2 salınımına neden olduğunu göstermiştir.

Glukhovsky, (1980) yaptığı çalışmada, alkali aktivatörleri kimyasal kompozisyonlarına göre; (1) Kostik (yakıcı) alkaliler: MOH; (2) Silikat içermeyen zayıf asit tuzları: M_2CO_3 , M_2SO_4 , M_3PO_4 , MF vb. ; (3) Silikatlar: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$; (4) Alüminatlar: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$; (5) Alüminosilikatlar $\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2-6) \text{SiO}_2$; ve (6) Silikat içermeyen kuvvetli asit tuzları: M_2SO_4 olmak üzere altı farklı gruba ayırmıştır. Uygulanacak kür koşullarından bağımsız olarak, geopolimer üretiminde kullanılacak bir cüruf için birinci ve üçüncü gruptaki aktivatörlerin sertleşme mekanizmasını sağlayacağını belirtmiştir.

Öte yandan Glukhovsky, (1980) tarafından yapılan bu sınıflandırma ile ilgili, Talling, (1989) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, birinci ve üçüncü grupta bulunan alkali aktivatörlerin kombinasyon halinde kullanılabilmesi ve ikinci gruptaki alkalilerin sadece nötr ve asit cüruflar için kullanılabilmesi belirtilmiştir.

2.5. Geopolimer Malzemeler

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların gelişimi 1940'larda Purdon'un çalışması ile büyük bir gelişme göstermiştir. Purdon, sodyum hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın cürufunu kullanarak meydana gelen reaksiyonun iki adımda gerçekleştiğini belirtmiştir. İlk aşamada, silika, alüminyum ve kalsiyum hidroksitin serbest bırakılmasının gerçekleştiği, ve sonraki aşamada alkali çözeltinin yenilenmesi ile birlikte, silika ve alümin hidratların oluşumunun da gerçekleştiği belirtilmiştir (Purdon, 1940).

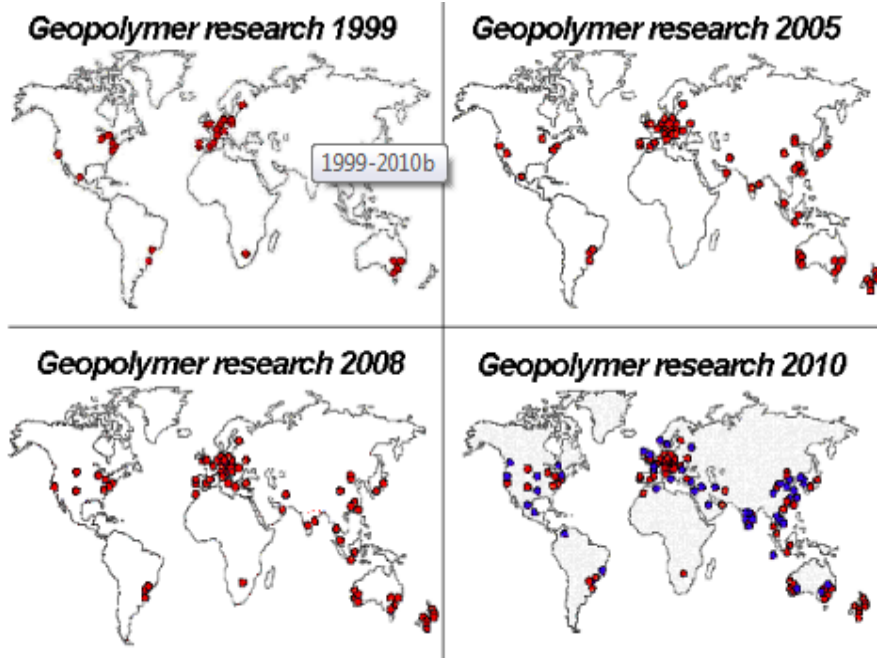
Roy, (1999) tarafından alkali aktivasyon metoduyla üretilen bağlayıcılar ve alkali çimento karışımları ile ilgili yapılan çalışmaların tarihsel gelişimi Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Alkali ile aktive edilen bağlayıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar

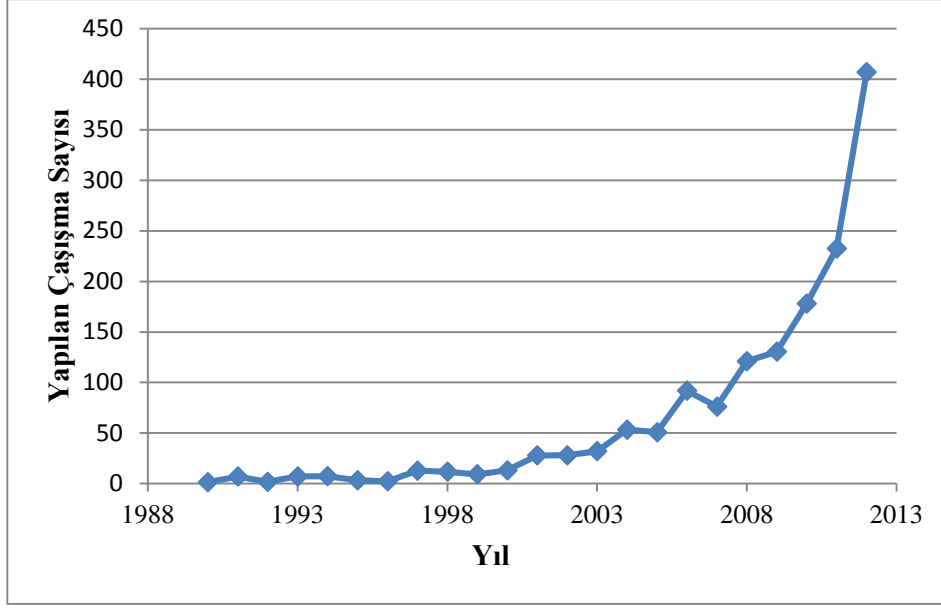
Yazar	Yıl	Çalışma Konusu
Feret	1939	Çimento İçin Kullanılan Cüruflar
Purdon	1940	Alkali Cüruf Kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkali Çimentoların Teorik Temelleri Ve Gelişimi
Davidovits	1979	“Geopolimer” Teriminin Literatüre Girişi
Malinowski	1979	Antik Su kemerlerinin tanımlanması
Forss	1983	F-çimento(cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemeleri tanımı
Davidovits ve Sawyer	1985	"piramit" çimento patenti
Krivenko	1986	Doktora tezi, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melilit cüruflarının aktivasyonu
Malek vd.	1986	Cürufllu çimento - düşük seviyeli radyoaktif atık formları
Davidovits	1987	Eski ve modern betonların karşılaştırılması
Deja ve Malolepsy	1989	alkali karışımlardan oluşan adyabatik kürlenmiş nükleer atıklar
Roy ve Langton	1989	Antik beton analogları
Majundar vd.	1989	$C_{12}A_7$ – cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkali ile aktive edilmiş cüruf
Wu vd.	1990	Cürufllu çimentonun aktivasyonu
Roy vd.	1991	Alkali ile aktive edilmiş cürufun hızlı prizi
Roy ve Silsbee	1992	Alkali ile aktive edilmiş cüruf – Genel bir bakış
Palomo ve Glasser	1992	CBC with metakaolin
Roy and Malek	1993	Cürufllu çimento
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek çağın betonları
Krivenko	1994	Alkali çimentolar
Wang ve Scrivener	1995	Alkali ile aktive edilmiş cürufun mikro yapısı

Alkali ile aktive edilen bağlayıcıların tarihsel gelişiminin yanı sıra, Reddy vd., (2016) yaptıkları çalışmada geopolimer beton üzerine yapılan araştırmaların 1979 yılında Fransız bilim adamı Joseph Davidovits tarafından başlatıldığını söylemişlerdir.

İlk kez 1979’da Fransız bilim adamı Joseph Davidovits tarafından üzerine araştırmalar yapılan geopolimerler, bu tarihten sonraki 20 yıllık süreçte çok önemli ilerlemeler kaydedilmemiş olsa da, özellikle son 20 yılda performans açısından geleneksel betondan üstün özelliklere sahip olması ve kullanıldığı yapı ile çevreye kazandırdığı tüm olumlu özellikleri sayesinde özellikle son yıllarda bilim adamları tarafından çok ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Şekil 2.2’de geopolimer malzemeler ile ilgili yapılan çalışmaların yıllara göre coğrafi dağılımı verilmiştir. Benzer şekilde Şekil 2.3, “geopolimer” anahtar kelimesi ile yapılan çalışma sayılarının yıllar geçtikçe yaşadığı artışı sunmaktadır (Geopolymer Institute, 2010).



Şekil 2.2. Dünyada geopolimer çalışmasının yıllara göre coğrafi dağılımı



Şekil 2.3. Geopolimer anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

Kouamo vd., (2012) yaptığı çalışmada geopolimer malzemelerin, portland çimentosuna kıyasla üretim aşamasındaki daha az enerji tüketimi, daha az miktarda CO₂ emisyonu, yüksek erken dayanım, düşük büzülme, düşük geçirimsizlik ve daha iyi yangın ve asit dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bahsedilen bu özelliklerin, ham maddenin tipi, mineralojik yapısı ve alüminosilikat kaynaklarındaki kimyasal bileşimler gibi birçok faktöre bağlı olduğunu söylemiştir.

Reddy vd., (2016) yaptıkları çalışmada, çimento üretimi ve kullanımından dolayı meydana gelen problemlerin engellenmesi için çimentoya alternatif bir bağlayıcı malzeme bulmak üzere yoğunlaştığını ve bu bağlamda kullanılabilecek geopolimerlerin sadece CO₂ salınımının azaltılmasında değil, aynı zamanda uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanılarak, bu malzemelerin depolanması ve yok edilmesi işlemleri sonucunda doğaya verilecek zararların engellenmesi açısından da geopolimerlerin çok büyük avantajlara sahip olduğunu belirtmiştir.

Farklı araştırmacılar, geleneksel portland çimentosunun kısmen veya tamamen yerini almak üzere araştırılan yeni malzemeler arasında en popüler malzeme olan geopolimerleri, alüminasilikat bazlı ham maddelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, pirinç kabuğu külü vb.) Na_2SiO_3 , K_2SiO_3 NaOH, KOH gibi alkali sıvıların tek başına veya birbirleri ile kombinasyon halinde kullanılmasıyla elde edilen homojen bir karışım olarak tanımlamışlardır. (Suwan ve Fan, 2014; Davidovits, 2011; Nguyen vd., 2017).

Yukarıda bahsedildiği gibi bir üretim prosesine sahip olan geopolimer malzemeler, üretimden sonra kr işlemine tabii tutulmaktadır. Bu kr sıcaklığı için kullanılan sıcaklık değerleri genellikle ortam sıcaklığının üstünde olup, kr süresi ise genellikle 24 ve 48 saat arasında değişmektedir. Uygulanan bu kr işleminden sonra, hazırlanan geopolimerlerin dayanım kazanmaya devam etmesi amacıyla oda sıcaklığında bekletilmektedir (Raijiwala ve Path, 2010).

Benzer Şekilde Zhang vd., (2011) yaptıkları çalışmada geopolimerleri, amorf alminosilikatlardan oluşan, çok ileri seviyede mekanik özelliklere sahip olan, düşük rötre değeri, yüksek yangın dayanımı ve düşük enerji tüketimi gibi özellikler göstermesiyle, sanayi ve mühendislik alanlarında geniş bir uygulama alanı bulan evre dostu bir yapı malzemesi olarak tanımlamışlardır. Bu olumlu özelliğin yanı sıra, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi alüminosilikat içerikli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonlarla karıştırılarak ortam sıcaklıklarında veya yüksek sıcaklıklarda kr edilmesi ile üretilen geopolimerlerin, üretimi aşamasında kullanılan bu tehlikeli atıkların değerlendirilmesi ve geleneksel portland çimentosuna kıyasla daha ekonomik olması nedeniyle de st düzeyde bir popülariteye sahip olduğu belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada Reddy vd., (2016) geopolimer betonu, uygun kr koşullarında alüminosilikatlar bakımından zengin olan ham maddelerin, güçlü alkali solyonlar olan NaOH ve KOH' ın çözelti içerisindeki silikatlar ile birlikte oluşturulan karışımların alkali aktivasyonu yoluyla sentezlenen evre dostu bir beton

olarak tanımlamıştır. Bunun yanında yazarlar, geopolimer üretiminde, uçucu kül, cüruf, palmiye yağı yakıt külü, pirinç kabuğu külü, kırmızı çamur alümin rafine endüstrisi atıkları, bakır ve hematit madenleri atıkları, metakaolin, silis dumanı gibi alüminosilikatlar bakımından zengin olan endüstriyel yan ürün atıkları veya doğal malzemeler ham madde olarak kullanılabilirdiğini belirtmişlerdir.

Rangan, (2014) yaptığı çalışmada, geopolimer beton ve Portland çimento kullanılarak üretilen beton arasındaki temel farkın bağlayıcı malzeme olduğunu söylemiştir. F sınıfı uçucu külün içerisinde bulunan silikon ve alüminyum oksitlerin kaba ve ince agregalar ile diğer reaksiyona girmemiş malzemeleri birbirine bağlamak suretiyle geopolimer beton üretmek için reaksiyona girdiği belirtilmiştir. Geleneksel Portland Çimentosu kullanılarak üretilen betonda olduğu gibi, kaba ve ince agregaların, geopolimer beton kütlesinin yaklaşık %75 ila %80'ini kapladığı ve geopolimer betonun basınç dayanımı ve işlenebilirliğinin, geopolimer hamuru oluşturan malzemelerin oranları ve özellikleri tarafından etkilendiğini söylemiştir.

Öte yandan, Geleneksel Portland çimentosu kullanılarak yapılmış beton yapıların durabilite sorunları gittikçe daha önemli bir konu ve kesin çözüm bekleyen bir problem haline gelmiştir. Bu nedenle, daha iyi durabilite özelliklerine sahip yeni bağlayıcıların araştırılması da kaçınılmaz olmuştur. Bu durum sonucunda araştırılan alkali aktive edilmiş bağlayıcılar, Portland çimentosuna göre daha çevreci ve daha yüksek durabilite özelliklerine sahip bağlayıcılar olarak ortaya çıkmıştır. Artık gelişmiş çevresel ve durabilite performansına sahip bağlayıcıların normal Portland çimentosunun yerini alması gerektiği fikri de yaygın olarak kabul edilen bir olgudur (Torgal vd., 2008).

Rangan, (2014) yaptığı çalışmada geopolimerin iki ana unsuru olarak kaynak materyalleri ve alkali sıvıları işaret etmiştir. Alümina-silikata dayanan geopolimerlerin kaynak malzemeleri, silikon (Si) ve alüminyum (Al) bakımından zengin olması gerektiğini bildirmiştir. Kullanılabilecek kaynak materyalleri arasında; kaolinit, kil gibi doğal mineraller ile uçucu kül, silis dumanı, cüruf, pirinç kabuğu

külü, gibi endüstriyel yan ürünlerin olduğunu belirtmiştir. Ayrıca çalışmada, geopolimer malzemelerin üretiminde kullanılacak kaynak materyallerin seçim işleminde, kullanılabilirlik, maliyet, uygulama türü ve son kullanıcıların spesifik talepleri gibi faktörlere dikkat edilmesi gerektiği söylenmiştir.

Davidovits, (1994) çalışmasında, geopolimer malzemelerin, otomobil ve havacılık, demir dışı dökümhaneler, metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik endüstrileri gibi birçok alanda geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu belirtmiştir.

2.5.1. Geopolimer malzemelerin kimyasal yapısı

Silikat ve alümin bakımından zengin olan puzolanik malzemeler, alkali çözeltilerle reaksiyona girerek, agregayı bağlayan mükemmel derecede sertleştirilmiş bir materyal olan alüminosilikat jellerini oluşturarak geopolimeri meydana getirir. Geopolimer prosesi bir sinterleme veya erime değil, polimerizasyon sürecidir. Geopolimerler, Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral molekülleri içeren monomerler arasındaki polikondenzasyon sonucu olan özellikle kovalent kompleks polimer zincirlerinin oluşumundan meydana gelir (Görhan vd., 2015)

1970'lerin başında Davidovits tarafından piyasaya sürülen geopolimerler, genellikle katı veya alüminosilikatlı bir tozun konsantre bir alkali metal silikat veya hidroksit çözeltisi ile reaksiyona sokulmasıyla ortam sıcaklığında veya biraz yükseltilmiş sıcaklıkta sentezlenen büyük ölçüde X-ışını amorf alüminosilikat sınıfının bir sınıfıdır (Davidovits, 1991).

Davidovits, (1989) tarafından yapılan çalışmada, güçlü alkali solüsyonlarla tepkimeye giren alüminosilikat kaynaklarının serbest SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral birimleri oluşturmak üzere hızla çözündükleri belirtilmiştir. Meydana gelen bu

reaksiyon geliştikçe, suyun yavaş yavaş ayrıldığı ve SiO₄ ve AlO₄ tetrahedral unitelerin alternatif olarak tüm oksijen atomlarının iki tetrahedral birim arasında paylaşıldığı u tip geopolimer ürün üretildiği belirtilmiştir. Bu geopolimerler: poli sialat [-SiO₄-AlO₄-] (PS tip), poli sialat silokso[-SiO₄-AlO₄-SiO₄-] (PSS tip), polisialat disilokso [-SiO₄-AlO₄-SiO₄-SiO₄-] olarak sınıflandırılmıştır.

Benzer şekilde Reddy vd., (2016) yaptıkları çalışmada, ham madde olarak kullanılan alüminosilikatlar bakımından zengin olan ile alkali aktivatör arasında gerçekleşen reaksiyonun bir inorganik polimerizasyon işlemine temsil ettiğini ve dolayısıyla bu mekanizmanın "geopolimerizasyon" olarak adlandırıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca geopolimerizasyon mekanizmasının temel olarak u aşamayı içerdiği söylenmiştir: 1) Alkali ortamın etkisi altındaki kaynak materyalden Al ve Si türlerinin çözünmesi. Bu znme işlemi, silikon, alüminyum ve oksijen atomlarının kovalent bağlarının koparılmasını takiben türler arasında iyonik bir arayüz sağlar ve alüminosilikatlar bakımından zengin olan kaynak materyali ile alkali solüsyonun temas etmesinden hemen sonra başlar. Al ve Si elementlerinin çözünmesi, aktivatörün pH'ına ve kaynak maddesinin miktarı ile bileşimine bağlıdır, 2) znmeyi, nc iyonlarının monomerele taşınması, yönlendirilmesi veya yoğunlaştırılması izler, 3) ve son olarak monomerlerin polikondenzasyonu, bu polikondenzasyon olayının sert bir u boyutlu siliko-alümin ağı oluşturmak için gerçekleştiği belirtilmiştir.

Diğer bir çalışmada geopolimerleşme süreci bir sinterleme veya eritme işlemi değil, polimerizasyon işlemi olarak tanımlanmıştır. Geopolimer, hidro sodalit ve polisialatlar, altıgen u boyutlu moleküler sıralamaya sahip olan alüminosilikat toprak malzemeleridir. Hidrotermal polikondenzasyon sonucunda içerdikleri suyu hem kimyasal hem de fiziksel yollarla (dehidratasyon + dehidrasyon) serbest bırakarak zeolit kayalarına benzer bir tane yapısına ulaşırlar. Oluşan bu yapı, zeolit kristallerinin aksine, amorf bir u boyutlu altıgen moleküler bağ yapısına sahiptir. Geopolimerizasyon süreci, düşük sıcaklıklarda alkali silikatlar ile uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, volkanik tüf, yıkanmış doğal metamorfik kayaçlar gibi alümino silikat yapısına sahip doğal ve yapay puzolanların reaksiyonu ile başlar.

Geopolimerizasyon, yüksek alkalın bir ortamda moleküllerin çözünmesi, taşınması, yönlendirilmesi ve polikondenzasyonunu içeren ekzotermik bir kimyasal işlemdir (Zeybek, 2009).

Jimenez vd., (1999) yaptıkları çalışmada geopolimerizasyon reaksiyonu için F sınıfı uçucu külün iyi bir kaynak olduğunu ve NaOH'nin, uçucu külün geopolimer üretiminde etkinleşmesi için çok etkili bir aktivatör olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca örneklerde Na_2SiO_3 çözeltisi ile birlikte NaOH'nin bir kombinasyon şeklinde kullanılması ile daha yüksek bir basınç dayanımına yol açabileceği de belirtilmiştir. Bu durum Criado vd., (2005) tarafından, kullanılan sodyum silikatın, geopolimerizasyon sırasında Si atomu ile reaksiyon ürünlerini artırarak mekanik mukavemeti artırması olarak açıklanmıştır.

Yuan vd., (2016) çalışmalarında, geopolimerizasyon işlemini kısaca çözünme, yeniden düzenleme, yoğunlaştırma ve yeniden katılma şeklinde özetlemişlerdir. Ayrıca, geopolimerlerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri, kullanılan ham maddenin kimyasal kompozisyonu ve reaktivitesinin alkali aktivatörlerin konsantrasyonu ve kür prosedürleri gibi bazı parametrelerden etkilendiğini söyleyerek, yeterli miktarda alümina ve silika içeren hemen hemen tüm malzemelerin geopolimerizasyon mekanizması için kaynak materyali olarak kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

Benzer şekilde Duxson ve Provis, (2007) geopolimerizasyon sürecinde hem alkali aktivatör tipinin hem de Si/Al oranının, elde edilen geopolimer malzemenin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde son derece önemli bir etkisinin olduğunu belirtmiştir.

Geopolimerizasyon, uçucu kül, kömür cürufu, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, volkanik tüf, ufalanmış doğal kayalar, kaolinit kili (metakaolinit) gibi dehidrasyona uğramış aluminosilikat yapıdaki malzemeler ile alkali silikat ve alkali tuzların düşük

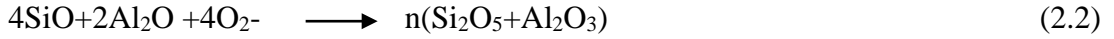
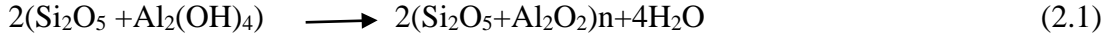
ısıda reaksiyona girmesi ile başlamaktadır. Bu reaksiyon sonucunda ortaya çıkacak ürünün kullanım amacına uygun fiziksel ve kimyasal beklentileri karşılaması; katı hammadde kompozisyonu, kullanılan aktivatörlerin yeterli konsantrasyonlarda karıştırılarak tepkimeye sokulması, uygulanan ısı kür ya da kalsinasyon işlemi ısı ve süresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Davidovits, 2008).

Sun ve Wu, (2013) çalışmalarında alkali ile aktive edilmiş çimentoları benzersiz bir inorganik polimer olarak nitelendirmiştir. Geopolimerlerin, kimyasal olarak üç boyutlu çapraz olarak bağlanmış, pozitif iyonların (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , H_3O^+ , vb.) yapıdaki negatif yükleri dengelemek için bulunduğu $[\text{AlO}_4^-]$ ve $[\text{SiO}_4]$ tetrahedrallerden oluştuğu söylenmiştir. Bahsedilen bu malzemeler, ilk kez 1950'lerde Ukrayna'da ortaya çıkmış ve o zamanlarda "toprak çimentosu" olarak anılmışlardı. Bu materyallerin kimyasal kompozisyonu ilk olarak ayrıntılı Davidovits tarafından incelenmiş ve bu inceleme sonunda 1980'lerde "geopolimer" terimi literatüre kazandırılmıştır.

Reddy vd., (2016) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer beton üretiminde kullanılan ham madde içinde bulunan oksitlerin (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO vb.) yüzdesinin basınç dayanımına etkisi hakkında inceleme yapılmıştır. Ayrı ayrı oksit bileşeni yüzdesine karşı 7 ve 28 günlük basınç dayanımı eğilimleri geliştirilmiş ve geopolimer betonun mukavemetinin, tek tek oksit bileşeni yüzdesindeki değişime bağlı olarak büyük farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca, bir numunenin basınç dayanımının ağırlıklı olarak alüminasilikat oksit yüzdesi tarafından etkilenmiş olduğu ve buna karşın CaO ve Fe_2O_3 gibi oksitlerin de, alüminasilikat oksitlere kıyasla daha az miktarda olsa da dayanıma olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Geopolimer, Portland çimentolu betona benzer şekilde formunu aldıktan sonra da iç reaksiyonlarını sürdürmektedir. Geopolimer ekzotermik reaksiyonu üç boyutlu oligomer makromoleküler yapıyı oluşturacak şekilde sürmektedir. Alüminasilikat hidratların ısıtılması ile hidroksil iyonları su oluşturacak şekilde ayrışır ve böylece

polimerik Si-O-Al bağları oluşur. Geopolimerin yoğunlaşma polikondensasyon ile oluşumu ise Denklem 2.1 ve 2.2'ye göre gerçekleşir (Ariöz vd., 2009).



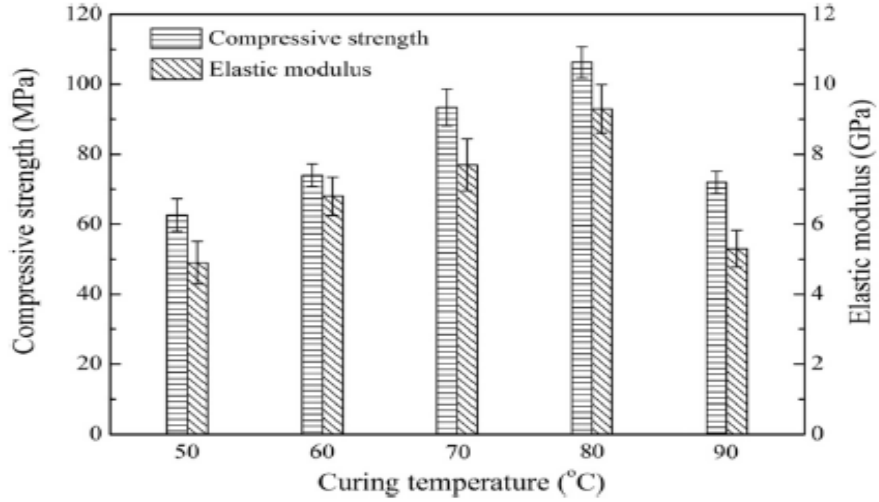
Buhar fazında gerçekleşen bu iki reaksiyon ham maddeye uygulanan ön ısıtma ve 100°C'ye kadar olan ısıtma işlemlerinin, geopolimer reaksiyonlarını hızlandırdığını ve reaksiyona giren alumino-silikat miktarını arttırdığını göstermektedir (Zeybek, 2009).

Geopolimer malzemeler inorganik polimerler ailesinin bir türüdür. Geopolimerin kimyasal kompozisyonu doğal zeolitik materyaller ile benzerlik gösterse de, amorf bir yapıya sahiptir. Geopolimerizasyon işlemi, Si ve Al mineralleri üzerinde, güçlü alkali koşullar altında gerçekleşen ve üç boyutlu bir polimerik zincir (Si-O-Al) oluşumu ile sonuçlanan hızlı bir kimyasal reaksiyondur (Rangan, 2010).

2.5.2. Geopolimer beton özelliklerine kür sıcaklığı ve süresinin etkisi

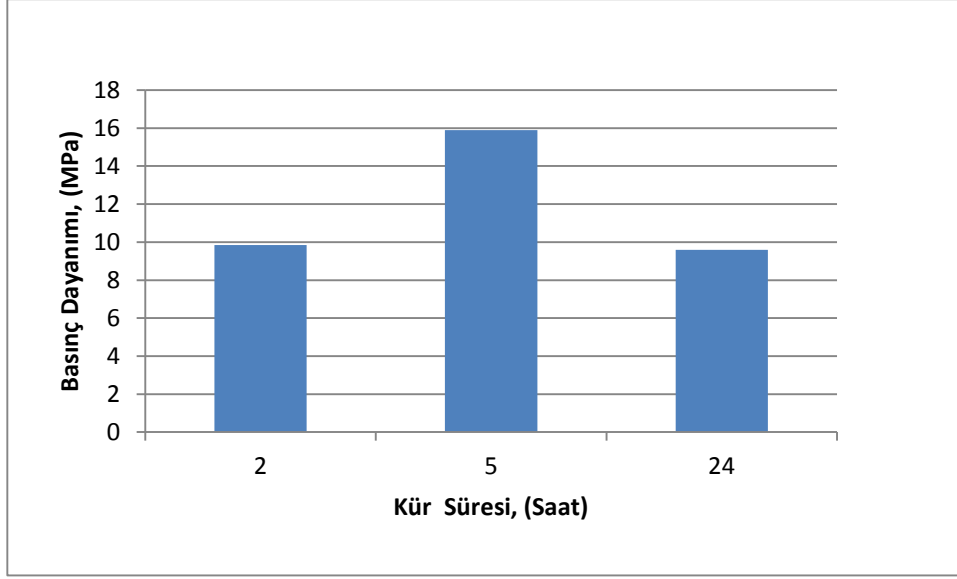
Yuan vd., (2016) yaptıkları çalışmada, metakaolin kullanılarak üretilen geopolimerlerin performansına kür sıcaklığı ve SiO₂/K₂O oranının etkisini incelemişlerdir. Kür sıcaklığı 50, 60, 70, 80 ve 90°C olarak belirlenmiştir. Dört farklı SiO₂/K₂O oranı kullanılarak üretilen geopolimerlerin mikro yapısında ve mekanik özelliklerindeki değişiklikler belirlenmiştir. Sonuç olarak, kür sıcaklıklarının ve farklı SiO₂/K₂O oranlarının, geopolimerlerin nihai dayanımını ve mikro yapısını etkilediği ortaya çıkmıştır. Deneysel sonuçlar, geopolimerin mekanik özelliklerinin gelişimine yardımcı olan mikro yapıların, kür sıcaklığının artması ile birlikte daha yoğun bir hale geldiğini göstermiştir. Benzer şekilde, Şekil 2.4'te görüleceği üzere optimum kür sıcaklığının 106.2 MPa basınç dayanımı ve 8.3 GPa

elastisite modülü ile 80°C olduğu ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, kür sıcaklığında yapılacak uygun yükselişlerin matris içerisindeki kompakt yapının oluşmasına ve mekanik özelliklerin gelişimine katkıda bulunan dehidroksilasyon ve yapısal yeniden düzenleme dahil olmak üzere, geopolimerizasyon işlemini hızlandırdığını göstermiştir.



Şekil 2.4. Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi (Yuan vd., 2016)

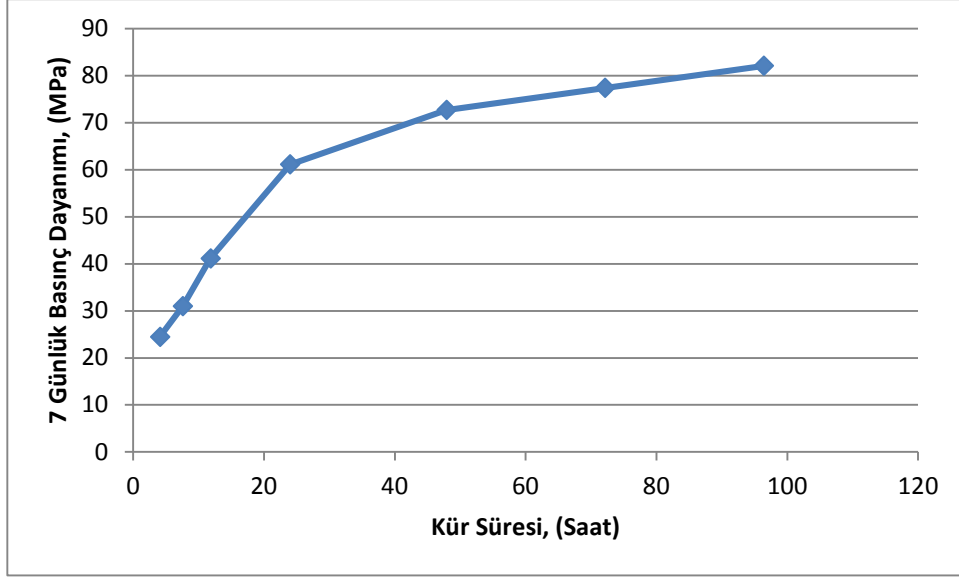
Görhan vd., (2015) yaptıkları çalışmada, puzolanik özelliğe sahip uçucu kül ile birlikte NaOH ve Na₂SiO₃ sıvılarını kombinasyon şeklinde kullanıp geopolimer hamur numuneler üretmişlerdir. Üretilen numuneler 2, 5 ve 24 saat olmak üzere üç farklı sürede kür işlemine (85°C) tabi tutulmuştur. Sıcaklığın sabit tutulduğu deney sisteminde, kür süresinin uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer hamur numunelerin görünür porozite, su emme, bulk yoğunluk, görünür yoğunluk gibi fiziksel özellikleri ile basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları, kür süresinin artması ile birlikte numunelerin gözeneklilik ve su emme değerlerinde azalma olduğunu göstermiştir. En yüksek basınç dayanımı değerlerini 5 saatlik kür süresinin sağladığı ve bu değer yaklaşık 16 MPa olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.5. Kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Görhan vd., 2015)

Görhan ve Kürklü, (2014) yaptıkları çalışmada, Kütahya Seyitömer termik santralinden alınan F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer harçların sahip olduğu özelliklere kür sıcaklığının, kür süresinin ve farklı NaOH konsantrasyonunun etkisini araştırmışlardır. 3, 6 ve 9 M konsantrasyonlarda hazırlanıp Na_2SiO_3 ile birlikte kullanılan NaOH ile üretilen geopolimer harç numuneler 65 ve 85°C sıcaklıkta kür edilmiştir. Deneysel sonuçları, uygulanan kür sıcaklığı ve süresinin geopolimer harçların fiziksel özellikleri üzerinde çok önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Elde edilen mukavemet değerleri göz önüne alındığında optimum ısı kür sıcaklığının 85°C olduğu ve ideal konsantrasyonun 6 M olduğu belirlenmiştir.

Rangan, (2014) yaptığı çalışmada ısı kürünün geopolimer hamurda meydana gelecek kimyasal reaksiyona yardımcı olduğunu ve böylece ısı kürü ile geopolimer betonun basınç dayanımının artacağını belirtmiştir. Bu çalışma, daha uzun kür süresinin geopolimerizasyon işlemini geliştirerek daha yüksek basınç dayanımı sağladığını göstermiştir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, mukavemet artış hızının 24 saatlik kür süresi boyunca hızlı olduğu ve 24 saatin ötesindeki kür sürelerinde bu hızın orta derecede gerçekleştiği belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Kür süresine bağlı basınç dayanım artışı, (Rangan, 2014)

Nazari vd., (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kullanılarak üretilen geopolimer numuneler için; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2.99 olan, 36 saat boyunca uygulanan kür süresinin ve 80°C 'lik kür sıcaklığının maksimum basınç dayanımını sağladığını belirtmişlerdir.

Haddad ve Alshbuol, (2016) yaptıkları çalışmada, Ürdün doğal puzolanı kullanılarak üretilen geopolimer betonları dökümden 24 saat sonra, 40, 80 ve 120°C sıcaklıkta ve laboratuvar koşullarında 24 ve 48 saat süreyle farklı kür koşullarına tabii tutmuştur. Üretilen geopolimer beton numunelerinden; 40°C ve 80°C sıcaklıkta 48 saatten daha az bir sürede kür edilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında, laboratuvar koşullarında kür edilen numunelere göre sırası ile %25 ve %32 oranlarında artış olduğunu ortaya çıkarmıştır. Öte yandan, deney sonuçları Ürdün doğal puzolanı kullanılarak üretilen geopolimer betonun, üç günlük kür süresinde ulaşacağı erken dayanımın, nihai dayanımının %70'ini aştığını göstermiştir.

Görhan vd., (2016) yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer hamurlara farklı oranlarda metakaolin ilavesi yaparak (%10-40) üretilen

numunelerin farklı kür süreleri, kür sıcaklıkları ve farklı metakaolin oranlarının, geopolimer hamurların özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Üretilen numuneler 2, 4 ve 24 saatlik üç farklı kür süresinde 60°C ve 80°C’ de iki farklı kür sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Uygulanan bu kür işlemlerinden sonra numuneler fiziksel ve mekanik testlerin yapılacağı yedinci güne kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Yapılan testler sonucunda, ideal kür süresi ve sıcaklığının sırasıyla 2 saat ve 60°C olduğu bulunmuştur.

Noushini ve Castel, (2016) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların 60, 75 ve 90 °C ‘lik kür sıcaklıklarında ve 8, 12, 18 ve 24 saatlik kür sürelerine tabii tutulması ayrıca laboratuvar şartlarında kür edilmesinin, numunelerin basınç dayanımı, elastisite modülü, su emmesi, bünyesinde bulunan geçirimli boşlukların hacmi, gözeneklerin boyut dağılımı ve özdirenç gibi fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Yapılan kür işlemlerine bağlı olarak, 28 günlük numunelerin basınç dayanımlarının 27.4 MPa ve 62.3 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. Benzer şekilde elastisite modülleri de 13.5 GPa ve 25.9 GPa değerleri arasında farklılık göstermiştir. Basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri, kür sıcaklığının 75 °C’ ye kadar, kür süresinde 24 saate kadar artmasıyla birlikte önemli bir artış göstermiştir. Öte yandan, ortam koşullarında kür edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artışın çok düşük olduğu ve bu şekilde uygulanan kür işleminin F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerler için uygun bir seçenek olmadığı ortaya çıkmıştır.

Xin vd., (2012) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanarak elde ettikleri geopolimer malzemeyi, NaOH, Na₂CO₃ kullanılarak aktive etmiş ve kompozit bir malzeme üretmişlerdir. Geopolimer hamur numunelerinin sıcaklığı, dayanımı, priz süreleri gibi fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Üretilen numunelerin 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 95°C gibi farklı kür sıcaklıklarında 28 günlük dayanım özellikleri incelenmiştir. 40°C sıcaklıkta kür edilen geopolimer hamur numunelerinin eğilme dayanımı değerlerinin düşük çıkmasının yanında, basınç dayanımı değerleri en yüksek çıkmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimer çimento priz başlama süresi 50 dakika ile 2 saat arası, priz bitiş süresinin ise 8 saat olduğu görülmüştür. Ayrıca,

NaOH veya cüruf içeriğinin artmasıyla, priz süresinin kısaldığı gözlenmiştir. Farklı kür sıcaklıklarının uygulandığı bu çalışmanın sonucunda, maksimum basınç dayanımı elde etmek için uygulanması gereken ideal kür sıcaklığının 40 °C olduğu tespit edilmiştir.

2.5.3. Geopolimer beton özelliklerine w/b oranının etkisi

Haddad ve Alshbuol, (2016) yaptıkları çalışmada, Ürdün doğal puzolanı kullanılarak üretilen geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımı üzerinde alkali sıvı/bağlayıcı oranının önemli bir etkisi olduğunu belirtmiştir. Sıvı/bağlayıcı etkisini incelemek amacıyla numuneler, 0.30 ve 0.45 sıvı/bağlayıcı oranlarında üretilmiştir. Ayrıca maksimum basınç dayanımının 0.45 alkali/bağlayıcı oranında sağlandığını göstermiştir. Bu durum alkali solüsyon ile puzolanik ham madde arasında belirli bir dengenin sağlanması gerektiğini ve bu denge sayesinde reaksiyona girmemiş ham madde oranının ve gözenek oluşumunun minimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Numuneler üzerinde yapılan mikro yapı analizleri de 0.45 alkali sıvı/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen geopolimer betonların 0.30 alkali sıvı/bağlayıcı kullanılarak üretilen geopolimer betonlara göre reaksiyona girmemiş daha az puzolanik ham madde ile birlikte daha yoğun bir matris oluşturduğunu göstermiştir.

2.5.4. Geopolimer beton özelliklerine aktivatör oranının etkisi

Haddad ve Alshbuol, (2016) yaptıkları çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ oranının Ürdün doğal puzolanı kullanılarak üretilen geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranına bakılmaksızın en yüksek basınç dayanımı değerinin yüksek NaOH konsantrasyonunda (14M) gözlemlendiği görülmüştür. Ağırlıkça, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı dikkate alındığında, maksimum basınç dayanımı bu oranın 2.5 olduğu karışımda bulunmuştur.

Rangan, (2014) yaptığı çalışmada, geniş bir ölçekte üzerine çalışmalar yapılan geopolimer beton elemanların mekanik özelliklerini ve geopolimerlerin inşaat sektöründeki uygulama alanlarından bahsetmiştir. Bu çalışmada, kütlece daha yüksek oranlarda Na_2SiO_3 / NaOH kullanımının daha yüksek basınç dayanımlarına yol açtığı, aynı şekilde $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oranının artmasının da basınç dayanımını arttırdığı belirtilmiştir.

Wang vd., (1994) yaptıkları çalışmada aktivatör dozajı ve silis modülünün geopolimer harçların mekanik özellikleri üzereinde çok önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, mekanik özellikler üzerinde etkili olan parametrelerin olması gereken optimum aralığın cüruf türüne bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir. Bu aralık, asit türdeki cüruflar için 0.75-1.25, nötr özellik gösteren cüruflar için 0.90-1.30 ve temel cüruf için 1-1.5 arasında olduğunu söylemiştir.

Görhan ve Kürklü, (2014) yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer harçların mekanik özellikleri dikkate alındığında NaOH tek başına kullanılmasının, Na_2SiO_3 ile birlikte belirli oranlarda kombine halde kullanımına kıyasla daha kötü sonuçlar ortaya çıkardığını belirtmiştir. Bu durumun nedeni olarak da, meydana gelen geopolimerizasyon sürecinde Na_2SiO_3 kullanılması halinde daha çok Si içeriği yüksek olan reaksiyon ürünleri oluşmasından kaynaklandığını söylemiştir.

2.5.5. Geopolimer beton özelliklerine aktivatör tipinin etkisi

Adam, (2009) tarafından yapılan bu çalışmada, geopolimer malzemelerin aktivasyon işlemi için literatürde sıklıkla kullanılan aktivatör tipi ve özelliklerini bir tabloda sıralamış ve bu aktivatör tipleri ile aktive edilen malzemelerin basınç dayanımları Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Farklı ham maddeler kullanılarak üretilen geopolimerlerin basınç dayanımına farklı aktivatör tiplerinin etkisi

Yazarlar	Bağlayıcı Türü	Aktivatör Olarak Kullanılan Sıvılar	28 günlük basınç dayanımı, (MPa)
(Bakharev,2000)	Alkali aktive edilmiş cüruf (hamur)	NaCO ₃ (%7 Na)	26
		NaOH (%7 Na)	20.9
		Na ₃ PO ₄ (%7 Na)	12
		Na ₂ SiO ₃ (%6 Na)	30
(Wang vd., 1994)	Alkali aktive edilmiş cüruf (harç)	Na ₂ SO ₄ (2M)	20
		NaOH (4M)	22.9
		NaCO ₃ (2 M)	35.5
		Na ₂ SiO ₃	85
Escalente Garcia, Gorokhovsky, Mendoza, Fuentes, 2003)	Alkali aktive edilmiş cüruf (harç)	NaOH	29.8
		Na ₂ SiO ₃	46.1
Shi,1996	Alkali aktive edilmiş cüruf (harç)	NaOH	13
		Na ₂ SiO ₃	62
		NaCO ₃	33
Fernandez-Jimenez, Puertas, Sobrados, Sanz, 2003	Alkali aktive edilmiş cüruf (harç)	NaCO ₃	40
Fernandez-Jimenez, Puertas, Sobrados, Sanz, 2003	Alkali aktive edilmiş cüruf (harç)	Na ₂ SiO ₃	100
		NaOH	28
Bakharev,2005	Geopolimer Hamur	NaOH	45
		Na ₂ SiO ₃	52
Fernandez-Jimenez, Palomo, 2005	Geopolimer Harç	NaOH	70.4
		NaOH + Na ₂ SiO ₃	91.6
		NaOH + Na ₂ CO ₃	35.99

Hosan vd., (2016) yaptıkları çalışmada sodyum ve potasyum esaslı aktivatörlerin, yüksek sıcaklıklara maruz kalmış F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen

geopolimerlerin basınç dayanımı ve fiziksel değişimlerine olan etkilerini incelemiştir. Kullanılan aktivatörler $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ve $\text{K}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ oranı bakımından kütlece 2, 2.5 ve 3 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen numuneler 28 günlük kür işlemine tabi tutulmuş ve yangın etkisi sonucunda kalıntı basınç dayanımını ölçmek için 200°C , 400°C , 600°C ve 800°C 'lik dört farklı yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları, 600°C ' ye kadar yaşanan sıcaklık artışlarında potasyum esaslı aktivatörler kullanılarak üretilen geopolimerlerin sodyum esaslı alkaliler kullanılarak üretilen geopolimerlere göre daha yüksek sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca potasyum esaslı aktivatörler kullanılarak üretilen uçucu kül temelli geopolimerlerin, yüksek yangın dayanımının yanında düşük kütle kaybı, düşük hacimsel değişiklik ve daha az çatlaklara uğrama açısından sodyum esaslı aktivatörler ile sentezlenen benzerlerine göre daha kararlı bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir.

2.5.6. Geopolimer beton özelliklerine nano ilavenin etkisi

Geopolimer betonların sahip olduğu özelliklerin iyileştirilmesi için kullanılan nano büyüklükteki katkı maddeleri literatürde; farklı tipteki nano katkıların kullanılması, aynı tip nano katkıların konsantrasyonlarının değiştirilmesi veya aynı tip nano katkıların karıştırılma metotlarının değiştirilmesi gibi farklı parametreler kullanılarak çalışılmıştır.

Deb vd., (2015) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer bağlayıcılara %0 ve %3 aralığında değişen oranlarda nano silika ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Nano silika oranı bağlayıcı miktarının %3'ü ile sınırlandırılmıştır. Basınç dayanımı ve SEM görüntüleri sonuçları ile birlikte, dayanım artışının ve mikro yapının nano-silika ilavesi ile matrisin yoğunlaştırılmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Deney sonuçları, %2' ye kadar artan nano silika ilavesinin basınç dayanımında önemli bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Fakat nano silika ilavesinin %2 oranından yüksek kullanılması basınç dayanımında azalmalara sebep olmuştur. Bu durum; %2 oranında kullanılan nano silika ilavesinin sahip olduğu yüksek yüzey alanı nedeniyle polimerizasyon reaksiyonu için yeterli olduğunu ve

%2'den fazla oranda kullanılan nano silika katkısının reaksiyona girmeyerek dayanıma olumlu bir katkısının bulunmadığını belirtmiştir.

Naskar ve Chakraborty, (2016) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonlara nano silika, karbon nano tüpü ve nano TiO₂ gibi üç farklı nano malzeme ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar; hem 7 hem de 28 günlük basınç dayanımları açısından, elde edilen en yüksek basınç dayanımına sahip olan numunenin %1 nano TiO₂ içeren geopolimer beton olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bu üç farklı nano ilavesinin geopolimer betonunun pH derecesini değiştirmedeğini ve üretilen her beton numunesinin pH değerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı belirtilmiştir.

Assaedi vd., (2016a) yaptıkları bu çalışmada; nano-kil trombositlerin uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların mekanik ve termal özelliklerine etkisini incelemiştir. Nano-kil trombositleri karışıma, bağlayıcı ağırlığının %1, 2 ve 3'ü oranlarında ilave edilmiş ve sonuçlar, nano-kil ilavesi ile birlikte geopolimerlerin mekanik özelliklerinin geliştiğini ortaya çıkarmıştır. %2 oranında kullanılan nano kil ilavesi, geopolimer numunelerin porozitesini düşürürken, su emmeye karşı direncini arttırmıştır. %2 nano silis ilavesi en yüksek basınç dayanımını beraberinde getirmiştir. Ayrıca, elde edilen mikro analiz sonuçları nano-kil trombositlerin sadece geopolimerlerin mikro yapısını iyileştirmek için kullanılan bir dolgu malzemesi olmadığını aynı zamanda meydana gelen reaksiyonu hızlandırmak için bir aktivatör olarak görev yaptığını göstermiştir.

Assaedi vd., (2016b) yaptıkları çalışmada, %0,5, 1, 2 ve 3 oranlarında nano silikanın karışım metotlarının, geopolimer kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Nano silika ilavesi, karışıma kuru ve ıslak metotlarla karıştırılmış (Şekil 2.7) ve bu karışım metotlarının geopolimer kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Dene sonuçları, nano silika ilavesinin genel olarak mikro yapıyı geliştirerek geopolimer kompozitlerin eğilme ve basınç dayanımlarını arttırdığını göstermiştir.

Kuru karışım yöntemi kullanılarak hazırlanan geopolimer numuneler, yaş karışım örneklerine göre daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler sergilemiştir. Kuru karışımda artan nano ilavesi ile dayanımın düşüş göstermesinin sebebi; geopolimer matrislerdeki artan nano silis oranının nispeten zayıf dağılımı ve topak oluşumudur ve bu da mikro gözenekler büyüklüğünde zayıf bölgeler oluşturmuştur. Islak karışımda artan nano ilavesi ile dayanımın düşüş sebebi; sistemde çözünmüş aşırı miktardaki silisyumdan kaynaklanmış ve bu durum da, alüminyum iyonlarını (Al^{3+}) tamamen çözüp, reaksiyona girmemiş uçucu külün kalmasına neden olan yetersiz bir OH^- iyonlarına neden olmuştur.



Şekil 2.7. Nano silikanın karıştırılma metotları , (Assaedi vd., 2016b)

2.5.7. Geopolimer beton özelliklerine mikro ilavesinin etkisi

Okoye vd., (2017) yaptıkları çalışmada, %2 H_2SO_4 ve % 5 NaCl solüsyonlarına daldırılmış uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların durabilite özelliklerine mikro silika ilavesinin etkisini incelemiştir. Numunelerin kimyasal saldırılara karşı dirençleri, görsel olarak, ağırlık değişimine bakılarak ve farklı zaman aralıklarındaki basınç dayanımının yüzde cinsinden kayıpları ele alınarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için, M40 koduna sahip geleneksel

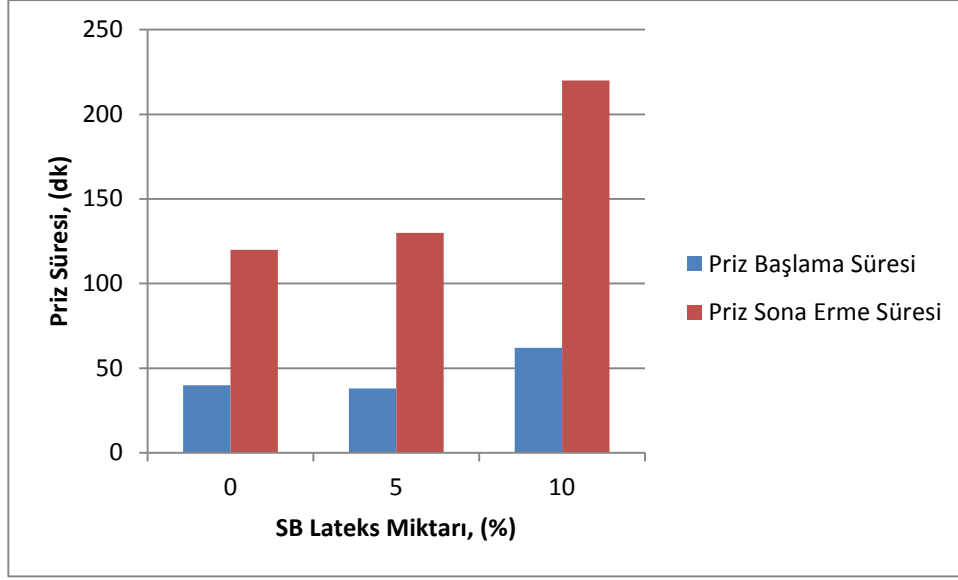
portland çimentosu kullanılarak bir kontrol karışım hazırlanmıştır. %2 H₂SO₄ solüsyonuna daldırılan 90 günlük numunelerde ölçülen basınç dayanımı kayıpları sırasıyla kontrol karışımı için %36, %20 mikro silis ilave edilen geopolimer için ise %8 olarak bulunmuştur. Benzer olarak %5 NaCl çözeltisine daldırılan 90 günlük numunelerdeki basınç dayanımı kayıpları ise kontrol karışımı için %18, %20 mikro silis ilave edilen geopolimer için ise %0 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu deneysel sonuçlar, mikro silis ilave edilerek üretilen uçucu kül temelli geopolimerlerin sülfürik asit ve sodyum klorür solüsyonlarına karşı olan dayanımının kontrol karışıma göre çok daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Behfarnia ve Rostami, (2017) yaptıkları çalışmada alkali ile aktive edilmiş cüruf kullanılarak ürettikleri betona mikro ve nano parçacık ilavesinin üretilen numunelerin geçirgenlik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Nano ve mikro parçacıklarının ayrı ayrı veya birlikte kullanımlarının etkisini araştırmak amacıyla, üretilen numunelere su geçirgenlik testi, hızlı klor geçirgenliği testi, karbonatlaşma direnci testi, kısa süreli ve toplam su emme testi ile birlikte basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Deneysel sonuçları; mikro ve nano silika ilavesinin numunelerin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Bu etkiye ayrı ayrı bakıldığında, %10 mikro silika ilavesi 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla % 24 ve % 28 oranında arttırırken, nano ilavesi bakımından en ideal karışım oranı olarak bulunan %3 nano silika ilavesinin, numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %12 ve %11 oranında arttırdığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar mikro ilavesinin nano ilavesine göre daha yüksek basınç dayanımına yol açtığını göstermiştir. Öte yandan, mikro silika ilavesi numunelerde gözlenen kısa süreli ve toplam su geçirgenliklerini sırasıyla %19 ve %10 oranında azaltırken, nano silika ilavesinin su geçirgenliklerine herhangi bir olumlu etkisi bulunmamıştır. Benzer şekilde hızlı klorür geçirgenliği testi sonuçları; mikro silika ilavesinin klorür geçirgenliğine karşı olan direnci arttırdığı ancak nano silika ilavesinin, klor geçirgenliğine olumlu bir katkısı olmadığı gözlenmiştir. Karbonatlaşma testi sonuçları da, benzer şekilde, mikro silikanın karbonatlaşma direncine olumlu bir etkisinin olduğunu ancak nano silika ilavesinin karbonatlaşma direncine olumsuz etki yaptığını göstermiştir.

Duan vd., (2017) yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların yüksek sıcaklıklara dayanımı üzerine mikro silis ilavesinin etkisini incelemiştir. Bu şekilde üretilen numuneler 7, 28 ve 56 döngü yapacak şekilde 200, 400 ve 800°C sıcaklıklara getirilmiştir. Deney sonuçları; geopolimer numunelerin basınç dayanımı gelişiminde mikro silis ilavesinin oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Öte yandan, mikro silika etkisine bağlı olmadan, sıcaklık değerlerinin 200°C'den 800°C'ye çıkması tüm numunelerde meydana gelen basınç dayanımı kayıplarını arttırmıştır. Ayrıca, %10, 20 ve 30 oranlarında kullanılan mikro silis ilavesinin artması yüksek sıcaklıklarda geopolimer numunelerde meydana gelen kütle kaybını azaltmıştır.

2.5.8. Geopolimer beton özelliklerine Sterin Bütadien Lateks ilavesinin etkisi

Lee vd., (2016) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve cüruf kullanarak ürettikleri geopolimer harç ve hamur numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerine, SB Lateks katkısının etkisini araştırmışlardır. SB Lateks etkisini incelemek amacıyla, polimer lateks karışımlara %0, %5 ve %10 oranlarında eklenmiştir. Deney sonuçları; lateks katkısı oranının %0'dan %10 mertebesine çıkmasının, geopolimer numunelerin eğilme dayanımlarını % 50 oranında arttırdığını göstermiştir. Bu durumun nedeninin, lateks ilavesinin geopolimer matrisinde bulunan bağ etkileşimlerini güçlendirmesinden kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca geopolimer hamur numunelerin priz süresi sonuçları, Şekil 2.8'de artan lateks oranının priz başlama ve sona erme sürelerini oldukça uzattığı görülmektedir. Priz sürelerindeki bu önemli artışın, lateks oranının artması ile birlikte matrisin pH derecesini düşüreceği ve meydana gelecek polimerizasyon işleminin de bu yüzden gecikmesinden kaynaklandığı söylenmiştir. Artan SB Lateks oranının priz süresine diğer bir olumsuz etkisi ise, karıştırma işleminde uçucu kül ve cüruf parçacıklarının yüzeyini lateks kaplaması ve bu malzemeler ile alkali aktivatör arasındaki reaksiyona engel olması olarak açıklanmıştır. Öte yandan SB Lateks oranının artması, geopolimer haçların basınç dayanımını azaltmıştır. Bu durum da SB Lateks oranının artması ile birlikte matrisin pH derecesinin düşerek geopolimerizasyon reaksiyonunun oluşmasına engel olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.8. Artan SB Lateks oranının priz süresine etkisi (Lee vd., 2016)

2.5.9. Geopolimer beton özelliklerine sodyum hidroksit konsantrasyonunun etkisi

Chindaprasirt ve Chalee, (2014) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların deniz koşulları altındaki çelik korozyonu ve basınç dayanımı gibi özelliklerine NaOH konsantrasyonunun etkisini incelemiştir. C sınıfı uçucu kül, Na_2SiO_3 ve NaOH alkali sıvılarının bir kombiasyonu ile karıştırılıp homojen bir karışım hazırlanmıştır. Geopolimer betonların özelliklerine NaOH konsantrasyonunun etkisini incelemek için, NaOH solüsyonu 8, 10, 12, 14, 16 ve 18 molar şeklinde hazırlanmıştır. Üretilen numuneler 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında kür edildikten sonra, Tayland Körfezi'nde bulunan deniz çevresinin gelgit etkisine maruz bırakılmıştır. 3 yıllık deney sonucunda, numuneler basınç dayanımı, klorür penetrasyonu ve numune içinde gömülü donatı korozyonunun miktarını ölçmek için teste tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, NaOH konsantrasyonunun artmasıyla birlikte klorür penetrasyonunun ve donatının korozyonunun azaldığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca numunelerin sahip olduğu basınç dayanımı ile donatı korozyonu arasında bir ilişki olduğu görülmüş ve yüksek basınç

dayanımına sahip olan numunelerde düşük miktarda korozyon olayı olduğu ortaya çıkmıştır.

2.5.10. Geopolimer betonların basınç dayanımı

Robayo-Salazar vd., (2016) yaptıkları çalışmada volkanik puzolan temelli ürettikleri geopolimer betonların mikro yapıları ve basınç dayanımlarına metakaolin etkisini incelemiştir. Metakaolinin bağlayıcı ağırlığının %0 ile 30'u arasında eklendiği geopolimer betonlarda aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ birlikte kullanılmıştır. Deney sonuçlarında, ham madde olarak kullanılan volkanik puzolan ile metakaolinin % 20 oranında yer değiştirilmesi maksimum basınç dayanımına yol açmıştır. Elde edilen sonuçlar, oda sıcaklığında kür edilmiş geopolimer malzemelerin 68 MPa' a varan basınç dayanımlarına ulaştığını ve çimento yerine bağlayıcı olarak volkanik puzolanlar ile birlikte metakaolinin kullanılabilceğini göstermiştir.

Shehab vd., (2016) yaptıkları çalışmada betonun mekanik özellikleri ve davranışındaki temel parametrelerin etkisini değerlendirmek için 18 beton karışımı üretmişlerdir. Üretilen bu 18 karışımın parametreleri; bağlayıcı madde içeriği, çimento ile uçucu külün yer değiştirme oranları ve uçucu kül temelli geopolimer betonlarda aktivatör çözelti oranı olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, uçucu külün çimento ile yer değiştirmesinin geopolimer betonların basınç dayanımlarında önemli artışlara neden olduğunu göstermiştir. Mekanik dayanım testlerinden elde edilen sonuçlar, çimento ile uçucu külün %50 oranında yer değiştirmesinin en yüksek basınç dayanımı değerlerini verdiği görülmüştür.

Allahverdi ve Kani, (2009) atık tuğla ve beton parçacıklarını hammadde olarak kullandıkları çalışmalarında ortalama 25 µm incelikte öğüttükleri hammaddeleri Na₂SiO₃ ve NaOH kullanarak aktive etmişlerdir. Deney sonuçları, bu atık malzemelerin Na₂SiO₃ ve NaOH ile aktive edilmesi halinde geopolimer beton olarak kullanılabilirliklerini göstermiştir. Hammaddelerin mekanik performansları

açısından bir değerlendirme yapılmış ve atık tuğlaların basınç dayanımlarının (yaklaşık 40 MPa) beton atıklarından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

2.5.11. Geopolimerlerde pH etkisi

Reddy vd., (2016) yaptıkları çalışmada, gepolimerizasyon işleminin üç farklı aşamada gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu aşamalardan ilki olan; geopolimer üretiminde kullanılacak ham maddenin bünyesinde bulunan Si ve Al atomlarının çözünmesi işlemidir. Bu çözünme işleminin de ancak ortamda yeterli pH derecesinin sağlanması durumunda gerçekleşebildiği belirtilmiştir.

Lee vd., (2016) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve cüruf kullanarak ürettikleri geopolimer harç ve hamur numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerine, SB Lateks katkısının etkisini araştırmışlardır. SB Lateks etkisini incelemek amacıyla, polimer lateks karışımlara %0, %5 ve %10 oranlarında eklenmiştir. Ayrıca geopolimer hamur numunelerin priz süresi sonuçları, artan SB Lateks oranının priz başlama ve sona erme sürelerini oldukça uzattığını göstermiştir. Bu durumun nedeninin, SB Lateks oranının artmasıyla birlikte geopolimer matrisinin pH derecesinin düşmesi ve polimerizasyon reaksiyonunun yavaşlamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Benzer şekilde, yüksek oranda lateks kullanılmasından kaynaklı matrisin pH'ının 14.5'dan 10 mertebesine düşmesi sonucunda basınç dayanımında da ciddi düşüşler yaşanmıştır.

2.5.12. Geopolimerlerin uygulama alanları

Sahip olduğu özelliklerle geopolimerler, inşaat mühendisliğinde, otomotiv sanayisinde, havacılık sanayisinde, metalurjide, plastik endüstrisinde, atık yönetiminde, yapıların güçlendirilmesinde, sanat ve dekorasyon vb. diğer birçok endüstride oldukça yaygın bir kullanım alanına ulaşmıştır (Li vd., 2004).

Davidovits, (1994) geopolimer malzemelerin, otomobil ve havacılık, demir dışı dökümhaneler ve metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik endüstrileri gibi endüstriler alanında geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu belirtmiştir. Geopolimer yapımında kullanılacak ham maddelerin uygulama türü, bünyesindeki Si ve Al atomlarının oranı açısından bulunan bir kimyasal yapı ile belirlenmektedir. Davidovits (1994), bu uygulama türü ile ilgili bir sınıflandırma yapmış ve bu sınıflandırma Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Geopolimer yapımında kullanılan ham maddelerin kimyasal yapısına göre uygulama alanları

Si/Al Oranı	Uygulama Alanları
1	-Tuğla -Seramik -Yangın Koruma
2	Düşük CO ₂ salan çimento ve betonlar Radyoaktif ve zehirli atık kapsülleme
3	Yangın Koruyucu Cam Elyaf Kompozit Döküm Ekipmanları Isıya dayanıklı kompozitler (200-1000°C arası) Havacılıkta kullanılan titanyum için kalıp
>3	Sanayi için sızdırmazlık ürünleri (200-600°C arası) havacılık takımları SPF alüminyum
20-35	Yangın ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

Si/Al oranının 1, 2 ve 3 olması çok rijit bir üç boyutlu bir ağ oluştururken, Si/Al oranının 15'ten yüksek olması geopolimer malzemeye polimer bir karakter vermektedir. İnşaat mühendisliği alanında birçok uygulama için düşük bir Si/Al oranının uygun olduğu belirtilmiştir (Rangan, 2014).

Balog vd., (2014) yaptıkları çalışmada doğal puzolanlardan olan zeolitik volkanik tüflerin, duvar yapımında, hafif beton veya otoklavlanmış gazbeton üretimi

aşamasında harç hazırlanması gibi yapı malzemeleri endüstrisinde kullanılabileceğini belirtmiştir.

2.6. Betonlarda Donma Çözülme Olayı

Baradan vd., (2002) yaptıkları çalışmada betonun donma çözülme etkisine karşı savunmasız olduğu uzun zamandır bilindiğini belirtmişlerdir. Suya doygun halde bulunan sertleşmiş bir betonda sıcaklık düştükçe, çimento hamurunun kılcal gözeneklerinde tutulan su, donar ve genişleme olayı gerçekleşir. Donmayı takip eden çözülme olayından sonra tekrar bir donma işleminin gerçekleşmesi halinde genişleme tekrar meydana gelecek ve böylece tekrarlanan donma çözülme döngüleri kümülatif bir genişleme etkisi oluşturacaktır. Bu genişmeler sonrasında ortaya çıkan gerilmeler, betonun çekme dayanımını aştığında betonda bozulmalara sebep olacaktır.

Beton bünyesinde bulunan suların tümü, açık ortamdaki sular gibi 0 °C' de donma işlemine maruz kalmamaktadır. Betondaki suların içerisinde eriyik halde bulunan farklı tipteki tuzların etkisiyle, beton içerisindeki su molekülleri 0°C' den daha düşük sıcaklıklarda donmaktadır. Aynı zamanda, suyun bulunduğu boşluk çapı da içerisinde bulunan suyun donma noktasını belirleyen önemli bir faktör durumundadır. Büyük kapiler boşluklar içerisinde yer alan su molekülleri 0 °C veya biraz daha düşük sıcaklıklarda donarken, çok daha düşük boyutlara sahip olan kapiler boşluklardaki su, -15°C veya -20°C sıcaklıklarda donma işlemine maruz kalır. Beton içerisinde bulunan diğer bir boşluk türü olan jel boşlukları, çok düşük boyutlu oldukları için bu boşluklar içerisinde bulunan suyun donması için çok düşük bir sıcaklık (-78°C) gerekmektedir (Erdoğan, 2003).

Yazıcı, (2008) yaptığı çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonların klor geçirimsizliği, donma çözülme dayanıklılığı ve mekanik özelliklerine uçucu kül ve silis dumanı ilavesinin etkilerini araştırmıştır. Uçucu kül, betona %30'dan %60' a

varan değişik oranlarda eklenmiştir. Bu karışımlara %10 oranında silis dumanı ilavesi de yapılmıştır. Deney sonuçları yüksek performanslı bir kendiliğinden yerleşen betonun, %10 silis dumanı ilavesiyle birlikte yüksek oranlarda uçucu kül içermesi gerektiğini açığa çıkarmıştır. Bu şekilde elde edilen yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonlar iyi mekanik özellikler, yüksek donma çözülme ve düşük klor geçirgenliği özelliğine sahiptir.

Nassar ve Lai, (1992) yaptıkları çalışmada, Saskatchewan linyit uçucu külünün betonun donma çözülme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. ASTM Tip 1 ve 5 çimento kullanılarak ve farklı oranlarda uçucu kül katkısı ile %4 ile 6 oranında hava boşluğu yüzdesi ihtiva eden karışımlar uygulanarak elde edilen betonlar donma çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları, yüksek oranda uçucu kül içeren (%35 ve %50) beton numunelerin 80 gün boyunca suda kür edilmesine ve %6 hava boşluğu içermesine rağmen, donma çözülme dayanımlarında düşüş gösterdiğini açığa çıkarmıştır. Bunun yanında, %20 uçucu kül içeren betonun, uçucu kül içermeyen betona göre çok iyi donma çözülme performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Baştopçu, (1997) çalışmasında uçucu kül katkılı veya katkısız betonun donma çözülmeye karşı göstereceği direncin, hava boşluk sisteminin yeterliliğine, agreganın sağlamlığına, beton yaşına, hidrasyon derecesine, çimento hamuru mukavemetine ve betonun nem şartlarına bağlı olduğu belirtilmiştir.

2.6.1. Donma çözülme olayının taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

Taze beton üretiminde meydana gelen donma etkisi, suya doymuş toprak üzerindeki don etkisi ile benzerlik göstermektedir. Beton karıştırma işleminden hemen sonra meydana gelecek don etkisi, betonun bünyesinde bulunan suyun hacminin %9 oranında artmasına neden olur. Beton henüz plastik kıvamdayken meydana gelen bu hacim artışı, oluşan buzun boşluklara hareket etmesine yol açar. Buz oluşumu sonucunda taze beton bünyesinde katı taneciklerinin hareketi ile bir

kütle transferi meydana gelmektedir. Bu kütle transferi, iri agrega taneleri ve çimento harcı arasında bulunan ara yüzey bağlarının bozulmasına neden olur. İri agrega tanelerinin birim hacmi betona göre daha büyük olduğundan, bu malzemeler ısıyı betondan daha iyi iletir. Betonun donmaya başlaması halinde iri agregalarda daha çabuk soğuma görülür. Oluşan bu sıcaklık farkına bağlı olarak, beton bünyesinde bulunan su, düşük sıcaklıktaki bölgelerde meydana gelen düşük basınç bölgelerine doğru hareket eder. Bu hareket sonucunda agrega yüzeyine ulaşan su, agreganın yüzeyinde donup bir su filmi tabakası oluşturmaktadır. Buz filminin, hacimsel olarak büyümesi ile birlikte agrega ile çimento arasındaki fiziksel bağ kopartılır. Bu şekilde meydana gelen aderans kaybı, agrega tanelerinin çimento matrisinden kolayca ayrılmasını sağlar. Hafif betonda olduğu gibi, boşluklu agregaların kullanılması, bu agregaların yüzeyine ulaşan suyu emerek cam filmi oluşturmasını engelleyeceğinden donma çözülme nedeniyle meydana gelecek hasarın mertebesini düşürmektedir (Baradan vd., 2002).

Betonun donması sırasında meydana gelen kütle transferinin bir başka nedeni de çimento hidrasyon mekanizmasının ekzotermik bir özelliğe sahip olmasıdır. Taze beton içerisinde bulunan suyun tamamı donma eğilimi göstermez. Örneğin, -5°C sıcaklıkta taze beton içerisinde bulunan karışım suyunun yaklaşık %92' si donarken, sıcaklığın -45°C ' ye düşmesi, sadece %4 oranında daha fazla suyun donmasına yol açar. Beton bünyesinde donmadan kalan bu su tanecikleri, çimento ile reaksiyona girdiğinde tanecikleri arasında bir miktar hidrasyon ısısına neden olacak ve bu ısı da suların daha soğuk bölgelere olan hareketini hızlandırarak meydana gelecek buz kütlelerinin hacminin büyümesine yol açacaktır. Meydana gelecek don olayının taze betona zarar vermemesi için gerekli beton yaşı Çizelge 2.4'te verilmiştir (Baradan vd., 2002)

Çizelge 2.4. Don olayının taze betona zarar vermemesi için geçmesi gereken süre

Çimento Tipi	Su/Çimento	Kür sıcaklığına bağlı olarak betonun don etkisinden zarar görmemesi için gerekli olan süre (saat)			
		5 °C	10 °C	15 °C	20 °C
Geleneksel Portland Çimentosu	0.4	35	25	15	12
	0.5	50	35	25	17
	0.6	70	45	35	25
Hızlı Dayanım Kazanan Çimento	0.4	20	15	10	7
	0.5	30	20	15	10
	0.6	40	30	20	15

Baradan vd., (2002) çalışmasında, taze betonda meydana gelecek don hasarlarını önlemek için alınması gereken önlemler arasında; beton üretiminde kullanılacak malzemelerin sıcaklıklarının yüksek tutulması, üretim aşaması ve sonrasında üretilen taze betonun sıcaklığının 15°C' nin üstünde tutulması, beton karışım tasarımının uygun yapılması, hava sürükleyici ve karışım suyunun donma noktasını düşürecek katkı maddelerinin kullanılması gibi durumların olduğunu belirtmiştir.

Erdoğan, (2003) donma çözülme olayının fiziksel bir etken olduğunu, ıslanarak doygun duruma gelmiş ve sertleşmiş halde donma çözülme devirlerine maruz kalmış bütün betonların kısa sürede hasar göreceğini belirtmiştir. Özellikle park alanlarında, hava alanlarında, kaldırım ve beton yollarda kullanılan beton elemanlar donma çözülme döngülerinin hasar vereceği birincil durumda betonlardır. Tekrarlı bir şekilde meydana gelen donma çözülme döngüleri karşısında, betonda oluşacak iç gerilmeler nedeniyle, beton bünyesinde bulunan agregalar gevşeyip kopmakta, beton içerisinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar döngü sayısına bağlı olarak giredek daha büyük çatlak haline gelmektedir.

Baradan vd., (2002) yaptıkları çalışmada sertleşmiş ve suya doymun haldeki bir beton don etkisinde kaldığında, çimento harcı içerisinde bulunan kapiler boşlukların bünyesinde bulunan su molekülleri donarak genişmeye başladığını ifade etmişlerdir. Çözünme işleminden sonra yaşanacak tekrar bir donma etkisi bu genişmeyi birikimli bir şekilde arttırmaktadır. Bu kümülatif işlemde kaynaklı; tekrarlı bir donma çözülme etkisinin, çözülmenin olmadığı uzun süreli bir donma etkisinden daha büyük hasarlara yol açacağı sonucu çıkarılabilir. Sertleşmiş beton içerisinde meydana gelecek karışım suyunun donma işlemi, oldukça zaman almaktadır. Meydana gelen bu donma hızı, ısının sahip olduğu transfer hızı, beton bünyesinde bulunan boşlukların çapı ve karışım suyu bünyesinde bulunan eriyiklerin özellikleri gibi değişik parametreler tarafından etkilenir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Volkanik tuf ve özellikleri

Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan volkanik tuf, Kapadokya ve civarında çıkarılan volkanik tuf, bazalt ve andezit gibi doğal taşların çıkarılıp işlendiği Böltaş Mühendislik'den temin edilmiştir. Elde edilen volkanik tuf, doğal halde irili ufaklı tanelerden oluştuğundan, bu malzemenin puzolanik reaktivitesini arttırmak için öncelikle 24 saat boyunca 105°C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuş ve daha sonra Portland çimentosu inceliğinde öğütülmüştür. Kullanılan volkanik tufün kimyasal bileşimi Çizelge 3.5'te verilmiştir. Şekil 3.9'da Nevşehir Yöresi'nde bulunan volkanik tuf rezervi gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Volkanik tufün kimyasal bileşimi

Bileşim (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
Volkanik Tuf	68.50	14.00	3.00	1.50	1.40	3.25	3.50	0.25	0.002



Şekil 3.9. Nevşehir Yöresi'nde bulunan volkanik tuf rezervi

3.1.3. Alkali aktivatörler

Çalışma boyunca alkali aktivatör olarak, NaOH ve Na₂SiO₃ kimyasalları kombinasyon oluşturacak şekilde kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan aktivatörlerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Sodyum hidroksit	Sodyum metasilikat
Molekül formülü	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Molekül kütlesi (g/mol)	40.00	122.06
Renk	Beyaz	Beyaz
pH	13-14	-
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2.13	1.38
Na ₂ O içeriği (%)	-	8.9
SiO ₂ içeriği (%)	-	28.7
H ₂ O içeriği (%)	-	64.8

3.1.4. Nano, mikro ve polimer katkıları

Çalışma kapsamında Ms ve NaOH kullanılarak iki farklı şekilde aktive edilen ve volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların fiziksel, mekanik ve geçirimsizlik özelliklerine farklı katkı tipi ve kullanım oranlarının etkisini incelemek amacıyla nano silika, mikro silika ve SB Lateks katkıları çeşitli oranlarda eklenmiştir. Karışımlarda kullanılan üç farklı katkı tipinin sahip olduğu özellikler Çizelge 3.7 – 3.9’ da verilmiştir.

Çizelge 3.7. Mikro silika özellikleri

SiO ₂ Oranı	Minimum %90
H ₂ O (Nem)	Maksimum %3
Kızdırma Kaybı	Maksimum %3.5
45 Mikron Üzeri tane yüzdesi	Maksimum %2.5
Hacim Yoğunluğu	0,25-0,35 kg/dm ³
BET	Minimum 15-28 m ² /gr

Çizelge 3.8. Nano silika özellikleri

Özellikler	Sınır Değerler
SiO ₂	Minimum %85
SO ₃	Maximum %2
Cl	Maksimum %0.3
Serbest CaO	Maksimum %1
Serbest Si	Maksimum %0.4
Kızdırma Kaybı	Maksimum %4
28. gündeki puzolanik aktivite indeksi	Minimum %100

Çizelge 3.9. Stiren Bütadien Lateks 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

3.1.5. Agregat

Normal betonda olduğu gibi geopolimer betonunda hacminin büyük bir bölümünü (%70-80) oluşturacak agregalar; çalışmada dere agregalarından seçilmiştir. Kullanılan agregaların tane dağılımı maksimum agregat tane boyutuna bağlı olarak TS 802 (2009)'de gösterilen ideal bölgeye uygun oluşturulmuştur. Karışımlarda

kullanılan maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak belirlenmiştir. Tane boyutu ayarlanırken, agregalar 2, 4 ve 8 mm elek çapına sahip eleklerden elenmiştir. Agregalar, 0-2, 2-4 ve 4-8 mm aralığa sahip olacak şekilde üç farklı tane sınıfına ayrılmıştır. 4-8 mm arasında tane büyüklüğüne sahip agregalar iri agrega, 0-4 mm arasına düşen agregalar ise ince agrega olarak değerlendirilmiştir.

3.1.6. Su

Geopolimer beton üretiminde kullanılan su İnönü Üniversitesi şebeke suyu olarak seçilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Karışım parametreleri dikkate alındığında, bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak yalnızca volkanik tüf kullanılmıştır. Volkanik tüf kullanılarak geopolimer beton üretmek amacıyla, alkali aktivatör olarak silis modülü dikkate alınarak NaOH ve Na₂SiO₃ kombinasyon halinde ve yalnızca NaOH kullanılarak numuneler iki temel grupta üretilmiştir. İki karışım grubu için, sıvı/bağlayıcı oranı 0,5 ve 0,6 olarak iki farklı şekilde alınmıştır. Tüm karışım seçenekleri için, agreganın tane dağılımı ise en büyük tane çapına bağlı olarak TS 706 EN 12620 (2003)'de verilen sınır değerler içinde kalacak şekilde oluşturulmuş ve bu granülometriye göre tane büyüklüğü oranları, 0-2 mm için %45, 2-4 mm için %25, 4-8 mm için %30 olarak belirlenmiştir.

3.2.2. Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi

Tüm geopolimer beton karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılan volkanik tüf dozajı 500 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Birinci grup karışımlarında, Ms değerleri

0,8 ve 0,6 olarak belirlenmiş ve buna göre kullanılan NaOH (10M) ve Na₂SiO₃ miktarları hesaplanmıştır. İkinci grup karışımlarında ise, aktivatör olarak sadece NaOH kullanılmış olup NaOH konsantrasyonları 10, 12, 14 ve 16 M olarak belirlenmiştir. Her iki grup karışım için değişen bu aktivatör miktarlarına bağlı olarak hacim hesaplanmış ve hesaplanan bu malzeme hacimleri 1 m³ değerinden çıkarılarak toplam agrega hacimleri bulunmuştur. Toplamda 12 farklı beton karışım hesabı yapılmış ve her bir betonun teorik taze birim hacim ağırlığı değerleri (TBHA) hesaplanmıştır. İki farklı w/b oranı, 6 farklı aktivatör tipi kullanılarak hesaplanan karışım oranları Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. 1 m³ beton üretimi için kullanılan malzeme miktarları, (kg/m³)

Karışım	Volkanik Tüf	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Su	Agrega			TBHA, (kg/m ³)
					0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	
10M - 0,6	500	-	85,72	214,28	551,4	319,1	390,58	2061,08
10M - 0,5	500	-	71,43	178,57	597,19	345,6	423,02	2115,81
12M - 0,6	500	-	97,3	202,7	558,05	322,95	395,28	2076,27
12M - 0,5	500	-	81,08	168,92	602,74	348,8	426,95	2128,48
14M - 0,6	500	-	107,69	192,31	564	326,38	399,48	2089,86
14M - 0,5	500	-	89,74	160,26	607,7	351,68	430,47	2139,84
16M - 0,6	500	-	117,07	182,93	569,38	329,5	403,31	2102,18
16M - 0,5	500	-	97,56	152,44	612,19	354,28	433,63	2150,09
0,8 SM - 0,6	500	190,52	31,3	78,25	557,25	322,48	394,72	2074,52
0,8 SM - 0,5	500	158,73	26,09	65,19	598,63	346,42	424	2118,84
0,6 SM - 0,6	500	163,66	38,85	96,95	548,47	317,4	388,5	2053,83
0,6 SM - 0,5	500	136,37	32,47	81,18	595,2	344,45	421,62	2111,29

Çizelge 3.11. Optimum karışım oranları belirlendikten sonra geopolimer betonlara eklenen katkı tip ve numune isimlendirilmesi

Numune İsmi	Katkı Oranı
K	Katkısız
N1	Bağlayıcı Ağırlığının %1'i oranında Nano Silis ilavesi
N2	Bağlayıcı Ağırlığının %2'si oranında Nano Silis ilavesi
N3	Bağlayıcı Ağırlığının %3'ü oranında Nano Silis ilavesi
M1	Bağlayıcı Ağırlığının %1'i oranında Mikro Silis ilavesi
M3	Bağlayıcı Ağırlığının %3'ü oranında Mikro Silis ilavesi
M5	Bağlayıcı Ağırlığının %5'i oranında Mikro Silis ilavesi
L5	Bağlayıcı Ağırlığının %5'i oranında Polimer Lateks ilavesi
L10	Bağlayıcı Ağırlığının %10'u oranında Polimer Lateks ilavesi
L15	Bağlayıcı Ağırlığının %15'i oranında Polimer Lateks ilavesi

3.2.3. Geopolimer beton üretim ve kür işlemi

Karışım oranları belirlendikten sonra geopolimer beton üretiminde kullanılacak malzemeler 1 g hassasiyete sahip terazide tartılmış ve mikserde karıştırılmıştır. Alkali aktivatörler ise, tüm karışımlar için, döküm anından 24 saat önce 5 dk süreyle karıştırılmış ve döküme 24 saat kala oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Üretilen beton numuneler $50 \times 50 \times 50$ mm³ boyutlarına sahip çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Numunelerin sertleştikten sonra kalıplardan kolayca çıkması için kalıp yüzeyleri yağlanmıştır. Numuneler yerleştirilirken, sıkıştırma işlemi hassasiyetle gerçekleştirilmiş ve bu işlem için beton numuneler tabaka tabaka dökülüp şişleme çubuğu ile sıkıştırma sağlanmıştır. Yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri sonucunda kalıp yüzeyleri mala yardımı ile düzeltilmiş ve numuneler 72 saat süre boyunca farklı sıcaklıklarda kür edilmek amacıyla etüve konulmuştur. Numuneler, yüksek sıcaklıklarda ısı kürüne maruz kalacağından, geopolimer betonun bünyesindeki suyun buharlaşmasını minimize etmek için numunelerin üzeri yanmaz

bir folyo ile kaplanmıştır. Kür süresinin ilk 24 saati sonrasında numunelerin yeterli sertleşmeyi sağladığı görülmüş ve numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler üzerinde 48 saatlik kür işlemine devam edilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. 50x50x50 mm³ boyutlarında üretilen geopolimer beton numuneler

3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışma kapsamında farklı aktivatör tipi ve konsantrasyonları ile birlikte farklı kür süreleri uygulanarak üretilen geopolimer betonların çeşitli mekanik ve geçirimsizlik özellikleri araştırılmıştır.

3.2.4.1 Basınç Dayanımı

Çeşitli parametreler kullanılarak üretilen volkanik tüf temelli geopolimer betonların basınç dayanımlarının belirlenmesi için ASTM C39 standartından yararlanılmıştır.

Deneye başlamadan önce basınç dayanımı test cihazının yükleme başlıklarının yüzeyleri silinmiş ve böylece kırım esnasında olumsuz etki yaratabilecek tane ve partiküller uzaklaştırılmıştır. Her bir basınç dayanım değeri elde etmek için, üç farklı numune kırılmış ve ortaya çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. 50x50x50 mm³ boyutlarına sahip küp numunelere yükün uygulama yönü beton döküm yönüne dik olarak belirlenmiştir.

Yükleme hızı, basınç dayanım test cihazına numune boyutları tanımlandığında otomatik olarak 3,40 kN/s olarak belirlenmiştir.

Basınç dayanımı değerleri, Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$F_c = P / A_s \quad (3.1)$$

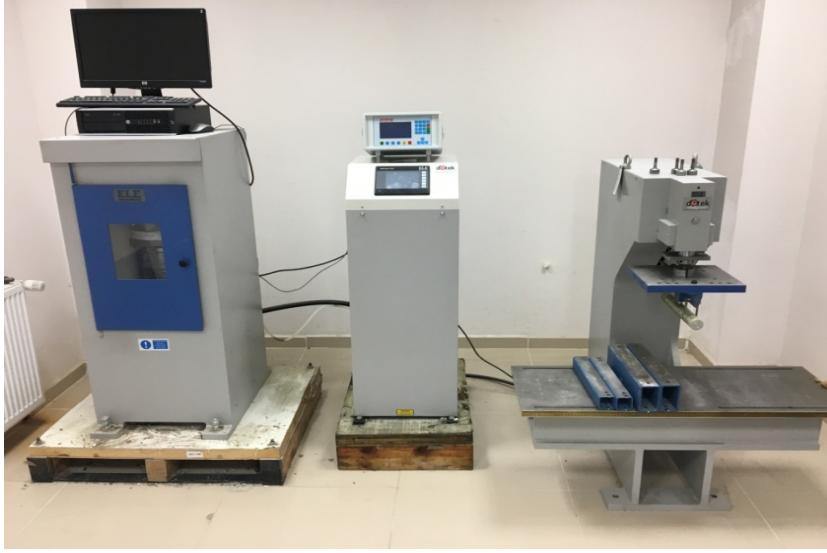
Burada;

F_c : Basınç dayanımı, MPa,

P : Numunenin kırılmadan taşıyabileceği maksimum yük, N,

A_s : Yükün uygulandığı yüzey alanı, mm². Bu alan, numunenin belirtilen ölçüleri kullanılarak (EN 12390-1), numune üzerinde ölçülen gerçek boyutlar kullanılarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, üretilen geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları elde edilmiştir. Şekil 3.11'de basınç dayanımı test cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11. Basınç Dayanımı Test Cihazı

3.2.4.2 Donma çözülme deneyi

Volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların içerisinde en yüksek basınç dayanımına sahip olan numuneler seçilmiş ve bu seçilen numunelere nano, mikro ve polimer lateks katkıları farklı konsantrasyonlarda eklenerek donma çözülme testine tabii tutulmuştur. DÇ testi yapılırken ASTM C 666 test metodundan yararlanılmış ve numuneler bu standartta belirlenen kuru DÇ yöntemi kullanılarak DÇ etkisine maruz bırakılmıştır. DÇ çevrimleri, bu standartta verilen Yöntem B'ye göre yapılmıştır.

Deneyde, numuneler yine -18°C sıcaklık değerinde soğutulup, $+4^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ısıtılmıştır. Bu DÇ döngüleri bir çevrim olarak 4 saat sürmüş ve DÇ testi kuru yöntem olarak 300 döngü yapılmıştır. Deneylerde, çözülme hızının bir saati geçmemesi sağlanmıştır. Şekil 3.12'de DÇ test cihazının görüntüsü verilmiştir. ASTM C 666 standardında belirtildiği gibi, DÇ etkisine maruz bırakılan numunelerin dayanıklılığı BDEM değerleri hesaplanarak belirlenebilmektedir. Denklem 3.2 kullanılarak BDEM değerleri her 30 çevrimde bir hesaplanmıştır.

$$P_c = (n_c^2/n^2) * 100 \quad (3.2)$$

Burada;

P: c çevrim sonunda hesaplanan BDEM değeri, (%)

n: DÇ öncesinde ölçülen ultrases hız değeri, (m/s)

n_c: c çevrim sonunda ölçülen ultrases hız değeri, (m/s)

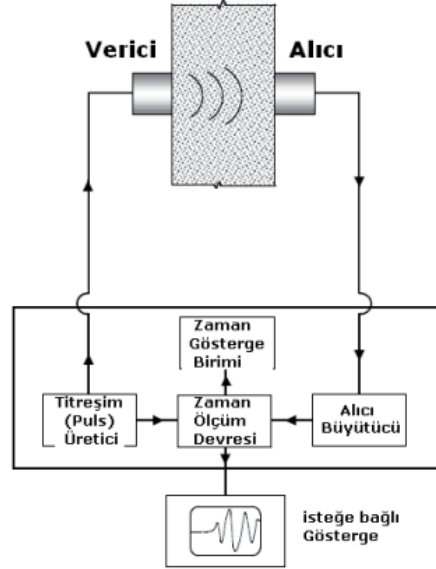


Şekil 3.12. Donma Çözülme Test Cihazı

3.2.4.3 Ultrasonik Hız Ölçümü (UPV)

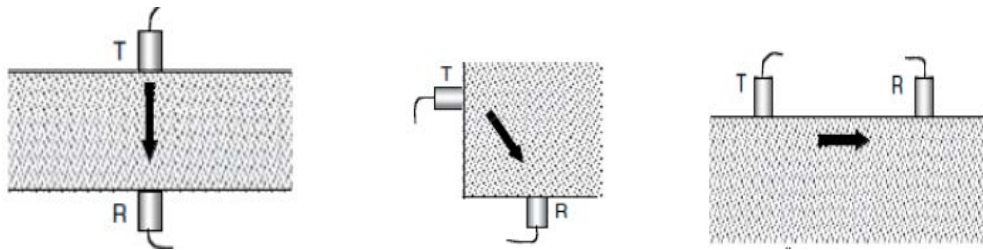
Mekanik dalgaların elektrik titreşimlere (puls) dönüşümü ve elektrik titreşimlerin mekanik titreşimlere dönüşümü Ultrasonik testlerin temelidir. Piezelektrik vericiler bu işlemde temel görevi yüklenirler. UPV test cihazı beton numunelerde bir verici ile dalga titreşimi oluşturarak, alıcı ile titreşimin varışını algılar. Böylece beton boyunca seyahat eden titreşimin seyahat süresini hassas biçimde ölçebilmektedir. Öte yandan

UPV test aleti bir osiloskopa bağlandığında titreşimin doğası hakkında da bilgi sahibi olmak mümkün olmaktadır. UPV test cihazının numuneler üzerindeki çalışma prensibi Şekil 3.13’de gösterilmiştir (Özçeğ vd., 2012).



Şekil 3.13. UPV test cihazının çalışma prensibi

UPV test cihazı kullanılarak beton numunelerinde doğrudan ölçüm, yarı doğrudan ölçüm ve dolaylı ölçüm olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Şekil 3.14’te bu yöntemler gösterilmiştir. Şekillerde görülen T kutupları vericiyi, R kutupları ise alıcıyı temsil etmektedir.

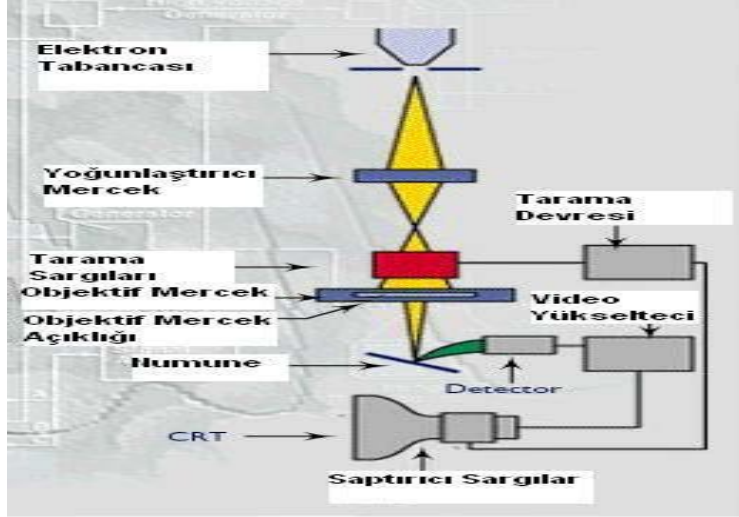


Şekil 3.14. UPV ölçüm yöntemleri

3.2.4.4 Mikroyapı analizi (SEM Ölçüm Metodu)

Numunelerin mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinde SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer beton numuneleriyle ilgili mikroyapı görüntüleri Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

İnsan gözünün malzemeler içerisinde bulunan çok küçük ayrıntıları görme kapasitesinin oldukça sınırlı olması nedeniyle, görüntü iletimi sağlayan ışık yollarının merceklerle değiştirilerek, daha küçük detayları görmemize olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Fakat bu optik cihazlar ile elde edilen görüntülerin büyütme miktarlarının sınırlı bir düzeyde olması ve çıktı sağlanan görüntüler üzerinde farklı işlem yapılma olanağının olmayışı, bilim adamlarını farklı sistemler araştırma ve geliştirmeye yöneltmiştir. Bu arayış sonucunda, 1930'lu yıllarda Manfred von Ardenne öncülüğünde geliştirilen taramalı elektron mikroskobu veya SEM (Scanning Electron Microscope), yüksek enerjiye sahip elektronlar yardımıyla malzeme bünyesindeki çok küçük alanlara odaklanmıştır. SEM, birçok dalda araştırma-geliştirme uygulamalarında kullanımının yanı sıra, mikro elektronikte yonga üretiminde, endüstriyel faaliyetlerin farklı alanlarında meydana gelen hata analizlerinde, temel bilimlerde, tıp ve kriminal uygulamalarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ticari olarak ilk kez 1965 yılında kullanılan SEM tekniğinde meydana gelen değişimler yıllar geçtikçe artış göstermiştir. Şekil 3.15'te SEM aletinin çalışma prensibi gösterilmiştir. SEM analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Merkezinde yapılmıştır.



Şekil 3.15. SEM'in şematik görünüşü

3.2.4.5. Su Emme

Beton yapı elemanlarının emmiş oldukları su miktarını ağırlık oranınca ifade eden deney yöntemidir. Su emme değerinin hesaplanması Denklem 3.3'de verilmiştir.

$$S_a = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada;

S_a: Ağırlıkça emilmiş su miktarı, (%)

P₁: Numunenin Su Emdirilmiş Ağırlığı, (gr)

P₀: Numunenin Kuru Ağırlığı, (gr)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışma, volkanik tuf kullanılarak üretilen geopolimer betonların farklı alkali aktivatör tip ve konsantrasyonları ile aktive edildikten sonra maruz bırakıldıkları çeşitli kür sıcaklıklarının, üretilen beton numunelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelendiği kapsamlı deneysel veri sunmaktadır.

Aktivatör tipi ve konsantrasyonlarına bağlı olarak birinci grup numuneler NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılarak silis modülüne (Ms) göre, ikinci grup numuneler de yalnız NaOH kullanılarak (farklı konsantrasyonlarda) üretilmiştir. İki grup olarak üretilen beton numuneler, dökümden sonra 72 saat boyunca farklı sıcaklık değerlerinde kür edilmiş ve basınç dayanımlarına göre en iyi dayanımları veren numuneler üzerine farklı oranlarda nano silika, mikro silika ve SB Latex polimer katkısı ilave edilmiştir. Temelde iki grup olarak üretilen geopolimer betonların her iki grup için basınç dayanımları 3, 7, 28 ve 90. günlerde ölçülmüştür. Ms kullanılarak aktive edilen birinci grup numuneler üretimi takip eden 72 saatlik süre boyunca 90°C, 105°C ve 120°C' lik sıcaklıklarda ısı kürüne maruz bırakılmıştır. Alkali aktivatör olarak yalnızca NaOH (10, 12, 14, 16 M) kullanılarak üretilen ikinci grup geopolimer beton numuneleri de 72 saat boyunca 90°C, 120°C ve 150°C 'lik kür sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Her iki grup numuneler için de w/b oranı 0,5 ve 0,6 olarak seçilmiştir.

Maksimum basınç dayanımına sahip olan her iki grup numunelerine bağlayıcı madde ağırlığının belirli oranlarında nano silika (%1, 2, 3) , mikro silika (%1, 3, 5) ve SB Latex polimer katkısı (%5, 10, 15) farklı oranlarda eklenmiş ve bu şekilde üretilen geopolimer beton numunelerin, basınç dayanımı, donma çözülme direnci, mikro yapıları, su emme ve yoğunluk değerleri gibi farklı özellikleri incelenmiştir.

Volkanik tuf kullanılarak üretilen geopolimer beton numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları aşağıda verilmiş ve detaylı olarak irdelenmiştir.

4.1. Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı

Farklı Ms değerleri ve yalnızca NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonların basınç dayanımlarının farklı kür sıcaklıkları ve w/b oranları etkisindeki değişimleri incelenmiştir.

4.1.1. Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımına silis modülünün (Ms) etkisi

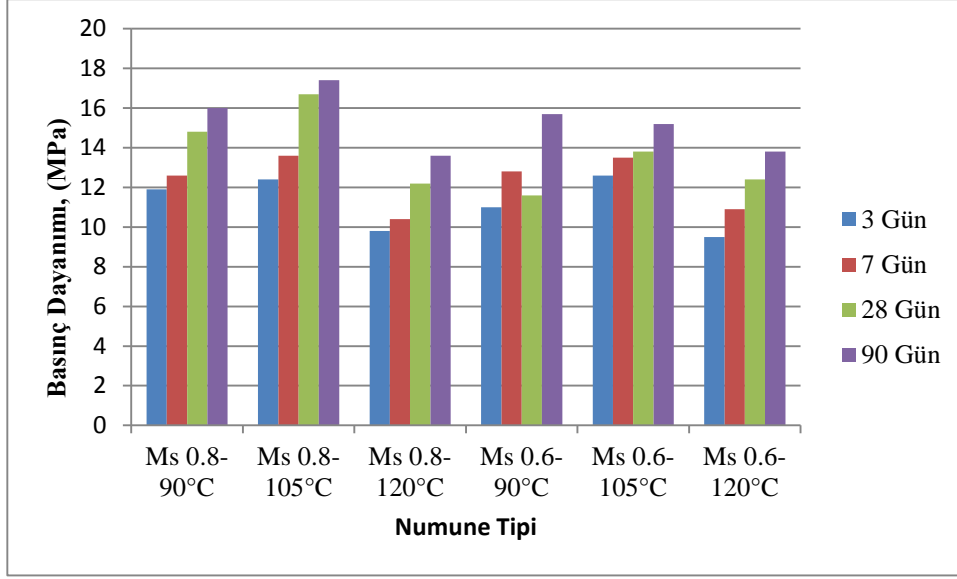
0,8 ve 0,6 olarak iki farklı silis modülüne (Ms) sahip karışımlar hazırlanmış ve bu şekilde üretilen numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Ms kullanılarak üretilen birinci grup geopolimer betonların farklı günlerdeki basınç dayanımları Çizelge 4.12’de verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, maksimum basınç dayanımları bütün test günleri için Ms 0,8, w/b oranı 0,6 olan 105 °C sıcaklıkta kür işlemine tabii tutulan numunelerde gözlenmiştir. Maksimum basınç dayanımına sahip bu numuneler için kür sıcaklığının 120°C’ye yükselmesi basınç dayanımının %20 oranında azalmasına sebep olmuştur.

Öte yandan, kür sıcaklığının 90°C’den 105°C’ye çıkması numunelerin basınç dayanımını arttırırken, sıcaklığın 120°C’ye kadar çıkması tüm geopolimer betonların basınç dayanımının düşmesine neden olmuştur. Ortaya çıkan bu sonuç, gerçekleşecek geopolimerizasyon reaksiyonu için optimum sıcaklığın 105°C olduğunu, ve bu sıcaklık değerinden sonra artan sıcaklığın geopolimer betonun iç yapısında olumsuz etkilere yol açtığını göstermiştir.

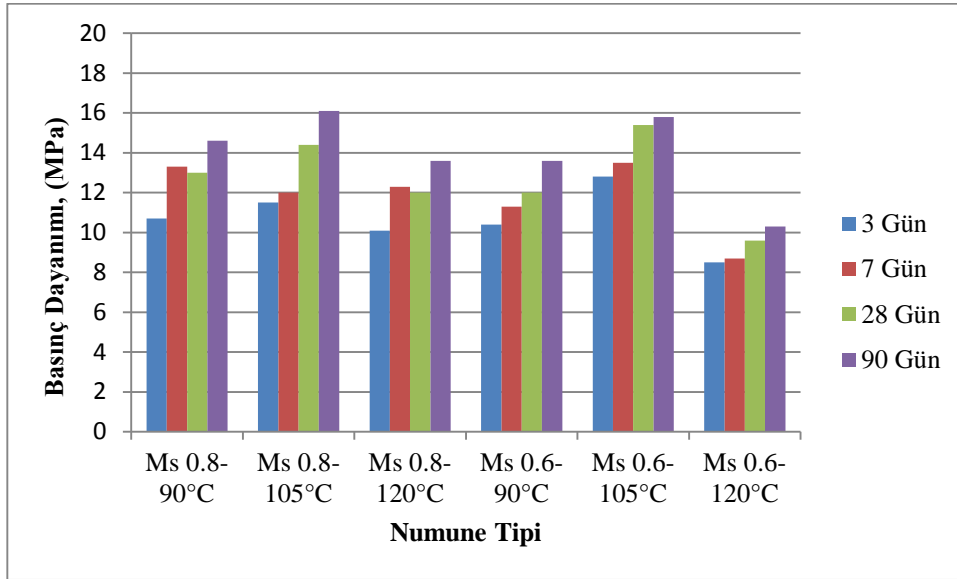
Çizelge 4.12. Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı

Ms	w/b	Kür Sıcaklığı, (°C)	Basınç Dayanımı, (MPa)			
			3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
0,8	0,6	90	11.9	12.6	14.8	16.0
		105	12.4	13.6	16.7	17.4
		120	9.8	10.4	12.2	13.6
	0,5	90	10.7	13.3	13.0	14.6
		105	11.5	12.0	14.4	16.1
		120	10.1	12.3	12.0	13.6
0,6	0,6	90	11.0	12.8	11.6	15.7
		105	12.6	13.5	13.8	15.2
		120	9.5	10.9	12.4	13.8
	0,5	90	10.4	11.3	12.0	13.6
		105	12.8	13.5	15.4	15.8
		120	8.5	8.7	9.6	10.3

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, Ms 0,8 ve 0,6 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların basınç dayanımı grafikleri incelendiğinde, tüm geopolimer betonların nihai dayanımlarının oldukça büyük bir kısmını ilk 3 gün uygulanan ısı kürü sonucunda aldığı görülmüştür. Numune yaşının artmasıyla birlikte basınç dayanımı değerlerinin neredeyse tümü artış göstermiştir. Ms değerinin 0,8’den 0,6’ya düşmesi w/b oranı 0,6 ve 0,5 olan geopolimer betonarda sırasıyla yaklaşık %13 ve %2 oranında basınç dayanımı kayıplarına yol açmıştır.



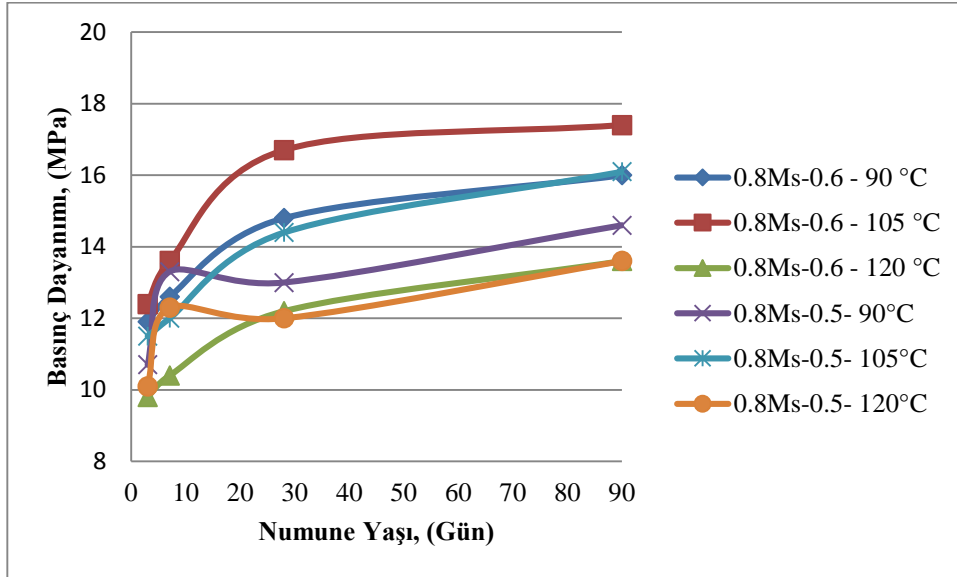
Şekil 4.16. Ms 0,8 ve 0,6 kullanılarak aktive edilen w/b oranı 0,6 olan geopolimer betonların farklı kür sıcaklıklarındaki basınç dayanımlarına kür süresinin etkisi



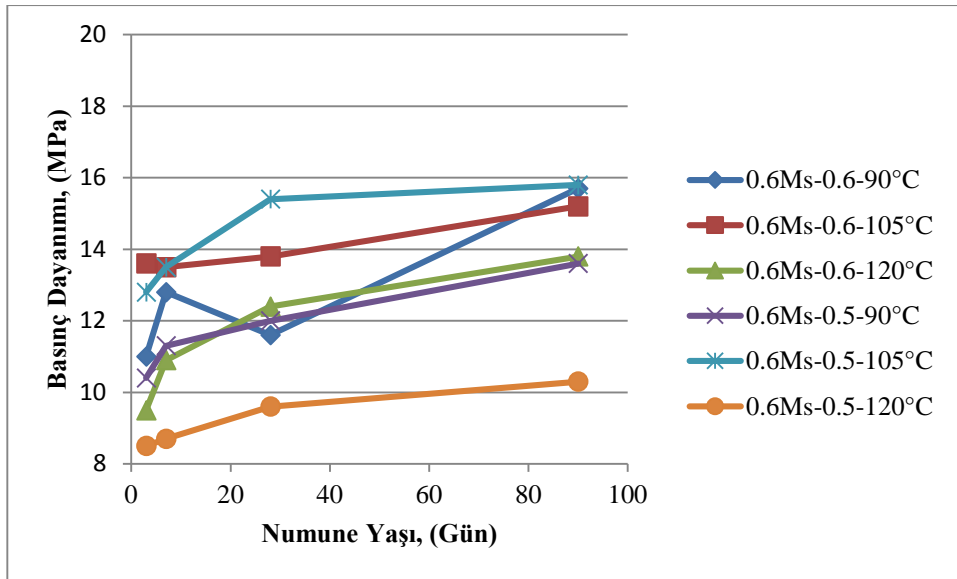
Şekil 4.17. Ms 0,8 ve 0,6 kullanılarak aktive edilen w/b oranı 0,5 olan geopolimer betonların farklı kür sıcaklıklarındaki basınç dayanımları

Şekil 4.18 ve 4.19’da Ms 0,8 ve 0,6 kullanılarak üretilen geopolimer betonların numune yaşının artmasıyla birlikte sahip olduğu basınç dayanımı değerlerindeki değişimleri göstermektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonlar sahip olacağı nihai dayanımlarının çok büyük bir kısmını üç günlük ısı kürü sonucunda almış ve ısı küründen çıkarılıp

laboratuar ortamında beklemesiyle birlikte az da olsa dayanım kazanmaya devam etmiştir. Şekil 4.18’de Ms 0,8 kullanılarak üretilen ve w/b oranları 0,5 olan numunelerin dayanımlarında zayıf bir düşüş yaşanmış fakat 28 günden sonra tekrar dayanım kazanmaya devam etmiştir.



Şekil 4.18. Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların dayanım kazanmasına farklı kür sıcaklıklarının etkisi



Şekil 4.19. Ms 0,6 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların dayanım kazanmasına farklı kür sıcaklıklarının etkisi

Elde edilen basınç dayanımındaki değişiklikleri gösteren grafikler incelendiğinde farklı parametreler kullanılarak üretilen birinci grup numuneleri için; optimum değerler; Ms değeri için 0,8, w/b oranı için 0,6 ve kür sıcaklığı için 105 °C olarak belirlenmiştir.

Noushini vd., (2016) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanılarak ürettikleri geopolimer betonları 60, 75, 90 °C sıcaklıklar ile ortam koşullarında kür işlemine tabii tutmuş ve kür sürelerinin etkisini 8, 12, 18 ve 24 saat olmak üzere dört farklı sürede incelemişlerdir. Deney sonuçları, kür sıcaklığının artmasıyla birlikte basınç dayanımlarında artış yaşandığını göstermiş ve bu artışın nedeninin yüksek sıcaklıklarda meydana gelen geopolimerizasyon reaksiyonunun derecesinin artmasıyla, daha çok miktarda reaksiyon ürünlerinin oluşumu olduğunu açıklanmıştır.

Benzer şekilde Rovnanik, (2010) tarafından yapılan çalışmada, gerçekleştirilen kızılötesi spektrometrik analiz yardımıyla geopolimer beton numunelerine uygulanan kür rejimine bakılmaksızın beton matrisi içerisinde bazı alüminosilikat kaynak materyallerinin reaksiyona girmeden kaldığı açığa çıkmıştır. Ayrıca, geopolimer betonlara uygulanacak daha yüksek kür sıcaklığının reaksiyona girmeyecek bu kaynak materyallerinin miktarında ciddi oranlarda azalmaya neden olacağı belirtilmiştir.

Ayrıca, Rovnanik (2010) ileri zamanlarda meydana gelecek geopolimerizasyon reaksiyonunun hızının aktivatör olarak kullanılan hidroksit ve silikat iyonlarının geopolimer jel üzerinden oluşan difüzyonundan önemli derecede etkilendiğini ve oluşacak bu hızın başlangıçta uygulanan kür sıcaklığından çok önemli derecede etkileneceğini belirtmiştir.

Benzer şekilde Brough ve Atkinson, (2002) yaptıkları çalışmada cüruf kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerini 12 saat boyunca 20 ve 80°C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta ısı kürüne maruz bırakmışlardır. Alkali aktivatör olarak sadece Na₂SiO₃' ün kullanıldığı çalışmada elde edilen basınç dayanımı değerleri kür sıcaklığının 20°C 'den 80°C değerine artışının basınç dayanımını 7 MPa'dan yaklaşık 70 MPa değerine kadar arttırdığını göstermiştir.

Kür sıcaklığında meydana gelen artışın geopolimer betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilemesinin yanı sıra, Noushini ve Castel, (2016) yaptıkları çalışmada uzun süren kür süreleri için (8, 12, 18 ve 24 saat), elde edilen maksimum basınç dayanımının en yüksek kür sıcaklığı olan 90°C' de değil, 75°C değerinde elde edildiğini belirtmiştir. Uzun kür sürelerinde uygulanan yüksek kür sıcaklıkları geopolimer betonun mikro yapısını zayıflatarak daha düşük basınç dayanım değerlerine yol açtığı söylenmiştir.

Yuan vd., (2016) kür sıcaklığının, geopolimerlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde hayati bir rol oynadığını ve optimum bir kür sıcaklığı uygulamanın, geopolimerlerde kompakt bir yapının oluşarak mekanik özelliklerin artışına katkıda bulunan dehidroksilasyon ve yapısal yeniden düzenleme işlemleri ile geopolimerizasyon işlemini hızlandırdığını ifade etmiştir.

Wang vd., (1994) yaptıkları çalışmada aktivatör dozajı ve silis modülünün geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerinde çok önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, mekanik özellikler üzerinde etkili olan parametrelerin olması gereken optimum aralığın cüruf türüne bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir. Bu aralığın, asit türdeki cüruflar için 0,75-1,25, nötr özellik gösteren cüruflar için 0,90-1,30 ve temel cüruf için 1-1,5 arasında olduğunu söylemişlerdir.

4.1.2. Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımına NaOH molaritesinin etkisi

Dört farklı NaOH molaritesi kullanılarak aktive edilen, iki farklı w/b oranı ve üç farklı kür sıcaklığı kullanılarak üretilen ikinci grup geopolimer betonlar üzerinde yapılan basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13’den görüleceği gibi yalnız NaOH kullanılarak üretilen ikinci grup numunelerde gözlenen optimum koşullar; 12 M NaOH konsantrasyonu, 0,6 w/b oranı ve 90 °C kür sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Şekil 4.20 ve 4.21’den görüleceği gibi, numune yaşının artması ile birlikte basınç dayanımlarında artış görülmüş fakat tüm geopolimer beton numunelerinde ilk üç günlük ısı kürü sonucunda betonun nihai dayanımının büyük bir bölümünü aldığı görülmüştür.

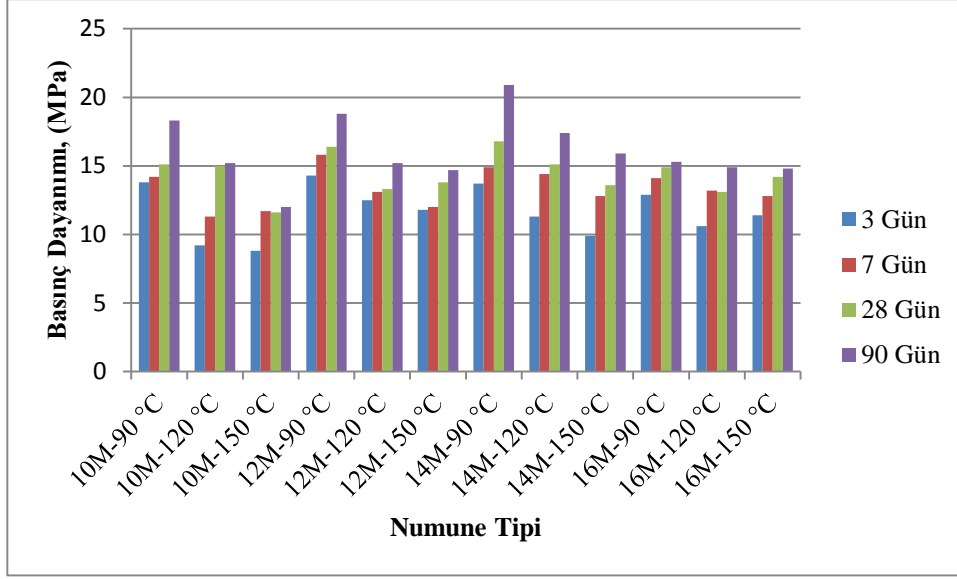
Benzer şekilde, Haddad ve Alshbuol (2016) yaptıkları çalışmada, Ürdün doğal puzolanı kullanılarak üretilen geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, numunelerin üç günlük kür süresinde ulaşacağı erken dayanımın, nihai dayanımlarının % 70’ini aştığını göstermiştir.

Çizelge 4.13. Farklı NaOH konsantrasyonları ve kür sıcaklıklarına bağlı basınç dayanımları

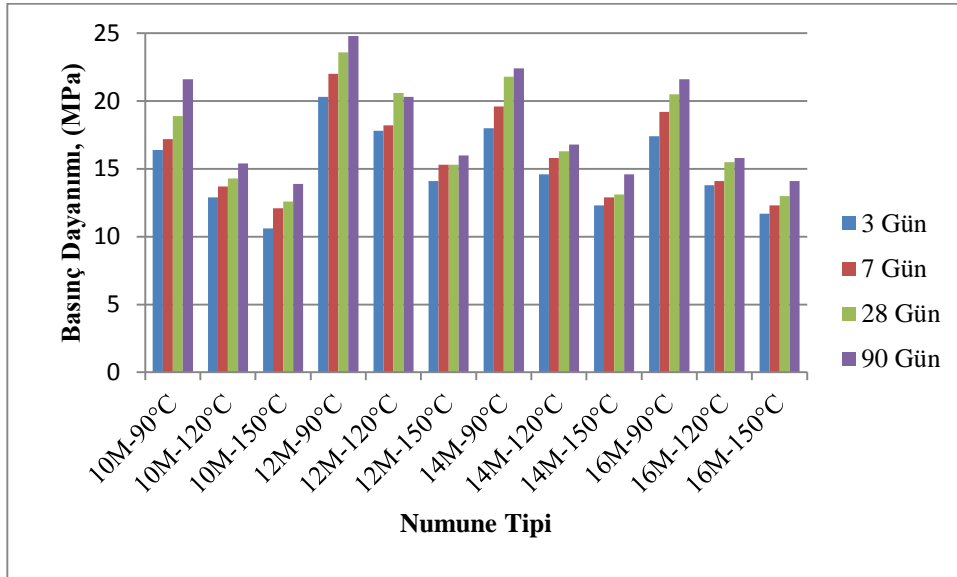
NaOH Konsantrasyonu, (M)	w/b	Kür Sıcaklığı, (°C)	Basınç Dayanımı, (MPa)			
			3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
10	0,6	90	16.4	17.2	18.9	21.6
		120	12.9	13.7	14.3	15.4
		150	10.6	12.1	12.6	13.9
	0,5	90	13.8	14.2	15.1	18.3
		120	9.2	11.3	15.0	15.2
		150	8.8	11.7	11.6	12.0
12	0,6	90	20.3	22.0	23.6	24.8
		120	17.8	18.2	20.6	20.3
		150	14.1	15.3	15.3	16.0
	0,5	90	14.3	15.8	16.4	18.8
		120	12.5	13.1	13.3	15.2
		150	11.8	12.0	13.8	14.7
14	0,6	90	18.0	19.6	21.8	22.4
		120	14.6	15.8	16.3	16.8
		150	12.3	12.9	13.1	14.6
	0,5	90	13.7	14.9	16.8	20.9
		120	11.3	14.4	15.1	17.4
		150	9.9	12.8	13.6	15.9
16	0,6	90	17.4	19.2	20.5	21.6
		120	13.8	14.1	15.5	15.8
		150	11.7	12.3	13.0	14.1
	0,5	90	12.9	14.1	14.9	15.3
		120	10.6	13.2	13.1	14.9
		150	11.4	12.8	14.2	14.8

Şekil 4.20 ve 4.21, w/b oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımında artış meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum kullanılan aktivatör miktarı ile volkanik tüf ham maddesi arasında bir denge bulunması gerektiği, aksi halde w/b oranının düşmesiyle reaksiyona girmeyecek ham madde miktarının artacağı şeklinde açıklanabilir. Maksimum basınç dayanımının 12 M NaOH ile aktive edilen geopolimer beton numunelerinde görülmesi, geopolimerizasyon için yeterli alkali koşulların 12 M NaOH çözeltisi ile sağlandığını göstermiştir. 12 M NaOH' dan daha yüksek molarite değerlerinde NaOH kullanılması alkaliniteyi çok fazla yükselterek, basınç dayanımlarını düşürmüştür. Benzer şekilde Yuan vd., (2016) alkalinitenin, Si ve Al fazlarının metakaolinden çözünme hızını arttırarak geopolimerizasyon işlemini arttırdığını ancak son derece yüksek alkalinite değerinin ise geopolimerizasyon reaksiyonunun oluşumuna engel olarak malzemenin daha düşük bir dayanıma neden olacağını belirtmiştir.

Öte yandan, Şekil 4.20 ve 4.21' de görüldüğü gibi, kür sıcaklığı değerlerinde yaşanan artış basınç dayanımlarını düşürmüştür. Bu durum, NaOH ile aktive ve volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda meydana gelecek geopolimerizasyon reaksiyonu için optimum kür sıcaklığının 90 °C olduğunu ve bu değerden yükseklere çıkıldıkça, artan sıcaklığın mikro yapılarda bozulmalara neden olarak basınç dayanımında düşüş olacağı şeklinde açıklanabilir.



Şekil 4.20. Farklı NaOH konsantrasyonları ve kür sıcaklıklarının w/b oranı 0,5 olan geopolimer betonların basınç dayanımına etkisi



Şekil 4.21. Farklı NaOH konsantrasyonları ve kür sıcaklıklarının w/b oranı 0,6 olan geopolimer betonların basınç dayanımına etkisi

Posi vd., (2015) yaptıkları çalışmada C sınıfı uçucu kül temelli geri dönüştürülmüş ambalaj köpüğü içeren hafif geopolimer betonların özelliklerini incelemişlerdir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 0,33'ten 3 değerine kadar değiştiği, NaOH konsantrasyonunun 5 ile 15 M arasında seçildiği ve kür sıcaklığının 25°C ve 60°C olarak uygulandığı çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ değerinin 0,33'ten 1'e kadar artışının

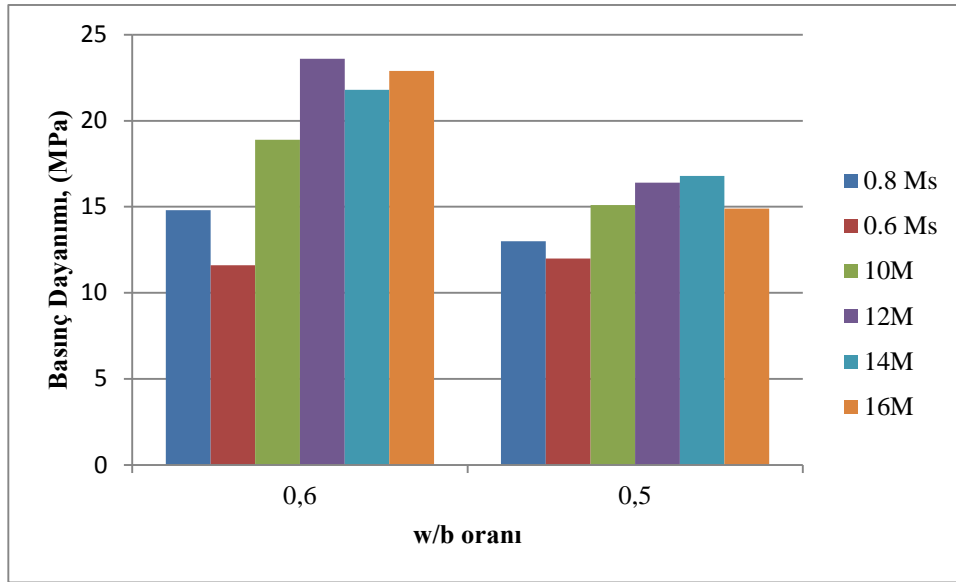
geopolimer betonların yoğunluklarında artışa sebep olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni, Na_2SiO_3 'ün yoğunluğunun NaOH'den daha yüksek olmasıdır. Deney sonuçları, NaOH konsantrasyonunun geopolimer betonların basınç dayanımı üzerinde kuvvetli bir etkisinin bulunmadığını, 10 M NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların basınç dayanımının 5 ve 15 M NaOH kullanılarak aktive edilen betonlardan biraz yüksek olduğu belirtilmiştir. NaOH konsantrasyonunda meydana gelen artışın, ham maddenin bünyesinde bulunan silis ve alüminin çözünmesi işlemine yardımcı olarak geopolimerizasyon işlemini hızlandırdığı belirtilmiştir. 10 ve 15 M arasında meydana gelen NaOH molaritesindeki yükselme basınç dayanımında herhangi bir artışa neden olmamıştır. Ayrıca geopolimer betonların basınç dayanımlarına kür sıcaklığının etkisini incelemek amacıyla numuneler 25, 40 ve 60°C sıcaklıklarda kür edilmiş ve geopolimerizasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için gerekli optimum sıcaklığın 40°C olduğu gözlenmiştir.

Basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında, Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlar farklı sıcaklıklarda ve w/b oranlarında üretilmiş, sonuç olarak birinci ve ikinci grup numuneler içerisinde maksimum basınç dayanımına sahip olan numuneler seçilerek bu numunelere farklı oranlarda nano silika, mikro silika ve SB Lateks katkısı ilave edilerek tekrar bir basınç dayanım testi yapılmıştır.

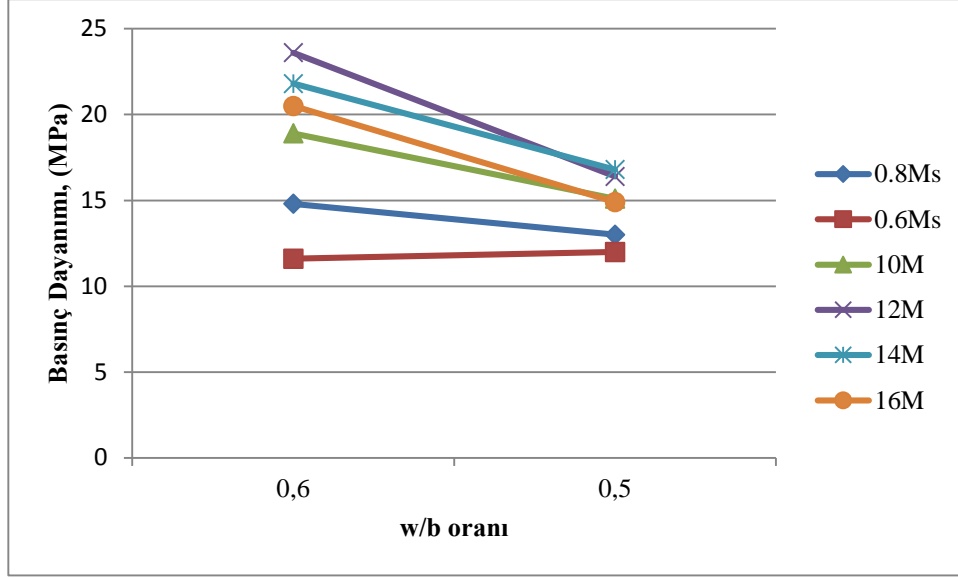
4.1.3. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların basınç dayanımına w/b oranının etkisi

Ms 0,6 kullanılarak aktive edilen birinci grup numuneler haricinde, diğer tüm numunelerde w/b oranının 0,6 değerinden 0,5'e düşmesi basınç dayanımlarını düşürmüştür. Fakat, Ms 0,6 numuneleri için w/b oranının düşmesi basınç dayanımlarında artışa neden olmuştur. Bu durum; Ms değerinin düşmesiyle birlikte Na_2SiO_3 miktarında meydana gelen azalmanın, geopolimerizasyon reaksiyonu için yeterli olmadığına işaret etmektedir. Öte yandan, Şekil 4.22 ve 4.23'te, NaOH kullanılarak aktive edilen ikinci grup numunelerinin basınç dayanımının, farklı w/b

oranlarında Ms kullanılarak üretilen birinci grup numunelerin basınç dayanımından daha yüksek çıktığı görülmüştür. Şekil 4.22 ve 4.23'te görüldüğü gibi, 0,6 w/b oranına sahip numunelerde maksimum basınç dayanımı 12 M NaOH aktivatörü ile elde edilirken, 0,5 w/b oranı kullanılarak üretilen numunelerde maksimum basınç dayanımı 14 M NaOH konsantrasyonu ile elde edilmiştir. Bu durum, beton karışımında aktivatör miktarının azalması halinde, geopolimerizasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için daha yüksek alkali ortama ihtiyaç duyulduğunun göstergesidir. w/b oranının değişmesiyle birlikte, farklı aktivatör tiplerinin gösterdiği davranışlara bakıldığında sadece NaOH kullanılarak üretilen ikinci grup numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen azalma Ms kullanılarak üretilen birinci grup numunelerine göre çok fazladır.



Şekil 4.22. w/b oranı 0,6 ve 0,5 olan 90°C sıcaklıkta kür edilmiş geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.23. 90°C sıcaklıkta kür edilmiş geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımına w/b oranının etkisi

Değişen w/b oranlarının etkisiyle geopolimer betonların basınç dayanımında gözlenen değişiklikler, geopolimer beton üretiminde kullanılacak alkali sıvılar ile puzolanik malzemeler arasında miktar bakımından belirli bir dengenin sağlanması gerektiğinin ve w/b oranının düşük olması halinde reaksiyona girmeyecek katı tanecik miktarının arttığına göstergesidir.

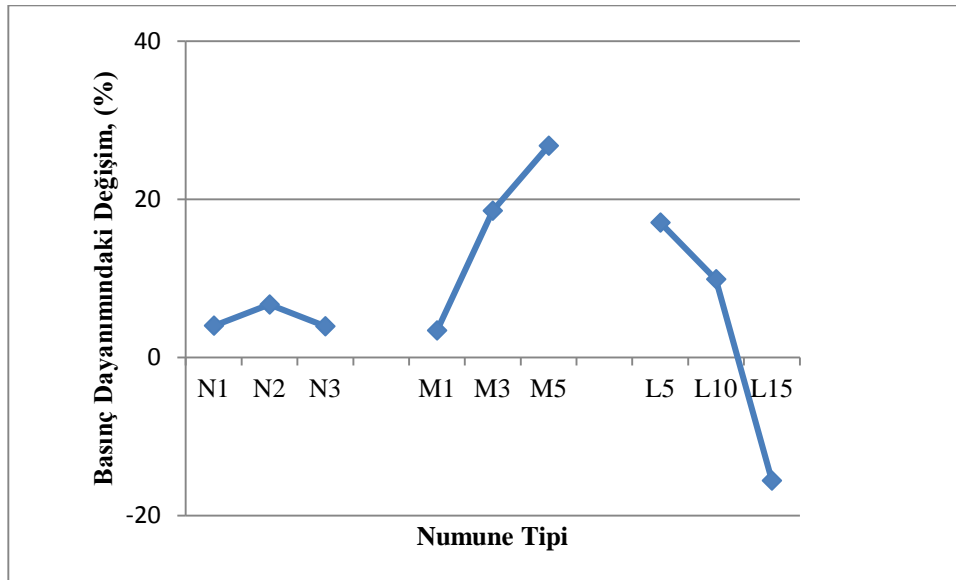
Benzer şekilde Haddad ve Alshbuol, (2016) yaptıkları çalışmada, Ürdün doğal kullanılarak üretilen geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımı üzerinde alkali w/b oranının önemli bir etkisi olduğunu belirtmiştir. w/b etkisini incelemek amacıyla numuneler, 0,30 ve 0,45 w/b oranlarında üretilmiştir. Ayrıca maksimum basınç dayanımının 0,45 w/b oranında elde edildiği görülmüştür. Sonuçlar, w/b oranının artışıyla birlikte reaksiyona girmeyen ham madde miktarının azalarak gözenek oluşumunun minimize edildiği ve bunun da basınç dayanımında artışa neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

4.1.4. Ms 0,8 ve yalnız NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların basınç dayanımına farklı katkı tiplerinin etkisi

Ms 0,8 ve 0,6 kullanılarak aktive edilen, farklı kür sıcaklıkları ve w/b oranları ile üretilmiş geopolimer betonlar arasından maksimum basınç dayanımına sahip olan; Ms 0,8, w/b oranı 0,6 olan ve 105°C sıcaklıkta kür edilmiş numunelere eklenen farklı tip ve oranlardaki katkıların, geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımlarına etkisi Çizelge 4.14, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilmiştir. Çizelge 4.14'den de görüleceği gibi %2'ye kadar artan nano silika ilavesi basınç dayanımını arttırırken, %3 nano silika ilavesinin basınç dayanımında küçük bir oranda azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Öte yandan, mikro silika ilavesinin artması geopolimer betonların basınç dayanımında artışa yol açmıştır. Diğer bir katkı tipi olan SB Lateks kullanımına gelince, %5 ve 10 oranında SB Lateks katkısının, katkısız geopolimer betonlara göre basınç dayanımını önemli bir derece arttırdığı görülmüştür. Fakat %15 oranında kullanılan SB Lateks ilavesinin katkısız geopolimer betonların basınç dayanımında yaklaşık %15 civarında bir düşüşe neden olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.24'te katkılı geopolimer betonların, katkısız numunelere göre basınç dayanımlarında meydana gelen değişiklikler incelenmiş ve maksimum basınç dayanımına sahip olan numunenin M5 (% 27 oranında artış), minimum basınç dayanımına sahip numunenin ise L15 (% 15 oranında bir azalma) olduğu görülmektedir. Mikro ve nano silika ilavelerinin basınç dayanımlarına etkisi incelendiğinde, mikro silika ilavesinin kullanılmasıyla elde edilen maksimum basınç dayanımı (M5) katkısız betona göre yaklaşık %27 oranında bir artış gösterirken, nano silika ilavesi ile elde edilen maksimum basınç dayanımı katkısız numuneye göre yaklaşık % 6 oranında bir artış sağlamıştır. Bu değerler, mikro silika ilavesinin nano silika ilavesine kıyala basınç dayanımı açısından çok daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, sabit w/b oranı kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda yüksek yüzey alanına sahip nano silika kullanımının daha fazla alkali sıvıya ihtiyaç duyduğunu ve nano silika kullanımıyla birlikte reaksiyona girmeyen katkı miktarının arttığını göstermektedir.

Çizelge 4.14. Ms 0,8, w/b oranı 0,6, 105°C’ de kür edilmiş numunelerin basınç dayanımlarına farklı katkıların etkisi

Katkı Tipi	28 Günlük Basınç Dayanımı, (MPa)	
	Ms 0,8-0,6-105°C	12 M NaOH-0,6-90°C
K	16.70	23.60
N1	17.37	25.10
N2	17.82	26.20
N3	17.36	24.00
M1	17.27	24.80
M3	19.80	26.60
M5	21.17	23.90
L5	19.55	24.00
L10	18.35	21.00
L15	14.10	19.90



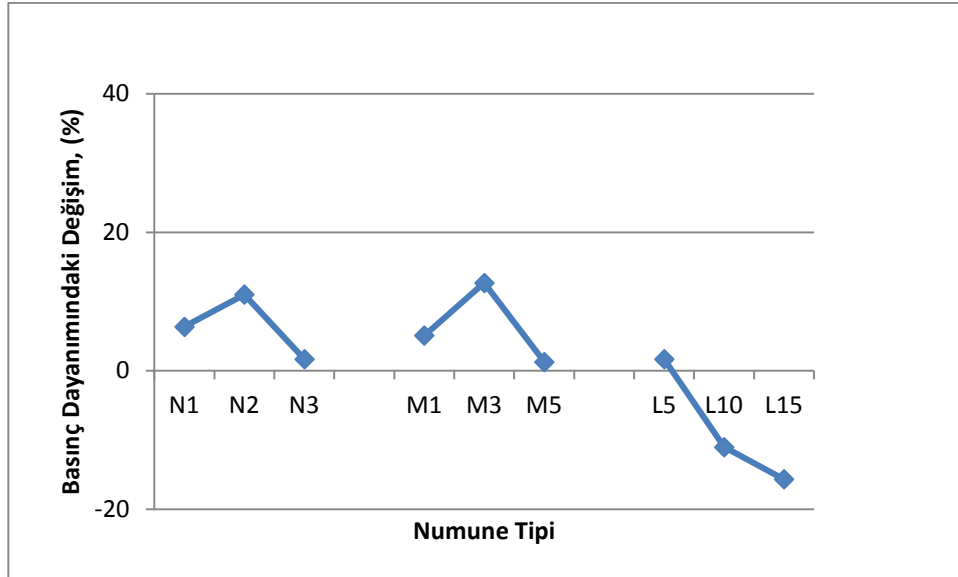
Şekil 4.24. Ms 0.8 kullanılarak aktive edilmiş farklı katkı tipi ve oranlarının katkısız geopolimer betonlara göre 28 günlük basınç dayanımlarındaki değişim

Elde edilen deney sonuçlarıyla benzer şekilde, Deb vd., (2015) uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer bağlayıcılara %0 ve %3 aralığında değişen oranlarda nano silika ilavesinin etkilerini araştırdıkları çalışmada, nano silika oranının %2' den fazla kullanılması halinde basınç dayanımı değerlerinin düşüş gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Bu düşüş, kullanılan nano silika katkısının sahip olduğu yüksek yüzey alanının polimerizasyon işlemi için yeterli olduğu ve %2' den fazla kullanılacak nano silikanın reaksiyona girmemesi olarak açıklanmıştır.

Ayrıca Assaedi vd., (2016a) uçucu kül kullanılarak ürettikleri geopolimer betonların mekanik ve termal özelliklerine nano kil trambositlerin etkisini inceledikleri çalışmada, %2 nano silika ilavesinin maksimum basınç dayanımını beraberinde getirdiğini ve mikro yapı sonuçlarının nano malzemelerin sadece geopolimerin mikro yapısını iyileştirmek için kullanılan bir dolgu malzemesi olarak değil, aynı zamanda geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandıran bir çeşit aktivatör olarak çalıştığını belirtmiştir.

Behfarnia ve Rostami, (2017) yaptıkları çalışmada alkali ile aktive edilmiş cüruf kullanılarak ürettikleri betona mikro ve nano parçacıkların ilavesinin üretilen numunelerin geçirgenlik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçları; mikro ve nano silika ilavesinin numunelerin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Bu etkiye ayrı ayrı bakıldığında, %10 mikro silika ilavesi 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %24 ve %28 oranında arttırırken, nano ilavesi bakımından en ideal karışım oranı olarak bulunan %3 nano silika ilavesinin, numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %12 ve %11 oranında arttırdığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar mikro ilavesinin nano ilavesine göre daha yüksek basınç dayanımına yol açtığını göstermiştir. Öte yandan, mikro silika ilavesi numunelerde gözlenen kısa süreli ve toplam su geçirgenliklerini sırasıyla %19 ve %10 oranında azaltırken, nano silika ilavesinin su geçirgenliklerine herhangi bir olumlu etkisinin bulunmadığı gözlenmiştir.

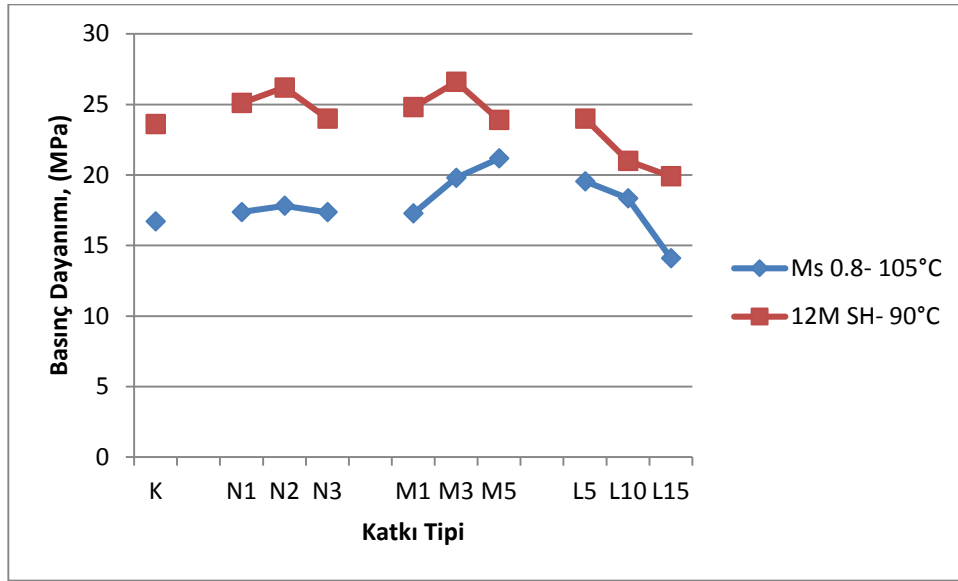
10, 12, 14 ve 16 M NaOH kullanılarak aktive edilen, farklı w/b oranları ve kür sıcaklıkları kullanılarak üretilen geopolimer betonlardan; maksimum basınç dayanımına sahip olan 12 M NaOH, w/b oranı 0,6 ve 90 °C sıcaklıkta kür edilmiş numunelere eklenen farklı tip ve oranlardaki katkıların, geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.25'te verilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına bakıldığında, Ms 0,8 kullanılarak üretilen özdeşlerine benzer olarak optimum nano silika oranı %2 olarak belirlenmiştir. Mikro silika katkılı geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımına bakıldığında, maksimum basınç dayanımının %3 mikro silika katkılı geopolimer betonlardan (M3) elde edildiği görülmüştür. Mikro silika oranının %3 değerinden fazla kullanılması, reaksiyona girmeyen mikro partiküllerin miktarını artırarak basınç dayanımına herhangi olumlu bir etki yapmamıştır. SB Lateks kullanımının artması ile birlikte basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir. Deney sonuçları, maksimum basınç dayanımına sahip numunelerin M3 (yaklaşık %13 oranında artış), minimum basınç dayanımına sahip numunelerin ise L15 (yaklaşık %16 oranında azalma) olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.25. NaOH kullanılarak aktive edilmiş farklı katkı tipi ve oranlarının katkısız geopolimer betonlara göre 28 günlük basınç dayanımlarındaki değişim

Şekil 4.26'da aynı w/b oranları kullanılarak, farklı şekilde aktive edilmiş geopolimer betonlara eklenen farklı tip ve oranlardaki katkıların basınç

dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Şekilde, NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların tüm katkı tip ve oranlarında, Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen özdeşlerine göre daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Her iki farklı şekilde aktive edilen geopolimer betonlarda SB Lateks oranının %5 oranında kullanılması (L5) basınç dayanımını yükseltirken, SB Lateks oranının %5 oranından fazla kullanılmasının ise basınç dayanımlarında ciddi düşüslere neden olduğu görülmüştür. Farklı tip katkıların etkisi incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı değerleri her iki grup numunede de ortak olarak mikro silika katkıları kullanılarak üretilen geopolimer betonlardan elde edilmiştir. Ayrıca, kullanılacak aktivatör tipinden bağımsız olarak volkanik tuf kullanılarak üretilen geopolimer betonlar için kullanılması gereken optimum nano silika oranının %2 olduğu belirlenmiştir.

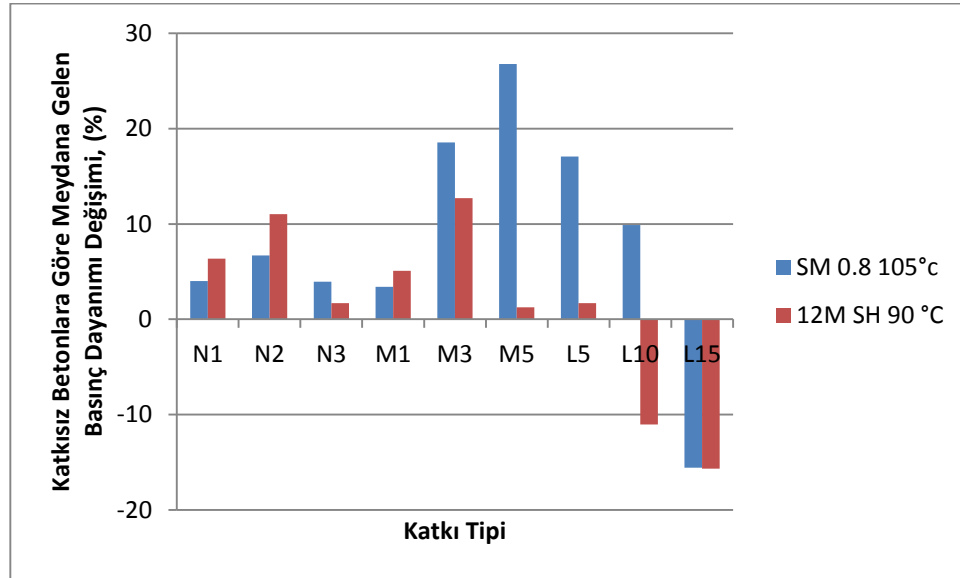


Şekil 4.26. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilmiş farklı katkı tipi ve oranlarının geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımları

Şekil 4.27’de Ms 0,8 ve 12M NaOH kullanılarak aktive edilmiş geopolimer betonların basınç dayanımına farklı tip katkıların etkisi katkısız numuneler referans olarak gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, %1 ve 2 oranında kullanılan nano silika katkısının NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlara göre daha yüksek basınç dayanımına yol açtığı

görülmüştür. Benzer şekilde, %3 ve 5 oranında kullanılan mikro silika ilavesinin Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlarda daha iyi davranış gösterdiği görülmektedir. Ms 0,8 kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda, %5 oranında SB Lateks katkısı basınç dayanımını önemli bir derecede arttırırken (yaklaşık %17), SB lateks oranının %15' e çıkması basınç dayanımını ciddi bir şekilde düşürmüştür. Ayrıca, SB Lateks ilavesinin, NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda olumlu bir etkisinin olmadığı ve özellikle % 10 ve 15 oranında kullanıldığında basınç dayanımlarında keskin düşüslere (%11 ve 15) sebep olduğu görülmüştür.

Benzer şekilde Lee vd., (2016) tarafından yapılan çalışmada, yüksek oranda lateks kullanılmasından kaynaklı matrisin pH değerinin düşmesi sonucunda basınç dayanımında da ciddi düşüşler yaşandığı gözlenmiştir.



Şekil 4.27. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlara eklenen farklı katkıların katkısız numunelere göre basınç dayanımındaki değişimler

4.2. Geopolimer betonların donma çözülme direnci

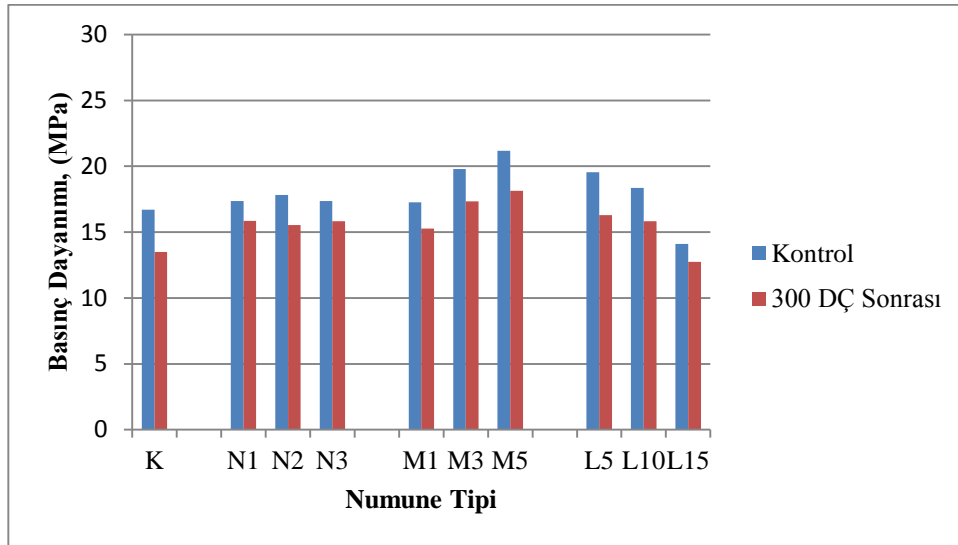
Ms ve yalnızca NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer beton numunelere nano silika, mikro silika ve SB Lateks ilavesinin donma çözülme direncine etkisini incelemek için yapılan çalışmada, deney öncesinde birinci ve ikinci grup numunelerinin her biri için basınç dayanımı ve ultases hızı ölçümleri yapılmıştır. Toplam 300 DÇ çevrimi yapılarak gerçekleştirilen DÇ testinde her 30 çevrimde bir numuneler üzerinde ultrases testi yapılmış ve bu elde edilen değerler yardımıyla betonun sahip olduğu mekanik özellikler hakkında ipucu veren BDEM değerleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, birinci ve ikinci grup numuneler için Şekil 4.28 ve 4.29' da sırası ile verilmiştir.

4.2.1. Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi sonucu özelliklerine farklı katkıların etkisi

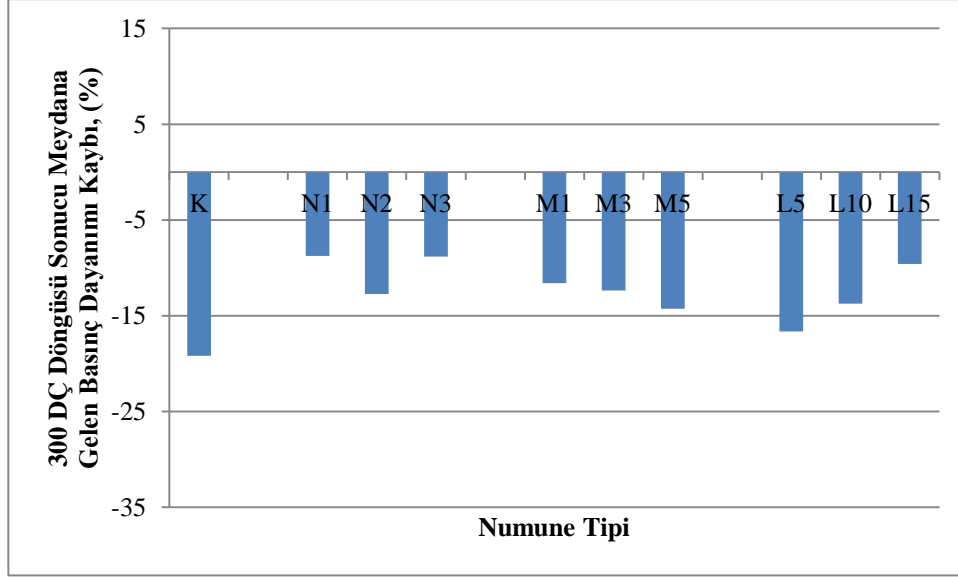
Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen ve 105°C sıcaklıkta 72 saat boyunca kür edilmiş katkısız ve farklı katkıları eklenerek üretilen geopolimer betonlarda 300 DÇ döngüsü sonucu meydana gelen basınç dayanımı değişimleri Çizelge 4.15 ve Şekil 4.28'de verilmiştir. Çizelge 4.15'de görüleceği gibi basınç dayanımında meydana gelen en yüksek kayıp katkısız numunelerde gerçekleşmiştir. Şekil 4.28'de farklı katkıların 300 DÇ döngüsü sonucu geopolimer betonlarda oluşacak basınç dayanımı kaybına etkisi incelendiğinde, optimum nano silika ilavesinin %8,75 basınç dayanımı kaybı ile %1 nano silika oranı (N1) olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, mikro silika ilavesinin %1'den %5 değerine çıkması DÇ çevrimi sonunda yaşanan basınç dayanımı kaybını arttırmıştır. Öte yandan, SB Lateks oranının artması ile birlikte 300 DÇ çevrimi sonunda meydana gelen basınç dayanımı kayıplarında azalmalar görülmüştür. Ms kullanılarak aktive edilen volkanik tüf temelli geopolimer betonlarda en iyi DÇ dirençleri nano silika ve SB Lateks katkıları ile sağlanmıştır.

Çizelge 4.15. Ms 0.8 kullanılarak üretilen katkısız ve katkılı geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları

Numune Tipi	Basınç Dayanımı, (MPa)		
	DÇ Öncesi	300 DÇ Döngüsü Sonrası	BD Değerlerinde Meydana Gelen Azalma, (%)
K	16,7	13,5	19,16
N1	17,37	15,85	8,75
N2	17,82	15,55	12,74
N3	17,36	15,83	8,81
M1	17,27	15,27	11,58
M3	19,8	17,35	12,37
M5	21,17	18,15	14,27
L5	19,55	16,3	16,62
L10	18,35	15,83	13,73
L15	14,1	12,75	9,57



Şekil 4.28. Ms 0.8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları



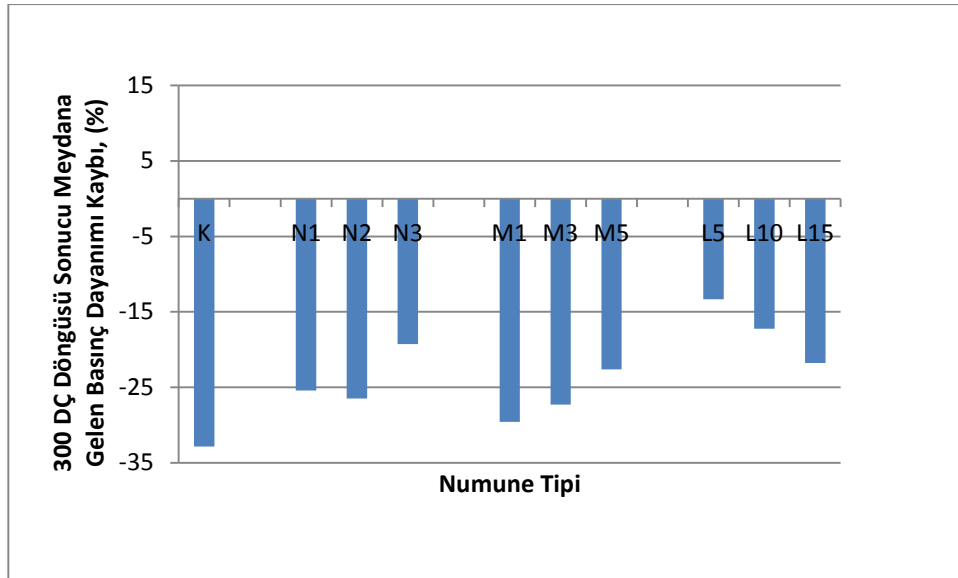
Şekil 4.29. Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrası basınç dayanımı kayıpları

4.2.2. NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi altındaki özellikleri

12 M NaOH kullanılarak aktive edilmiş ve 90 °C sıcaklıkta kür edilmiş katkısız ve farklı katkıları eklenerek üretilen geopolimer betonlarda 300 DÇ döngüsü sonucu meydana gelen basınç dayanımı değişimleri Çizelge 4.16 ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Şekil 4.30'da görüldüğü gibi, 12 M NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlar arasında katkısız numuneler DÇ etkisine karşı dayanıklılığı en az olan numune türü olarak dikkat çekmektedir. Öte yandan DÇ sonrası basınç dayanım kayıp oranları dikkate alındığında, minimum basınç dayanımı kaybı %5 SB Lateks katkılı (L5) geopolimer betonlarda görülmüştür. Nano silika katkılarının etkisi göz önüne alındığında, maksimum basınç dayanımına yol açan %2 nano silika katkılı (N2) geopolimer betonlar donma çözülme etkisinden %1 ve 3 oranda nano silika katkılı (N1,N3) özdeşlerinden daha çok etkilenmiştir. Mikro silika ilavesinin %5 değerine kadar çıkması, Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda olduğu gibi daha yüksek basınç dayanımı kayıplarına yol açmıştır. NaOH ile aktive edilen geopolimer betonlara artan SB lateks ilavesi, daha sünek bir beton yapısına yol açtığından SB Lateks oranının artması DÇ direncini arttırmıştır.

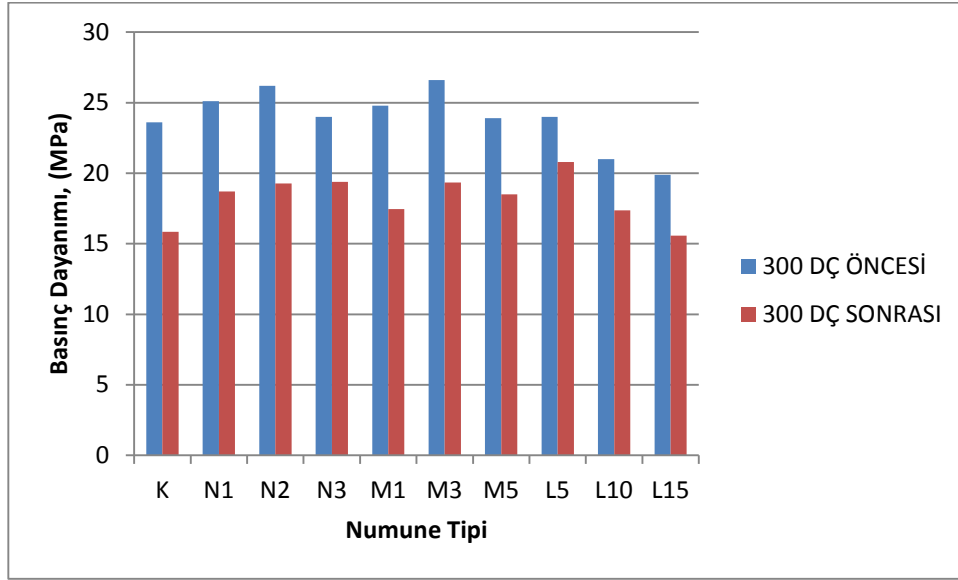
Çizelge 4.16. NaOH kullanılarak aktive edilen katkısız ve katkılı geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları

Numune Tipi	Basınç Dayanımı, (MPa)		
	DÇ Öncesi	300 DÇ Döngüsü Sonrası	BD Değerlerinde Meydana Gelen Azalma, (%)
K	23,6	15,85	32,84
N1	25,1	18,72	25,42
N2	26,2	19,27	26,45
N3	24	19,38	19,25
M1	24,8	17,47	29,56
M3	26,6	19,35	27,26
M5	23,9	18,5	22,59
L5	24	20,8	13,33
L10	21	17,38	17,24
L15	19,9	15,57	21,76



Şekil 4.30. NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrası basınç dayanımı kayıpları, (%)

Elde edilen deney sonuçlarına paralel olarak, Baradan vd. (2002) yaptıkları çalışmada, basınç dayanımı düşük olan kalitesiz, içerisinde hava bulunan boşlukların oranı fazla olan betonların genellikle don etkisinden önemli bir zarar görmediklerini belirtmişlerdir.

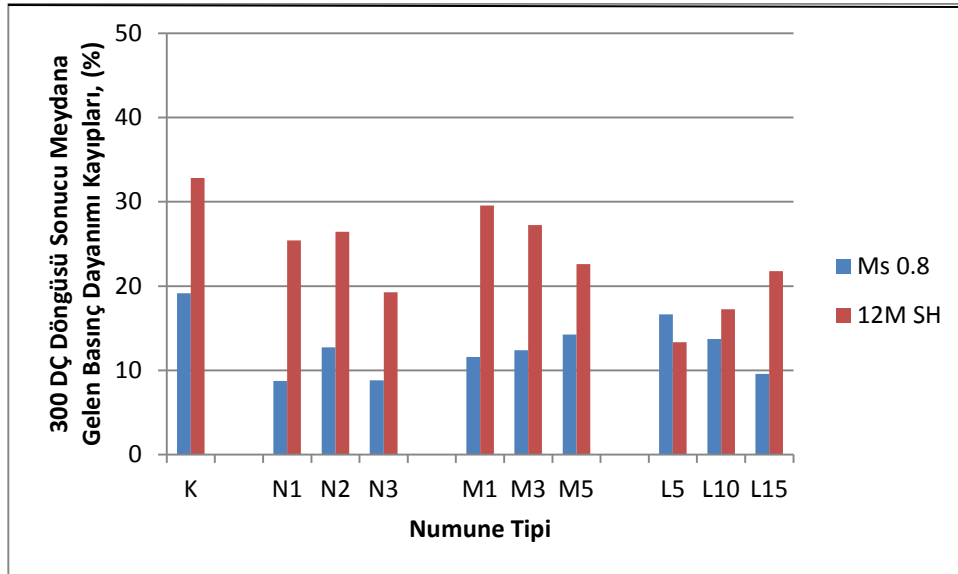


Şekil 4.31. NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımları

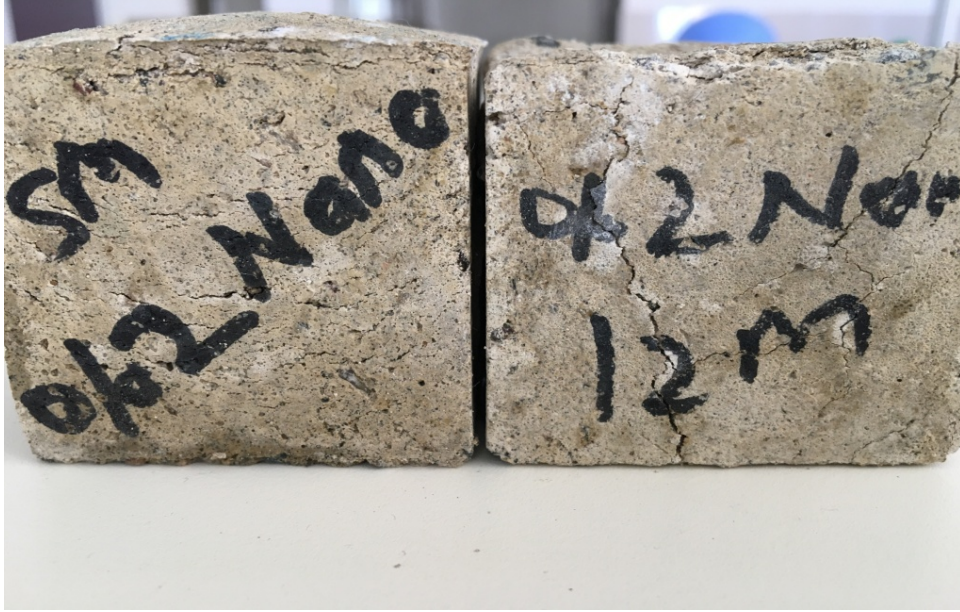
Şekil 4.32’de farklı aktivatör tiplerinin aynı cins ve orandaki katkıları eklenerek üretilen geopolimer betonların 300 DÇ sonrası basınç dayanımlarında yaşanan kayıplara etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.32’de görüldüğü gibi, L10 numuneleri haricinde tüm numunelerde NaOH aktivatör tipinin çok daha yüksek basınç dayanımı kayıplarına yol açtığı görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımı değerleri Ms 0,8 kullanılarak üretilen geopolimer betonlardan çok yüksek olan 12 M NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisine karşı dayanıksız oluşu, sahip olduğu gevreklik nedeniyle DÇ etkisiyle oluşacak çatlak ve yarıkların meydana gelme olasılığı ve miktarının daha yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Sonuç olarak volkanik tüf kullanılarak üretilen Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisine dayanıklılığı 12 M NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda, yoğun bir mikro yapıya sahip olan yüksek dayanımlı betonların, normal betonlara göre bünyesindeki boşluk büyüklüklerinin de muhtemelen daha küçük olacağını ve küçük çaplı boşluklardaki suyun donma etkisinden daha az etkilenebileceğini belirtmiştir. Yapılan bu çalışmadaki çıkarım, NaOH kullanılarak aktive edilen benzerlerinden daha yoğun bir mikro yapıya sahip olan Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ dayanıklılığının yüksek çıkmasını destekler niteliktedir (Cai ve Liu, 1998; Karakoç, 2010).

Topçu ve Canbaz (2007) yaptıkları çalışmada çimento yerine %0, 25, 50, 75 ve 100 oranında YFC kullanılarak ve farklı tip alkaliler ile aktive ederek üretilen harçların tekrarlı DÇ etkisi altındaki özelliklerini incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak I, NaOH+ Na₂CO₃; II, NaOH+Na₂SiO₃; III: Na₂SiO₃ olmak üzere üç farklı aktivatör kullanılmıştır. 50, 100 ve 300 DÇ çevrimi sonrasında meydana gelen dayanım, elastisite modülü, birim ağırlık, UPV ve rezonans frekansı değerlerindeki değişimlerin incelendiği çalışmada, I ile aktive edilmiş geopolimer harçlarda güçlü bağın gevrek yapısı nedeniyle yaşanan kayıplar daha yüksek olmuştur.



Şekil 4.32. Ms ve yalnızca NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü öncesi ve sonrası basınç dayanımlarındaki azalmalar



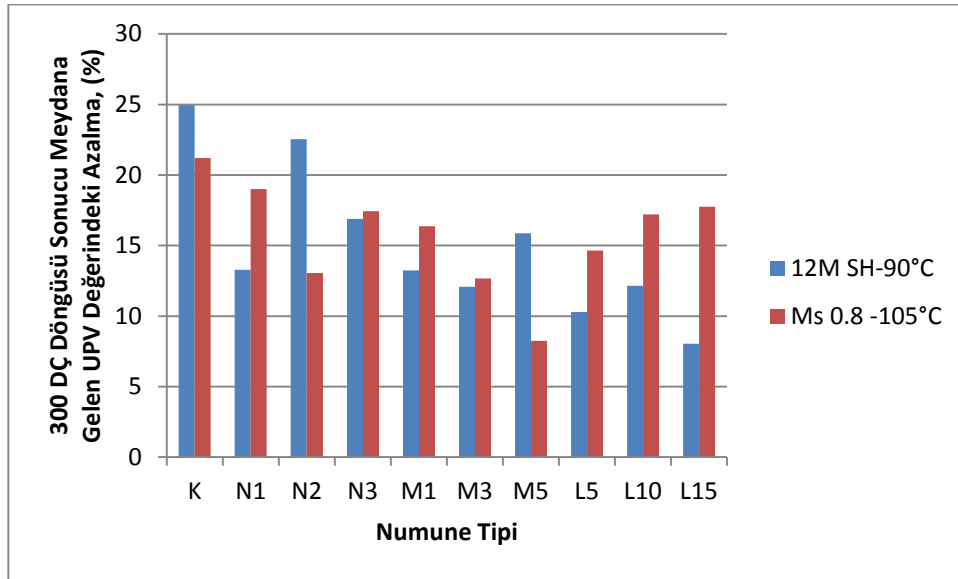
Şekil 4.33. 240 DÇ sonrası N2 numuneleri arasındaki aktivatör tipi farkı

4.2.3. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi altındaki UPV değişimleri

Ms ve NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonların 300 DÇ çevrimi sonunda meydana gelen ultrases hızlarındaki değişimlere farklı katkı maddelerinin etkisi Şekil 4.34’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, ultrases hızlarında meydana gelen en büyük kayıp NaOH kullanılarak üretilen katkısız geopolimer betonlarda yaşanırken, UPV değerlerindeki minimum düşüş Ms kullanılarak aktive edilen %5 mikro silika (M5) katkılı geopolimer betonlarda görülmüştür. Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlardaki ultrases hızı kayıpları incelendiğinde % 5 mikro silika katkısının (M5) katkısız betona (K) göre yaklaşık % 60 oranında daha az kayıp gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde, 12 M NaOH kullanılarak aktive edilmiş geopolimer betonlarda ultrases hızı kaybı açısından en iyi davranışı gösteren L15 numunesi katkısız geopolimer betona göre yaklaşık %68 oranında daha az kayıp yaşamıştır. Her iki aktivatör tipi için, en yüksek UPV kayıpları katkısız (K) numunelerde görülmüştür. 300 DÇ çevrimi sonunda meydana gelen bu kayıplar, çevrim sayısının artmasıyla birlikte geopolimer betonların mikro yapıda meydana gelen çatlak ve boşluk miktarının artmasıyla ilgilidir.

Topçu ve Canbaz, (2007) yaptıkları çalışmada, YFC kullanılarak ürettikleri geopolimer harçlar üzerinde DÇ çevrim sayısının etkisini incelemiş ve sonuç olarak çevrim sayısının artmasının oluşan çatlaklar nedeniyle ultrases geçiş sürelerini arttırarak UPV değerlerini düşürdüğünü belirtmiştir.

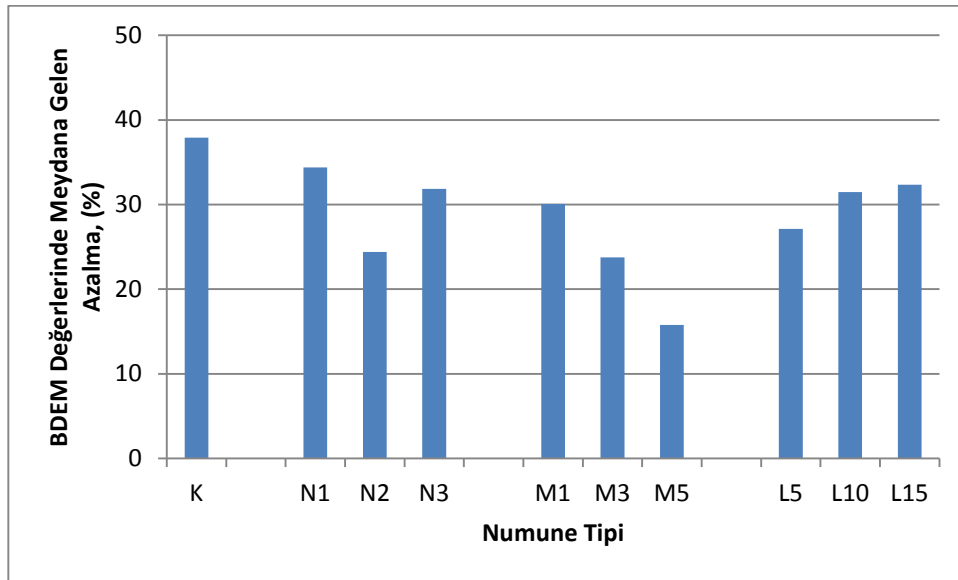
Benzer şekilde Ekinci, (1995) betonun bir yüzünden gönderilen ses dalgalarının beton içinde ilerlerken karşılaştıkları boşluklardan direkt olarak karşıya geçemeyeceğini, karşıya geçmek için boşluğun etrafını dolaşacağını belirtmiştir. DÇ çevrimi sayısı arttıkça meydana gelecek çatlak ve boşluk oranlarının artması beton içerisinden geçen ses dalgalarının karşı yüzeye geçeceği süreyi arttıracak dolayısıyla ultrases hızlarında düşüş yaşanacaktır.



Şekil 4.34. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen katkı ve katkısız geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonucunda uğradıkları UPV değeri kaybı

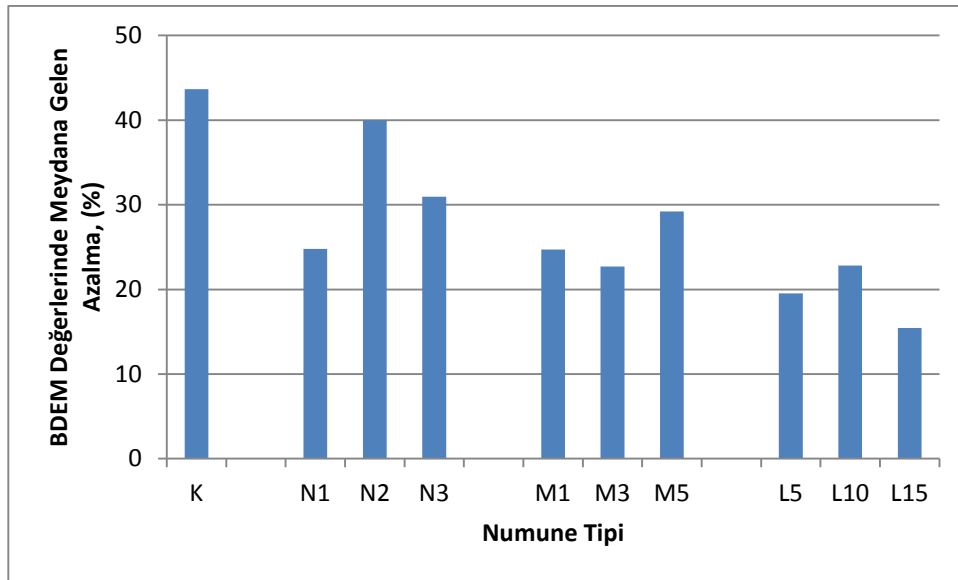
4.2.4. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların DÇ etkisi altındaki BDEM değerlerinde meydana gelen azalma

Ms ve NaOH kullanılarak üretilen birinci ve ikinci grup numunelerinde 300 DÇ çevrimi sonrasında meydana gelen BDEM kayıpları Şekil 4.35 ve 4.36’da verilmiştir. Şekillerden görüleceği gibi, BDEM değerlerinde meydana gelen azalmalar eklenen katkı tipi ve miktarlarından oldukça etkilenmiştir. Ms kullanılarak aktive edilen birinci grup numunelerde meydana gelen maksimum BDEM azalması katkısız (K) numunelerde görülmüştür. BDEM değerlerindeki değişime nano silika katkısının etkisi incelendiğinde, Ms ile aktive edilen geopolimer betonlarda %2 oranında nano silika kullanımının (N2) BDEM değerlerinde meydana gelen azalma minimum değerdedir. Öte yandan, Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonlara mikro silika katkısının oranı arttıkça BDEM değerlerinde yaşanan azalmalar düşüş göstermiştir. SB Lateks oranının artması, boşluk oranını arttıracığından bu oran arttıkça BDEM değerlerinde gözlenen düşüş miktarı artmıştır.

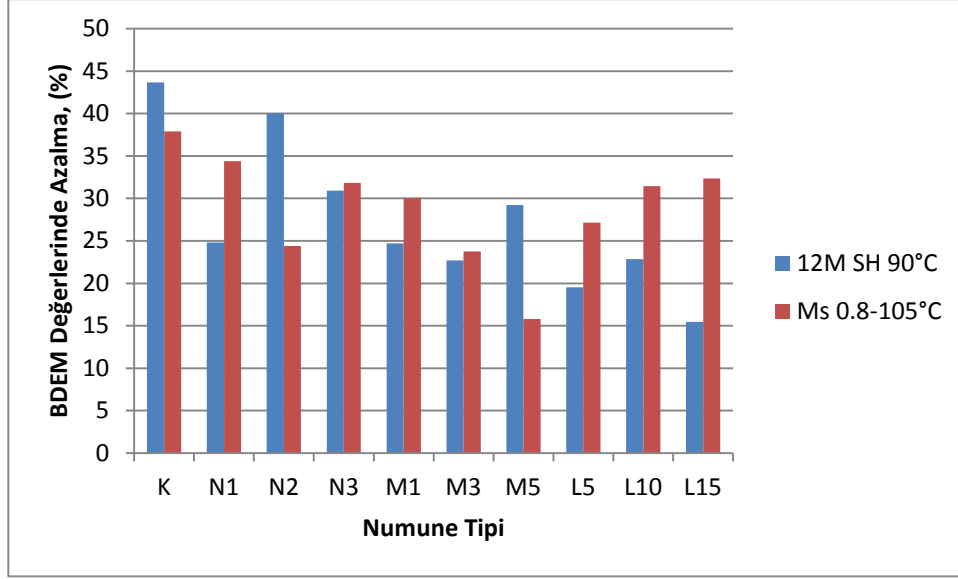


Şekil 4.35. Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrasında BDEM değerlerinde meydana gelen azalma

Şekil 4.36’da NaOH kullanılarak aktive edilen ikinci grup geopolimer betonlarda 300 DÇ çevrimi sonunda meydana gelen BDEM kayıpları gösterilmiştir. Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlarda olduğu gibi, ikinci grup numunelerde de en yüksek BDEM kaybı katkısız (K) numunelerde görülmüştür. Üç farklı katkı tipinin BDEM değerlerine etkisinin incelendiği şekilde BDEM kaybı açısından en iyi sonuçların SB Lateks katkısı ile sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, nano silikanın %1 (N1) oranında kullanılması BDEM değerlerinde minimum azalmaya yol açarken, mikro silikanın %3 oranında kullanılması (M3) ise tıpkı ikinci grup numunelerin basınç dayanımlarında olduğu gibi BDEM değerlerinde de en iyi sonucu vermiştir.



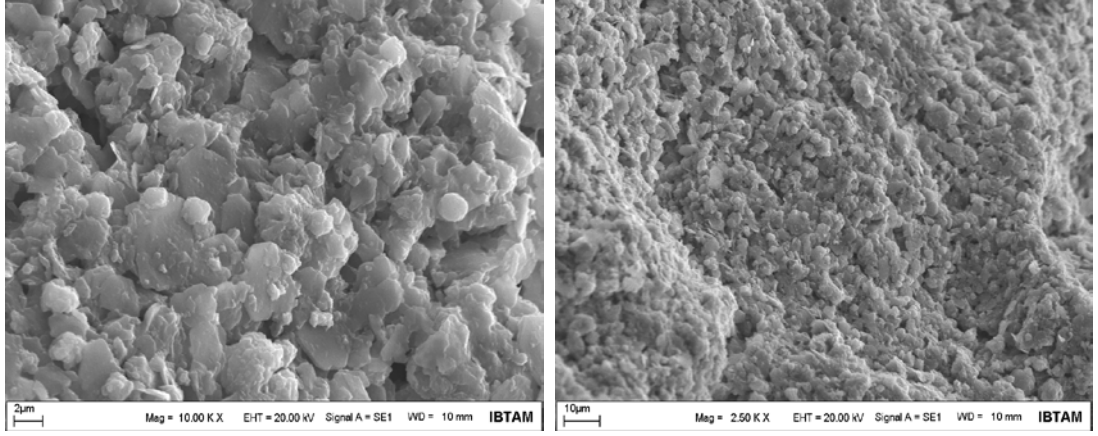
Şekil 4.36. NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrasında sahip olduğu BDEM değerleri



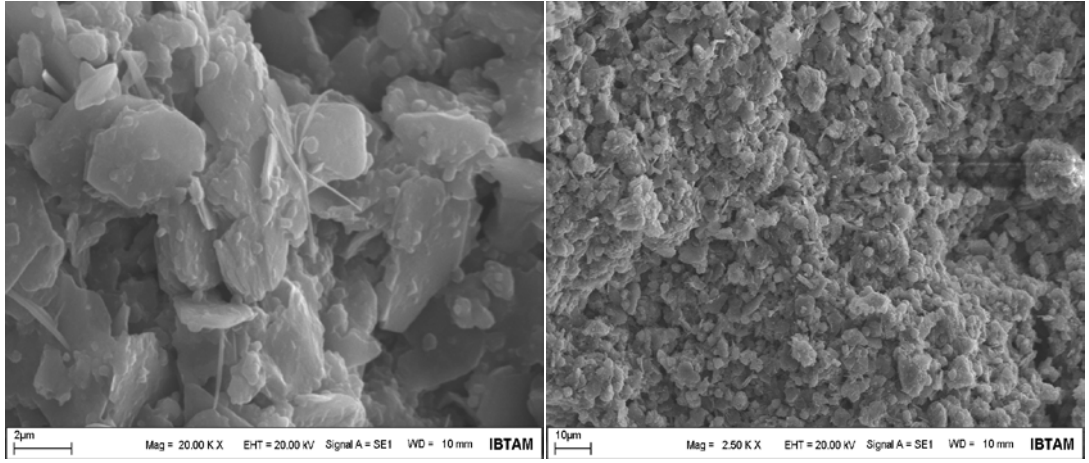
Şekil 4.37. NaOH ve Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonların 300 DÇ döngüsü sonrasında meydana gelen BDEM kayıpları

4.3. Geopolimer beton numunelerinin mikro yapı analizleri

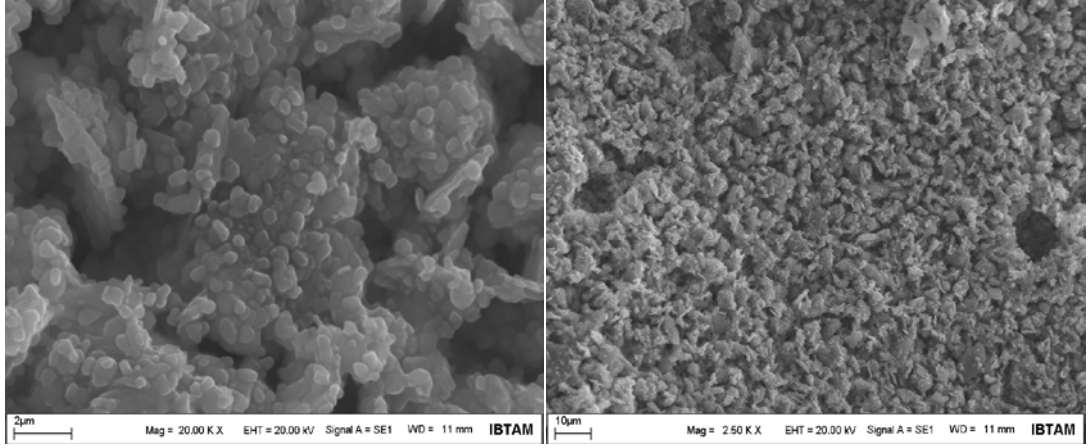
SEM analizi yardımıyla, Ms ve NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonların ve bu betonlara eklenen farklı tip ve oranlardaki katkıların, geopolimer betonların mikro yapılarına etkisi araştırılmıştır. Bu farklı alkali aktivatör ve katkı tiplerinin geopolimer betonların mikroyapılarına etkisi Şekil 4.38 - 4.41'de verilmiştir. Özellikle Şekil 40'da, volkanik tüf ile üretilen geopolimer betonların mikro yapılarında doğal boşluklar bulunduğu ve tüflerin gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. NaOH ile üretilen geopolimer betonlarda elde edilen maksimum basınç dayanımına sahip numunelerin (M3) SEM analizlerinin gösterildiği Şekil 4.41'de mikro silika katkısının daha yoğun bir faz yapısı oluşturmada etkili olduğu görülmüştür.



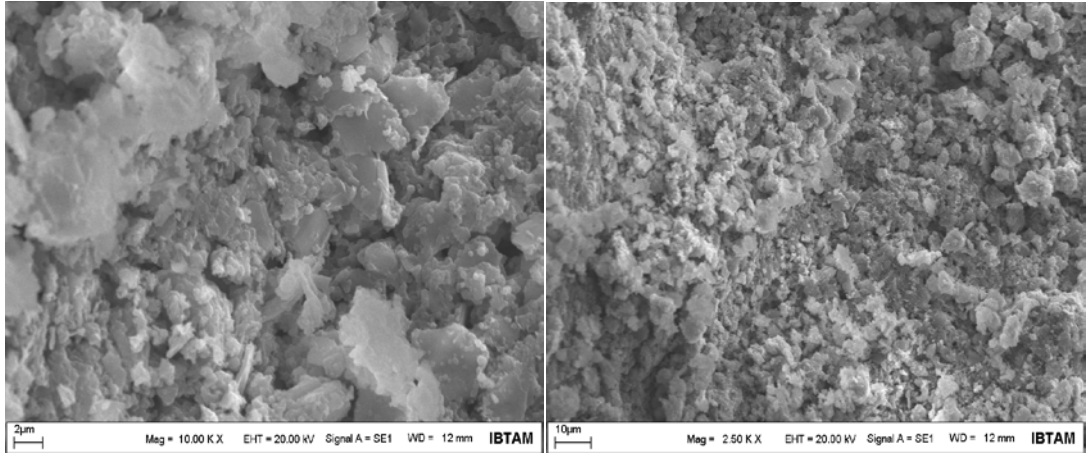
Şekil 4.38. Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen katkısız geopolimer betonların SEM görüntüleri



Şekil 4.39. Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen M5 katkılı geopolimer betonların SEM görüntüleri



Şekil 4.40. NaOH kullanılarak aktive edilen katkısız ve katkılı geopolimer betonların SEM görüntüleri



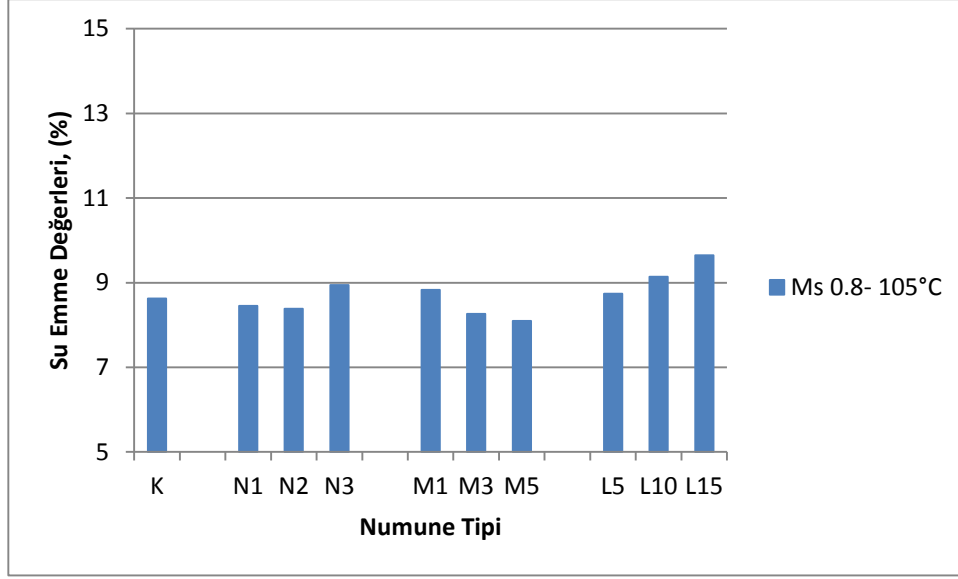
Şekil 4.41. NaOH kullanılarak aktive edilen M3 katkılı geopolimer betonların SEM görüntüleri

Şekil 4.38 ve 4.40'da görüleceği üzere Ms kullanılarak aktive edilen katkısız geopolimer numuneler, aktivatör olarak yalnızca NaOH kullanılan katkısız numunelerden daha yoğun bir faz oluşturmuştur. Volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda Ms ile aktivasyon yöntemi, mikro yapılarda yoğun bir faz oluşumuna imkân vererek agrega ile aderans konusunda olumlu özelliğe sahip olmuştur. Özellikle 12 M NaOH kullanılarak aktive edilen numunelerde maksimum basınç dayanımına %3 mikro silika katkılı geopolimer beton numuneler (M3), katkısız olanlara mikro silikanın yapıda reaksiyona girerek yoğun bir faz oluşturduğu ve böylece boşlukların azaldığı görülmektedir.

Phoo-ngernkham vd., (2015) yaptıkları çalışmada ham madde olarak uçucu kül ve YFC kullanılarak ürettikleri geopolimerleri NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatörlerini yalnız olarak ve kombinasyon olarak birlikte kullanmak kaydıyla üç farklı şekilde aktive etmişlerdir. Bu şekilde üretilen geopolimerlerin, basınç dayanımları, mikro yapıları ve kesme kuvvetlerindeki değişim incelenmiştir. Elde edilen SEM görüntülerine göre, NaOH ve Na₂SiO₃ birlikte kullanılmasının yalnız NaOH veya Na₂SiO₃ kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlardan daha yoğun bir mikro yapı meydana getirdiği görülmüştür.

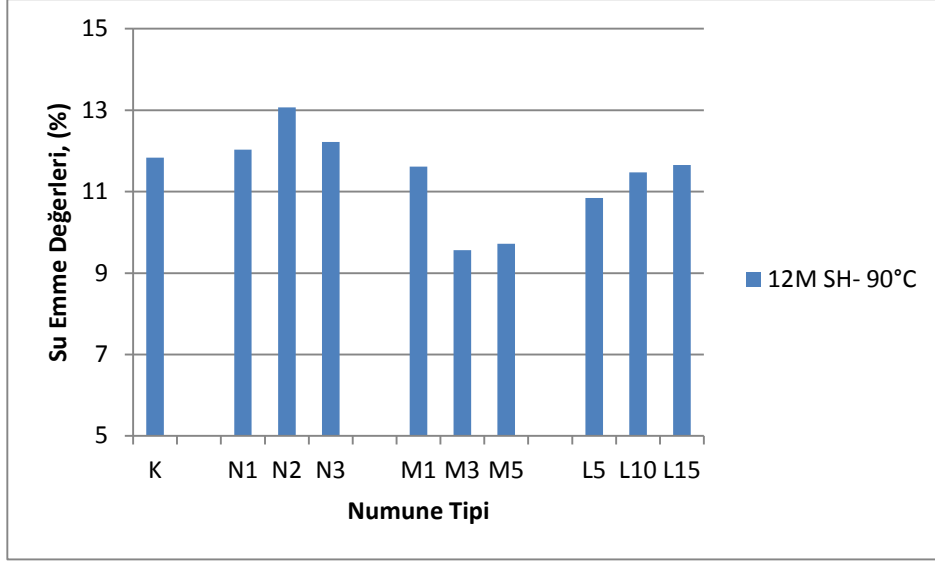
4.4. Geopolimer beton numunelere eklenen katkı maddelerinin geopolimerlerin fiziksel özelliklerine etkisi

Birinci ve ikinci grup basınç dayanımı numunelerinden her iki grup için maksimum basınç dayanımına sahip numuneler üzerine eklenen nano ve mikro silika ile SB Lateks katkısının geopolimer betonların su emme özelliklerine etkisi incelenmiş olup sonuçlar Şekil 4.42'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, Ms 0,8 kullanılarak üretilen geopolimer betonların sahip olduğu minimum su emme değeri %5 mikro silika katkılı numunelerden (M5) elde edilmiştir. Bu sonuç, maksimum basınç dayanımına sahip olan bu katkılı geopolimer betonun boşluk oranının çok az olduğunu göstermektedir. Ayrıca, su emme özelliği açısından nano silika ilavesinin optimum değerinin % 2 olduğu (N2) görülmüştür. Artan nano silika oranı reaksiyona girmeyerek boşluk oranının artmasına sebep olmuş ve bu durum da su emme miktarını arttırmıştır. Öte yandan, 105 °C sıcaklıkta kür işlemine maruz bırakılan geopolimer betonlarda emülsiyon şeklinde kullanılan SB Lateks katkısı bünyesindeki suyun buharlaşmasından dolayı poroziteyi arttırmış ve artan SB Lateks oranı ile birlikte su emme değerlerinde artış görülmüştür.



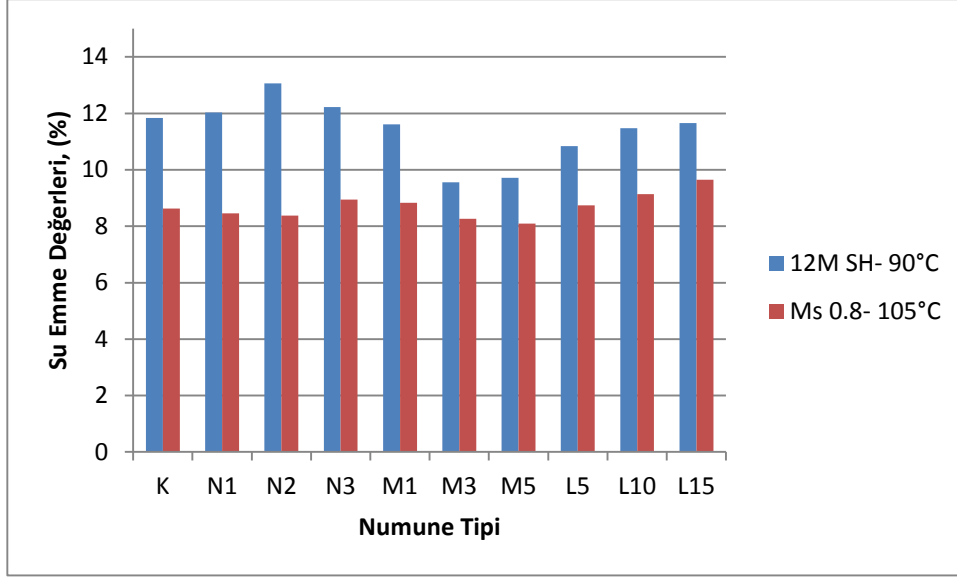
Şekil 4.42. M_s kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların su emme özelliklerine farklı katkıların etkisi

Şekil 4.43'te görüleceği gibi NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonların su emme değerleri farklı katkı tipleri ve oranlarının değişmesiyle birlikte farklılık göstermiştir. Minimum su emme değerleri %3 mikro silika katkılı geopolimer betonlardan (M3) elde edilmiştir. Mikro silika ilavesinin %3 oranına kadar artması, geopolimer betonların su emme değerlerini azaltırken, %3 mikro silika değerinden fazlasının kullanılması halinde, geopolimer matrisinde herhangi bir olumlu etkiye sahip olmadığı görülmüştür. M_s 0,8 kullanılarak üretilen geopolimer betonların su emme değerlerine benzer olarak, NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda da SB Lateks oranı arttıkça su emme değerleri artış göstermiştir.



Şekil 4.43. NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların su emme özelliklerine farklı katkıların etkisi

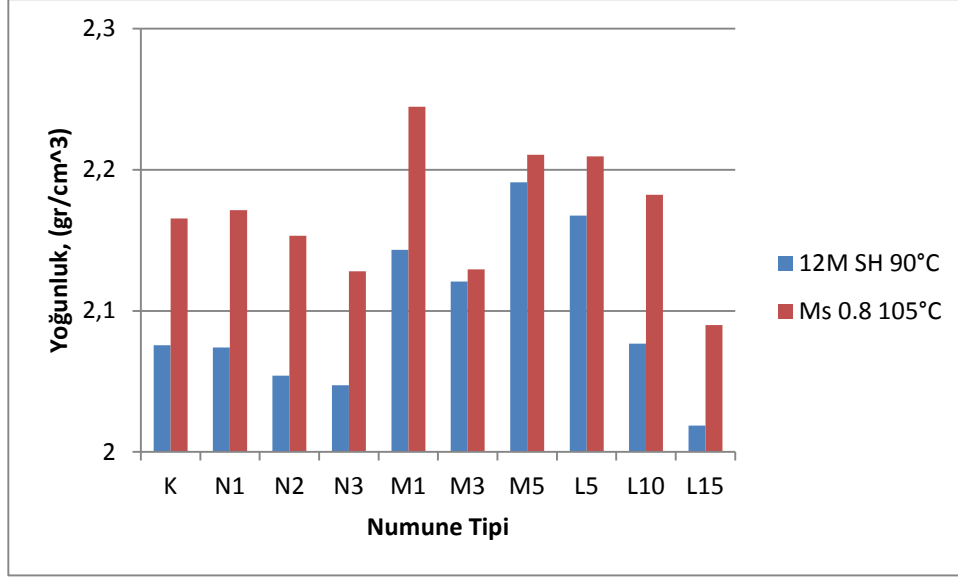
Şekil 4.44'te kullanılan aktivatör tipinin su emme değerlerine etkisi görülmektedir. Elde edilen SEM analizlerine paralel olarak, Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların, NaOH kullanılan benzerlerine göre daha yoğun bir mikro yapı oluşturdukları ve bu sayede boşluk oranının azalarak su emme değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Katkısız veya farklı tip ve oranlarda eklenen nano silika, mikro silika ve SB Lateks katkılarının su emme değerlerine etkisinin büyük olduğunu, ancak tüm katkı tipi ve oranlarında Ms kullanılarak üretilen numunelerin, NaOH kullanılarak üretilen özdeşlerine göre daha az su emme değerlerine sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.44. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların su emme özelliklerine farklı katkıların etkisi

Ayrıca Behfarnia ve Rostami, (2017) tarafından yapılan çalışmada, mikro silika ilavesinin numunelerde gözlenen kısa süreli ve toplam su geçirgenliklerini sırasıyla %19 ve %10 oranında azaltırken, nano silika ilavesinin su geçirgenliklerine herhangi bir olumlu etkisi bulunmadığı gözlenmiştir.

Şekil 4.45'te volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda farklı tip aktivatör ve katkı kullanımının yoğunluğa büyük bir etkisinin olduğu görülmüştür. Tüm numunelerin yoğunluk değerleri göz önünde bulundurulduğunda, NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların Ms kullanılarak aktive edilen benzerlerinden çok daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum; molekül kütlesi 63 g olan Na_2SiO_3 aktivatörünün, 40 g molekül kütlesine sahip olan NaOH'dan yaklaşık %50 daha yoğun olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.45. Ms ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların yoğunluk değerleri

Benzer şekilde, Posi vd., (2015) yaptıkları çalışmada C sınıfı uçucu kül temelli geri dönüştürülmüş ambalaj köpüğü içeren hafif geopolimer betonların özelliklerini incelemişlerdir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 0.33'ten 3 değerine kadar değiştiği, NaOH konsantrasyonunun 5 ile 15M arasında seçildiği ve kür sıcaklığının 25°C ve 60°C olarak uygulandığı çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ değerinin 0.33'ten 1'e kadar artışının geopolimer betonların yoğunluklarında artışa sebep olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni, Na_2SiO_3 'ün yoğunluğunun NaOH'den daha yüksek olması şeklinde açıklanmıştır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Nevşehir Bölgesi'nden elde edilen volkanik tüf kullanılarak ve farklı parametreler yardımıyla üretilen geopolimer betonların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin incelendiği bu kapsamlı çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Ms kullanılarak aktive edilen birinci grup geopolimer betonların basınç dayanımları göz önüne alındığında, maksimum basınç dayanımına sahip olan numunelerin Ms 0,8 kullanılarak aktive edilen, w/b oranı 0,6 ve 105°C sıcaklıkta kür edilen numuneler olduğu görülmüştür. Ms kullanılarak aktive edilen geopolimer betonların tüm yaşlardaki dayanımlarına bakıldığında, tüm numunelerin nihai basınç dayanımlarının önemli bir kısmını üretimi izleyen ilk üç gündeki ısı kürü sonucu aldığı görülmüştür. Ms değerinin 0,8'den 0,6'ya düşmesi w/b oranı 0,6 ve 0,5 olan geopolimer betonlarda sırasıyla yaklaşık % 13 ve % 2 oranında basınç dayanımı kayıplarına yol açmıştır.

2. Sadece NaOH kullanılarak aktive edilen ikinci grup geopolimer betonlarda maksimum basınç dayanımına sahip olan geopolimer betonların 12 M NaOH kullanılarak aktive edilmiş, w/b oranı 0,6 ve kür sıcaklığı 90°C olan numuneler olduğu belirlenmiştir. Birinci grup numunelerine benzer şekilde, NaOH ile aktive edilmiş ikinci grup numuneleri de nihai dayanımlarının yaklaşık %70'lik bir kısmını ilk üç gündeki ısı kürüyle kazanmışlardır. 12 M NaOH değerinden daha yüksek NaOH molaritesi ile aktive edilen geopolimer betonların basınç dayanımı, meydana gelen yüksek alkalinite nedeniyle düşüş göstermiştir.

3. Deney sonuçları birinci ve ikinci grup geopolimer betonlar için optimum kür sıcaklığının sırasıyla 105 ve 90°C olduğunu, ve bu sıcaklık değerlerini aşan ortamlarda yapılacak ısı kür işleminin geopolimer betonların mikro yapılarını bozarak basınç dayanımlarını düşürdüğü belirlenmiştir.

4. w/b oranının 0,6'dan 0,5 değerine düşmesi Ms 0,6 kullanılarak üretilen birinci grup numuneleri haricinde diğer tüm numunelerin basınç dayanımlarında düşüşe sebep olmuştur. Bu durum kullanılacak alkali sıvılar ile

volkanik tuf ham maddesi arasında miktar bakımından belirli bir dengenin sağlanması gerektiğinin ve w/b oranının düşmesiyle birlikte geopolimer beton matrisinde reaksiyona girmeyecek katı madde miktarının artarak dayanımın düştüğünün göstergesidir.

5. Birinci ve ikinci grup numunelerde, mikro silika ilavesinin en yüksek basınç dayanımına yol açtığı gözlenmiştir. Optimum mikro silika ilavesi, birinci ve ikinci grup numuneler için sırasıyla %5 ve %3 olarak ortaya çıkmıştır.

6. Birinci ve ikinci grup numunelere eklenen katkıların basınç dayanımlarına etkisi göz önünde bulundurulduğunda, her iki grup numune için nano silika oranının %2 değerinde maksimum basınç dayanımını verdiği ve bu oranın %3'e çıkması halinde basınç dayanımında düşüşler yaşandığı gözlenmiştir. Bu durum kullanılan nano silikanın, sahip olduğu yüksek yüzey alanı nedeniyle %2 oranında kullanılmasının geopolimerizasyon reaksiyonu için yeterli olduğu ve bu orandan daha yüksek nano silika kullanımının reaksiyona girmeyerek dayanıma olumlu bir katkı sağlamadığı şeklinde yorumlanmıştır.

7. Her iki grup numune için, SB Lateks katkısının %5 oranında kullanımının basınç dayanımlarını iyileştirdiği ve bu oranın yükselmesiyle birlikte basınç dayanımı değerlerinde düşüş yaşandığı görülmüştür. Bu durum, SB Lateks kullanımının artışıyla birlikte matrisin pH değerinin düşmesi ve meydana gelecek geopolimerizasyon reaksiyonun yavaşlamasından kaynaklıdır.

8. DÇ testi sonucunda elde edilen verilere bakıldığında, her iki gruptaki numuneler için 300 DÇ çevrimi sonunda meydana gelen en yüksek basınç dayanımı kayıpları katkısız numunelerde görülmüştür.

9. NaOH kullanılarak üretilen ikinci grup numuneler, Ms kullanılarak üretilen birinci grup numunelere göre daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olmasına rağmen DÇ etkisine karşı daha dayanıksız olduğu görülmüştür. Bu durumun, NaOH kullanılarak üretilen geopolimer betonların, Ms kullanılarak üretilen özdeşlerine göre gösterdikleri gevrek yapı nedeniyle DÇ etkisi sonucu oluşacak çatlakların artışından kaynaklandığı belirtilmiştir.

10. 300 DÇ çevrimi etkisinde kalmış volkanik tuf kullanılarak üretilen geopolimer betonların tümünde çevrim sayısının artmasıyla birlikte oluşacak çatlakların miktarı ve boyutları arttığından, basınç dayanımlarında, ultrases geçiş hızlarında ve BDEM değerlerinde azalmalar görülmüştür.

11. Su emme deneyi sonucunda elde edilen veriler; Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda maksimum ve minimum su emme değerlerinin sırasıyla M5 ve L15 numunelerinde gözlendiğini göstermiştir. NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer betonlarda ise minimum su emme değeri, maksimum basınç dayanımına sahip olan M3 numunelerinde görülmüştür.

12. Ms kullanılarak üretilen geopolimer betonların yoğunluk değerleri, bünyesinde aktivatör olarak bulundurduğu Na_2SiO_3 'ün NaOH' den daha yoğun bir yapıya sahip olması nedeniyle NaOH ile üretilen geopolimer betonlardan daha yüksek çıkmıştır.

Deneysel çalışmalar sırasında edinilen gözlemlerle aşağıdaki öneriler sıralanabilir;

- 1.Volkanik tuf kullanılarak üretilen geopolimer betonların, betonarme yapılarda kullanılan donatı ile göstereceği davranış araştırılabilir.
- 2.Volkanik tuf kullanılarak üretilen geopolimer betonların, farklı silis modülleri, farklı NaOH konsantrasyonları veya farklı tipteki aktivatör tipleri ile davranışında meydana gelebilecek değişimler incelenebilir.
3. Farklı tip ve özelliklere sahip doğal veya yapay puzolanların geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- ACI Committee 232. (2012). Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete. Michigan, USA, 29 p.
- Adam, A. A. (2009). *Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete*. PhD thesis, RMIT University, Melbourne.
- Allahverdi, A., Kani E. N. (2009). Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. *International Journal of Civil Engineering*. **7** (3), 154-160.
- Anonymous. (2010). <https://www.geopolymer.org/science/world-wide-increase-in-geopolymer-research/>. (on-line access on 03 Dec, 2017)
- Arıöz, Ö., Tuncan, M., Tuncan, A., Kavas, T. (2009). Uçucu Kül esaslı geopolimer tuğla üretimi (Tübitak Projesi). *Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Eskişehir*.
- Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., Low, I. M. (2016a). Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer. *Journal of Asian Ceramic Societies*. **4**, 19-28.
- Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., Low, I. M. (2016b). Influence of mixing methods of nano silica on the microstructural and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*. **123**, 541-552.
- ASTM C109/C109M. (2016). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C39/C39M. (2017). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C 597. (2016). *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete.*, West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C666 / C666M – 15 (2015). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Balog, A. A., Cobirzan, N., Aciu, C., Ilutiu-Varvara, D. A. (2014). Valorification of volcanic tuff in constructions and materials manufacturing industry (pp: 323-328). *The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2013)*, Petru Maior University of Tirgu Mures, October 10-11, Romania.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. İzmir, Türkiye, 318 sayfa.

- Baştopçu, M. E. (1997). *Effect of curing on resistance to deicing salt scaling, freezing-thawing and chloride ion penetration of fly ash concrete*. Yüksek lisans tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Behfarnia, K., Rostami, M. (2017). Effects of micro and nanoparticles of SiO₂ on the permeability of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*. **131**, 205-213.
- Brough, A.R., Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars: part 1. strength, hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*. **32**, 865-879.
- Cai, H., Liu, X. (1998). Freeze-thaw durability of concrete; ice formation process in pores. *Cement and Concrete Research*. **28** (9) 1281-1287.
- Celik, M. Y., Sabah, E. (2008). Geological and technical characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of Environmental Management*. **87**(1), 106-116.
- Chindaprasirt, P., Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*. **63**, 303-310.
- Colella, C., de' Gennaro, M., Aiello, M. (2001). Use of zeolitic tuff in the building industry, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America*, Washington, pp. 551–588.
- Criado, M., Palomo, A., Jimenez, F.A. (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*. **84** (16), 2048–2054.
- Davidovits, J. (1994a). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*. **6** (2), 263–278.
- Davidovits, J. (1994b). High-Alkali cements for 21st century concretes. in concrete technology, past, present and future. (pp: 383-397). *Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium*, University of California, Berkeley.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and applications*, Geopolymer Institute, Saint Quantin, France, 620 p.
- Davidovits, J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications*, Third edition. Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France 620 p.
- Deb, P. S., Sarker, P. K., Barbhuiya, S. (2015). Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. *Construction and Building Materials*. **101**, 675-683.
- Dhir, R.K., Jones, M.R., Ahmed, H.E.H., Seneviratne, A.M.G. (1990). Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete. *Magazine of Concrete Research*. **42** (152), 177-185.

- Duan, P., Yan, C., Zhou, W. (2017). Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle. *Cement and Concrete Composites*. **78**, 108-119.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G. C., van Deventer, J.S.J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*. **37**, 1590-1597.
- Ekinci, C.E. (1995). *Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi silis dumanlarının çimento ve betonda katkı maddesi olarak değerlendirilmesi*, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton*. ODTÜ Geliştirme vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Ankara, Türkiye, 757 sayfa.
- Ergul, S., Sappa, G., Magaldi, D., Piscicella, P., Pelino, M. (2011). Microstructural and phase transformations during sintering of a phillipsite rich zeolitic tuff. *Ceramics International*. **37**, 1843-1850.
- Gao, K., Lin, K-L., Wang, D., Hwang, C-L., Shiu, H-S., Chang, Y-M., Cheng, T-W. (2014). Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*. **53**, 503-510.
- Glukhovskiy, V. D., Rotovskaya, G. S., Rumyna, G. V. (1980). High strength slag-alkali cement. (pp:164-168) Presented at the 7th International Congress on the Chemistry of Cements. Paris, France
- Görhan, G., Aslaner, R., Şinik, O. (2016). The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste. *Composites Part B: Engineering*. **97**, 329-335.
- 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.
- Görhan, G., Kürklü, G., Demir, İ. (2015). Effect of Thermal Curing Processes on The Properties of Geopolymer Paste. *Electronic Journal of Construction Technologies*. **11**(2), 20-24.
- Gursel, P., Cagla, M., Arpad, H., Monteiro P. J.M. (2013). Comparative analysis of life-cycle global warming potential (gwp) of mortar mixes using the greenconcrete lca tool. *International Concrete Sustainability Conference*, May 6-8, San Francisco.
- Haddad, R. H., Alshbuol, O. (2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Construction and Building Materials*. **114**, 699-707.
- Hosan, A., Haque, S., Shaikh, F. (2016). Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. *Journal of Building Engineering*. **8**, 123-130.

- Jana, D. (2007). A New Look To An Old Pozzolan: Clinoptilolite – A Promising Pozzolan In Concrete (pp:168-206). *29th International Conference on Cement Microscopy*, May 21-24, Quebec.
- Jimenez, A. F., Palomo, J.G., Puertas, F. (1999) Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*. **29**, 1313-1321.
- Kaplan, H., Binici, H. (1995). Tras Ve Traslı Çimentolar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **1** (2), 121-127.
- Karakoç, M.B. (2010). *Hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı maddesinin yüksek dayanımlı betonun donma- çözülme dayanıklılığına etkisinin incelenmesi ve modellenmesi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Bradic, V. (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*. **181**, 35-42.
- 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. *Construction and Building Materials*. **35**, 960-969.
- Lee, N.K., Kim, E.M., Lee, H.K. (2016). Mechanical properties and setting characteristics of geopolymer mortar using styrene-butadiene (SB) latex. *Construction and Building Materials*. **113**, 264-272.
- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y. (2004). Development of Sustainable Cementitious Materials (pp: 55-76) *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Iowa State University, May 20-21, Beijing.
- Maras, M. M. (2013). *Elazığ ferrokrom cürufundan üretilen geopolimer çimentolu betonların sülfat direncinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Massazza, F. (2002). Properties and applications of natural pozzolans (pp:326-352). In: Bensted J., Barnes P. (Eds.), *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)*. pp:15-19.
- Mcnulty, E. (2009). Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement, Department of Chemistry, *The Catholic University of America*.
- Mehta, P. K., Monterio, P. J. M. (2006a). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, California, USA, 299-301 p.

- Mehta, P. K., Monterio, P. J. M. (2006b). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, California, USA, 638-640 p.
- Naskar, S., Chakraborty, A. K. (2016). Effect of nano materials in geopolymer concrete. *Recent Trends in Engineering and Material Sciences*. **8**, 273-275.
- Nasser, K.W., Lai, P.S.H. (1992). Resistance of fly ash concrete to freezing and thawing. *American Concrete Institute*. **132**, 205-226.
- Nazari, A., Bagheri, A., Riahi, S. (2011). Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash, *Material Science and Engineering A*, **528**, 7395-7401.
- Neville, A.M. (1997). *Properties of Concrete*. London, England. pp: 2866.
- Nguyen, K. T., Le, T. A., Lee, J., Lee, D., Lee, K. (2017). Investigation on properties of geopolymer mortar using preheated materials and thermogenetic admixtures. *Construction and Building Materials*. **130**, 146-155.
- Nguyen, K. T., Lee, Y. H., Lee, J., Ahn, N. (2013). Acid resistance and curing properties for green fly ash-geopolymer concrete. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. **12**(2), 317-322.
- Anonymous. (2007). <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> . (on-line access on 14 Nov, 2017).
- Noushini, A., Castel, A. (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. **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. *Journal of Cleaner Production*. **149**, 1062-1067.
- Özçep, F., Karabulut, S., Özgüven, B., Sanlı, O. (2012). http://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/76a0caea1b986b_ek.pdf?dergi=34. (20 Kasım 2017 tarihinde çevrimiçi erişim)
- Posi, P., Ridtirud, C., Ekvong, C., Chammanee, D., Janthowong, K., Chindaprasirt, P. (2015). Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. *Construction and Building Materials*. **94**, 408-413.
- Purdon, A.O. (1940). The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*. **59**, 191-202.
- Raijiwala, O.B., Path, H.S. (2010) Geopolymer concrete: a green concrete. (pp:202-206). *2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering (ICBEE 2010)*, November 2-4, Cairo, Egypt.
- Rangan, B. V. (2010). Fly Ash-Based Geopolymer Concrete (pp:68-106). *International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete*, Mumbai University, India.

- Rangan, B.V. (2014). Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian Concrete Journal*. **88** (4), 41-59.
- 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 and Mesoporous Materials*. **234**, 12-23.
- Report, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014/> (accessed 10.01.15).
- Robayo-Salazar, R. A., Gutiérrez, R. M. de., Puertas, F. (2016). Effect of metakaolin on natural volcanic pozzolan-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*. **133**, 491-497.
- Rovnanik, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. **24** (7), 1176-1183.
- Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*. **29**, 249-254.
- Sağlık, A.Ü. (2009). *Alkali-Silica Reactivity and Activation of Ground Perlite-Containing Cementitious Mixtures*. Doktora Tezi, Middle East Technical University, Ankara.
- Sassani, A. (2014). *A Multi-Scale Approach To Characterization Of Volcanic Natural Pozzolans*. Yüksek lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Sengül, Ö., Taşdemir, M.A., Yüceer, Z., Erenoğlu, T. (2003). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun betonun klor geçirimsizliğine ve basınç dayanımına etkisi (pp: 483-492). *Proc. 5. Ulusal Beton Kongresi*, Ekim 01-03, İstanbul.
- Shehab, H. K., Eisa, A. S., Wahba, A. M. (2016). Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Construction and Building Materials*. **126**, 560-565.
- Sheridan, M.F., Wang, Y. (2005). Cooling and welding history of the Bishop Tuff in Adobe Valley and Chidago Canyon, California. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. **142**, 119-144.
- Speight, J.G. (2002). *Chemical and Process Design Handbook*. McGraw-Hill, USA, pp. 530-539.
- Sun, P., Wu, H. C. (2013). Chemical and freeze-thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars. *Fuel*. **111**, 740-745.
- Suwan, T., Fan, M. (2014). Influence of OPC replacement and manufacturing procedures on the properties of self-cured geopolymer. *Construction and Building Materials*. **73**, 551-561.
- Talling, B. (1989). Effect of curing conditions on alkali-activated slags. (pp:1485-1500). *Proc. third international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. Trondheim, Norway.

- Tekin, I. (2016). Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*. **127**, 607-617.
- Toprak, M. U., Arslanbaba, M. A. (2016). Possibility of using Kütahya Volcanic Tuff as building stone: Microstructural evaluation and strength enhancement through heat treatment. *Construction and Building Materials*. **110**, 128-134.
- Torgal, F. P., Castro-Gomez, J., Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*. **22**, 1305-1314.
- TS EN 12390-1 (2002). *Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri*. TSE, Ankara.
- TS 706 EN 12620 (2003). *Beton agregaları*. TSE, Ankara.
- TS 802 (2009). *Beton Karışımı Hesap Esasları*. TSE, Ankara.
- Turkmenoglu, A.G., Tankut, A. (2002). Use of tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements Assessment of their petrographical properties. *Cement and Concrete Research*. **32**, 629-637.
- U.S. Geological Survey (USGS), Mineral Commodity Summaries, Feb. 2014.
- Wang, S.D., Scrivener, K. L., Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*. **24**(6), 1033- 1043.
- Xin, L., Jinyu, X., Erlei, B., Weimin, L. (2012). Systematic study on the basic characteristics of alkali-activated slag-fly ash cementitious material system. *Construction and Building Materials*. **29**, 482-486.
- Yasar, E., Tolgay, A., Teymen, A. (2009). Industrial Usage of Nevşehir-Kayseri (Turkey) Tuff Stone. *World Applied Sciences Journal*. **7** (3), 271-284.
- Yazıcı, H. (2008). The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. **22**, 456-462
- Yuan, J., He, P., Jia, D., Yang, C., Zhang, Y., Yan, S., Yang, Z., Duan, X., Wang, S., Zhou, Y. (2016). Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. *Ceramics International*. **42**, 16184- 16190.
- Zeybek, O. (2009). *Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Zhang, L., Ahmari, S., Zhang, J. (2011). Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers. *Construction and Building Materials*. **25**, 3773-3781.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Enes EKİNCİ

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya - (20.06.1992)

E Posta: enes.ekinci@inonu.edu.tr

Adres: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
MALATYA

E-Posta: enes.ekinci@inonu.edu.tr

Lisans: İnönü Üniversitesi - 2014

Mesleki Deneyim:

2014-2015 : Maski Genel Müdürlüğü / İnşaat Mühendisi

2016 - : İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü / Araştırma Görevlisi