



**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ BİTLİS YÖRESİ  
POMZASI İÇEREN HİBRİT BAĞLAYICILARIN  
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Yük. Müh. Bilal BALUN**

**Doktora Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ**

**OCAK-2019**

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ BİTLİS YÖRESİ POMZASI İÇEREN HİBRİT  
BAĞLAYICILARIN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Doktora Tezi

Bilal BALUN  
131115202

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17.12.2018

Tezin Savunulduğu Tarih: 18.01.2019

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı

Danışman: Doç.Dr.Mehmet KARATAŞ

Üye: Prof.Dr.Zülfü Çınar ULUCAN

Üye: Prof.Dr.Bahar DEMİREL

Üye: Dr.Öğ.Üyesi Ahmet BENLİ

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Mehrzad MOHABBİ

OCAK-2019

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bilimsel katkılarda bulunan ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ'a, deneysel çalışmalarım sırasında değerli tavsiye ve katkılarından dolayı Bingöl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve hayatımın bütün dönemlerinde olduğu gibi bu tez çalışmamda da maddi ve manevi her konuda katkıda bulunan ve sabırlarını esirgemeyen değerli ailem ve sevgili eşime teşekkür ederim.



**Bilal BALUN**  
**ELAZIĞ-2019**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>III</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>VI</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>VII</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>XII</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>XIII</b>
<b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GEOPOLİMERLER</b> .....	<b>5</b>
2.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	9
2.1.1. Bağlayıcılar .....	9
2.1.2. Alkali Aktivatörler .....	13
2.2. Kür Koşulları .....	16
2.3. Reaksiyon Mekanizması .....	18
2.3.1. Reaksiyon Ürünleri .....	22
2.3.2. Reaksiyonu Etkileyen Faktörler .....	24
2.3.2.1. Blaine İnceliği .....	25
2.3.2.2. Alkali Aktivatörün pH Değeri .....	25
2.3.2.3. Kür Sıcaklığı .....	26
2.3.2.4. Kür Süresi .....	26
2.4. Durabilite .....	27
<b>3. ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ HİBRİT BAĞLAYICILAR</b> .....	<b>28</b>
<b>4. POMZA</b> .....	<b>33</b>
4.1. Pomzanın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	34
4.2. Pomzanın Alkalilerle Aktivasyonu .....	36
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>38</b>
5.1. Malzeme Özellikleri.....	38
5.1.1. Bağlayıcı Malzemeler .....	38
5.1.2. Alkali Çözeltiler .....	40
5.1.3. Karışım Suyu .....	42
5.1.4. Agrega.....	42
5.2. Karışım Oranları ve Seriler .....	44
5.2.1. Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hamurlar .....	44
5.2.1.1. Malzeme Miktarlarının Belirlenmesi .....	45
5.2.1.2. Kür Koşullarının Etkisi .....	47
5.2.2. Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hibrit Harçlar .....	49
5.2.2.1. Bağlayıcı Dozajının Belirlenmesi .....	49

5.2.2.2.	Yüksek Sıcaklık Direnci .....	50
5.3.	Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	50
5.4.	Deneyler .....	53
5.4.1.	Pomzanın Puzolanik Aktivite Deneyi .....	53
5.4.2.	Priz Süresi Tayini Deneyi .....	55
5.4.3.	Ultra Ses Hızı Ölçüm (UPV) Deneyi.....	55
5.4.4.	Basınç Dayanımı Deneyi .....	56
5.4.5.	Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deneyi .....	57
5.4.6.	Sertleşmiş Numunelerin Yoğunluk, Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri.....	58
5.4.7.	Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	59
5.4.8.	X-Işını Difraktometresi (XRD) Deneyi .....	60
5.4.9.	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi.....	60
5.4.10.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	61
<b>6.</b>	<b>DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER.....</b>	<b>63</b>
6.1.	Pomzanın Puzolanik Aktivite Deneyi Sonuçları.....	63
6.2.	Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hamur Numunelerin Deney Sonuçları .....	64
6.2.1.	Sabit Kür Koşullarında Hamur Numunelerin Deney Sonuçları .....	64
6.2.1.1.	Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri .....	64
6.2.1.1.1.	Portland Çimentosu Miktarının Priz Sürelerine Etkisi .....	66
6.2.1.1.2.	Alkali Çözelti/Bağlayıcı Oranının Priz Sürelerine Etkisi .....	70
6.2.1.1.3.	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /KOH Oranının Priz Sürelerine Etkisi.....	74
6.2.1.2.	UPV ve Basınç Dayanımı .....	78
6.2.1.2.1.	Portland Çimentosu Miktarının Basınç Dayanımına Etkisi.....	79
6.2.1.2.2.	Alkali Çözelti/Bağlayıcı Oranının Basınç Dayanımına Etkisi.....	82
6.2.1.2.3.	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /KOH Oranının Basınç Dayanımına Etkisi .....	86
6.2.1.2.4.	Basınç Dayanımı ile UPV Değerleri Arasındaki İlişki .....	90
6.2.1.3.	Yoğunluk, Toplam Su Emme ve Porozite Deneyi Sonuçları.....	90
6.2.1.4.	Mikro Yapı Analizi Sonuçları.....	94
6.2.2.	Kür Koşullarının Etkisi .....	101
6.2.2.1.	Sabit Etüv Kürü Süresinde Etüv Sıcaklığının Basınç Dayanımına Etkisi .....	103
6.2.2.2.	Sabit Etüv Kürü Sıcaklığında Etüv Süresinin Basınç Dayanımına Etkisi .....	108
6.2.2.3.	Kür Sürelerinin Basınç Dayanımına Etkisi.....	113
6.2.2.4.	Basınç Dayanımları ile UPV Değerleri Arasındaki İlişki.....	117
6.3.	Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hibrit Harçların Deney Sonuçları... ..	118
6.3.1.	Bağlayıcı Dozajının Etkisi .....	119

6.3.1.1.	Bağlayıcı Dozajının Eğilme ve Basınç Dayanımına Etkisi .....	119
6.3.1.2.	Bağlayıcı Dozajının Yoğunluk, Toplam Su Emme ve Porozite Değerlerine Etkisi .....	121
6.3.2.	Yüksek Sıcaklık Direnci .....	123
6.3.2.1.	Yüksek Sıcaklıkların UPV ve Basınç Dayanımına Etkisi .....	126
6.3.2.2.	Yüksek Sıcaklıkların Mikro Yapıya Etkisi .....	127
<b>7.</b>	<b>SONUÇLAR</b> .....	<b>133</b>
	<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>136</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>150</b>



## ÖZET

Portland çimentosu üretimi esnasında çıkan CO<sub>2</sub> gazının çevresel etkileri alternatif bağlayıcılar aranmasına sebep olmuştur. Alüminosilikat yapıya sahip malzemelerin alkali çözeltilerle aktif edilmesiyle üretilen alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar (geopolimerler) bu alternatiflerden biridir. Az miktarda Portland çimentosu ile üretilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcılar ise, geleneksel çimento ve inorganik geopolimerlerin malzeme özelliklerinden yararlanırken hem çevresel açılarından hem de gelişmiş mukavemet özelliklerinden ötürü araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Bu tez çalışmasında, Bitlis yöresine ait pomzanın alkalilerle aktive edilmiş sistemlerde kullanılabilirliği ve düşük oranlarda (%20'ye kadar) Portland çimentosu ilavesinin üretilen bu malzemelerin üzerindeki etkisi incelenmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ve potasyum hidroksit (KOH) çözeltileri kullanılmıştır. Portland çimentosu içeren ve içermeyen alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin malzeme oranları ve kür koşulları tespit edilmiş sonrasında alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçlar üretilmiştir. Hamur karışımların en uygun malzeme miktarları; Portland çimentosu içeriği (%0, %5, %10, %15 ve %20), alkali çözelti/bağlayıcı oranı (0.47, 0.50 ve 0.53) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranı (1, 2 ve 3) üzerinden değerlendirilmiştir. UPV, basınç dayanımı, yoğunluk, toplam su emme ve porozite deneyleri gerçekleştirilirken üretilen malzemelerin mikro yapılarının incelenebilmesi için SEM/EDX ve FTIR analizleri yapılmıştır. Karışım oranları belirlendikten sonra farklı etüv sıcaklıklarında (20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C ve 120°C), farklı etüv sürelerinde (24, 48, 72 ve 96 saat) ve farklı bekleme sürelerinde (3, 28 ve 90 gün) kür koşulları incelenmiştir. Farklı bağlayıcı dozajlarında hazırlanan alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların UPV, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerleri deneyler sonucunda elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklar karşısındaki davranışlarını inceleyebilmek için optimum bağlayıcı dozajına sahip harç numuneler 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve UPV, basınç dayanımı ve ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Mikro yapı özelliklerinin incelenebilmesi için SEM/EDX ve FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyler, ortam koşullarında kür edilen numunelerden tatmin edici basınç dayanımı sonuçlarının alınabileceğini göstermiştir. 100°C sıcaklıktaki etüvde 72 saat bekletilen 28 günlük alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamur numunelerde 91.09 MPa, harç numunelerde ise 43.66 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık dereceleri arttıkça harç numunelerin basınç dayanımları düşmektedir. 800°C sıcaklıkta basınç dayanımındaki kayıp %49.32 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, Bitlis yöresi pomzasının alkalilerle aktive edilmiş hibrit sistemlerde kullanılabilmesini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer, pomza, alkali çözelti, Portland çimentosu, hibrit

## SUMMARY

### **The Investigation of Bitlis Pumice Based Alkali Activated Hybrid Binders Production**

The environmental impact of CO<sub>2</sub> gas generated during the production of Portland cement has led to the search for alternative binders. Alkali activated cements (geopolymers) produced by the activation of aluminosilicate materials with alkali solutions are one of these alternatives. Pumice based alkali activated hybrid binders produced with a small amount of Portland cement, while benefiting from the material properties of traditional cement and inorganic geopolymers, attract attention of researchers due to their environmental impacts and improved strength properties.

In this thesis, the use of pumice from Bitlis region in alkali activated systems and effect of the addition of Portland cement at low rates (up to 20%) on these materials was investigated. Sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) and potassium hydroxide (KOH) solutions were used as alkali activators. Material proportions and curing conditions of alkali activated paste samples with and without Portland cement were determined and then alkali activated hybrid mortars were produced. The optimum proportions of paste mixes were evaluated over Portland cement content (%0, %5, %10, %15 and %20), alkali solution/binder ratio (0.47, 0.50 and 0.53) and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH ratio (1, 2 and 3). UPV, compressive strength, density, total water absorption and porosity tests were performed. Also, SEM/EDX and FTIR analyzes were performed to examine the microstructure of the materials produced. After the mixing proportions were determined, the curing conditions were examined at different oven temperatures (20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C and 120°C), different waiting time in the oven (24, 48, 72 and 96 hours) and different curing ages (3, 28 and 90 days). UPV, flexural and compressive strength, density, total water absorption and porosity values of the alkali activated hybrid mortars prepared in different binder dosages were obtained as a result of the tests. Mortar samples with optimum binding dosage were exposed to 200°C, 400°C, 600°C, 800°C and 1000°C to examine their behavior against high temperatures. In addition, UPV values, compressive strengths and weight losses were determined. SEM/EDX and FTIR analyzes were performed to examine the microstructure properties.

Experiments have shown that satisfactory compressive strength results can be obtained from samples cured under ambient conditions. 28 days compressive strength of pumice based alkali activated hybrid paste samples, which kept in the oven at a temperature 100°C for 72 hours, is 91.09 MPa while mortar samples is 43.66 MPa. As high temperatures increase, the compressive strength of mortar samples decreases. The loss of compressive strength at 800°C was %49.32. These results have shown that the pumice of Bitlis region can be used in alkali activated hybrid systems.

**Keywords:** Geopolymer, pumice, alkali solution, Portland cement, hybrid

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Türkiye'nin yıllık çimento üretim miktarları [5].	2
Şekil 2.1.	2012 yılına kadar anahtar kelimesinde alkali aktivasyon ve geopolimer terimi içeren basılı yayınlar [6].	7
Şekil 2.2	E-Crete hazır beton tesisi ve uygulaması [6].	9
Şekil 2.3	Avustralya'da E-Crete kullanılarak tamamlanmış inşaat projeleri [40].	9
Şekil 2.4	N-A-S-H jel stabilitesini pH ve kalsiyum içeriği açısından tanımlamak için önerilen model [74].	15
Şekil 2.5	Polysialat çeşitleri [43].	19
Şekil 2.6	Uçucu külün alkalilerle aktivasyon modeli. a) Başlangıç malzemesi; b) Alkalilerin uçucu kül partiküllerini parçalaması ve erken N-A-S-H jeli oluşumu; c) Jel polimerizasyonu ve d) İleriki yaşlardaki jel içyapısı [86].	21
Şekil 2.7	Geopolimerizasyon modeli [72].	22
Şekil 2.8	Yüksek fırın cürufun alkalilerle aktivasyonu [6].	23
Şekil 2.9	N-A-S-H jelinin SEM görüntüsü [15].	23
Şekil 2.10	N-A-S-H jelinin üç boyutlu yapısı [6].	24
Şekil 3.1	Yüksek silika ve alümin ile düşük kalsiyum içerikli çimento harmanları için alkali aktivasyon modeli (70 % uçucu kül+30% Portland çim., Aktivatör: NaOH+Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ) [6].	29
Şekil 4.1	Bitlis ili maden haritası [134].	34
Şekil 4.2	Pomzanın SEM görüntüleri a) 100x b) 300x [137].	35
Şekil 4.3	Pomzanın X-Işını Difraksiyonu (XRD) [139].	36
Şekil 5.1	a) Öğütülmüş pomza ve b) Portland çimentosu.	39
Şekil 5.2	Bitlis yöresine ait öğütülmüş pomzanın XRD sonuçları	40
Şekil 5.3	a) Sodyum silikat ve b) potasyum hidroksit çözeltileri	41
Şekil 5.4	Harç numunelerde kullanılan agregalar a) 0-2 mm ve b) 2-4 mm	42
Şekil 5.5	İnce agrega granülometri eğrisi	43
Şekil 5.6	CEN standart kumu.	43
Şekil 5.7	Pomzanın etüvde bekletilmesi	51
Şekil 5.8	Pomzanın öğütülüp elenmesi işlemi	51
Şekil 5.9	Karıştırıcı ve hamur karışımı	52
Şekil 5.10	50×50×50 mm ve 40×40×160 mm ebatlarındaki kalıplar	52
Şekil 5.11	Deney numunelerinin etüve yerleştirilmesi	53
Şekil 5.12	Numunelerin ortam koşullarında saklanması	53
Şekil 5.13	Puzolanik aktivite numuneleri	54
Şekil 5.14	Vicat aleti	55
Şekil 5.15	Ultra ses hızı ölçüm cihazı	56
Şekil 5.16	Hamur numuneler için kullanılan basınç dayanımı test cihazı	57
Şekil 5.17	40×40×160 mm harç numuneler için eğilme ve basınç dayanımı deneyi aleti	57
Şekil 5.18	Arşimet terazisi	58
Şekil 5.19	Yüksek sıcaklık fırını	59
Şekil 5.20	XRD cihazı	60
Şekil 5.21	Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı	61
Şekil 5.22	SEM cihazı	62
Şekil 6.1	Pomzanın 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksleri	63

<b>Şekil 6.2</b>	$l/b=0.47$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2$ ve $3$ sabit oranlarında Portland çimentosu miktarının priz sürelerine etkisi .....	66
<b>Şekil 6.3</b>	$l/b=0.50$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2$ ve $3$ sabit oranlarında Portland çimentosu miktarının priz sürelerine etkisi .....	67
<b>Şekil 6.4</b>	$l/b=0.53$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2$ ve $3$ sabit oranlarında Portland çimentosu miktarının priz sürelerine etkisi .....	67
<b>Şekil 6.5</b>	Bağlayıcı malzemelerin içeriğine göre kimyasal bileşenlerinin miktarları .....	69
<b>Şekil 6.6</b>	CaO miktarı ile priz bitiş süresi arasındaki ilişki.....	69
<b>Şekil 6.7</b>	$PÇ=\%0$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2,$ ve $3$ sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi .....	70
<b>Şekil 6.8</b>	$PÇ=\%5$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2,$ ve $3$ sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi .....	71
<b>Şekil 6.9</b>	$PÇ=\%10$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2,$ ve $3$ sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi .....	72
<b>Şekil 6.10</b>	$PÇ=\%15$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2,$ ve $3$ sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi .....	72
<b>Şekil 6.11</b>	$PÇ=\%20$ ve $Na_2SiO_3/KOH=1, 2,$ ve $3$ sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi .....	73
<b>Şekil 6.12</b>	$PÇ=\%0$ ve $l/b=0.47, 0.50$ ve $0.53$ sabit oranlarında $Na_2SiO_3/KOH$ oranının priz sürelerine etkisi .....	74
<b>Şekil 6.13</b>	$PÇ=\%5$ ve $l/b=0.47, 0.50$ ve $0.53$ sabit oranlarında $Na_2SiO_3/KOH$ oranının priz sürelerine etkisi .....	75
<b>Şekil 6.14</b>	$PÇ=\%10$ ve $l/b=0.47, 0.50$ ve $0.53$ sabit oranlarında $Na_2SiO_3/KOH$ oranının priz sürelerine etkisi .....	76
<b>Şekil 6.15</b>	$PÇ=\%15$ ve $l/b=0.47, 0.50$ ve $0.53$ sabit oranlarında $Na_2SiO_3/KOH$ oranının priz sürelerine etkisi .....	76
<b>Şekil 6.16</b>	$PÇ=\%20$ ve $l/b=0.47, 0.50$ ve $0.53$ sabit oranlarında $Na_2SiO_3/KOH$ oranının priz sürelerine etkisi .....	77
<b>Şekil 6.17</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren küp hamur numunenin kırılma biçimi ..	79
<b>Şekil 6.18</b>	Alkali çözelti/bağlayıcı oranı $0.47$ olan karışımların Portland çimentosu miktarına göre basınç dayanımı değişikliği .....	80
<b>Şekil 6.19</b>	Alkali çözelti/bağlayıcı oranı $0.50$ olan karışımların Portland çimentosu miktarına göre basınç dayanımı değişikliği .....	80
<b>Şekil 6.20</b>	Alkali çözelti/bağlayıcı oranı $0.53$ olan karışımların Portland çimentosu miktarına göre basınç dayanımı değişikliği .....	81
<b>Şekil 6.21</b>	Portland çimentosu miktarı $\%0$ olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi .....	83
<b>Şekil 6.22</b>	Portland çimentosu miktarı $\%5$ olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi .....	84
<b>Şekil 6.23</b>	Portland çimentosu miktarı $\%10$ olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi .....	84
<b>Şekil 6.24</b>	Portland çimentosu miktarı $\%15$ olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi .....	85
<b>Şekil 6.25</b>	Portland çimentosu miktarı $\%20$ olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi .....	86
<b>Şekil 6.26</b>	Portland çimentosu miktarı $\%0$ olan karışımların basınç dayanımına $Na_2SiO_3/KOH$ oranının etkisi .....	87

<b>Şekil 6.27</b>	Portland çimentosu miktarı %5 olan karışımların basınç dayanımına Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /KOH oranının etkisi .....	87
<b>Şekil 6.28</b>	Portland çimentosu miktarı %10 olan karışımların basınç dayanımına Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /KOH oranının etkisi .....	88
<b>Şekil 6.29</b>	Portland çimentosu miktarı %15 olan karışımların basınç dayanımına Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /KOH oranının etkisi .....	89
<b>Şekil 6.30</b>	Portland çimentosu miktarı %20 olan karışımların basınç dayanımına Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /KOH oranının etkisi .....	89
<b>Şekil 6.31</b>	Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ile UPV değerleri arasındaki ilişki.....	90
<b>Şekil 6.32</b>	Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ve etüv kurusu yoğunlukları arasındaki ilişki .....	92
<b>Şekil 6.33</b>	Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ve toplam su emmeleri arasındaki ilişki.....	93
<b>Şekil 6.34</b>	Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ve poroziteleri arasındaki ilişki .....	93
<b>Şekil 6.35</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren bağlayıcıların SEM görüntüleri; a) P-47-1, b) P-47-3, c) H5-47-3, d) H10-47-3, e) H15-47-3 ve f) H20-47-3 .....	94
<b>Şekil 6.36</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren bağlayıcıların EDX verileri; a) P-47-1, b) P-47-3, c) H5-47-3, d) H10-47-3, e) H15-47-3 ve f) H20-47-3 .....	96
<b>Şekil 6.37</b>	P-47-1 serisinin FTIR analizi.....	98
<b>Şekil 6.38</b>	P-47-3 serisinin FTIR analizi.....	98
<b>Şekil 6.39</b>	H5-47-3 serisinin FTIR analizi .....	99
<b>Şekil 6.40</b>	H10-47-3 serisinin FTIR analizi .....	99
<b>Şekil 6.41</b>	H15-47-3 serisinin FTIR analizi .....	100
<b>Şekil 6.42</b>	H20-47-3 serisinin FTIR analizi .....	100
<b>Şekil 6.43</b>	24 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi .....	103
<b>Şekil 6.44</b>	48 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi .....	104
<b>Şekil 6.45</b>	72 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi .....	105
<b>Şekil 6.46</b>	96 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi .....	106
<b>Şekil 6.47</b>	40°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi .....	108
<b>Şekil 6.48</b>	60°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi .....	109
<b>Şekil 6.49</b>	80°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi .....	110

<b>Şekil 6.50</b>	100°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi .....	111
<b>Şekil 6.51</b>	120°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi .....	112
<b>Şekil 6.52</b>	Farklı etüv sıcaklıklarına ve sürelerine maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların basınç dayanımına kür sürelerinin etkisi; a) 20°C, b) 40°C, c) 60°C, d) 80°C, e) 100°C, f) 120°C.....	113
<b>Şekil 6.53</b>	Farklı etüv sıcaklıklarına ve sürelerine maruz kalmış pomza içeren geopolimerlerin basınç dayanımına kür sürelerinin etkisi; a) 20°C, b) 40°C, c) 60°C, d) 80°C, e) 100°C, f) 120°C .....	115
<b>Şekil 6.54</b>	Farklı kür koşullarına maruz kalmış pomza içeren geopolimerlerin basınç dayanımı ve UPV değerleri arasındaki ilişki .....	117
<b>Şekil 6.55</b>	Farklı kür koşullarına maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit malzemelerin basınç dayanımı ve UPV değerleri arasındaki ilişki .....	118
<b>Şekil 6.56</b>	Taze haldeki alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harç karışımı .....	119
<b>Şekil 6.57</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların eğilme ve basınç dayanımı deneyleri.....	120
<b>Şekil 6.58</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve UPV değerleri .....	121
<b>Şekil 6.59</b>	Bağlayıcı dozajının alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların yoğunluğuna etkisi.....	122
<b>Şekil 6.60</b>	Bağlayıcı dozajının alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların toplam su emme ve porozitesine etkisi .....	123
<b>Şekil 6.61</b>	Yüksek sıcaklığa maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların yüzey görüntüleri; a) etüv kürü, b) 200°C, c) 400°C, d) 600°C, e) 800°C ve f) 1000°C.....	124
<b>Şekil 6.62</b>	Yüksek sıcaklığa maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların boyut değişimi (soldan sağa; etüv kürü, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C) .....	124
<b>Şekil 6.63</b>	Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların ağırlık kayıpları .....	125
<b>Şekil 6.64</b>	Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış harçların UPV değerleri ve basınç dayanımları .....	126
<b>Şekil 6.65</b>	Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların SEM görüntüsü (x1000) ve EDX analizi; a) 20°C, b) 200°C, c) 400°C, d) 600°C, e) 800°C ve f) 1000°C .....	128
<b>Şekil 6.66</b>	1000°C sıcaklığa maruz kalmış numunenin SEM görüntüsü (x40).....	128
<b>Şekil 6.67</b>	Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların kızılötesi spektroskopisi (FTIR) sonuçları .....	131

## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa No

<b>Tablo 1.1</b>	Ülkelere göre yıllık çimento üretimleri (milyon ton) [5].....	2
<b>Tablo 2.1</b>	Alkalilerle aktive edilmiş çimentolar hakkındaki önemli olaylar [31]. .....	6
<b>Tablo 2.2</b>	Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi [66]. .....	12
<b>Tablo 2.3</b>	F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşimi [67]. .....	13
<b>Tablo 4.1</b>	Pomzanın genel kimyasal bileşeni [136]. .....	35
<b>Tablo 5.1</b>	Portland çimentosu ve öğütölmüş pomzanın kimyasal ve fiziksel özellikleri..	39
<b>Tablo 5.2</b>	Potasyum hidroksit ve sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özellikler .....	41
<b>Tablo 5.3</b>	CEN standart kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı ve sınır değerler.....	43
<b>Tablo 5.4</b>	Alkalilerle aktive edilen hamur karışımların en uygun malzeme oranlarının tespiti.....	46
<b>Tablo 5.5</b>	Alkalilerle aktive edilen hamur karışımların en uygun kür koşullarının incelenmesi .....	47
<b>Tablo 5.6</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların karışım oranları .....	49
<b>Tablo 5.7</b>	Yüksek sıcaklığa maruz kalan alkalilerle aktive edilmiş hibrit harç serileri ....	50
<b>Tablo 5.8</b>	Puzolanik aktivite deneyi karışım oranları .....	54
<b>Tablo 5.9</b>	Yüksek sıcaklık deneyinde numunelere uygulanan sıcaklık ve süreleri .....	59
<b>Tablo 6.1</b>	Puzolanik aktivite deneyi numunelerinin basınç dayanımı ve UPV değerleri .	63
<b>Tablo 6.2</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamurların priz başlangıç ve bitiş süreleri .....	65
<b>Tablo 6.3</b>	Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşenleri .....	68
<b>Tablo 6.4</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin UPV ve basınç dayanımı değerleri .....	78
<b>Tablo 6.5</b>	Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin yoğunlukları, toplam su emmeleri ve poroziteleri .....	91
<b>Tablo 6.6</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren bağlayıcıların EDX analizi sonuçları	95
<b>Tablo 6.7</b>	Alkalilerle aktive edilmiş 3 günlük hamur numunelerin farklı kür koşullarındaki UPV ve basınç dayanımları .....	101
<b>Tablo 6.8</b>	Alkalilerle aktive edilmiş 28 günlük hamur numunelerin farklı kür koşullarındaki UPV ve basınç dayanımları .....	102
<b>Tablo 6.9</b>	Alkalilerle aktive edilmiş 90 günlük hamur numunelerin farklı kür koşullarındaki UPV ve basınç dayanımları .....	102
<b>Tablo 6.10</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit numunelerin 3 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark .....	114
<b>Tablo 6.11</b>	Pomza içeren geopolimer numunelerin 3 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark .....	116
<b>Tablo 6.12</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçlarda kullanılacak malzeme oranları ve kür koşulları.....	118
<b>Tablo 6.13</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve UPV değerleri .....	120
<b>Tablo 6.14</b>	Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerleri.....	121
<b>Tablo 6.15</b>	Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların ağırlık kayıpları .....	125
<b>Tablo 6.16</b>	Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış harçların UPV değerleri ve basınç dayanımları. ....	126
<b>Tablo 6.17</b>	Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış numunelerin EDX analizi sonuçları .....	130

## KISALTMALAR

<b>MTA</b>	: Maden Tetkik ve Arama
<b>GJ</b>	: Gigajoule
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>EDX</b>	: Enerji Dağılım Spektrometrisi
<b>FTIR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi
<b>XRD</b>	: X-Işını Difraktometresi
<b>UPV</b>	: Ultra Ses Hızı
<b>PÇ</b>	: Portland Çimentosu
<b>P</b>	: Pomza
<b>SM</b>	: Silika Modülü
<b>SS</b>	: Sodyum Silikat
<b>PH</b>	: Potasyum Hidroksit

## SEMBOLLER LİSTESİ

<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	: Sodyum Silikat
<b>NaOH</b>	: Sodyum Hidroksit
<b>KOH</b>	: Potasyum Hidroksit
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Oksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum Dioksit
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	: Sodyum Karbonat
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Sodyum Sülfat
<b>CaO</b>	: Kalsiyum Oksit
<b>MgO</b>	: Magnezyum Oksit
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Demir Oksit
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	: Sodyum Oksit
<b>K<sub>2</sub>O</b>	: Potasyum Oksit
<b>TiO<sub>2</sub></b>	: Titanyum Dioksit
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	: Kalsiyum Hidroksit

## 1. GİRİŞ

Dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olan Portland çimentosunun üretimi esnasında çıkan CO<sub>2</sub> gazının çevresel etkileri ile ilgili kaygılar Portland çimentosu ile aynı özellikleri taşıyan ve aynı zamanda sürdürülebilir şekilde üretilebilecek alternatif bağlayıcılar aranmasına neden olmuştur. Son yıllarda birçok araştırmacı çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmaya yönelik çalışmalar yapmıştır.

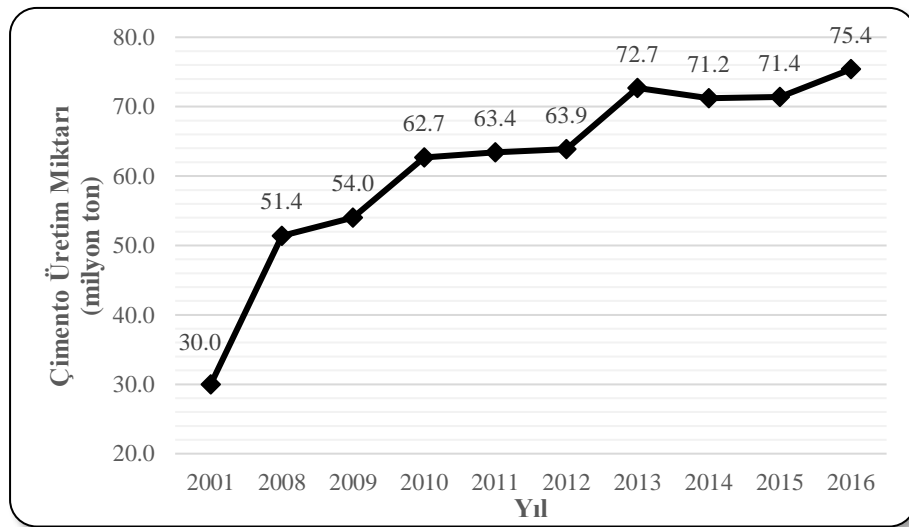
Atmosferdeki CO<sub>2</sub> emisyonları üç ana kaynaktan oluşmaktadır. Bunlar; fosil yakıtların oksitlenmesi, ormanların azalması ve diğer arazi kullanımı değişiklikleri ve karbonat ayrışmasıdır. Eski çağlardan beri kullanılan çimento, karbonatların ayrışmasından kaynaklanan en büyük emisyon kaynağıdır [1]. Portland çimentosu üretimi esnasında kalker ve kil karışımından oluşan hammadde yüksek sıcaklıklara (1350-1450°C) kadar pişirilir ve klinker adı verilen ürün elde edilir. Klinker az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülerek nihai bağlayıcı elde edilir [2]. 1 ton Portland çimentosu üretimi için yaklaşık 4.2 GJ enerji gerekir ve 1 ton Portland çimentosu üretimi esnasında atmosfere yaklaşık 0.8-1.0 ton CO<sub>2</sub> gazı salınır [3]. Böylelikle küresel yıllık çimento üretimi, toplam insan kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır [4]. Avrupa Çimento Birliğinin 2017'de hazırladığı raporda, dünya çimento üretiminin 2016 yılı için yaklaşık 4.65 milyar ton olduğu belirtilmiştir [5]. Ayrıca Tablo 1.1 incelendiğinde ülkelerin çimento üretiminin yıldan yıla genel olarak arttığı görülmektedir. Gelişmekte olan ülkelerin büyümesinde önemli bir faktör olan büyük ve modern altyapıların kısa ve orta vadeli inşaatı, açıkça önümüzdeki 40-50 yıl boyunca çimento talebinde dik bir tırmanışın habercisidir [6]. Bu veriler ışığında çimento üretimi arttıkça atmosfere salınan CO<sub>2</sub> gazının da artacağı aşikârdır. Türkiye'nin yıllık çimento üretim miktarları Şekil 1.1'de verilmiştir. Son yıllarda ülkemizdeki inşaat sektöründeki gelişmeler çimento üretim miktarının artmasına neden olmuştur.

Portland çimentosunun kullanımı sadece CO<sub>2</sub> emisyonlarına değil, aynı zamanda başka olumsuz etkilere de sahiptir. Birincisi, özellikle çimento tüketiminin yüksek olduğu ve doğal kaynakların sınırlı olduğu küçük Avrupa ve Doğu Asya ülkelerinde maden rezervlerinin tükenmesine yol açmaktadır. Çimento üretimi ile ilgili ikinci bir endişe, çimento fırınlarından atmosfere yayılan tehlikeli maddeler ile ilişkilidir. Çimento araştırmalarına ilgi duyan kamu ve özel kuruluşlar, bu konulara duyarlı bir şekilde,

sektördeki çevresel ve güvenlik politikalarının uygulanmasını daha da geliştirmek için asgari klinker içeriğine sahip sistemlerin geliştirilmesi ve ticari ölçekte uygulanması peşindedir [7].

**Tablo 1.1** Ükelere göre yıllık çimento üretimleri (milyon ton) [5].

Ülke	2001	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Çin	661.0	1388.4	1644.0	1881.9	2063.2	2137.0	2420.0	2480.0	2350.0	2410.0
Hindistan	102.9	185.0	205.0	220.0	240.0	270.0	280.0	26.0	270.0	290.0
Avrupa Birliği	225.6	250.8	209.0	192.1	191.6	172.6	166.6	166.8	167.2	169.1
ABD	88.9	86.3	63.9	65.2	68.6	74.9	77.4	83.2	83.4	85.9
Türkiye	30.0	51.4	54.0	62.7	63.4	63.9	72.7	71.2	71.4	75.4
Endonezya	31.1	38.5	36.9	39.5	45.2	32.0	56.0	65.0	65.0	63.0
Suudi Arabistan	20.0	37.4	37.8	42.5	48.0	50.0	57.0	55.0	55.0	61.0
Brezilya	39.4	51.6	51.7	59.1	63.0	68.8	70.0	72.0	72.0	60.0
Rusya	28.7	53.5	44.3	50.4	56.1	53.0	72.0	68.4	69.0	56.0
Japonya	79.5	67.6	59.6	56.6	56.4	51.3	57.4	53.8	55.0	56.0
Güney Kore	52.0	51.7	50.1	47.4	48.2	48.0	47.3	63.2	63.0	55.0
Meksika	33.2	37.1	35.1	34.5	35.4	35.4	34.6	35.0	39.8	40.8
Almanya	32.1	33.6	30.4	29.9	33.5	32.4	31.5	32.1	31.1	32.7
İtalya	39.8	43.0	36.3	34.4	33.1	26.2	23.1	21.4	20.8	19.3
Fransa	19.1	21.2	18.1	18.0	19.4	18.0	17.5	16.4	15.6	15.9
Güney Afrika	8.4	13.4	11.8	10.9	11.2	13.8	14.9	13.8	14.0	13.6
Kanada	12.1	13.7	11.0	12.4	12.0	12.5	12.1	12.8	12.5	11.9
Arjantin	5.5	9.7	9.4	10.4	11.6	10.7	11.9	11.8	12.2	10.9
Birleşik Krallık	11.9	10.5	7.8	7.9	8.5	7.9	8.5	9.3	9.6	9.4
Avustralya	6.8	9.4	9.2	8.3	8.6	8.8	8.6	9.3	9.3	9.4



**Şekil 1.1.** Türkiye'nin yıllık çimento üretim miktarları [5].

Özellikle son yıllarda birçok araştırmacı, Portland çimentosunun çevresel etkilerini ve dayanıklılık sorunlarını azaltmak için Portland çimentosunun yerini alabilecek veya Portland çimentosu üretimini azaltabilecek alternatif bağlayıcılar üzerine çalışmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında belirli oranlarda doğal puzolan veya uçucu kül ve silis dumanı gibi endüstriyel atık malzemeler çimento yerine kullanılarak betonlar üretilmiştir [8-10]. Tamamen çimento kullanımından vazgeçilmediği bu tür betonlarda mineral malzemelerin puzolanik özelliklerinden yararlanılmıştır. Yapılan çalışmaların bir kısmında ise mineral malzemelerin alkali ortamlarda aktivasyonu ile elde edilen geopolimer betonlar üretilmiştir [6, 7, 11-19]. Geleneksel betondan farklı olarak, bu üretim esnasında uygun alkalinite ve ortam sıcaklığı gerekmektedir.

Birçok bilim adamı ve mühendis, alkali çimentolarla üretilen yapıların günümüze kadar ayakta kalmalarına ve iyi bir durabilite sergilemelerine rağmen alkali çimentoların neden şu anda dünya çapında yaygın alternatif bir bağlayıcı olmadığını sorgulamaktadırlar. Palomo vd. [6], bu konunun farklı açılardan değerlendirilmesi gerektiğini düşünmektedirler ve bunun nedenlerinden en önemlisinin çimento üretiminin çok kazançlı bir iş olmasından ötürü uluslararası çimento sağlayıcılarının çimentonun alternatif bir bağlayıcı ile yer değiştirilmesine istekli olmadıkları görüşündeler.

Geopolimer üretimi için kaynak malzemelerin uygun kür koşullarında alkalilerle aktive edilmesi gerekmektedir. Geopolimer üretiminde genel olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi mineral malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin bir kısmı genellikle ihtiyaca bağlı olarak elde edilen endüstriyel atık malzemelerdir ve termik santraller veya demir üretim tesisleri çalıştığı sürece elde edileceklerdir. Endüstriyel atık malzemelerin yanında alüminosilikat yapılarından ötürü doğal puzolanlar ile de geopolimer üretilmektedir. Kullanım alanı çok geniş olan doğal puzolanlardan pomza taşının dünya rezervlerinin yaklaşık 1/7'sinin Türkiye'de olduğu tahmin edilmektedir. U.S. Geology Survey [20], dünya rezervleri hakkında kesin bilgi vermese de 2017 yılı için en fazla pomza madenciliği yapan ülkenin Türkiye olduğunu belirtmiştir (6.7 milyon ton). MTA Genel Müdürlüğüne Türkiye geneli yapılan pomza jeolojik etüt çalışmalarından elde edilen verilere göre, Türkiye'deki rezervlerin %56'sı Doğu Anadolu bölgesindedir. Doğu Anadolu'daki pomza rezervlerinin ise büyük kısmı Bitlis yöresinde bulunmaktadır [21]. Düşük maliyetli bir hammadde olan pomza alüminosilikat yapısından ötürü geopolimer üretiminde kullanılabilir. Ancak literatürde alkalilerle aktive edilmiş pomza ile ilgili sayılı çalışma bulunmaktadır.

Alkalilerle aktive edilen hibrit bağlayıcılar, geleneksel Portland Çimentolu malzemelerin olumlu özelliklerini alkali ile aktive olan malzemelerin özellikleriyle birleştirerek yüksek dayanıklılık ve mekanik özelliklere sahip yeni malzemeler üretmeyi hedeflemektedir. Bu sistemlerde kaynak malzemeye düşük miktarlarda Portland çimentosu ilavesi yapılmaktadır. Geopolimer reaksiyonlar daha agresif ortamlarda (yüksek pH ve yüksek ortam sıcaklığı) gerçekleşmektedir. Hibrit sistemlerde ise bir miktar hidrasyon meydana gelmekte ve bu reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ısı mineral malzemenin geopolimerizasyonu için gerekli ortam sıcaklığını sağlayabilmekte ve geopolimer aktivasyonuna katkı sağlamaktadır [6]. Pomza gibi düşük CaO içeren malzemelerle üretilen geopolimerler ortam koşullarında genellikle daha uzun priz süresine ve erken yaşlarda daha düşük dayanımına sahiptir [22, 23]. Bu durumda oluşan reaksiyon ürünü, üç boyutlu alkali bir polimer olan N-A-S-H jelidir.

Geopolimer malzemeler ancak uygun alkali ortamlarda aktifleştirilebilir. Genel olarak yapılan çalışmalarda sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit (NaOH) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalarda alkaliler katı halde kullanıldığı gibi çözelti halinde de karışımlara ilave edilmiştir [24]. Xu ve Deventer [25], alüminosilikat minerallerini aktive etmek için NaOH yerine KOH (potasyum hidroksit) kullanımının geopolimerizasyona yardımcı olduğunu ve daha yüksek basınç dayanımı elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu görüş,  $\text{Na}^+$  iyonundan daha büyük olan  $\text{K}^+$  iyonunun daha büyük silikat oligomer oluşumuna destek vermesiyle açıklanabilir [25]. Ayrıca Bondar vd. [16], doğal puzolanlı geopolimer üretiminde NaOH yerine uygun konsantrasyondaki KOH kullanımı ile daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edildiğini belirtmiştir. Bu sebeple bu tez çalışmasında alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve potasyum hidroksit seçilmiştir.

Hem pomzanın alüminosilikat yapısı hem de Türkiye'deki pomza rezervleri göz önünde bulundurulduğunda, Bitlis yöresinden elde edilen pomzanın alkalilerle aktive edilmiş hibrit sistemlerde kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla, çalışmada kaynak malzemesi pomza olan ve düşük miktardaki Portland çimentosu ilaveli alkalilerle aktive edilen hibrit bağlayıcılar üretilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda hem hamur hem de harç numunelerin uygun alkali ortam ve uygun kür koşullarında mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığı incelenecektir.

## 2. GEOPOLİMERLER

Geopolimerler, Si ve Al bakımından zengin olan yapay veya doğal puzolanların alkali aktivasyonu sonucunda oluşan üç boyutlu polimerik zincir (Si-O-Al-O) yapısına sahip ve sıradan Portland Çimentosuna gerçek alternatif olabilecek bir bağlayıcı malzeme çeşididir.

Geopolimer ifadesi ilk kez 1979'da Fransız bir araştırmacı olan Davidovits tarafından ortaya atılmıştır. Davidovits, 1981'de yaptığı çalışmasında; metakaolin, kalker ve dolomit karışımından elde edilen ürünlere polimerik yapıları sebebiyle geopolimer adını vermiştir [6]. Geopolimer terimi, zamanla dünya çapında inorganik polimer bileşikler için genel bir terim halini almıştır ve daha çok 2002'den sonra geopolimerler üzerine birçok uluslararası konferans düzenlenmiştir. Son yıllarda bazı yazarlar, alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların tanımlanmasının kafa karıştırıcı olduğunu ve alkali silika reaksiyonlarını çağrıştırdığı için inşaat mühendislerini yanlış yönlendirdiğini ileri sürmüşlerdir. Buna ek olarak alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar yerine; geopolimer çimentolar, geopolimerik çimentolu bileşikler, geoçimentolar veya polisialetler olarak adlandırılması gerektirdiğini belirtmişlerdir. Davidovits ise, alkalilerle aktive edilmiş çimentolar ve alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül gibi ifadelerin bir kavram karmaşası oluşturduğunu ancak bu çeşitli isimlendirmelere rağmen bütün bu çimento ve bağlayıcı türünün aslında alkali aktivasyon reaksiyonları ile oluştuğunu belirtmiştir [13, 26-28]. Palomo, geopolimer adının her şeyden önce ticari bir tanım olduğunu ve bu nedenle kullanılmaması gerektiğini vurgulamıştır. Bu nedenle alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar adının kullanılması gerektiğini ve geopolimer isminin sadece amorf ve yarı kristal özelliklerine sahip bir zeolit varlığında kullanılması gerektiği belirtilmiştir [13]. Görüldüğü üzere bu yeni bağlayıcının tanımlanması ve isimlendirilmesi konusunda birçok görüş vardır ve kavram karmaşası yaşanmaktadır. Her şeye rağmen her iki isimlendirmede de reaksiyonun ana mekanizmasını alkali aktivasyonunun oluşturduğunu bilmek gerekmektedir.

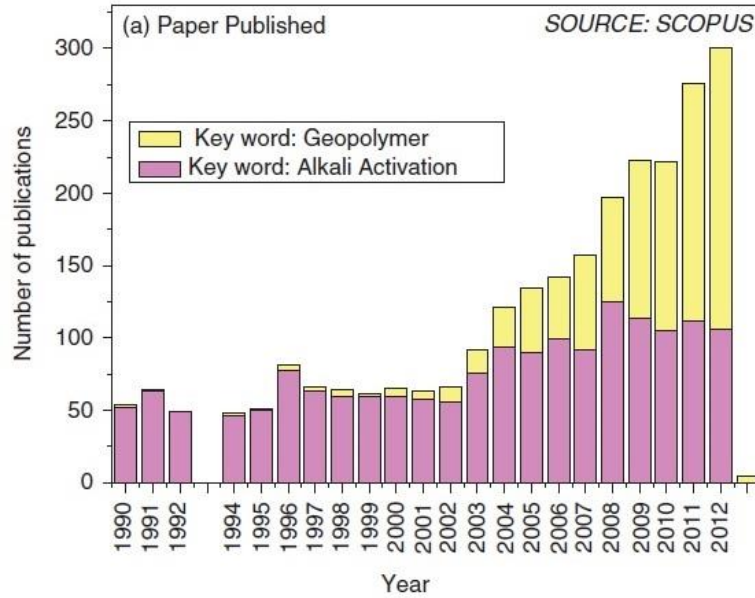
Her ne kadar geopolimer terimini literatüre kazandıran Davidovits olsa da alkalilerin çimentolarda kullanılmasına yönelik ilk girişimler 1930'lu yıllara kadar dayanmaktadır (Tablo 2.1).

**Tablo 2.1** Alkalilerle aktive edilmiş çimentolar hakkındaki önemli olaylar [31].

Feret	1939	Bağlayıcı olarak kullanılan cüruflar
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkali çimentoların gelişimi ve teorik temelleri
Glukhovsky	1965	İlk olarak "alkali çimentolar"
Davidovits	1979	"Geopolimer" terimi
Malinowski	1979	Antik su kemerlerinin karakterize edilmesi
Forss	1983	F tipi çimento (cüruf-alkali-süperplastikleştirici)
Langton ve Roy	1984	Tarihi yapı malzemelerinin karakterize edilmesi
Davidovits ve Sawyer	1985	"Pyrament" çimentosunun patentinin alınması
Krivenko	1986	Doktora tezi, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melit cürufların aktivasyonu
Malek vd.	1986	Cüruf çimento-düşük seviye radyoaktif atık formları
Davidovits	1987	Eski ve modern betonların karşılaştırılması
Deja ve Malolepsy	1989	Kloridlere karşı direnç araştırılması
Kaushal vd.	1989	Alkali karışımlardan oluşan adyabatik kürlenmiş nükleer atık formları
Roy ve Langton	1989	Tarihi betonların benzerleri
Majundar vd.	1989	$C_{12}A_7$ -cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf
Wu vd.	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy vd.	1991	Alkalilerle aktive edilmiş çimentoların priz alması
Roy ve Silsbee	1992	Alkalilerle aktive edilmiş çimentolara genel bakış
Palomo ve Glasser	1992	Metakaolin ile kalsine edilmiş kahverengi kil
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentolar
Glukhovsky	1994	Eski ve modern betonlar ile geleceğin betonları
Krivenko	1994	Alkali çimentolar
Wang ve Scivener	1995	Cüruf ve alkalilerle aktive edilmiş yapıların içyapıları
Shi	1996	Alkalilerle aktive edilmiş cürufun mukavemeti, gözenek yapısı ve geçirgenliği
Fernandez-Jimenez ve Puertas	1997	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf çimentoları üzerine kinetik çalışma
Katz	1998	Alkalilerle aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapıları
Davidovits	1999	Geopolimerik sistemlerin kimyası ve teknoloji
Roy	1999	Alkalilerle aktive edilmiş çimentoların fırsatları ve zorlukları
Palomo	1999	Alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül-geleceğe yönelik bir çimento
Gong ve Yang	2000	Alkalilerle aktive edilmiş kırmızı çamur-cüruf çimentosu
Puertas	2000	Alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül/cüruf
Bakharev	2001-2002	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf betonlar
Palomo ve Palacios	2003	Tehlikeli atıkların immobilizasyonu
Grutzeck	2004	Zeolit formu
Sun	2006	Sialite teknolojisi
Duxson	2007	Geopolimer teknolojisi
Hajimohammadi, Provis ve Deventer	2008	One-part geopolimer
Provis ve Deventer	2009	Geopolimerler: yapısı, işlenmesi, özellikleri ve endüstriyel uygulamaları

Daha sonra, 1957'de Victor Glukhovsky, başlangıçta "toprak çimentoları" olarak adlandırılan, kil ve alkali metal çözeltileri kullanarak düşük kalsiyumlu veya kalsiyumsuz çimentolu malzemeler hazırlama olanağını araştıran ilk araştırmacıydı. Bu ilk yaklaşımı; yüksek fırın cürufu, kil, alüminosilikat kayalar ve uçucu kül gibi geniş bir ürün yelpazesinin kullanıldığı çalışmalar takip etmiştir [6]. Glukhovsky, başlangıç malzemelerinin bileşimine bağlı olarak bağlayıcıları  $Me_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  ve  $Me_2O-MO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  şeklinde iki gruba ayırmıştır (Me=Na, K...; M=Ca, Mg...) [29].

Palomo vd. [6], geopolimer ve alkali aktivasyon üzerine yayınlanan bilimsel çalışmaların 2012 yılına kadar yaklaşık üssel olarak arttığını belirtmiştir (Şekil 2.1). Bu da geopolimer veya alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların son yıllarda araştırmacıların ilgisini çektiğini göstermektedir.



Şekil 2.1. 2012 yılına kadar anahtar kelimesinde alkali aktivasyon ve geopolimer terimi içeren basılı yayınlar [6].

Geopolimer, oldukça alkali bir ortamda reaktif bir katı maddenin aktivasyonundan sonra katılaştıran büyük bir bağlayıcı grubu için kullanılan bir isimdir. Malzemenin priz alması ve dayanımının gelişimi esas olarak amorf inorganik alüminosilikatların üç boyutlu ağ yapılarını oluşturan polikondenzasyon reaksiyonlarına bağlanabilir. Geopolimerler, kaolin gibi doğal alüminosilikat kaynaklardan veya uçucu kül gibi atık malzemelerden üretilir. Geopolimer bağlayıcıların özellikleri, kaynak malzemeye ve aktivasyon koşullarına bağlıdır [30].

Teorik olarak, tüm alüminosilikat malzemeler alkaliler ile aktive edilebilir. Fakat alüminosilikat malzemenin alkalilerle aktive edilmesi için ortamda yüksek çözünürlük (pH) ile yeterli miktarda  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$ 'nin bulunması gerekmektedir [29].

Alkali metal veya alkali toprak hidroksitleri (ROH,  $R(OH)_2$ ), zayıf asit tuzları ( $R_2CO_3$ ,  $R_2S$ ), güçlü asit tuzları ( $Na_2SO_4$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ve  $R_2O(n)SiO_2$  tipi silisli tuzlar, genel olarak geopolimer üretimi için kullanılan alkali çözeltilerdir. Burada R; Na, K ve Li gibi alkali iyonları temsil etmektedir. Literatürde, oluşan nihai ürünlerin dayanıklılığı açısından en etkili alkali aktivatörlerin NaOH,  $Na_2CO_3$  ve hidratlanmış sodyum silikatlar veya cam suyu çözeltileri olduğu belirtilmiştir [32-34].

Genel olarak yapılan çalışmalarda alkali aktivasyon için uygun kür sıcaklığının 40-85°C olduğu tespit edilmiştir [35-38]. Ayrıca Palomo vd. [6] düşük kalsiyum içeren sistemlerin 60-200°C aralığında, kalsiyum oranı yüksek sistemlerin ise ılıman ortamlarda aktive olabileceğini belirtmiştir.

1950'lerin ortalarında, eski Sovyetler Birliği'nde Portland çimentosu alternatiflerine yönelik talepten dolayı Glukhovsky, düşük kalsiyumlu veya kalsiyum içermeyen alüminosilikat malzemeleri alkali çözeltiler ile aktif ederek toprak çimentoları denen bağlayıcıyı geliştirmiştir. O tarihten beri, birkaç milyon ton üretilen bu malzemeler birçok altyapı ve üstyapı inşaatında kullanılmıştır [39, 40]. Kuzey Avrupa'da, F-beton olarak bilinen alkalilerle aktive edilmiş cüruf betonları 1980'lerde geliştirilmiş ve ticarileşmiştir [41]. Metalürjik cürufların alkali aktivasyonu ile üretilen çimentolar ve betonlar Çin'de uzun yıllardır pazarlanmaktadır [42]. 1970'lerin Fransa'sında Davidovits [43], metakaolin bazlı alkalilerle aktive edilen bağlayıcıları geliştirdi ve ticarileştirmeye başladı. Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılara ilginin artmasıyla 1980'lerde ve 1990'larda Kuzey Amerika'da yüksek erken dayanımlı Portland/alkalilerle aktive edilmiş hibrit bir beton olan Pyrament pazarlanmıştır. Wastiels [44], yüksek fırın cürufunu ve uçucu külü alkalilerle aktif ederek boru üretimi için aside karşı dayanıklı bir malzeme üretmiştir. Aynı zamanda bu malzeme Hollanda'da patentlenmiş ve pazarlanmıştır. Birleşik Krallık, Hollanda ve Çek Cumhuriyeti gibi birçok Avrupa ülkesinde alkalilerle aktifleştirilmiş inşaat ürünlerinin ticareti yapılmaktadır. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karışımları Avustralya'da ticarileşmiş ve E-Crete markası altında pazarlanarak büyük altyapı işlerinde ve yerel inşaat projelerinde kullanılmıştır (Şekil 2.2 ve 2.3) [40]. Yıllar içinde, çok sayıda şirket, çok çeşitli inşaat uygulamalarında alkali (özellikle yüksek fırın cürufu) çimento esaslı beton yapı elemanlarının imalatını, ticarileştirilmesini ve kullanılmasını sağlamıştır [6].



Şekil 2.2 E-Crete hazır beton tesisi ve uygulaması [6].



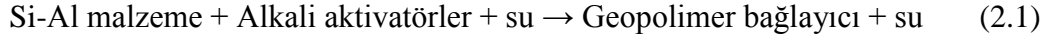
Şekil 2.3 Avustralya’da E-Crete kullanılarak tamamlanmış inşaat projeleri [40].

## 2.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler

### 2.1.1. Bağlayıcılar

Geopolimer oluşumunda başlangıç malzemesi (kaynak malzemeler) önemli bir rol oynamaktadır. Si ve Al bakımından zengin malzemeler geopolimerizasyonun temel gereksinimidir [45]. Geopolimer bağlayıcı üretmek için kaolinit ve kil gibi doğal mineraller ile uçucu kül, kırmızı çamur ve pirinç kabuğu külü gibi atık malzemelerin de içerisinde bulunduğu, yüksek miktarda Al-Si içeren mineral malzemeler kullanılabilir [46]. Denklem

2.1'deki reaksiyon mekanizması, Al-Si içeren malzemenin alkali metallere reaksiyona girdiği ve bir polimer ürünü ürettiği polimerizasyon işlemini göstermektedir [27].



Alkali aktivasyon reaksiyonları; başlangıç materyalinin (bağlayıcı) parçacık büyüklüğü dağılımına ve mineral bileşimine büyük oranda bağlıdır [47]. Genellikle amorf olan cüruf, uçucu kül ve metakaolin gibi kalsine edilmiş materyallerin, genellikle kalsine edilmemiş materyallere kıyasla geopolimerizasyon sırasında daha yüksek bir reaktivite sergiledikleri kanıtlanmıştır [25, 35].

Geopolimer üretiminde; doğal minerallerin, atık malzemelerin (özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu) ve toksik malzemelerin kullanımı son yıllarda yoğun olarak araştırılmıştır [16, 35, 48-51]. Xu ve Van Deventer [25], geopolimer üretmek için 16 farklı alüminosilikat içeren malzemeyi kaolinit ile birlikte kullandıkları kapsamlı çalışmalarında, diğer alüminosilikatlar olmadan sadece kaolinit kullanıldığında zayıf bir yapı oluştuğunu bu nedenle farklı alüminosilikatların bir arada kullanılmasının önemini vurgulamıştır.

Daha önceki çalışmalarda, esas olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve metakaolin gibi öncüller geopolimer üretimi için kullanılmıştır. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalar ile öncüllerin kaynaklarının ve türlerinin genişlemiş olduğu görülmektedir. Alkali aktivasyon öncülü olarak üzerinde çalışılan diğer malzemeler aşağıdaki gibidir [12];

- Boksitten alüminyum üretimi sırasında ortaya çıkan ve bir atık malzeme olan kırmızı çamur (red mud)
- Manganez cevherinden demir üretimi esnasında atık olarak elde edilen siliko manganez cürufu (silico-manganese slag)
- Kömür kazısı ve yıkama sırasında boşaltılan bir maden atığı olan gang kömür (coal gangue)
- Petrol rafinelerinin katalizör kalıntıları (catalyst residues)
- Termik santrallerde elektrik üretmek için yakılan kömür fırınının altında kalan taban külü (coal bottom ash)
- Elektrik üretmek için veya başka sebeplerden ötürü yakılan pirinç kabuğu külü (rice husk ash)
- Palmiye yağı endüstrisinin bir yan ürünü olan palmiye yağı yakıt külü (palm oil fuel ash)

- Cam atığı
- Seramik atığı
- Doğal mineraller

Bu malzemelerin ortak özelliği olan alüminosilikat yapıları araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bunların dışında son yıllarda geri dönüşümün odağında olan bina atığı malzemelerden de (tuğla, beton ve cam atığı) alkali aktivasyon yöntemiyle yeni bağlayıcılar üretimi üzerine araştırmalar yapılmıştır [52].

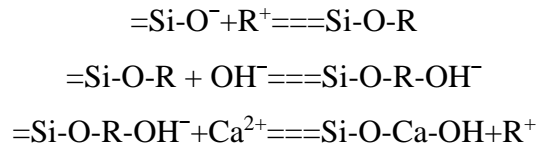
Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül esaslı geopolimerler üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmıştır ancak doğal puzolanlı geopolimerler için nispeten daha az literatür çalışması bulunmaktadır. Doğal puzolanlar genellikle  $\text{SiO}_2$  oranı yüksek ve çok çeşitli kimyasal bileşime sahip jeolojik tortullardır. Haddad ve Alshbuol [53], bazaltik tüf esaslı alkalilerle aktive edilmiş beton çalışmalarında  $80^\circ\text{C}$  etüv sıcaklığı ile 28 günlük 31.9 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Yadollahi vd. [17], pomza kullandıkları alkalilerle aktive edilmiş hamur çalışmalarında  $65^\circ\text{C}$  etüv sıcaklığı ile 28 günlük 40 MPa basınç dayanımına ulaşmışlardır. Literatürde pomza gibi doğal puzolanlı geopolimerlerin daha yüksek kalsiyum içeren endüstriyel atık malzemeler ile birlikte kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Ramezianpour ve Nadoushan [54], ortam koşullarında küre bırakılan pomza ve yüksek fırın cüruf esaslı geopolimer hamur çalışmalarında yaklaşık 160 MPa basınç dayanım elde edebilmişlerdir.

Roma döneminde kullanılan betonların içeriğinde yer alan volkanik küller de alkali aktivasyona uygundur [55]. İran'ın pomza tipi volkanik küllerinin sodyum silikat çözeltileri ile aktifleştirilmesi, alkalilerle aktive edilen bağlayıcılar için bir öncü olarak değer kazanmıştır. Az miktarda kalsiyum alüminat çimentosu eklenmesi volkanik külün düşük reaktif alümina içeriğine bağlı çiçeklenmesini azaltmada etkili olduğu vurgulanmıştır [56, 57]. Kamerun'da yapılan bir dizi araştırmada, hem yoğun hem de gözenekli doğal puzolanların alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin üretiminde değer taşıdığı belirtilmiştir [12, 58, 59].

Palomo vd. [6], çimentolu bileşenlerin ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  sistemi) doğasına dayalı olarak alkalilerle aktive edilen bağlayıcıların üç ana grupta toplanabileceğini belirtmişlerdir. Bunlar;

- Kalsiyum bakımından zengin çimentolar,
- Düşük kalsiyumlu çimentolar,
- Hibrit çimentolardır.

Kalsiyum bakımından zengin çimentolu sistemlerin aktivasyon malzemeleri yüksek kalsiyum ve silis ((Na, K)<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) içermektedir. Bu modele, nispeten ılımlı koşullar altında aktive edilebilen yüksek fırın cürufunun (SiO<sub>2</sub>+CaO>%70) alkali aktivasyonu örnek olarak verilebilir. Bu durumda, ana reaksiyon ürünü Portland çimentosu hidratasyonu sırasında elde edilen jele benzer bir C-S-H jelidir. Aynı zamanda bir miktar Al'un bağ yapısına dâhil olmasıyla C-A-S-H jeli de oluşmaktadır. Cüruf; CaO (%35-40), SiO<sub>2</sub> (%25-35), MgO (%5-10) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%5-15) ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Örnek bir yüksek fırın cürufu numunesine ait kimyasal bileşim Tablo 2.2'de verilmiştir. Diğer yandan cüruf hem (SiO<sub>4</sub>)<sup>4-</sup>, (AlO<sub>4</sub>)<sup>5-</sup> ve (MgO<sub>4</sub>)<sup>6-</sup> gibi ağ oluşturu anyonları hem de Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> ve Mg<sup>2+</sup> gibi ağ değiştirici katyonları içermektedir [6]. Cürufun iç yapısını %90-95 camsı faz oluşturmaktadır. Bir dizi araştırma, alkali aktivasyon sürecinin büyük oranda bağlayıcı bileşenlerine ve camsı yapılarına bağlı olduğunu belirtmiştir [60, 61]. Fakat alkali reaktivite ve camsı faz arasında doğrudan bir ilişki tam olarak kanıtlanamamıştır. Buna rağmen bazı yazarlar [62], daha efektif bir aktivasyon için cüruf yapısında en az %90 camsı faz olması gerektiğini düşünmekteyken bazı yazarlar da [63] %30-65 aralığındaki bir camsı faz oranının yeterli olacağı kanaatindedir. Glukhovsky ve Krivenko [64, 65], aşağıdaki reaksiyonlar vasıtasıyla yüksek fırın cürufu gibi SiO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve CaO<sup>-</sup> bakımından zengin malzemelerin alkali aktivasyonunu açıklayacak bir model önermişlerdir (R<sup>+</sup>=Alkali katyon).



**Tablo 2.2** Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi [66].

Bileşen	İçerik (%)
SiO <sub>2</sub>	40.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.66
MgO	6.00
CaO	36.42
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	1.25
SO <sub>3</sub>	1.62
TiO <sub>2</sub>	1.01
Serbest CaO	-
Reaktif SiO <sub>2</sub>	39.25
Kızdırma Kaybı	0.20

Düşük kalsiyumlu sistemler, esas olarak alüminyum ve silikon (Na, K)<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) içeren malzemelerin aktivasyonudur. Bu ikinci alkali aktivasyon sistemi, metakaolin veya F tipi uçucu kül gibi düşük CaO içeriğine sahip malzemeleri içerir. F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşime ait bir örnek Tablo 2.3'te verilmiştir. Bu durumda, alkali aktivasyon reaksiyonlarını başlatmak için daha agresif ortam koşulları gerekmektedir (yüksek alkali ortam ve 60-200°C kür sıcaklığı). Bu sistemin ana reaksiyon ürünü, üç boyutlu bir inorganik polimer olan N-A-S-H (geopolimer) jelidir [6].

**Tablo 2.3** F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşimi [67].

Bileşen	İçerik (%)
SiO <sub>2</sub>	58.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.25
CaO	2.58
MgO	2.42
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	3.05
SO <sub>3</sub>	0.27
Kızdırma Kaybı	3.23

Palomo vd. [6], önceki iki alkali reaksiyon sisteminin bir karışımı olan hibrit alkali çimentoları yeni bir alkali aktivasyon modeli olarak tanımlamıştır. Bu sistemde CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %20'nin üzerinde olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu hibrit alkali sistem aşağıdaki gibi iki gruba ayrılabilir:

- Grup A: Düşük Portland çimentosu klinkeri içeriği (<%30) ve yüksek oranda mineral malzeme içeriğine (>%70) sahip olmalıdır.
- Grup B: Portland çimentosu içermeyen; yüksek fırın cürufu + uçucu kül, fosfor cürufu + yüksek fırın cürufu + uçucu kül ve benzeri sistemleri içermektedir.

Alkalilerle aktive edilmiş hibrit sistemlerin reaksiyon ürünü C-S-H ve N-A-S-H jellerinin karışımından oluşmaktadır [49].

### 2.1.2. Alkali Aktivatörler

Geleneksel betonlardan farklı olarak, alkalilerle aktive edilmiş alüminosilikatlı bağlayıcıların davranışı, alkali aktivatörlerin tipine ve konsantrasyonuna büyük ölçüde

bağlıdır. Bunun yanı sıra malzemenin kür sıcaklığı da dayanım kazanma açısından önemlidir.

Alkalilerle aktive edilmiş betonlarda veya çimentolarda genellikle kostik alkaliler ve alkali tuzlar kullanılmaktadır [39]. Glukovsky vd. [68] bu alkalileri kimyasal bileşenlerine göre 6 farklı grupta toplamıştır (M=Na, K, Li...(Alkali metalleri));

- Kostik alkaliler : MOH
- Silikatsız zayıf asit tuzları :  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_2PO_4$
- Silikatlar :  $M_2O.nSiO_2$
- Alüminatlar :  $M_2O.nAl_2O_3$
- Alüminosilikatlar :  $M_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$
- Silikatsız güçlü asit tuzları :  $M_2SO_4$

Yukarıda belirtildiği gibi, alkali aktivasyonda kullanılan alkali aktivatörler çeşitlilik göstermektedir. Alüminosilikat malzemeleri aktive ederken aktivatör olarak; NaOH,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2O.nSiO_2$  ve  $Na_2SO_4$  alkalileri kullanılmaktadır. Alkali aktivasyon için en çok kullanılan aktivatörler ise hidroksitler (NaOH, KOH) ve cam suyu/sodyum silikat ( $nSiO_2Na_2O$ ) veya potasyum cam suyudur ( $nSiO_2K_2O$ ) [39, 69, 70].

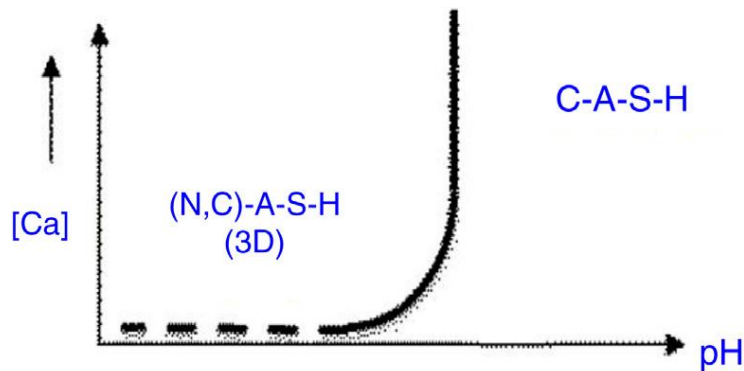
Farklı alkaliniteye sahip çözeltilerle aktive edilen hibrit çimentoları analiz eden Garcia-Lodeiro vd. [71], alkali aktivatör tipinin reaksiyon kinetiklerini ve ikincil reaksiyon ürünlerinin oluşumunu önemli ölçüde etkilemesine karşın, ana çimentolu jeller ((N,C)-A-S-H/C-A-S-H) üzerinde herhangi bir malzeme etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, alkali aktivasyon sonucunda oluşan her bir jelin miktarının aktivatöre bağlı olduğu gözlenmiştir. Yine aynı çalışmada, güçlü alkalilerin varlığının uçucu külün çözünmesini ve bir (N,C)-A-S-H jelin çökmesini, daha hafif alkali bileşiklerin kullanılmasının ise C-A-S-H jellerinin oluşumunu desteklediği belirtilmiştir [71].

Alüminosilikat malzemelerin alkalilerle aktivasyonu Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının parçalanmasıyla başlar. Alkali hidroksitler kaynak malzemenin çözünmesi ve bu bağların koparılması için kullanılmaktadır [45]. Alkali hidroksitlerle karşılaştırıldığında, çözünür silikatların karışıma eklenmesi reaksiyon hızını arttırmakta ve reaksiyon sonucunda oluşan bağlayıcıların gelişimini sağlamaktadır [25, 72]. Alkali hidroksitlerle aktive edilen minerallerin içerisine ekstra  $Na_2SiO_3$  katılması ile daha uzun zincirli silikat oligomerler oluşmakta ve böylelikle daha güçlü bir bağ meydana gelmektedir. Alkali silikat çözeltilisinin bileşimi genel olarak  $SiO_2/Na_2O$  oranı (silika modülü) olarak ifade edilir. Ticari olarak

üretileen likit sodyum silikatların silika modülleri 1.60-3.85 aralığında değişmektedir. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının artması ile polimerizasyon oluşumu desteklenmektedir [16, 25, 35].

Literatürde doğal alüminosilikatların aktivasyonu ile ilgili çalışmaların uçucu kül ve cüruf gibi atık malzemelere oranlara daha az olduğu görülmektedir. Doğal alüminosilikatlar aktifleştirilirken genellikle sodyum veya potasyum hidroksit ile sodyum silikat çözeltilerinin karşımı kullanılmıştır. Xu ve Deventer [25, 73], doğal alüminosilikatlar aktifleştirilirken potasyum hidroksitin sodyum hidroksitten daha iyi reaksiyon ürünleri oluşturduğunu ve daha iyi dayanım kazandırdığını belirtmiştir. Yazarlar, Na<sup>+</sup>dan daha büyük olan K<sup>+</sup> iyonunun büyük silikat oligomerlerinin oluşumunu desteklediğini düşünmektedirler. Böylelikle potasyum hidroksit kullanımı ile sodyum hidroksite göre daha kısa priz süreleri ve daha yüksek dayanımlar elde edilebileceğini belirtmişlerdir. İyon büyüklüğü farkının reaksiyonların kinetiğinde belirleyici bir faktör olması muhtemeldir ve bu durum yüksek silikat aktifleştirici çözeltiler kullanıldığında giderek daha önemli bir rol oynayacaktır [72].

Alkali aktivatör tipinin yanında pH değerinin de geopolimerleşme üzerinde büyük etkisi vardır. Amorf alüminosilikatların çözünmesi yüksek pH ortamında daha hızlıdır ve böylelikle doymuş alüminosilikat çözeltileri oluşmaktadır [72]. Garcia-Lodeiro vd. [74] C-S-H/N-A-S-H uyumluluğunu analiz etmek için sentetik numuneler üzerinde yürüttükleri yakın tarihli araştırmaları, kalsiyum varlığında N-A-S-H yapısının kararlılığının, ortamdaki pH değerine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Ortamda yeterli miktarda kalsiyum bulunduğunda ve 12'nin üzerindeki pH değerinde, C-A-S-H jeli N-A-S-H jelinden daha baskın olmaktadır (Şekil 2.4). Bu bulguları veren deneyler, özellikle reaksiyonun erken evrelerinde, bağlayıcı hidratasyonunda normalde gerçekleşmeyen denge koşullarında gerçekleştirilmiştir [5].



Şekil 2.4 N-A-S-H jel stabilitesini pH ve kalsiyum içeriği açısından tanımlamak için önerilen model [74].

Alüminosilikat malzemeleri aktive etmek için kullanılan alkaliler sıvı çözelti halinde kullanılabilirdiği gibi katı halde de kullanılabilir. Qu vd. [75], bir beton santralinde Portland çimentosu klinkeri, cüruf, uçucu kül ve katı haldeki alkali aktivatörü milde öğütüp çimento haline getirmiştir. Daha sonra normal Portland çimentosu gibi karışıma sonradan su ilave edilerek malzemenin bağlayıcılık özelliği kazanması sağlanmıştır. Yapılan basınç dayanımı testleri sonucunda ortam koşullarında kür edilen 28 günlük numunelerde yaklaşık 35 MPa dayanım elde edilirken, 3 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımı 85°C etüv sıcaklığında gerçekleşmiştir.

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar üretirken kullanılan alkali aktivatörlerin dozajı için henüz standartlaşmış bir yöntem yoktur. Tipik olarak, bir mineral malzeme alkalilerle aktifleştirileceği zaman ön çalışmalar, alkali miktarını belirlemek için yapılmaktadır. Bu da aktivatör dozajının çalışmadan çalışmaya değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle, mikro yapısal gelişim ve alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin dayanıklılığında aktivatör konsantrasyonunun rolünün iyi anlaşılmadığı ortaya çıkmaktadır [76].

## **2.2. Kür Koşulları**

Alkalilerle aktive edilecek malzemelerin kür sıcaklığı reaksiyon kinetiklerini etkilemektedir. Alkali aktivasyon reaksiyonu sonucunda oluşan ürünlerin doğası da kür sıcaklığına ve kür süresine göre değişmektedir. Etüv kürü süresinin artması silika açısından zengin ürünlerin oluşumunu ve malzemenin mukavemet gelişimini desteklemektedir [6]. Yüksek kür sıcaklığı ve daha uzun kür süreleri malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir.

Geleneksel Portland çimentolu betonlarda olduğu gibi, alkalilerle aktive edilen malzemelerde de kür sıcaklığının artmasıyla malzemenin dayanım kazanımı artmaktadır. 65°C ve üzeri sıcaklıklarda Portland çimentosu hidratasyonu sonucunda oluşan C-S-H jeli ortam sıcaklığında meydana gelen C-S-H jelinden daha polimerizedir. Yine aynı şekilde, alkali aktivasyon üzerine yapılan çalışmalar kür sıcaklığı ve süresinin bağlayıcıların mekanik gelişimini büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bununla birlikte dayanım artışının yüksek sıcaklıklarda yavaşladığı görülmüştür. Tuyan vd. [77], atık tuğla tozu ile ürettikleri alkalilerle aktive edilmiş harç çalışmasında, 90°C'ye kadar sıcaklık artışının numunelerin basınç dayanımlarının arttırdığını 90°C'den sonra ise düşürdüğünü tespit etmiştir. Salih vd. [78], palmiye yağı külü ile yürüttükleri alkalilerle aktivasyon

çalışmalarında kür sıcaklığının 60°C'den 80°C'ye çıktığında dayanım kazanma hızının düştüğünü belirtmiştir. İlkentapar vd. [79], F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimer harçlarda genel olarak kür süresinin artmasıyla numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının arttığını vurgulamıştır. Bununla birlikte kür sürelerinin artmasıyla dayanım kazanma hızlarının da düştüğü görülmüştür. Mustafa Al Bakri vd. [80], alkali aktivatör olarak NaOH ile Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullandıkları uçucu küllü geopolimerlerin farklı kür sıcaklıklarındaki (50°C, 60°C, 70°C ve 80°C) dayanımlarını incelemiştir. 24 saat etüv küründe bekleyen numunelerin basınç dayanımının 60°C sıcaklığa kadar arttığı (67.04 MPa) 60°C'den sonra (80°C-27.87 MPa) ise düştüğü tespit edilmiştir. Salman vd. [81], cürufu alkalilerle aktifleştirdikleri çalışmalarında 6 farklı kür sıcaklığı (60, 70, 80, 90, 100 ve 110°C) ve etüvden sonraki 4 farklı bekleme süresinde (3, 7, 28 ve 90 gün) malzemenin basınç dayanımı değişikliklerini incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda en yüksek basınç dayanımının 110°C'de elde edildiği ve 90 günlük numunenin dayanım kazanma hızının 3 günlüğe göre düşük olduğu belirtilmiştir. İleriki yaşlarda dayanım kazanma yavaşlamaktadır.

Yüksek sıcaklıkların yanında ortam koşullarında da alkali aktivasyon reaksiyonları devam edebilmektedir. Ca içeriği bakımından zengin alüminosilikatların alkali aktivasyonunda daha düşük kür sıcaklıkları yeterli olurken Ca içeriği düşük olan alüminosilikat malzemeleri aktifleştirmek için daha yüksek kür sıcaklıklarına ihtiyaç vardır [6].

Kür sıcaklığının alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar üzerindeki etkisi kullanılan alkali aktivatöre göre değişkenlik gösterebilmektedir. Huseien vd. [82], uçucu kül ve palmiye yağı külünü alkalilerle aktive ettikleri çalışmada alkali aktivatörler ile kür sıcaklıkları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu çalışmada, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün beraber kullanıldığı numunelerde oda sıcaklıklarında daha yüksek basınç dayanımı elde edilirken, sadece NaOH kullanılan numunelerde ise 60°C sıcaklıkta daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Doğal puzolanların kür sıcaklıkları karşısındaki dayanım kazanmaları ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Haddad ve Alshbuol [53], doğal puzolan (bazaltik tüf) kullandıkları çalışmada üç farklı kür sıcaklığının (40°C, 80°C ve 120°C) ve iki farklı kür süresinin (24 ve 48 saat) alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların dayanımına etkisini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanımının 80°C etüv sıcaklığında elde edildiği, 24 saatlik etüv süresinin dayanımı hızlandırdığı ve 48 saate kadar ise dayanım kazanma hızının

düştüğü tespit edilmiştir. Bondar vd. [16], doğal puzolan (andezit ve dasit) içerikli alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların 60°C sıcaklıkta en yüksek basınç dayanımı elde ettiğini tespit etmiştir. Yadollahi vd. [17, 83], pomza ile üretilen geopolimer çalışmasında 25°C, 45°C, 65°C ve 85°C etüv sıcaklıklarının dayanıma etkisini incelemiştir ve en yüksek basınç dayanımının 65°C etüv sıcaklığında elde edildiğini belirtmiştir.

Kaynak malzemeye belirli oranlarda Portland çimentosu ilavesiyle oluşturulan hibrit bağlayıcıların da kür koşulları incelenmiştir. Rivera vd. [84]; %10, %20 ve %30 oranında Portland çimentosu ve uçucu kül içeren alkalilerle aktive edilmiş hibrit bağlayıcıların kür koşullarını incelemiştir. Oda koşullarında kür edilen ve %30 Portland çimentosu ikame edilen numunelerin basınç dayanımının 63.6 MPa olduğu belirtilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada %100 uçucu küllü geopolimerin 75°C kür sıcaklığında 28 günlük basınç dayanımının ise yaklaşık 22 MPa olduğu tespit edilmiştir. Palomo vd. [49], alkalilerle aktive edilen hibrit sistemlerde, Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan ısının geopolimerizasyonu hızlandığını ve ortam koşullarında da alkali aktivasyonun gerçekleşebileceğini belirtmiştir.

Görüldüğü üzere alkali aktivasyon için standart bir kür sıcaklığı belirlenememiştir. Kaynak malzemelerin kimyasal yapıları, alkali aktivatörlerin tipi ve konsantrasyonu gibi birçok etken optimum kür sıcaklığını tespit etmede önemli rol oynamaktadır. Genel olarak, hibrit sistemlerin geopolimer sistemlere göre daha düşük sıcaklıklarda geopolimerizasyon reaksiyonlarını gerçekleştirebildiği sonucuna varılabilir.

### **2.3. Reaksiyon Mekanizması**

Geopolimerizasyon, birçok alüminosilikat malzemeyi, geopolimer veya inorganik polimerler olarak adlandırılan faydalı ürünlere dönüştürebilen yenilikçi bir teknolojidir. Alüminosilikat malzemelerin alkalilerle aktivasyonu henüz tam olarak tarif edilemeyen karmaşık bir süreci temsil etmektedir [45].

Geopolimerler, silis ve alümin içeren malzemelerin alkali aktivatörler ile uygun kür koşulları altında aktifleştirilmesi sonucunda oluşmaktadır. Geopolimerizasyon, mineralleri kimyasal olarak birleştiren bir inorganik polikondenzasyon reaksiyonudur [85]. Polimerik jel oluşturmak için alüminosilikat malzeme, alkali aktivatörler ile etkileşime girmekte ve karmaşık bir dizi kimyasal reaksiyon gerçekleşmektedir. Glukhovsky [65], alkali çözeltilerin kaynak malzemelerdeki silikon ve alüminyum iyonlarını çözmek için

kullanıldığını ve geopolimerin üç adımda oluştuğunu belirtmiştir. Bu adımlar aşağıdaki gibidir;

- Çözünme-koagülasyon(katılaşma)
- Koagülasyon-yoğunlaşma
- Yoğunlaşma-kristalleşme

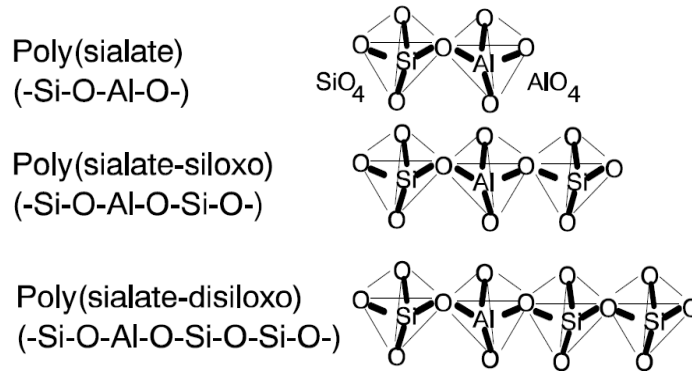
Yukarıda belirtildiği gibi alkali aktivasyon mekanizması; çözünme, yoğunlaşma ve birleşme tepkimelerinden oluşmaktadır. İlk adımda, alkali çözeltinin pH değeri yükseldikçe Si-O-Si ile Al-O-Si yapılarının kovalent bağları kopar ve böylelikle kolloidal faz oluşur. Daha sonra çözünen alümin ve silikat yapıları bir araya gelir ve üçüncü aşamada yoğunlaşmış yapının oluşması sağlanır [13].

İlerleyen yıllarda, farklı yazarlar geopolimerleşme sürecini açıklamak için Glukhovsky teorilerini detaylandırmış ve genişletmiştir. Davidovits [43], geopolimerizasyon sonucunda üç boyutlu alüminosilikat yapılar oluştuğunu belirtmiştir. Polysialat olarak ifade edilen bu yapıların deneysel olarak elde edilmiş formülü Denklem 2.2’de verilmiştir.



Bu formülasyonda M; Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> gibi katyonları, z; 1, 2 veya 3 sayılarını, n ise polikondenzasyon derecesini ifade etmektedir.

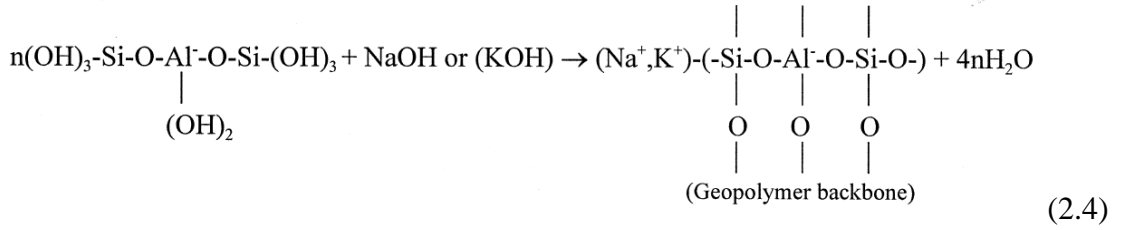
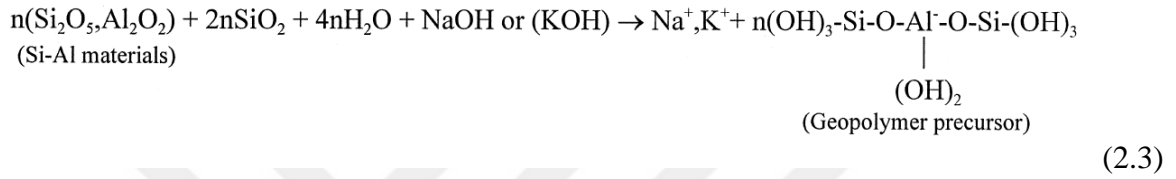
Polysialat ağları, tüm oksijen atomlarının paylaşılmasıyla bağlanan SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> tetrahedralarından oluşan zincir ve halka polimerlerdir. Bu polimerlerde alüminyum ve silisyum arasında oksijen atomları bulunmaktadır (-Si-O-Al-O-). Amorf ila yarı kristal arasında değişen polysialat çeşitleri Şekil 2.5’te belirtilmiştir [43].



Şekil 2.5 Polysialat çeşitleri [43].

$Al_3^{+}$ 'un negatif yükünü dengelemek için yapı boşluklarında pozitif iyonlar ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Ba^{++}$ ,  $NH_4^+$ ,  $H_3O^+$ ) bulunmalıdır [26]. Geopolimerlerin molekül yapısı genellikle bir zincir veya halka şeklini alır ve amorf tan yarı kristale kadar değişebilir. Amorf polimerler düzensiz polimer zincirlerdir. Geopolimerler hem sıralı hem de sıralanmamış polimer yapılarına sahiptir ve bu nedenle yarı kristal olarak adlandırılmaktadır.

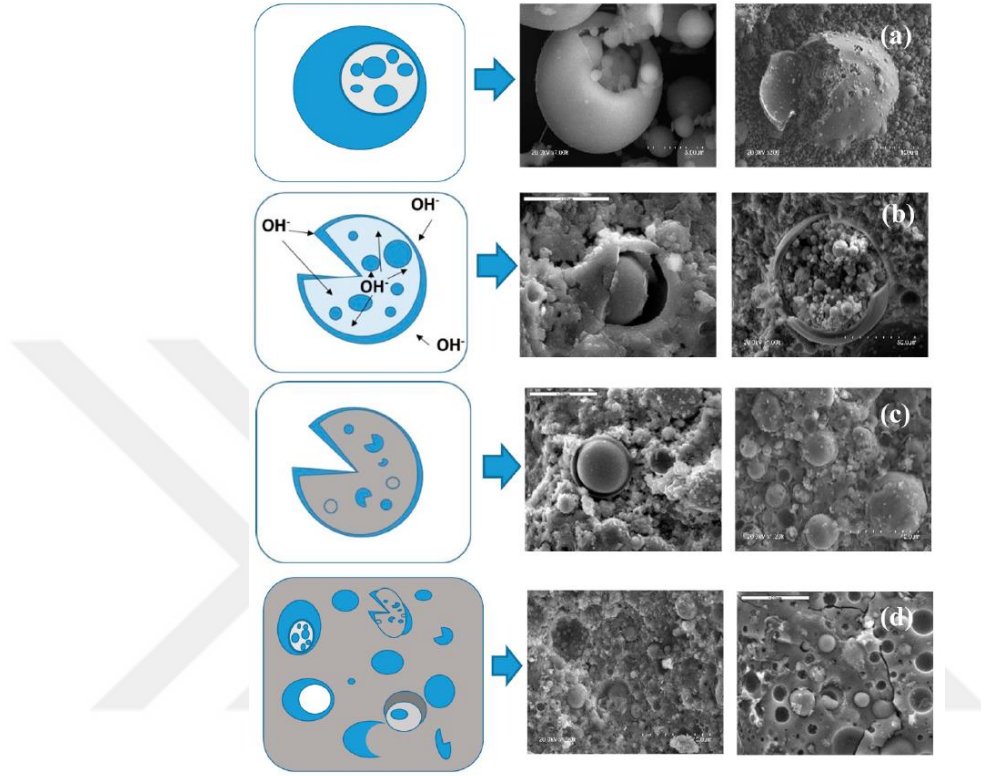
Xu ve Deventer [25], geopolimerizasyonu, yüksek alkali ortamda çeşitli alüminosilikat oksitlerle silikatların Si-O-Al-O polimer bağı oluşturduğu kimyasal reaksiyon olarak tanımlamaktadır (Denklem 2.3 ve 2.4).



Yukarıdaki iki reaksiyon, herhangi bir Si-Al içeren malzemenin, geopolimerizasyon kaynağı olabileceğini göstermektedir [51]. Davidovits'e [43] göre geopolimerik bağlayıcılar zeolitlerin amorf analoglarıdır ve benzer hidrotermal sentez koşullarına ihtiyaç duyarlar. Bununla birlikte, hızlı gerçekleşen reaksiyondan ötürü oldukça kristalli ve düzenli zeolit yapılarına kıyasla amorf veya yarı kristal matrisler oluşur [25].

Fernandez ve Palomo [86], uçucu külün alkalilerle aktivasyonu için kavramsal bir model ortaya koymuştur (Şekil 2.6). Bu reaksiyon modeli öncelikle uçucu kül parçacıklarının kimyasal tepkimesiyle başlamaktadır. Bu ilk adımın sonucunda uçucu kül parçacıklarının üzerinde alkalilerin nüfuz edebileceği küçük boşluklar oluşmaktadır. Reaksiyon devam ettikçe uçucu kül parçacıkları çözünmeye devam etmektedir. Alkali aktivasyon nihayetinde yavaş ilerlemektedir çünkü uçucu kül partikülleri tepkime ürünleri tarafından kaplandığında alkali saldırı sadece difüzyon yoluyla gerçekleşmektedir. Bu işlemlerin sonunda ortamda; reaksiyona girmemiş uçucu kül partikülleri, alkali saldırı altındaki parçacıklar ve reaksiyon ürünleri (N-A-S-H) gibi bir dizi morfoloji bulunabilir. Bu

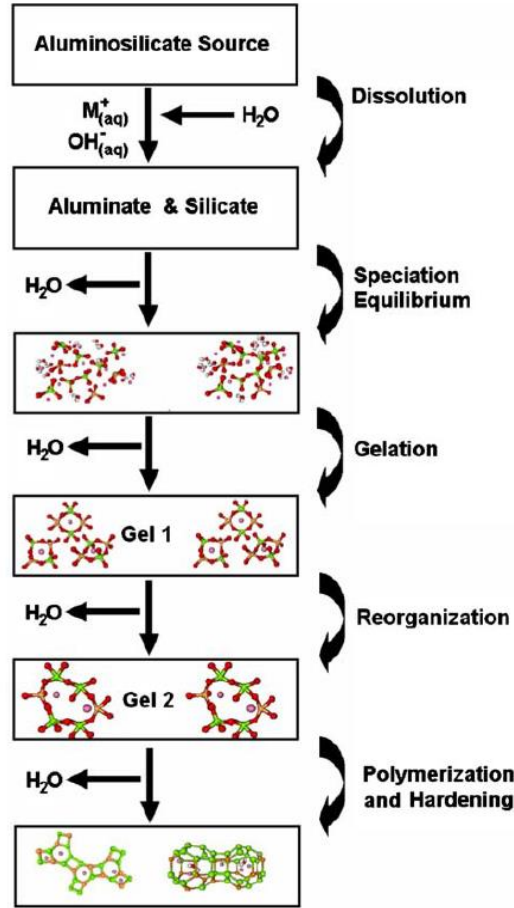
reaksiyon modeli, toplam katının yaklaşık %30'unu oluşturan içi boş parçacıkları veya daha küçük küreler barındıran parçacıkları kapsar. Katı “plerosferler” olan diğer parçacıklar, büyüklüklerine bağlı olarak reaktivite gösterirler. Küçük parçacıklar yüksek alkali ortamda daha hızlı çözünür.



**Şekil 2.6** Uçucu külün alkalilerle aktivasyon modeli. a) Başlangıç malzemesi; b) Alkalilerin uçucu kül partiküllerini parçalaması ve erken N-A-S-H jeli oluşumu; c) Jel polimerizasyonu ve d) İleriki yaşlardaki jel içyapısı [86].

Duxson vd. [72] ise geopolimerizasyon için oldukça basit bir mekanizma sunmuştur (Şekil 2.7). Bu reaksiyon modeli, katı alüminosilikat kaynağının sentetik bir alüminosilikata dönüşümünü açıklamaktadır. Katı alüminosilikatın alkalilerle hidroliz edilmesiyle alüminat ve silikat türleri oluşmaktadır. Alkali çözeltideki silikatlar ile katı alüminosilikatın çözünmesi sonucunda meydana gelen alüminat ve silikatlar karmaşık bir sıvı faz oluşturmaktadır. Yüksek pH ortamında alüminosilikatlar daha hızlı çözünür ve doymuş alüminosilikat çözeltileri oluşur. Sıvı fazdaki oligomerler yoğunlaşarak büyük ağlar oluşturur ve böylelikle jel oluşumu gerçekleşir. Bu işlem sonucunda çözünme sırasında tüketilen su serbest kalır. Bu su jel boşluklarında yer alır. Bu jel yapısı tipi, alüminosilikat bağlayıcı ve su ile birlikte genellikle iki fazlı olarak ifade edilir. Bunun yanında bazı sıvı fazlar jelleşmez ve sistemden salınır. Jelleşmeden sonra, jel ağının bağlantısı arttıkça sistem yeniden düzenlenir ve böylelikle üç boyutlu alüminosilikat geopolimer oluşur.

Alüminosilikat malzemenin çözünmesi ve polimerik türlerin oluşumu büyük ölçüde termodinamik ve kinetik parametrelere bağlıdır. Büyüme, çekirdeğin kritik bir boyuta ulaştığı ve kristallerin gelişmeye başladığı aşamadır. Bu yeniden yapılandırma süreçleri, birçok fiziksel özelliği belirlemede kritik olan malzemenin mikro yapısını ve gözenek dağılımını belirlemektedir [72, 87].

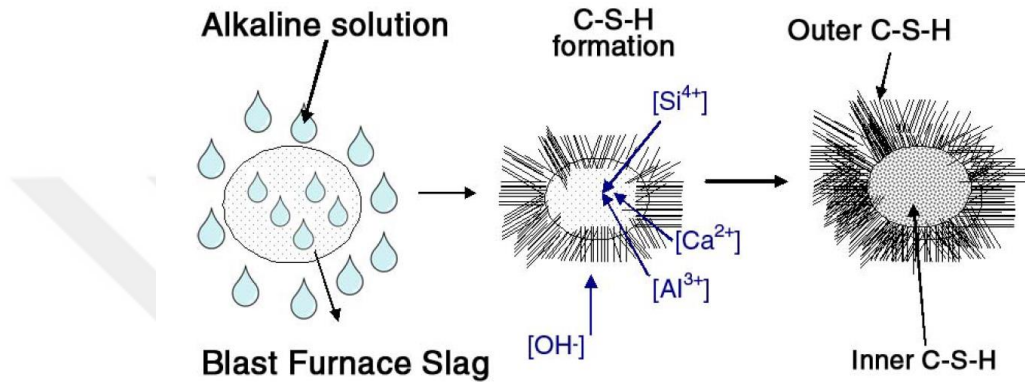


Şekil 2.7 Geopolimerizasyon modeli [72].

### 2.3.1. Reaksiyon Ürünleri

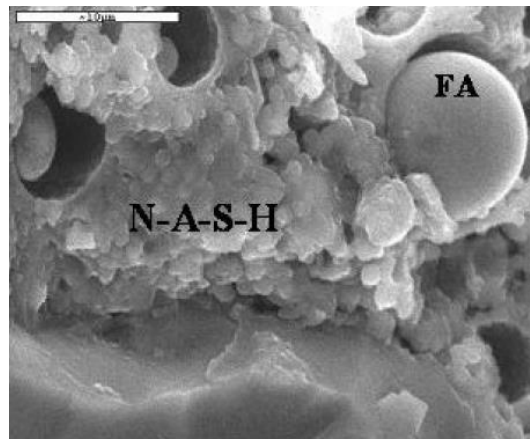
Portland çimentosu hidratasyonu sonucunda oluşan reaksiyon ürünü, malzemenin esas olarak mekanik özellikleri üzerinde etkisi olan C-S-H jelidir. C-S-H jeli dışında oluşan reaksiyon ürünleri; portlandit ( $Ca(OH)_2$ ), etrenjit ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) ve kalsiyum monosülfoalüminat ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ) içermektedir [88]. Geopolimerizasyon işlemleri sonucunda oluşan reaksiyon ürünleri ise kaynak malzemenin bileşimine göre değişmektedir. Yüksek fırın cürufu gibi kalsiyum bakımından zengin malzemelerin alkalilerle aktivasyonu sonucunda, Portland çimentosunun hidratasyonundan elde edilen C-

S-H jeline benzer jel yapısı oluşmaktadır (Şekil 2.8). Bunun yanında içeriğinde bir miktar Al ihtiva edebilen C-(A)-S-H jeli de meydana gelmektedir. Kalsiyum oranı düşük kaynak malzemelerin alkali aktivasyonu sonucunda bir zeolit öncüsü kabul edilen üç boyutlu alkali inorganik polimer olan N-A-S-H jeli üretilir. Yukarıdaki iki modelin kombinasyonuna dayanan hibrit sistemlerde ise reaksiyon ürünleri daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu reaksiyonlar sonucunda (C, N)-A-S-H veya N-(C)-A-S-H jelleri oluşmaktadır [15, 89].



Şekil 2.8 Yüksek fırın cürufun alkalilerle aktivasyonu [6].

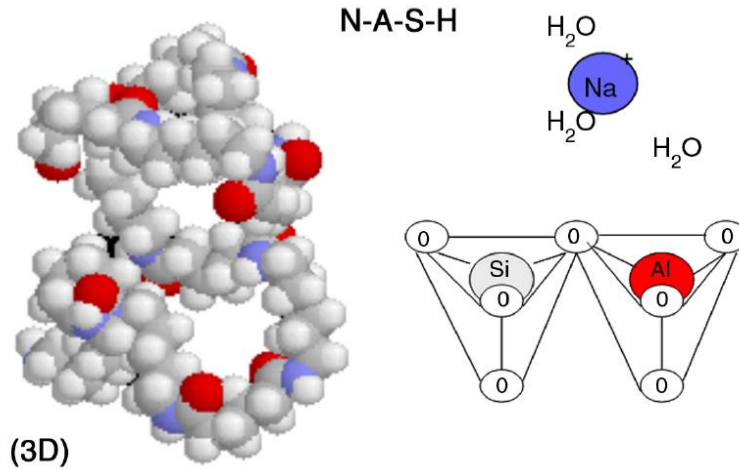
Uçucu kül ve metakaolin gibi silis ve alümina bakımından zengin (aynı zamanda düşük kalsiyum oranına sahip) malzemelerin alkali aktivasyonu sonucunda N-A-S-H jeli (Şekil 2.9) olarak bilinen amorf alkali alüminosilikat hidratlar oluşmaktadır ve bu jellere aynı zamanda geopolimer jel de denilmektedir [84, 90]. Skvara vd. [91, 92], sodyum iyonları ile alüminosilikat arasındaki bağların zayıf olduğunu belirtmiştir. Kullanılan alkali çözeltideki alkali katyonunun türüne göre jel değişiklik gösterebilir. Örneğin potasyum içerikli alkali çözeltiler kullanıldığında jel K-A-S-H yapısında olur.



Şekil 2.9 N-A-S-H jelinin SEM görüntüsü [15].

N-A-S-H jelinin yapısı, Portland çimentosu hidrasyonu sonucunda oluşan C-S-H jelinden farklıdır. Bu N-A-S-H jelleri, silikatın  $Q^4(3Al)$  ve  $Q^4(2Al)$  birimlerinin baskın olduğu çeşitli ortamlarda bulunduğu üç boyutlu bir yapı ile karakterize edilir. Silikat ve alüminat grupları tetrahedral olarak koordine edilir ve oksijen bağları ile birleşir. Tetrahedral olarak koordine edilmiş Al üzerindeki negatif yük, kullanılan aktivatör tarafından sağlanan alkali katyonun ( $Na^+$ ,  $K^+$ ) varlığı ile dengelenmektedir [93].

Düşük kalsiyumlu alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonu sırasında oluşan jellerin yapısı kalsiyum bakımından zengin çimentoların aktivasyonunda oluşan jellerin yapısından büyük ölçüde farklıdır. Bu jeller (N-A-S-H),  $Q^4$  ve  $nAl$  ( $n=0, 1, 2, 3$  veya  $4$ ) birimlerinin baskınlığı ile içerisinde silisyumun bulunduğu 3 boyutlu yapılar (Şekil 2.10) ile karakterize edilir [6].



Şekil 2.10 N-A-S-H jelinin üç boyutlu yapısı [6].

### 2.3.2. Reaksiyonu Etkileyen Faktörler

Alkalilerin doğası, alkalilerin konsantrasyonu, kaynak hammaddelerin reaktivitesi ve fizikokimyasal özellikleri, kür koşulları ve alkali ortamın pH değeri gibi birçok faktör alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin performansını etkilemektedir. Aşağıda alkali aktivasyonu etkileyen bazı faktörler açıklanmıştır.

### 2.3.2.1. Blaine İnceliği

Alkali aktivasyonda kullanılan kaynak malzemenin incelik değerinin reaksiyon mekanizması üzerinde etkisi olduğu yapılan çalışmalar tarafından tespit edilmiştir. Jamkar vd. [94], uçucu kül inceliğinin geopolimer betonların dayanımına etkisini inceledikleri çalışmada 5 farklı Blaine incelik değerine sahip uçucu kül ile geopolimer betonlar üretmiştir. Yapılan basınç dayanımı deney sonuçlarına göre uçucu kül inceliğinin geopolimer betonunun aktivasyonunda önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. İncelik değerlerindeki artış hem işlenebilirliği hem de dayanım değerlerini arttırmıştır. Aynı zamanda daha yüksek incelik değerleri, belirlenen bir basınç dayanımına daha düşük sıcaklıklarda ulaşılmasını sağlamıştır. Sathonsaowaphak vd. [95], çalışmalarında sodyum hidroksit ve sodyum silikat zelteleri kullanılarak termik santralden elde edilen taban külü ile geopolimer üretmiştir. Bu çalışmada farklı incelik oranlarına sahip taban külleri kullanılmış ve malzemenin işlenebilirlik ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda dayanım değerleri kaynak malzemenin incelik değerleri ile paralel bir şekilde artmıştır. Shekhovtsova vd. [96], uçucu külün 8 farklı Blaine incelik değerinin (1716-4524 cm<sup>2</sup>/g), alkali aktivasyon mekanizması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, uçucu külün Blaine incelik değeri ile alkalilerle aktive edilen uçucu kül numunelerin basınç dayanımları arasında güçlü bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Bunların aksine bazı yazarlar [97] yaptıkları çalışmalarda yüksek fırın cürufunun Blaine inceliğinin 5300 cm<sup>2</sup>/g'dan 6700 cm<sup>2</sup>/g değerine yükseltilmesinin alkalilerle aktive edilmiş numunelerin mekanik mukavemetlerini çok fazla arttırmadığını tespit etmiştir [70]. Bu bilgiler ışığında alkali aktivasyonda kullanılan kaynak malzemenin en iyi reaktivite göstereceği optimum inceliğinin tespit edilmesinin önemli olduğunu vurgulamak gerekmektedir.

### 2.3.2.2. Alkali Aktivatörün pH Değeri

Geopolimer üretmek için kullanılan alkali zeltelerin pH değeri geopolimerizasyon reaksiyonlarını etkilemektedir. Yüksek pH değerleri, uçucu kül yüzeyindeki amorf zincirlerin kırılmasını sağlamakta ve böylelikle silikat ve alüminatlar alkali iyonlarla reaksiyona girerek amorf geopolimerizasyon ürünleri oluşturmaktadır [98]. Alüminosilikatların yüksek pH ortamında znmesi daha hızlı olduğundan dolayı doymuş alüminosilikat zelteler meydana gelmektedir [72]. Khale ve Chaudhary [85], pH değerinin

12'den 14'e yükseltilmesi ile geopolimer hamur numunelerinin basınç dayanımının yaklaşık 5 kat arttığını tespit etmiştir. 13 ila 14 aralığında değişen pH değerinin geopolimer oluşumu için optimum ortam koşulunu oluşturduğu sonucuna varmışlardır. Daha yüksek bir pH değerinde çözünebilir alüminatlarla reaksiyona girebilecek zincir oligomer yapılar ile monomerik silikatların varlığı gözlemlenirken düşük pH seviyelerinde düşük monomer konsantrasyonları bulunmaktadır [85].

### **2.3.2.3. Kür Sıcaklığı**

Kür sıcaklığının, geopolimer reaksiyonlarında ve malzemenin dayanım kazanmasında önemli bir rolü vardır. Alkali aktivasyon reaksiyonları sıcaklık arttıkça hızlanmaktadır. Qu vd. [75] uçucu kül, cüruf ve Portland çimentosu klinkerini alkalilerle aktive ettikleri çalışmalarında, etüv sıcaklığının 25°C'den 85°C yükseltilmesi ile başlangıç reaksiyonların hızlandığını ve sertleşmiş malzemenin dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Kirschner ve Harmuth [99], metakaolin ile geopolimer ürettikleri çalışmalarında farklı kür sıcaklıklarının etkilerini incelemiştir. Yazarlar, ortam koşullarındaki kürün malzemenin sertleşmesini geciktirdiğinden dolayı uygulanabilir olmadığını ve 75°C'lik kür ile tatmin edici dayanım sonuçları alındığını belirtmiştir. 75°C üzerindeki sıcaklıklarda üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımları düşmüştür. Genel olarak Ca içeriği yüksek malzemelerle üretilen geopolimerler daha düşük sıcaklıklarda (hatta ortam koşullarında) aktive edilebilirken, Ca içeriği düşük malzemelerle üretilen geopolimerler daha yüksek sıcaklıklarda aktive edilmektedir.

### **2.3.2.4. Kür Süresi**

Uzun kür süreleri geopolimer yapıları geliştirdiği için alkalilerle aktive edilen malzemenin dayanımını arttırmaktadır. Fakat literatürde en uygun kür süreleri ile ilgili tutarlı bir bilgi yoktur. Görhan vd. [100], NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltilerini kullanarak metakaolin ve uçucu külün alkali aktivasyonunu gerçekleştirdiği çalışmalarında kür koşullarının malzeme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla üretilen geopolimer pastaları 60°C ve 80°C'deki etüv sıcaklıklarında 2, 4 ve 24 saat bekletmişlerdir. Yapılan testler sonucunda en uygun kür süresinin 60°C'de 2 saat olduğu belirlenmiştir. Bai vd. [101], cürufun metakaolinli geopolimerin mekanik özellikleri ve kür sürelerine etkisini incelemişlerdir. 24 saatten

sonraki uzun kür sürelerinin (7 güne kadar) malzemenin dayanım kazanımını geliştirdiği vurgulanmıştır. Heah vd. [102], kür koşullarının kaolin bazlı geopolimer üzerindeki etkisini incelemiştir. Üretilen numuneler 40°C, 60°C, 80°C ve 100°C etüv sıcaklıklarında 1 günden 3 güne kadar bekletilmiştir. Optimum kür sıcaklığının ve süresinin sırasıyla 60°C ve 3 gün olduğu ve böylelikle daha fazla geopolimerik jel oluştuğu ve daha yoğun bir yapı ortaya çıktığı belirtilmiştir.

#### **2.4. Durabilite**

Dayanıklılık konusunda alkalilerle aktive edilmiş sistemlerin Portland çimentosu ile üretilen malzemelere göre önemli bir avantaja sahip olduğunu belirten yazarlar varken bir kısım yazar ise bu konunun henüz ispatlanmamış olduğunu savunmaktadır [103]. Fernandez-Jimenez vd. [24], alkalilerle aktive edilmiş hibrit bağlayıcıların agresif kimyasal çözeltilere karşı dayanıklılığını incelemiş ve hibrit sistemin geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betonlara yakın bir davranış gösterdiğini belirtmiştir. Cheng ve Chiu [104], yüksek fırın cürufu ile ürettikleri geopolimerlerin yüksek sıcaklıklara olan direncini inceledikleri çalışmada yangın dayanımının malzemelerin kimyasal kompozisyonundan etkilendiği belirtmiştir. Artan K<sub>2</sub>O içeriğiyle geopolimerlerin yangına karşı dayanıklılıklarının arttığı vurgulanmıştır. Kaynak malzemelerdeki CaO varlığı, alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin hizmet ömrünün uzaması için gerekli olan geçirgenliği azalttığından ötürü üretilen malzemelerin dayanıklılığını birçok yönden geliştirmektedir [40]. Ayrıca, alkalilerle aktive edilen uçucu kül temelli ürün, korozif solüsyonlara karşı kimyasal direnç ve stabilite göstermiş böylelikle yüksek performanslı ve dayanıklı inşaat malzemelerinin geliştirilmesinde büyük ilgi görmüştür [35, 40, 105-107].

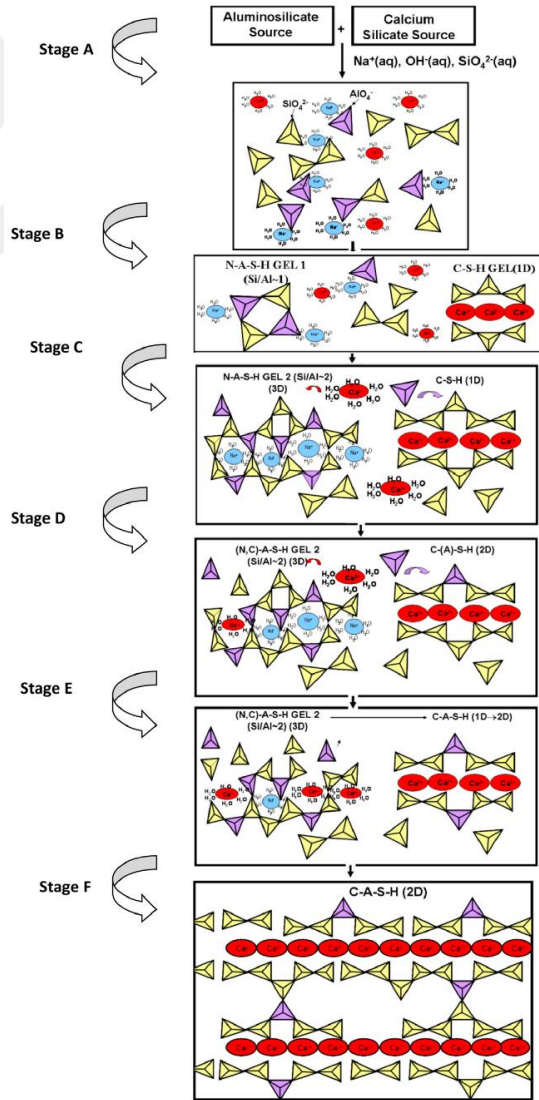
### 3. ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ HİBRİT BAĞLAYICILAR

Portland çimentosu üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan biri olan Portland çimentosunun mineral malzemeler ile yer değiştirilmesi, genellikle uzun priz sürelerine ve düşük erken dayanıma sebep olmaktadır. Portland çimentosu üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmanın yollarından biri de son yıllarda geliştirilen alkalilerle aktive edilen bağlayıcılar da denilen geopolimerlerin kullanılmasıdır. Geopolimer betonlar, tüketilen Portland çimentosu miktarını önemli ölçüde azaltabilir. Alkalilerle aktive edilmiş hibrit bağlayıcılar ise geopolimerlerin ve Portland çimentosu bazlı bağlayıcıların bazı avantajlarını bir araya getirebilen alternatif bir bağlayıcı grubunu temsil etmektedir. Hibrit bağlayıcılar, düşük klinker içerikli (%20-30) karışımlara alkali aktivatörlerin katılması ile elde edilmektedir. Alkali ortam, alkali çözelti kullanılarak ya da yerinde alkalinite oluşturmak için çimento klinkeri ile reaksiyona girebilen bir katı ya da çözünmüş Na/K bileşiği ile sağlanabilir [12, 14, 75, 108]. Alkalilerle aktive edilmiş hibrit bağlayıcı, geleneksel çimento ve inorganik geopolimerin malzeme özelliklerinden yararlanırken enerji ve çevre açısından Portland çimentosunun kısmen yerini alabilir [109].

Alkali bağlayıcılar, amorf veya camsı yapıdaki SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> açısından zengin doğal veya endüstriyel atık malzemelerin alkali ortamda çözünmesiyle oluşan malzemelerdir. Bu şekilde çözüldüğünde ve kısa süreli termal aktivasyondan sonra, bu alüminosilikatlar iyi bağlayıcı özellikleri kazanacak şekilde sertleşip dayanım kazanabilirler. Son araştırmalar, başlangıç karışımında belirli miktarda reaktif kalsiyumun (Portland klinker formunda) mevcudiyetinin başlangıçtaki termal aktivasyona gerek kalmaksızın malzemenin ortam sıcaklığında sertleşmesini sağladığını göstermiştir. % 30'dan az Portland çimentosu klinkeri içeren bu alkalilerle aktive edilen çimentolar "hibrit çimentolar" veya "hibrit bağlayıcılar" olarak bilinmektedir [15, 29, 74, 110-112]. Alkalilerle aktive edilen hibrit sistemlerin reaksiyon mekanizması Portland çimentosu hidrasyonundan farklıdır. Palomo vd. [6], hibrit alkali çimentoların %20'nin üzerinde CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine sahip karmaşık bir çimentolu karışım olduğunu ve reaksiyon ürünlerinin karmaşık farklı jellerin karışımından oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca aynı yazarlar, çimento ve uçucu kül karışımlarının alkali aktivasyonu sonucunda oluşan reaksiyon ürünlerinin bilimsel ve teknolojik ilginin yoğunlaştığı bir alan olduğunu ve iki sistemde çökeltilen ana çimentolu

jeller (N-A-S-H ve C-S-H) arasındaki uyumun günümüzde önemli araştırmaların hedefi olduğunu vurgulamışlardır. Önceki araştırmalar, bu iki jelin hibrit çimentolarda birlikte çökmesinin mümkün olduğunu göstermiştir [49, 71, 110, 111, 113-116]. Her ne kadar son araştırmalar, iki ürünün tek başına iki ayrı jel olarak gelişmediğini gösterse de etkileşim içinde olduklarını ve bu süreçte yapısal ve bileşimsel değişime uğradıklarını ortaya koymuştur [74].

Garcia-Lodeiro ve arkadaşları, iki jelin ve çimento harmanlarının (%30 Portland çimentosu + %70 uçucu kül) uyumluluğunu, yaptıkları çalışmalarda tecrübeler ve hibrit alkali sistemlerle alakalı literatüre dayandırmaktadırlar. Ayrıca, yüksek silika ve alümin ile oldukça düşük kalsiyumlu çimento harmanlarının başlangıçtan (ilk birkaç saat) bir yıla kadar aktive aşamalarını açıklayan kavramsal bir model önermişlerdir (Şekil 3.1) [6].



Şekil 3.1 Yüksek silika ve alümin ile düşük kalsiyum içerikli çimento harmanları için alkali aktivasyon modeli (70 % uçucu kül+30% Portland çim., Aktivatör:  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) [6].

Hibrit sistemdeki Portland çimentosu hidratasyonu alkali içeriğinden ( $\text{OH}^-$  konsantrasyonu) ve çözünebilir silis varlığından etkilenmektedir. Buna ek olarak, ortam sıcaklığında mineral malzemenin (uçucu kül) aktivasyonu Portland çimentosu klinkerinin varlığı ile hızlanmaktadır. Bu yararlı etki, çimento hidratasyonu sırasında çıkan ısı ile açıklanabilir ve bu enerji kaynak malzemenin çözünmesi, sertleşmesi ve sertleşmesini sağlayan kimyasal reaksiyonları desteklemektedir. Hibrit sistemler üzerine yapılan çalışmalarda, aktivasyon sonucunda oluşan jel veya jellerin türünün ve özelliklerinin ortam pH değerinden ve ortamda bulunan kalsiyum konsantrasyonundan önemli ölçüde etkilendiği ortaya çıkmıştır [6]. Ortamda yeterli miktardaki kalsiyum ile 12'nin üzerindeki pH değeri, bir N-A-S-H jeli yerine bir C-A-S-H jelinin oluşumunu desteklemektedir [74, 117]. Bununla birlikte, bu tür hibrit sistemlerin, özellikle erken safhalardaki alkali aktivasyon sırasında oluşan reaksiyon kinetiği hakkında çok az şey bilinmektedir [6]. Düşük klinker içeriğine rağmen hibrit bağlayıcılar, erken mekanik mukavemet değerlerine erişebilirler [118].

Hibrit sistemlerde Portland çimentosu klinkerinin varlığında bir miktar (C)-N-A-S-H jel elde etmek için bir miktar Ca ihtiva edebilen N-A-S-H veya K-A-S-H jelleri oluşur. Taze haldeki geopolimere ait kür koşulları çok önemlidir. Yaklaşık  $60^\circ\text{C}$  ila  $80^\circ\text{C}$  sıcaklığındaki kür koşullarında veya 6 ila 12 saatlik buhar otoklavında, geopolimerlerin üç boyutlu yapısı daha da güçlenir. Portland çimento klinkeri hidratasyonu ağırlıklı olarak, C-(A)-S-H jelleri ve portlanditin ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) oluşması için mikro yapısında bir miktar Al ihtiva eden C-S-H jellerinin oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Portlandit, ikincil C-S-H ve C-A-H jelleri elde etmek için uçucu küllerin puzolanik özelliklerini ve ikincil C-(A)-S-H jellerini oluşturmak için granüle yüksek fırın cürufunun gizli hidrolik özelliklerini geliştirir. Bu nedenle, yeni hibrit çimento bağlayıcıları, kimyasal etkileşim sonucunda nihai (N,C)-A-S-H jelin oluşumuyla sonuçlanan (C)-N-A-S-H jeli yanı sıra C-(A)-S-H jellerini de ihtiva eder [119]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, uçucu kül ve Portland çimento klinkerinin alkali ortamda aktivasyonu sonucunda C-(A)-S-H, C-A-S-H ve (N, C)-A-S-H tipi üç farklı jelin ortaya çıktığı tespit edilmiştir [120]. İlgili bulgular, oluşan C-S-H/N-A-S-H jel karışımının saf halde çökelmediğini, aksine kompozisyonlarının ortamdaki çözülmüş türlerden etkilendiğini göstermiştir. Ortamda alüminyum (Al) varlığında C-S-H jeli,  $\text{C-S-H} \rightarrow \text{C-(A)-S-H} \rightarrow \text{C-A-S-H}$  sıralaması ile gelişir. Ortamda kalsiyum (Ca) varlığında N-A-S-H jeli,  $\text{N-A-S-H} \rightarrow (\text{N, C})\text{-A-S-H} \rightarrow \text{C-A-S-H}$  sıralamasındaki gibi gelişir. Ortamda yeterli kalsiyum olmadığında bu son dönüşüm tamamlanamamaktadır [111].

Jel benzeri hidrasyon ürünlerinin yoğun şekilde oluşumundan dolayı, hibrit çimentolar, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla agresif kimyasal ortamlara karşı daha dirençlidir [24, 121, 122]. Düşük Ca içeriğine sahip bağlayıcıların alkali aktivasyonu sonucunda elde edilen N-A-S-H veya K-A-S-H jelleri içeren sıradan geopolimerlerin temel dezavantajı nispeten uzun priz süreleridir. Öte yandan geopolimerlerin önemli olumlu özelliği ise yüksek sıcaklık (1100°C) direncidir [104]. N-A-S-H ve K-A-S-H içeren geopolimerlerin dikkate alınması gereken ikinci dezavantajı, büzülme duyarlılıklarıdır. Cam suyu ile aktif edilen cürüflü harçlar ve betonlar genellikle önemli otojen ve kuruma büzülmesi ile karakterize edilmektedir. Polipropilenglikol (polypropylenglycol) esaslı büzülme azaltıcı katkıları, cam suyu ile aktifleştirilmiş cüruf harçlarında otojen büzülme %85, kuruma büzülmesini ise %50 azaltmaktadır [32]. Büzülme, geopolimer ve Portland çimentolu betonların karakteristik bir özelliğidir. Rötreye karşı, betonda hacim genişmesi sağlayan  $\text{Ca(OH)}_2$  oluşturan CaO ve  $\text{H}_2\text{O}$  karışımı uygulanabilir [123].

Alkalilerle aktive edilen hibrit sistemler üzerine yapılan çalışmalarda ve uygulamalarda sadece Portland çimentosu değil de Portland çimentosu klinkeri de kullanılmıştır [124]. Bu çimentolarda özellikle, priz sürelerini düzenlemek için lignosülfonat katkıları kullanılmıştır. Fakat Portland çimentosu kullanmak pratik açıdan daha kolay görünmektedir [108].

Qu vd. [75], kür sıcaklıklarının endüstriyel olarak ürettikleri hazır hibrit çimentolarına etkisini incelemiştir. Çalışmada %30 Portland çimentosu, %32.5 yüksek fırın cürufu, %32.5 uçucu kül ve %5 katı aktivatör beton santralinde karıştırılıp öğütülerek hibrit çimento üretilmiştir. Su/çimento oranı 0.5 ve agrega/çimento oranı 3/1 oranlarında karışımlar hazırlanıp 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik numunelere dökülmüştür. 25±1°C - %99 nem ile 85°C - %99 nem kür koşullarında numuneler 20 saat bekletilmiş ve bu sürenin sonunda numuneler %99 nem oranına sahip kür koşullarında deney gününe kadar saklanmıştır. Hibrit çimentoda yüksek ön kürlenme sıcaklığı, Portland çimentosu ve alkali çimentolarda olduğu gibi reaksiyon hızını arttırmıştır. Sıcaklığın 25°C'den 85°C'ye yükseltilmesi ile betonun başlangıç reaksiyonu hızlanmış ve 3 günün sonunda 30 MPa basınç dayanımı elde edilebilmiştir.

Yüksek fırın cürufunun uçucu kül ile bir miktar yer değiştirmesi, ortam sıcaklığında alkalilerle aktive edilen sistemlerin priz alma ve mukavemet kazanma hızlarını arttırdığı belirlenmiştir [125]. Geopolimerlerin sertleşmesi ve mukavemet kazanması, katı

hammaddelerin ve aktivatörün çevre sıcaklığına göre dikkatli bir şekilde tasarlanmasıyla kontrol edilebilir [126].

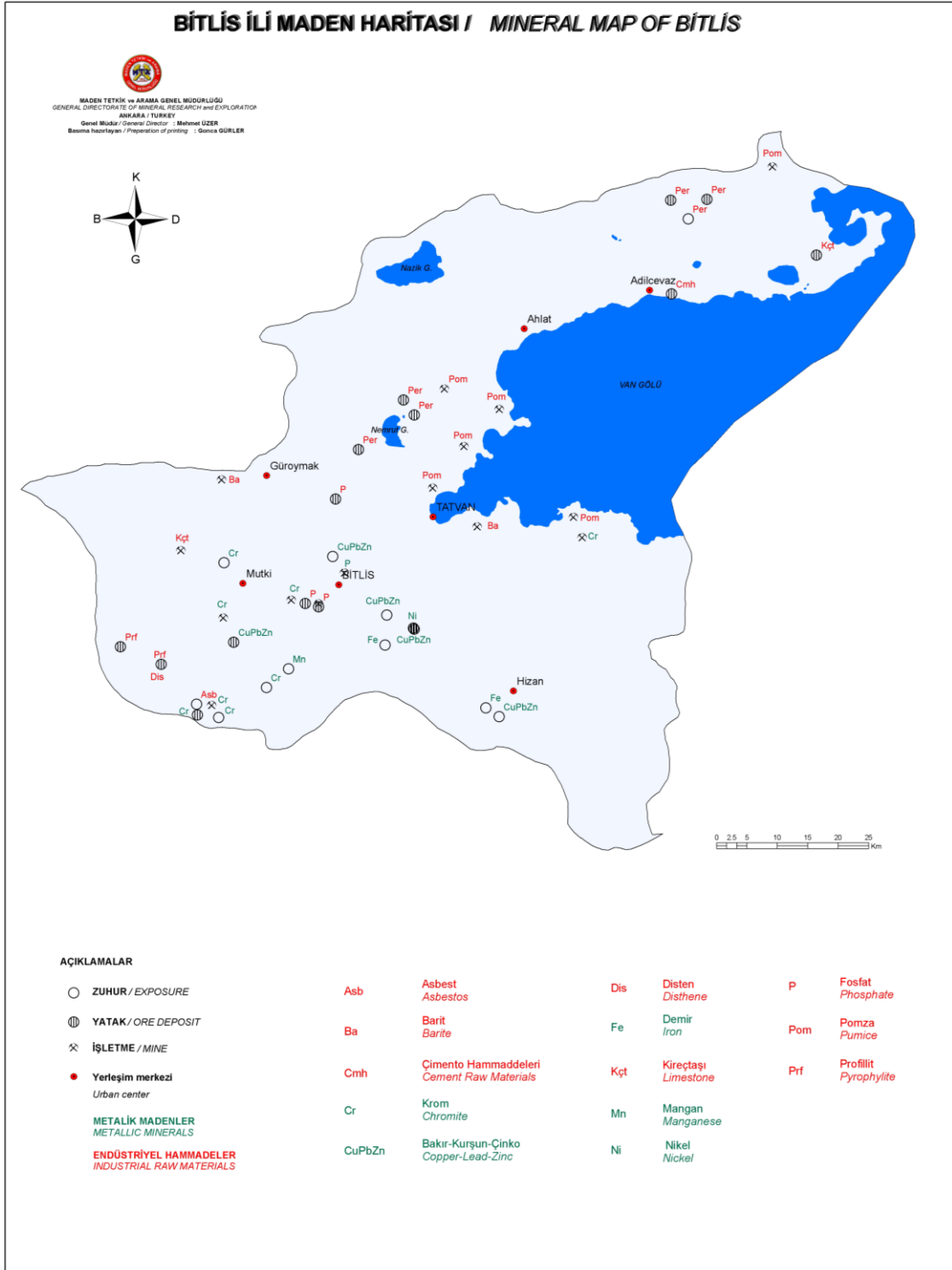


#### 4. POMZA

Kullanımı çok eski dönemlere kadar giden volkanik kökenli pomza, gözenekli ve amorf yapıya sahip olup birim ağırlığı düşük bir madendir. Birçok kullanım alanı olan pomzanın kimyasal bileşiminden ötürü puzolanik aktivite sergileyebildiği ve çimento ikameli sistemlerde kullanılabilirdiği yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur [11, 127-129]. Ayrıca içeriğindeki silis ve alümin sayesinde alkalilerle aktive edilip geopolimer malzeme üretilebilir [17, 54, 130-132]. Pomza kimyasal bileşim olarak F sınıfı uçucu kül gibi düşük CaO içeriğine sahiptir. Yapılan çalışmalar sonucunda, düşük CaO içeriğine sahip kaynak malzemeler ile üretilen geopolimerlerin oda koşullarında priz sürelerinin uzadığı ve erken dayanımlarının düşük olduğu tespit edilmiştir [22, 133].

Türkiye'nin pomza rezervlerinin büyük bölümü Doğu Anadolu bölgesindedir. Doğu Anadolu'daki pomza rezervlerinin büyük kısmı ise Bitlis yöresinde yer almaktadır. Jeolojik yapısından ve volkanik alan üzerine kurulu olmasından dolayı Bitlis önemli pomza yataklarına sahiptir (Şekil 4.1). Söz konusu pomza rezervi Tatvan ilçesinde yer almakta olup iyi kalitede ve kısmen yıkama işlemi gerektirmeyen pomza çıkarılabilmektedir [134].

Ülkemiz pomza rezervi olarak dünyada önde gelen ülkelerden biridir. Türkiye, yıllık pomza madenciliği bakımından 2017 yılı için dünyada ilk sırada yer almaktadır [20]. Kimyasal bileşiminden ötürü olarak alkalilerle aktive edilebileceği bilinen pomzanın rezerv miktarları da düşünüldüğünde geopolimer üretiminde kullanılmasının hem çevresel hem de ekonomik birçok olumlu etkisinin olacağı düşünülmektedir.



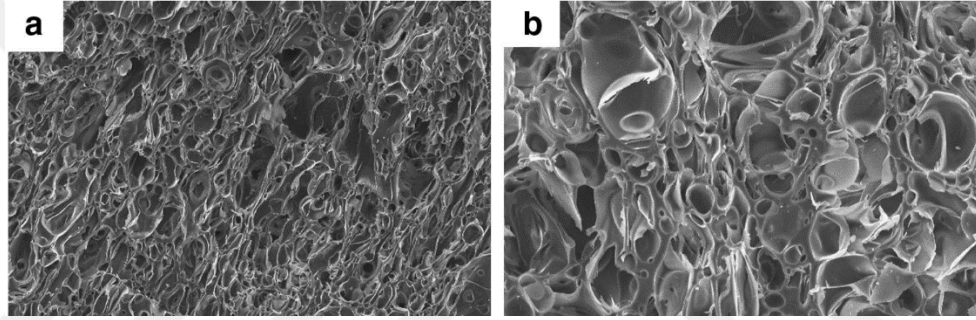
Şekil 4.1 Bitlis ili maden haritası [134].

#### 4.1. Pomzanın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Pomza, volkanik olaylar neticesinde oluşan ve çoğunlukla birbiri ile bağlantılı olmayan gözenekli yapıya sahip camsı bir malzemedir. Pomza asidik ve bazik olmak üzere

ikiye ayrılmaktadır. Mohs skalasına göre sertliği 5-6 olan asidik pomzanın birim ağırlığı 1 gr/cm<sup>3</sup>'ten düşüktür. Bazik pomzanın ise birim ağırlığı 1-2 gr/cm<sup>3</sup> olup Mohs skalasına göre sertliği 5-6'dır. Asidik pomza doğada daha fazla bulunmaktadır.

Pomza agregası yaklaşık %70 boşluk içermektedir [135]. Pomza, genellikle gözeneklerinin birbiri ile bağlantısının olmamasından ötürü ısı ve ses yalıtımı yüksek bir malzemedir [136]. Şekil 4.2'deki SEM görüntüleri pomzanın gözenekli yapısını göstermektedir [137]. Hafif bir malzeme olan pomza beton içerisinde hem agregası olarak hem de puzolanik malzeme olarak kullanılabilir. Hafifliğinden ötürü pomza ile üretilen betonların Portland çimentosu ile üretilen geleneksel betonlara göre birim ağırlığı daha düşüktür.



Şekil 4.2 Pomzanın SEM görüntüleri a) 100x b) 300x [137].

Pomza silis oranı yüksek bir malzemedir. Asidik pomzalarda SiO<sub>2</sub> oranı genellikle %50'den fazladır. Ayrıca içeriğinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O, MgO ve CaO bulunmaktadır. Asidik pomzanın genel kimyasal bileşeni Tablo 4.1'de verilmiştir.

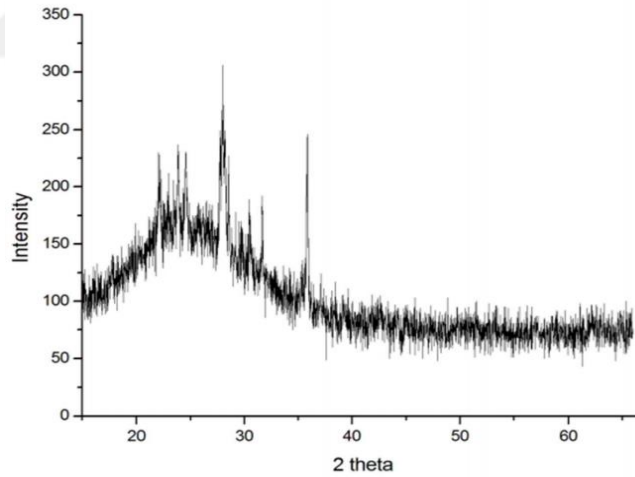
Tablo 4.1 Pomzanın genel kimyasal bileşeni [136].

Bileşen	İçerik (%)
SiO <sub>2</sub>	60-75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13-15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-3
CaO	1-2
MgO	1-2
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	7-8
TiO <sub>2</sub>	Eser
SO <sub>3</sub>	Eser
Cl	Eser

## 4.2. Pomzanın Alkalilerle Aktivasyonu

Geopolimer üretiminde kullanılan kaynak malzemeler genellikle amorf yapıya sahip olup reaktif alüminosilikat içermektedirler [138]. Pomza, yapısındaki silis ve alümin sayesinde ve uygun kür koşulları altında alkalilerle aktif edilebilmektedir. Pomzanın porozitesi yüksek olduğundan öğütülüp elenmesi yüksek fırın cürufu gibi malzemelerden daha kolaydır.

Şekil 4.3'te tipik bir pomza numunesinin XRD sonuçları verilmiştir. XRD verilerinin tepe noktalarının büyük pik genişliğine sahip olduğu ve kırınım doruklarının hafifçe eğimli olduğu, dolayısıyla malzemenin içindeki atomların düzeninin periyodik olmadığı söylenebilir. Bu veriler, pomzanın esas olarak amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir [139]. Allahverdi vd. [132] yaptıkları geopolimer çalışmalarında, kullanılan pomzanın kristal kısımlarının reaktif olmadığını ve geopolimerizasyon reaksiyonlarına katılmadığını belirtmiştir. Ayrıca, amorf yapıdaki pomzanın asıl olarak geopolimerizasyon reaksiyonlarına katıldığını ve geopolimer oluşturduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 4.3 Pomzanın X-Işını Difraksiyonu (XRD) [139].

Yadollahi vd. [17], öğütülmüş Hasankale pomzası ile yürüttükleri geopolimer hamur çalışmasında, silika modülünün ve geopolimer yaşının basınç dayanımlarına etkisini incelemiştir. Bu çalışmada; su/bağlayıcı, silika modülü, kür süresi ve kür sıcaklığı gibi değişkenler kontrol edilerek 28 günlük yaklaşık 40 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Hasankale pomzası ile üretilen geopolimerlerin en uygun etüv kürü sıcaklığının 65°C ve en uygun etüvde bekleme süresinin ise 48 saat olduğu vurgulanmıştır. Nadoushan ve

Ramezianpour [54], yüksek fırın cürufu ve pomza ile ürettikleri geopolimerlerin basınç dayanımlarını incelemiştir. Bu çalışmada, alkali aktivatör olarak KOH, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. %100 pomza içeren geopolimer pastaların yapışkan, yüksek viskoziteli ve kalıba yerleştirilmesi zor bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. %10 pomza katkılı yüksek fırın cürüflü geopolimerlerin en yüksek basınç dayanımını (yaklaşık 160 MPa) verdiği vurgulanmıştır. Ayrıca KOH içeren geopolimerlerin NaOH içeren geopolimerlerden daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir. Özodabaş ve Yılmaz [131], Portland çimentosu + yüksek fırın cürüflü geopolimer ile Portland çimentosu + yüksek fırın cürufu + pomza üçlü karışımından elde edilen geopolimerlerin basınç dayanımlarını ve dayanıklılıklarını kıyaslamıştır. Sonuç olarak, ikili karışımlar ile pomza içeren üçlü karışımların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve büzülme duyarlılıkları değerlerinin birbirine yakın olduğunu ancak durabilite bakımından pomza içeren üçlü karışımların daha iyi değerler elde ettiği belirtilmiştir. Allahverdi vd. [140], İran'ın güneydoğusundan elde edilen pomza ile yürüttükleri çalışmada, uygun oranlardaki alkali çözeltilerle pomza aktif edilerek geopolimer üretmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Üretilen geopolimerin kalitesinin; pomzanın kalitesine, alkali aktivatörlerin bileşimine ve su/bağlayıcı oranına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma bölümü; malzeme özellikleri, karışım oranı ve seriler, deney numunelerinin hazırlanması ve uygulanan deneyleri içermektedir. Malzeme özellikleri kısmında çalışmanın amacı doğrultusunda kullanılan bağlayıcı malzemeler, alkali çözeltiler, karışım suyu ve agregalar hakkında bilgiler verilmiştir. Karışım oranları ve seriler başlığı altında üretilen hamur ve harçların öncelikle değişkenleri ve sabitleri belirlenmiş daha sonra serilerin isimlendirilmesi ve karışım oranları tespit edilmiştir. Karışım oranları belirlenen serilerin üretilebilmesi için deney numunelerinin hazırlığı hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak alkalilerle aktive edilmiş malzeme üretim aşamasında uygulanan deneylerin açıklaması yapılmıştır.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce pomza laboratuvar ortamında öğütülüp elenmiştir. Kullanıma hazır hale gelen pomzanın puzolanik aktivitesi deneyler sonucunda tespit edilmiş ve hamur karışım aşamasına geçilmiştir. Çalışmanın ana kısmının ilk aşamasında alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların en uygun malzeme oranlarının ve kür koşullarının belirlenmesi için hamur numuneler hazırlanmıştır. Hem Portland çimentosu içeren hem de içermeyen numunelerin en uygun malzeme oranlarının ve kür koşullarının tespitinden sonra elde edilen veriler ışığında alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harç üretimine geçilmiştir. Harç üretiminde bağlayıcı dozajının etkisi incelenmiştir. Son aşamada ise en iyi dozaja sahip alkalilerle aktive edilmiş hibrit harcın yüksek sıcaklık direnci araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar Bingöl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda, Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'nda ve Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

### 5.1. Malzeme Özellikleri

#### 5.1.1. Bağlayıcı Malzemeler

Bu tez çalışmasında alkalilerle aktive edilmiş malzeme üretmek için Türkiye'nin doğusunda yer alan Bitlis-Tatvan yöresine ait doğal pomza ve Elazığ Altınova Çimento San. Tic. A. Ş.'den temin edilen %90-95 klinker içeriğine sahip CEM I 42.5 R Portland

Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır (Şekil 5.1). Öğütülmüş pomzanın inceliği geopolimerizasyon için önemli bir parametredir. Bu sebeple pomza, laboratuvar ortamında Los Angeles cihazı ile öğütülüp tamamı 200 nolu (75 µm) elekten geçecek şekilde elenmiştir. Öğütülmüş pomzanın özgül ağırlığı 2.33 gr/cm<sup>3</sup> olup özgül yüzey alanı 2921 cm<sup>2</sup>/g'dır. Pomzanın özgül yüzey alanı Blaine aleti kullanılarak belirlenmiştir. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

**Tablo 5.1** Portland çimentosu ve öğütülmüş pomzanın kimyasal ve fiziksel özellikleri

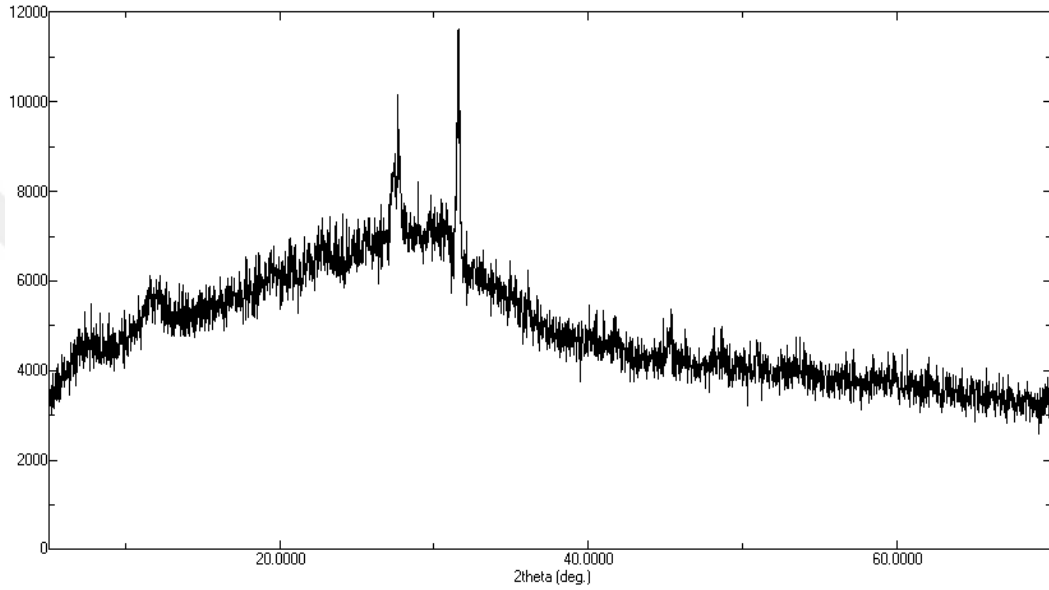
<b>Kimyasal Bileşenler (%)</b>	<b>PÇ</b>	<b>Pomza</b>
SiO <sub>2</sub>	20.03	63.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.93	14.81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.67	6.75
CaO	62.57	2.66
MgO	1.80	1.02
SO <sub>3</sub>	3.20	0.02
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	1.10	4.36
Cl	0.005	-
Kızdırma Kaybı	1.84	4.59
Çözünmeyen Kalıntı	0.75	-
<b>Fiziksel Özellikler</b>		
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.14	2.33
Özgül Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> /g)	3218	2921



**Şekil 5.1** a) Öğütülmüş pomza ve b) Portland çimentosu

Öğütülmüş pomzanın amorf veya kristal içyapısını ortaya çıkarmak için X-Işını Difraktometresi (XRD) deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla pomza öğütülüp 200 nolu elekten geçirilmiştir. Öğütülmüş pomza numunesine ait XRD spektrumu Şekil 5.2'de verilmiştir.

Şekil 5.2'deki grafik incelendiğinde, Bitlis yöresi pomzasının genellikle amorf bileşenlerden oluşmasından dolayı net bir XRD spektrumu elde edilemediği görülmektedir. Putri vd. [139] belirttiği gibi XRD verilerinin tepe noktaları büyük pik genişliğine sahiptir ve kırınım dorukları hafifçe eğilimlidir. Bundan dolayı, malzemenin içindeki atomların düzeninin periyodik olmadığı ve amorf bir yapıya sahip olduğu söylenebilir ( $2\theta=15-35^\circ$  bant aralığı).



Şekil 5.2 Bitlis yöresine ait öğütülmüş pomzanın XRD sonuçları

### 5.1.2. Alkali Çözeltiler

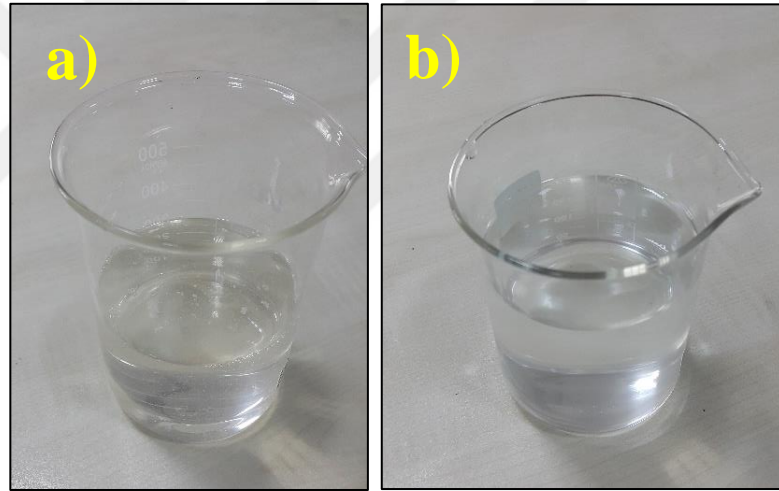
Alkalilerle aktive edilen malzemelerin mukavemet kazanması ortamda bulunan alkaliler ve uygun kür koşulları ile sağlanır. Yapılan çalışmalarda, geopolimer malzeme üretmek için çoğunlukla NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltileri kullanılmıştır. Ayrıca bazı çalışmalarda, alüminosilikat minerallerini aktive etmek için kullanılan alkali solüsyonlardan NaOH yerine uygun konsantrasyondaki KOH çözeltisinin, geopolimerizasyona yardımcı olduğu, bu nedenle daha kısa priz süreleri ve daha yüksek basınç dayanımları elde edilebildiği vurgulanmıştır. Bunun sebebi,  $\text{K}^+$  iyonunun  $\text{Na}^+$  iyonundan daha büyük olduğu için daha büyük silikat oligomerlerinin oluşumuna olanak verdiği şeklinde açıklanmıştır [16, 25, 73]. Bu sebeple alkalilerle aktive edilmiş malzeme üretmek için hidroksit çözeltisi olarak KOH kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) çözeltileri Söz Kimyevi Ltd.'den temin edilmiştir (Şekil 5.3). Potasyum hidroksit %40 KOH

ve %60 H<sub>2</sub>O içerirken sodyum silikat ise %12.81 Na<sub>2</sub>O, %25.62 SiO<sub>2</sub> ve %61.57 H<sub>2</sub>O içermektedir. Kullanılan sodyum silikatın silika modülü (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) oranı 2'dir. Çalışmada kullanılan sodyum silikat ve potasyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

**Tablo 5.2** Potasyum hidroksit ve sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özellikler

Çözelti	Potasyum Hidroksit	Sodyum Silikat
Kimyasal Formül	KOH+H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O.xSiO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O
Görünüş	Renksiz, Berrak Sıvı	Renksiz, Berrak Sıvı
KOH	%40.00	-
Na <sub>2</sub> O	-	%12.81
SiO <sub>2</sub>	-	%25.62
H <sub>2</sub> O	%60.00	%61.57
Özgül Ağırlık (20°C)	1.25 gr/cm <sup>3</sup>	1.43 gr/cm <sup>3</sup>



**Şekil 5.3** a) Sodyum silikat ve b) potasyum hidroksit çözeltileri

Potas kostik olarak ta bilinen potasyum hidroksit beyaz renkte katı bir kimyasal malzemedir ve KOH formülü ile belirtilir. Akkor derecede uçucu özelliğe sahip olan KOH, 360°C sıcaklıkta bileşiklerine ayrılıp çözünebilmektedir. Ayrıca nem tutma özelliğine sahip olan KOH suda eridiğinde ısı açığa çıkarmaktadır. Çözelti hali renksiz ve berraktır. Alkali özelliğe sahip olan KOH kimya endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Cam suyu olarak ta bilinen sodyum silikat, Na<sub>2</sub>O.n(SiO<sub>2</sub>) formülüne sahip bir kimyasal bileşendir. Sodyum silikatlar üretildikleri aside göre, ortosilikat, metasilikat, disilikat ve tetrasilikat olarak adlandırılırlar. Sodyum silikat çözeltileri renksiz, kokusuz ve berrak bir formda olup sıvı içerisinde viskoz bir çözelti halindedirler. Çözeltileri kuvvetli alkalilerdir. Sodyum silikatın kullanım alanlarını silika modülleri belirler. Ticari olarak

üretilen ve kolayca bulunabilen sodyum silikat çözeltisinin silika modülü 1.60 ile 3.85 arasında değişmektedir.

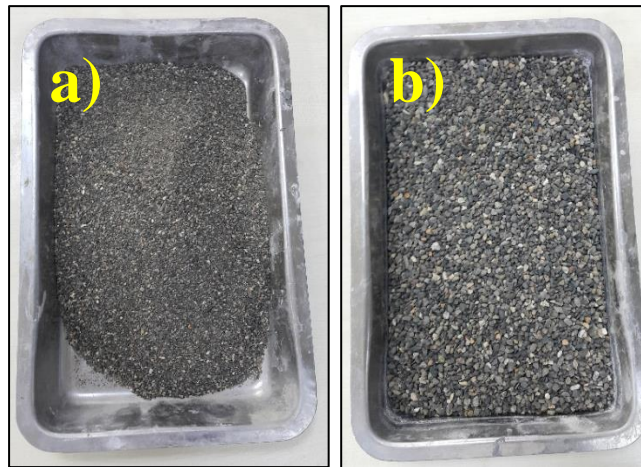
### 5.1.3. Karışım Suyu

Beton karma suyu, mümkün olabildiği kadar temiz olmalıdır ve içinde hamur veya betona zararlı etki gösterebilecek maddeler bulundurmamalıdır. Deneysel çalışmalarda TS EN 1008 [141] standardına uygun Bingöl ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

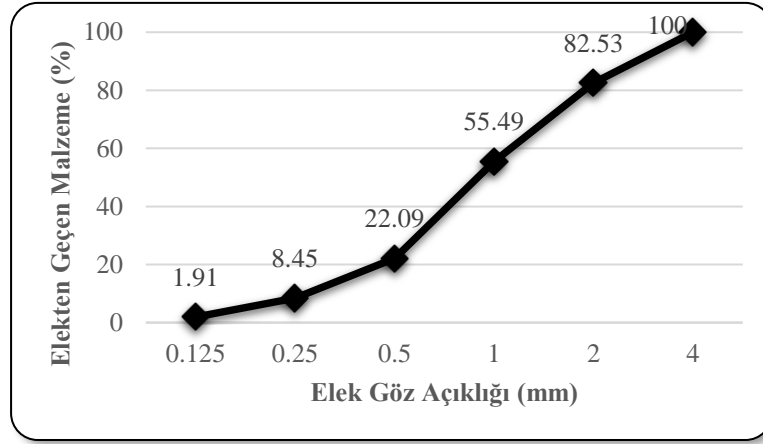
Alüminosilikat yapıların çözünmesinde ve polikondenzasyon reaksiyonlarında rol almasından ötürü alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların geopolimerizasyonunda suyun önemli bir yeri vardır [142, 143].

### 5.1.4. Agregat

Alkalilerle aktive edilmiş hibrit harç numuneler üretmek için 0-2 mm ve 2-4 mm aralıklarında Bingöl yöresinden temin edilen dere agregaları kullanılmıştır (Şekil 5.4). Agregalar yıkanmış halde temin edilmiştir. Çalışmada ince agregalar doygun kuru yüzey haline getirildikten sonra karışıma ilave edilmiştir. Agregaların doygun kuru yüzey özgül ağırlıkları  $2.63 \text{ gr/cm}^3$  ve su emmesi %1.96 olup elek analizi sonucunda elde edilen granülometri grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.4 Harç numunelerde kullanılan agregatlar a) 0-2 mm ve b) 2-4 mm



Şekil 5.5 İnce agrega granülometri eğrisi

Puzolanik aktivite deneyi için Limak Çimento San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilen ve TS EN 196-1 [144] standardına uygun CEN standart kumu (Şekil 5.6) kullanılmıştır. CEN standart kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı ve TS EN 196-1 standardına uygun sınır değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir. CEN standart kumu, tercihen yuvarlak tanecikli ve silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) içeriği en az %98 olmalıdır.



Şekil 5.6 CEN standart kumu

**Tablo 5.3** CEN standart kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı ve sınır değerler

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)	Sınır değerler (%)
2.00	0	0
1.60	11	7±5
1.00	37	33±5
0.50	62	67±5
0.16	84	87±5
0.08	99	99±1

## 5.2. Karışım Oranları ve Seriler

Deneysel çalışmada karışımlar, birim hacim esasına göre TS 802 standardına [145] uygun bir şekilde hesaplanmıştır (Denklem 5.1).

$$\frac{PÇ}{\delta_{PÇ}} + \frac{P}{\delta_P} + \frac{SS}{\delta_{SS}} + \frac{PH}{\delta_{PH}} + \frac{W}{\delta_W} + \frac{W_a}{\delta_{W_a}} + A = 1000 \text{ dm}^3 \quad (5.1)$$

PÇ : Karışıma girecek Portland çimentosunun ağırlığı (kg)

$\delta_{PÇ}$  : Portland çimentosunun yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

P : Karışıma girecek öğütülmüş pomzanın ağırlığı (kg)

$\delta_P$  : Öğütülmüş pomzanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

SS : Karışıma girecek sodyum silikat çözeltisi ağırlığı (kg)

$\delta_{SS}$  : Sodyum silikatın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

PH : Karışıma girecek potasyum hidroksit çözeltisi ağırlığı (kg)

$\delta_{PH}$  : Potasyum hidroksitin yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

W : Karışıma girecek suyun ağırlığı (kg)

$\delta_W$  : Suyun yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

$W_a$  : Karışıma girecek agreganın ağırlığı (kg)

$\delta_{W_a}$  : Agreganın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

A : Karışımındaki toplam hava miktarı ( $\text{dm}^3$ )

### 5.2.1. Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hamurlar

Çalışmanın bu bölümünde Portland çimentosu içeren ve içermeyen alkalilerle aktive edilmiş hamur karışımların ilk olarak en uygun malzeme oranlarının daha sonra en uygun kür koşullarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda hazırlanan karışım oranları tablolar halinde verilmiştir.

### 5.2.1.1. Malzeme Miktarlarının Belirlenmesi

Deneyel çalışmanın birinci aşamasında hamur numunelerin en uygun Portland çimentosu miktarı, alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı basınç dayanımları baz alınarak belirlenmiştir. Literatürde hibrit karışımlarda genel olarak çimento içeriği %20~30 arasında kullanılmıştır [75, 84, 89, 93, 109, 111, 118, 121]. Bu amaçla, Portland çimentosu içeriği toplam bağlayıcının %5, %10, %15 ve %20'si olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca Portland çimentosu içermeyen seriler de üretilip geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş hibrit bağlayıcıların yürütülen deneyler üzerinden kıyası sağlanmıştır. Kullanılan sodyum silikat çözeltisinin silika modülü ( $\text{SM}=2$ ) sabit tutulurken,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı (1, 2 ve 3) değişken olarak kabul edilmiştir.

Yapılan deneme karışımları sonucunda alkali çözelti/bağlayıcı oranları 0.47, 0.50 ve 0.53 olarak belirlenmiştir. Denklem 5.1 yardımı ile karışıma girecek olan malzemelerin miktarları hesaplanmıştır (Tablo 5.4) ve hamur karışım aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada  $50 \times 50 \times 50$  mm ebatlarındaki küp kalıplar kullanılarak 45 farklı serinin dökümü gerçekleştirilmiştir. Seriler; kullanılan kaynak malzeme, alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sıralamasıyla isimlendirilmiştir. Karışımların içerisinde Portland çimentosu mevcut ise H, sadece öğütülmüş pomza var ise P olarak isimlendirilmeye başlanmıştır. Örneğin H5-47-3 serisi; Portland çimentosu içeriğinin %5, alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 3 olduğunu belirtmektedir. Önceki çalışmalarda [17, 54, 146], pomza içerikli alkalilerle aktive edilen malzemeler için optimum sertleşme sıcaklığının  $60^\circ\text{C}$  olduğu tespit edilmiştir ve böylelikle bu aşamada etüv sıcaklığı olarak  $60^\circ\text{C}$  seçilmiştir. Etüv sıcaklığının yanında etüvde bekleme süresi (48 saat) ve ortam koşullarında deney gününe kadar geçen süre de (28 gün) sabit tutulmuştur.

Bu aşamada; priz süresi tayini, UPV testi, basınç dayanımı, yoğunluk, toplam su emme ve porozite deneyleri ile üretilen malzemelerin mikro yapılarının incelenebilmesi için FTIR ve SEM/EDX deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan basınç dayanımı deneyi sonucunda hem Portland çimentosu içeren hem de içermeyen en uygun seriler belirlenmiştir.

**Tablo 5.4** Alkalilerle aktive edilen hamur karışımların en uygun malzeme oranlarının tespiti

Seri	Bağlayıcılar			Alkali Çözeltiler		Muhteva (kg/m <sup>3</sup> )			
	Pomza (P)	Portland Çimentosu (PÇ)	Alkali Çözelti/ Bağlayıcı	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / KOH	SM	P	PÇ	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	KOH
P-47-1	100%	0%	0.47	1	2	1279.56	0.00	300.70	300.70
P-47-2	100%	0%	0.47	2	2	1292.60	0.00	405.02	202.51
P-47-3	100%	0%	0.47	3	2	1299.23	0.00	457.98	152.66
P-50-1	100%	0%	0.50	1	2	1243.77	0.00	310.94	310.94
P-50-2	100%	0%	0.50	2	2	1256.88	0.00	418.96	209.48
P-50-3	100%	0%	0.50	3	2	1263.55	0.00	473.83	157.94
P-53-1	100%	0%	0.53	1	2	1209.92	0.00	320.63	320.63
P-53-2	100%	0%	0.53	2	2	1223.09	0.00	432.16	216.08
P-53-3	100%	0%	0.53	3	2	1229.78	0.00	488.84	162.95
H5-47-1	95%	5%	0.47	1	2	1224.25	64.43	302.84	302.84
H5-47-2	95%	5%	0.47	2	2	1236.82	65.10	407.93	203.97
H5-47-3	95%	5%	0.47	3	2	1243.21	65.43	461.30	153.77
H5-50-1	95%	5%	0.50	1	2	1189.77	62.62	313.10	313.10
H5-50-2	95%	5%	0.50	2	2	1202.41	63.28	421.90	210.95
H5-50-3	95%	5%	0.50	3	2	1208.83	63.62	477.17	159.06
H5-53-1	95%	5%	0.53	1	2	1157.18	60.90	322.79	322.79
H5-53-2	95%	5%	0.53	2	2	1169.85	61.57	435.10	217.55
H5-53-3	95%	5%	0.53	3	2	1176.29	61.91	492.19	164.06
H10-47-1	90%	10%	0.47	1	2	1168.15	129.79	305.02	305.02
H10-47-2	90%	10%	0.47	2	2	1180.23	131.14	410.90	205.45
H10-47-3	90%	10%	0.47	3	2	1186.37	131.82	464.66	154.89
H10-50-1	90%	10%	0.50	1	2	1135.02	126.11	315.28	315.28
H10-50-2	90%	10%	0.50	2	2	1147.16	127.46	424.87	212.44
H10-50-3	90%	10%	0.50	3	2	1153.33	128.15	480.55	160.18
H10-53-1	90%	10%	0.53	1	2	1103.71	122.63	324.98	324.98
H10-53-2	90%	10%	0.53	2	2	1115.89	123.99	438.09	219.04
H10-53-3	90%	10%	0.53	3	2	1122.08	124.68	495.58	165.19
H15-47-1	85%	15%	0.47	1	2	1111.24	196.10	307.22	307.22
H15-47-2	85%	15%	0.47	2	2	1122.82	198.14	413.90	206.95
H15-47-3	85%	15%	0.47	3	2	1128.70	199.18	468.08	156.03
H15-50-1	85%	15%	0.50	1	2	1079.50	190.50	317.50	317.50
H15-50-2	85%	15%	0.50	2	2	1091.13	192.55	427.89	213.95
H15-50-3	85%	15%	0.50	3	2	1097.04	193.59	483.99	161.33
H15-53-1	85%	15%	0.53	1	2	1049.52	185.21	327.20	327.20
H15-53-2	85%	15%	0.53	2	2	1061.18	187.27	441.12	220.56
H15-53-3	85%	15%	0.53	3	2	1067.10	188.31	499.03	166.34
H20-47-1	80%	20%	0.47	1	2	1053.49	263.37	309.46	309.46
H20-47-2	80%	20%	0.47	2	2	1064.55	266.14	416.95	208.47
H20-47-3	80%	20%	0.47	3	2	1070.17	267.54	471.54	157.18
H20-50-1	80%	20%	0.50	1	2	1023.19	255.80	319.75	319.75
H20-50-2	80%	20%	0.50	2	2	1034.29	258.57	430.96	215.48
H20-50-3	80%	20%	0.50	3	2	1039.93	259.98	487.47	162.49
H20-53-1	80%	20%	0.53	1	2	994.58	248.65	329.46	329.46
H20-53-2	80%	20%	0.53	2	2	1005.71	251.43	444.19	222.09
H20-53-3	80%	20%	0.53	3	2	1011.36	252.84	502.52	167.51

### 5.2.1.2. Kür Koşullarının Etkisi

Malzeme oranlarının tespitinden sonra kür koşullarının alkalilerle aktive edilmiş malzemeler üzerindeki etkisi incelenmiş ve en uygun kür şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple; farklı etüv sıcaklıklarının (20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C ve 120°C), farklı etüvde bekleme sürelerinin (24, 48, 72 ve 96 saat) ve farklı kür sürelerinin (3, 27 ve 90 gün) geopolimer ve hibrit numuneler üzerindeki etkisi incelenmiştir (Tablo 5.5). Bu aşamada, bir önceki aşamadan elde edilen en yüksek basınç dayanımına sahip Portland çimentosu içeren ve içermeyen seriler kullanılmıştır.

Üretilen hamur numunelerin UPV ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Kür koşullarının tespiti için, geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş hibrit karışımlardan toplam 116 serilik hamur numune dökülmüştür. Bu aşamada kullanılan kalıplar 50×50×50 mm boyutlarındadır. Seriler; kür süresi, etüv sıcaklığı ve etüv süresi sırasıyla isimlendirilmişlerdir. P ile başlayan seriler geopolimer hamurları, H ile başlayan seriler ise alkalilerle aktive edilmiş hibrit hamurları ifade etmektedir.

**Tablo 5.5** Alkalilerle aktive edilen hamur karışımların en uygun kür koşullarının incelenmesi

Seri	Kür Süresi (gün)	Etüv Sıcaklığı (°C)	Etüv Süresi (saat)	Seri	Kür Süresi (gün)	Etüv Sıcaklığı (°C)	Etüv Süresi (saat)
P3-20	3	20	24	H3-20	3	20	24
P3-40-24			24	H3-40-24			24
P3-40-48		40	48	H3-40-48		40	48
P3-40-72			72	H3-40-72			72
P3-60-24		60	24	H3-60-24		60	24
P3-60-48			48	H3-60-48			48
P3-60-72			72	H3-60-72			72
P3-80-24		80	24	H3-80-24		80	24
P3-80-48			48	H3-80-48			48
P3-80-72			72	H3-80-72			72
P3-100-24		100	24	H3-100-24		100	24
P3-100-48			48	H3-100-48			48
P3-100-72			72	H3-100-72			72
P3-120-24		120	24	H3-120-24		120	24
P3-120-48			48	H3-120-48			48
P3-120-72			72	H3-120-72			72

Tablo 5.5 (devam)

Seri	Kür Süresi (gün)	Etüv Sıcaklığı (°C)	Etüv Süresi (saat)	Seri	Kür Süresi (gün)	Etüv Sıcaklığı (°C)	Etüv Süresi (saat)
P28-20	28	20	24	H28-20	28	20	24
P28-40-24		40	24	H28-40-24		40	24
P28-40-48			48	H28-40-48			48
P28-40-72			72	H28-40-72			72
P28-40-96			96	H28-40-96			96
P28-60-24		60	24	H28-60-24		60	24
P28-60-48			48	H28-60-48			48
P28-60-72			72	H28-60-72			72
P28-60-96			96	H28-60-96			96
P28-80-24		80	24	H28-80-24		80	24
P28-80-48			48	H28-80-48			48
P28-80-72			72	H28-80-72			72
P28-80-96			96	H28-80-96			96
P28-100-24		100	24	H28-100-24		100	24
P28-100-48			48	H28-100-48			48
P28-100-72			72	H28-100-72			72
P28-100-96			96	H28-100-96			96
P28-120-24		120	24	H28-120-24		120	24
P28-120-48			48	H28-120-48			48
P28-120-72			72	H28-120-72			72
P28-120-96	96		H28-120-96	96			
P90-20	90	20	24	H90-20	90	20	24
P90-40-24		40	24	H90-40-24		40	24
P90-40-48			48	H90-40-48			48
P90-40-72			72	H90-40-72			72
P90-40-96			96	H90-40-96			96
P90-60-24		60	24	H90-60-24		60	24
P90-60-48			48	H90-60-48			48
P90-60-72			72	H90-60-72			72
P90-60-96			96	H90-60-96			96
P90-80-24		80	24	H90-80-24		80	24
P90-80-48			48	H90-80-48			48
P90-80-72			72	H90-80-72			72
P90-80-96			96	H90-80-96			96
P90-100-24		100	24	H90-100-24		100	24
P90-100-48			48	H90-100-48			48
P90-100-72			72	H90-100-72			72
P90-100-96			96	H90-100-96			96
P90-120-24		120	24	H90-120-24		120	24
P90-120-48			48	H90-120-48			48
P90-120-72			72	H90-120-72			72
P90-120-96	96		H90-120-96	96			

## 5.2.2. Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hibrit Harçlar

Çalışmanın bu bölümünde hamur numunelerden elde edilen en iyi malzeme oranları ve en uygun kür süreleri ile alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçlar üretilmiş ve yüksek sıcaklık dirençleri test edilmiştir.

### 5.2.2.1. Bağlayıcı Dozajının Belirlenmesi

Bu aşamada alkalilerle aktive edilmiş hibrit harçların karışım oranları Denklem 5.1 yardımı ile hesaplanıp Tablo 5.6'da verilmiştir. Farklı bağlayıcı dozajlarının hibrit sistemlerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla karışımlara  $350 \text{ kg/m}^3$ ,  $450 \text{ kg/m}^3$ ,  $550 \text{ kg/m}^3$  ve  $650 \text{ kg/m}^3$  miktarlarında bağlayıcı (pomza + Portland çimentosu) eklenmiştir. Harç karışımlarda 0-2 mm ve 2-4 mm tane boyutlarındaki dere agregaları kullanılmıştır. Yapılan deneme karışımları sonucunda toplam su içeriği/bağlayıcı oranı 0.37 olarak seçilmiştir. Toplam su içeriği ifadesi, çözeltilerdeki su miktarı ve ilave su miktarının toplamı anlamına gelmektedir. Bu aşamada  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  boyutlarındaki kalıplar kullanılarak prizmatik numuneler dökülmüş ve 28 günün sonunda; UPV, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yoğunluk, porozite ve toplam su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 5.6** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların karışım oranları

Seri	Dozaj ( $\text{kg/m}^3$ )	P (kg)	PÇ (kg)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (kg)	KOH (kg)	Alkali Çözelti/ Bağlayıcı	Agrega (kg)		İlave Su (kg)	Toplam Su/ Bağlayıcı
							0-2 mm	2-4 mm		
H650	650	520.00	130.00	229.13	76.38	0.47	847.77	363.33	53.60	0.37
H550	550	440.00	110.00	193.88	64.63	0.47	1000.57	428.82	45.36	0.37
H450	450	360.00	90.00	158.63	52.88	0.47	1153.38	494.30	37.11	0.37
H350	350	280.00	70.00	123.38	41.13	0.47	1306.18	559.79	28.86	0.37

### 5.2.2.2. Yüksek Sıcaklık Direnci

Tez çalışmasının bu aşamasında en iyi dozaja sahip alkalilerle aktive edilmiş hibrit harçların yüksek sıcaklıklara karşı dayanımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için 28 günün sonunda 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklara maruz kalan harç numunelerinin (50×50×50 mm) basınç dayanımları, UPV ve ağırlık kaybı değerleri deneyler sonucunda belirlenmiştir. Tablo 5.7’de üretilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harcın hedef sıcaklığa çıkış süresi, hedef sıcaklıkta bekleme süresi ve toplam yüksek sıcaklık süreleri verilerek seriler isimlendirilmiştir. Sıcaklık değişiminin malzemelerin içyapılarındaki meydana getirdiği değişiklikleri gözlemlemek için FTIR ve SEM/EDX yöntemleri kullanılmıştır.

**Tablo 5.7** Yüksek sıcaklığa maruz kalan alkalilerle aktive edilmiş hibrit harç serileri

Seri	Sıcaklık (°C)	Hedef Sıcaklığa Çıkış Süresi (dk)	Hedef Sıcaklıkta Bekleme Süresi (dk)	Toplam Yüksek Sıcaklık Süresi (dk)
H-20	Ortam	-	-	-
H-200	200	40	60	100
H-400	400	80	60	140
H-600	600	120	60	180
H-800	800	160	60	220
H-1000	1000	200	60	260

### 5.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmada hamur/harç karışımlarının yapılabilmesi için öncelikle bağlayıcı malzemeler hazır hale getirilmiştir. Deney aşamasına geçilmeden önce pomza 24 saat boyunca 105°C±5 sıcaklığındaki etüvde kuruması ve içerisindeki suyun buharlaşması sağlanmıştır (Şekil 5.7). Daha sonra pomza, Los Angeles cihazında 30000 devir döndürülerek toz haline getirilmiştir. 200 nolu elek kullanılarak öğütülmüş pomzanın tamamının 75 µm altında kalması sağlanmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 Pomzanın etüvde bekletilmesi



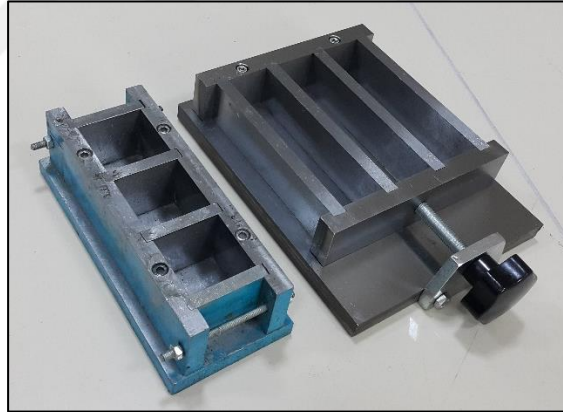
Şekil 5.8 Pomzanın öğütülüp elenmesi işlemi

Laboratuvar ortamında öncelikle bağlayıcıların Şekil 5.9'daki çimento mikseri kullanılarak 2 dakika boyunca kuru karışımı gerçekleştirilmiştir. Sodyum silikat ve potasyum hidroksit çözeltileri ayrı bir kaptaki karıştırılarak azar azar kuru karışıma ilave edilmiştir ve ıslak karıştırma işlemi 3 dakika boyunca devam etmiştir. Harç karışımlarında ise, bağlayıcı malzemeye agrega eklenerek kuru karıştırma işlemi gerçekleştirilirken hamur karışımındaki gibi alkali çözeltiler sonradan karışıma ilave edilmiştir. Bu işlemlerin sonucunda hamur/harç karışımlar elde edilmiştir.



**Şekil 5.9** Karıştırıcı ve hamur karışımı

Karıştırma işlemi bittikten sonra hamur numuneler 50×50×50 mm ebatlarındaki küp metal kalıplara harç karışımlar ise 50×50×50 mm küp ve 40×40×160 mm ebatlarındaki prizmatik metal kalıplara dökülmüştür (Şekil 5.10). Kalıplara yerleştirme işlemi 3 aşamada yapılmış sonrasında ise titreşim masasının üzerinde içerisindeki hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır. Bütün karıştırma ve döküm işlemleri oda koşullarında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.10** 50×50×50 mm ve 40×40×160 mm ebatlarındaki kalıplar

Numunelerin içeriğindeki suyun etüvde buharlaşmasını önlemek için kalıpların etrafı film ile sarılmış ve 300°C kapasiteli laboratuvar tipi etüve yerleştirilmiştir (Şekil 5.11). Etüvden çıkarılan kalıplar deney gününe kadar ortam koşullarında bekletilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.11 Deney numunelerinin etüve yerleştirilmesi



Şekil 5.12 Numunelerin ortam koşullarında saklanması

## 5.4. Deneyler

### 5.4.1. Pomzanın Puzolanik Aktivite Deneyi

Geopolimer ve alkalilerle aktive edilen hibrit karışımlarda kullanılacak olan pomzanın 7 ve 28 günlük puzolanik aktiviteleri ASTM C 311 [147] standardı ile belirlenmiştir. Pomzanın puzolanik aktivite deneyi karışımlarında; CEM I 42.5 R Portland çimentosu, öğütülmüş pomza, CEN standart kumu ve su kullanılmıştır. Harç numuneler 50×50×50 mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür. Puzolanik aktivite deneyi karışım oranları Tablo 5.8’de verilmiştir.

**Tablo 5.8** Puzolanik aktivite deneyi karışım oranları

	Seri	Kür Süresi (gün)	Çimento (gr)	Pomza (gr)	Kum (gr)	Su (mL)
Kontrol Harç Karışımı	K7	7	500	-	1375	242
	K28	28	500	-	1375	242
Test Harç Karışımı	T7	7	400	100	1375	255
	T28	28	400	100	1375	255

Kontrol harcı için öncelikle 500 gr Portland çimentosu, 1375 gr CEN standart kumu ve 242 gr su kullanılarak karışım hazırlanmıştır. Daha sonra 400 gr Portland çimentosu, 100 gr öğütülmüş pomza, 1375 gr CEN standart kumu ve kontrol karışımıyla aynı akmayı sağlayabilecek kadar su ilave edilerek test harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan harç karışımlar 50×50×50 mm boyutlarındaki metal kalıplara dökülmüştür. 24 saat boyunca 23±2°C sıcaklıkta oda koşullarında kalıpta bekleyen harç numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra ilgili kür sürelerine (7 ve 28 gün) kadar kirece doymun su içerisinde bekletilmiştir (Şekil 5.13). Kür süreleri sonunda numunelerin UPV değerleri ölçüldükten sonra basınç dayanım testine tabi tutulmuştur ve aşağıdaki eşitlikten (Denklem 5.2) dayanım aktivite indeksleri belirlenmiştir.

$$\text{Dayanım Aktivite İndeksi} = (A/B) \times 100 \quad (5.2)$$

Eşitlikte; A, puzolanlı harç numunelerinin (test harç karışımları) ortalama basınç dayanımını, B ise kontrol harç karışımlarının ortalama basınç dayanımını ifade etmektedir.

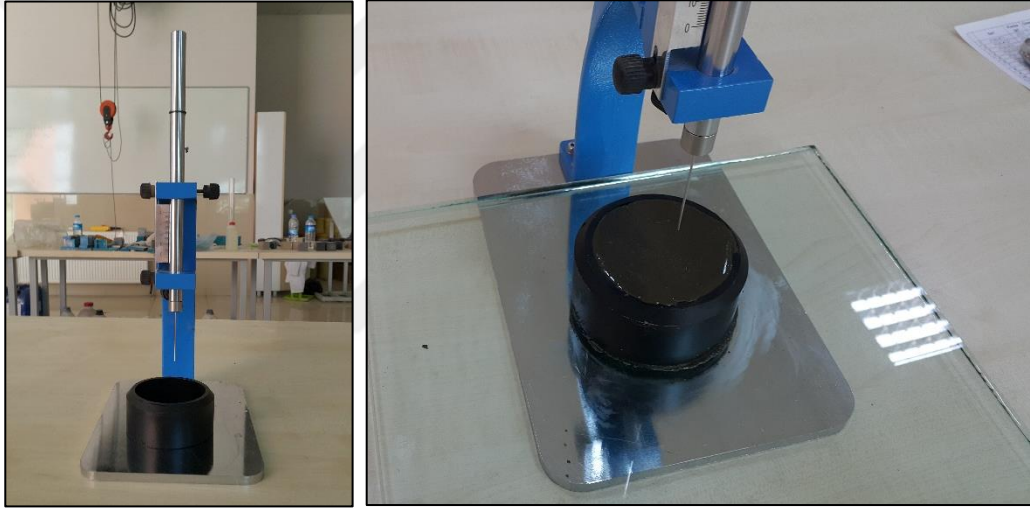


**Şekil 5.13** Puzolanik aktivite numuneleri

### 5.4.2. Priz Süresi Tayini Deneyi

Çalışmanın ilk aşamasında; Portland çimentosu ilavesinin, alkali çözelti/bağlayıcı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranlarının hamur karışımların priz başlangıç ve bitiş sürelerine etkisi TS EN 196-3 [148] standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Vicat aletinin (Şekil 5.14) kullanıldığı priz süresi tayini deneyinde, vicat iğnesi taban plakasının üzerine indirilir ve taksimatlı gösterge sıfırlanır. Karışımın tamamlanmasından sonra alkalilerle aktive edilmiş hamurlar vicat halkası içerisine yerleştirilir. Hamur yüzeyi spatula ile düzgün hale getirilir. İğnenin hamura hızlı bir şekilde batmasını önlemek için yavaşça indirildikten sonra serbest bırakılır ve belirli zaman aralıklarında ölçüm yapılır.



Şekil 5.14 Vicat aleti

Başlangıç zamanından vicat iğnesinin taban plakası ile arasındaki mesafe  $4\pm 1$  mm oluncaya kadar geçen süreye priz başlangıç süresi denilmektedir. Vicat iğnesinin 0.05 mm battığı veya hiç batmadığı an ile sıfır kabul edilen zaman priz bitiş süresi olarak kaydedilir. Vicat aletinin iğnesi her batırma işlemi sonucunda silinip tekrar kullanılmıştır. Bu deney  $23\pm 2^\circ\text{C}$  ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

### 5.4.3. Ultra Ses Hızı Ölçüm (UPV) Deneyi

Ultra ses ölçüm cihazı, betonun homojenliliğinin, betondaki boşluk yapısının ve mukavemetinin tahribatsız bir şekilde belirlenmesinde kullanılmaktadır. Deneyde kullanılan cihaz Proceq Pundit Lab markadır (Şekil 5.15). Bu cihaz, ultrasonik dalgalar üreterek belirli

bir boyuttaki numunenin bir yüzünden gönderilen dalgaların diğer yüzünden alınmasına kadar geçen süreyi ölçer ve iki yüzey arasındaki mesafeyi süreye bölerek dalgaların hızını elde eder.



Şekil 5.15 Ultra ses hızı ölçüm cihazı

Sertleşmiş hamur ve harç numunelerinde ultra ses ölçüm hızı ile dayanımları arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Erdoğan [2], ultrasonik test cihazı ile hesaplanan ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasında yaklaşık ilişki kurulabileceğini belirtmiştir. Ayrıca araştırmacılar, betonun su/bağlayıcı oranının, agrega granülometrisinin ve kür süresinin UPV değerlerini etkilediğini, betonun UPV değerleri ile basınç dayanımları arasında yaklaşık üstel bir ilişki olduğunu, betonun basınç dayanımının tahmininde etkili bir yöntem olduğunu fakat UPV verilerinin tek başına yeterli olmadığını ve ek yöntemlerle desteklenmesi gerektiğini belirtmişlerdir [149-151].

#### 5.4.4. Basınç Dayanımı Deneyi

50×50×50 mm boyutlarındaki alkalilerle aktive edilmiş hamur/harç numunelerin basınç dayanımı tayini TS EN 12390-3 [152] standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Betonun basınç dayanımı yükleme hızından etkilenmektedir. Yükleme hızı azaldıkça sertleşmiş numune daha fazla yüke maruz kalacağı için basınç dayanımı azalmaktadır [153]. Bu sebeple TS EN 12390-3 standardına uygun olarak, her bir seri için üretilen 3'er adet numune yükleme hızı 0.6 MPa/s olan Şekil 5.16'daki deney aleti ile kırılmış ve basınç dayanımlarının ortalaması alınmıştır. Yük, darbe etkisinden kaçınacak şekilde en büyük yüke ulaşıncaya kadar sabit hızda uygulanmıştır.



Şekil 5.16 Hamur numuneler için kullanılan basınç dayanımı test cihazı

#### 5.4.5. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deneyi

Alkalilerle aktive edilmiş  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarındaki harç numuneler TS EN 196-1 [144] standardına uygun bir şekilde önce üç noktalı eğilme daha sonra ikiye ayrılan her bir parça basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 5.17). Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı tayini için yükleme hızları sırasıyla  $50 \pm 10$  N/s ve  $2400 \pm 200$  N/s'dir. Her seriden üç adet numune dökülmüş ve numune dayanım değerlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.17  $40 \times 40 \times 160$  mm harç numuneler için eğilme ve basınç dayanımı deneyi aleti

#### 5.4.6. Sertleşmiş Numunelerin Yoğunluk, Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri

Geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş hibrit hamur numuneler ile alkalilerle aktive edilmiş hibrit harç numunelerin yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerleri Şekil 5.18'deki Arşimet terazisi kullanılarak elde edilmiştir. Her seriden üretilen 50 mm'lik küp numuneler öncelikle 24 saat boyunca su içerisinde bırakılmış ve değişmez ağırlığa ulaşıncaya kadar bekletilmiştir. Su içerisinde ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları Arşimet prensibine göre tespit edildikten sonra  $105^{\circ}\text{C}\pm 5$  sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşıncaya kadar etüvde bekletilmiştir. Su içerisinde, doymuş kuru yüzey ve etüv kurusu ağırlıkları bulunduktan sonra aşağıdaki denklemler (Denklemler 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7) vasıtasıyla numunelerin; etüv kurusu yoğunluğu, doymuş kuru yüzey yoğunluğu ve görünür yoğunluğu ile toplam su emme ve porozite değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.18 Arşimet terazisi

$$\text{Etüv kurusu yoğunluk} = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \quad (5.3)$$

$$\text{Doymuş kuru yüzey yoğunluk} = \frac{W_3}{W_3 - W_2} \quad (5.4)$$

$$\text{Görünür yoğunluk} = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \quad (5.5)$$

$$\text{Toplam su emme (\%)} = \frac{(W_3 - W_1)}{W_1} \times 100 \quad (5.6)$$

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (5.7)$$

$W_1$  : Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr)

$W_2$  : Numunenin sudaki ağırlığı (gr)

$W_3$  : Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr)

#### 5.4.7. Yüksek Sıcaklık Deneyi

Alkalilerle aktive edilmiş hibrit harç numuneler, Şekil 5.19'daki 1200°C kapasiteli laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır.



Şekil 5.19 Yüksek sıcaklık fırını

Yüksek sıcaklık fırınına konulan numuneler dakikada 5°C artışla istenilen sıcaklık seviyesine getirilmiş ve hedef sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Deney bittikten sonra numunelerin ortam sıcaklığında soğuması gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığına ulaşan numunelerin UPV ve basınç dayanımı değerleri ile ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Numunelerin sıcaklık ve deney süreleri Tablo 5.9'da verilmiştir.

**Tablo 5.9** Yüksek sıcaklık deneyinde numunelere uygulanan sıcaklık ve süreleri

Sıcaklık	Çıkış Süresi (dk)	Bekleme Süresi (dk)	Toplam Deney Süresi (dk)
200°C	40	60	100
400°C	80	60	140
600°C	120	60	180
800°C	160	60	220
1000°C	200	60	260

#### 5.4.8. X-Işını Difraktometresi (XRD) Deneyi

XRD, X-ışını difraktometresinin (X-Ray Diffraction) kısaltılmasıdır. X-ışını difraktometresi yöntemi (XRD), malzemelerin mikro yapı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada XRD deneyi için Şekil 5.20’de görülen Rigaku Ultima IV marka cihaz kullanılmıştır. Bu analiz Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.20 XRD cihazı

Tahribatsız bir yöntem olan XRD tekniği, özellikle kristal yapıdaki inorganik malzemelerin içerdikleri fazların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Malzemeye X-ışını göndererek ışınların kırılma ve dağılma verilerinin toplanması esasına göre çalışır ve malzemenin kristal yapısına göre farklı açılarda ve şiddetlerdeki ışınlar ile hassas bir biçimde analizler gerçekleştirilebilir. Bu yöntem ile kristal malzemelerin, kayaçların ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir. Numuneler parça halinde kullanılabilir gibi toz halinde de kullanılabilir.

#### 5.4.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi

Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, organik veya inorganik bileşiklerin tanımlanmasında kullanılır. Bu yöntem molekül veya bileşik yapısında bulunan

bağlar hakkında bilgiler verir. Üretilen malzemelerin bileşik yapılarını ortaya çıkarmak için Perkin Elmer Spectrum 100 FT-IR cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.21). Bu analiz Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numuneler önce öğütülüp daha sonra 200 nolu elekten geçirildikten sonra deneye hazır hale getirilmiştir. Toz haline getirilen numuneler, Potasyum Bromür (KBr) ile karıştırıldıktan sonra basınç altında 0.5 mm kalınlığında 10 mm çapında pellet haline getirilmiştir.



Şekil 5.21 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı

Kızılötesi (IR) absorpsiyon spektroskopisi bir tür titreşim spektroskopisidir; IR ışınları molekülün titreşim hareketleri tarafından soğurulmaktadır [154]. IR spektrumu, maddeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimiyle oluşan frekanslarına karşılık gelen absorpsiyon pikleri ile örneğin parmak izini göstermektedir [155]. Hangi kimyasal bağların hangi dalga sayısı değerlerinde gözleneceği çeşitli tablolarla düzenlenmiştir. Bu tablolara korelasyon tabloları denir. IR spektrumlarında  $4000\text{ cm}^{-1}$  ile  $1300\text{ cm}^{-1}$  arasında izlenen pikler molekülde bulunan çeşitli fonksiyonel gruplara ait piklerdir. Spektromun bu bölgesinin değerlendirilmesiyle o molekülde hangi fonksiyonel grupların olup olmadığı anlaşılabilir [156].

#### 5.4.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Üretilen numunelerin mikro yapı kompozisyonları ve yüksek çözünürlüklü görüntüleri Şekil 5.22'deki JSM-6510 taramalı elektron mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscop) ve enerji dağılım spektrometrisi (EDX- Energy Dispersive X-Ray)

analizleri yapılarak incelenmiştir. Bu analiz Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.22 SEM cihazı

Elektronları kullanarak numune yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntü alma sistemi ile çalışan taramalı elektron mikroskobu numune yüzeyinin üç boyutlu görüntülerinin elde edilmesinde kullanılır. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Elektron demeti ızgara tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluşturulur. Taramalı elektron mikroskobu optik mikroskoplara göre çok daha iyi görüntüleme derinliği ve geniş bir büyütme alanına sahiptir. Düzgün yüzeyli olmayan numunelerde de kullanılabilir.

SEM cihazı kullanılarak üretilen alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin içyapısının görüntülenmesi ve SEM/EDX ile de malzeme içerisindeki elementlerin oranı elde edilmiştir.

## 6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde, pomzanın puzolanik aktivite deneyi sonuçları ile alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamurlar ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçlar üzerinde yürütülen deneylerin sonuçları ve değerlendirilmeleri sunulmaktadır.

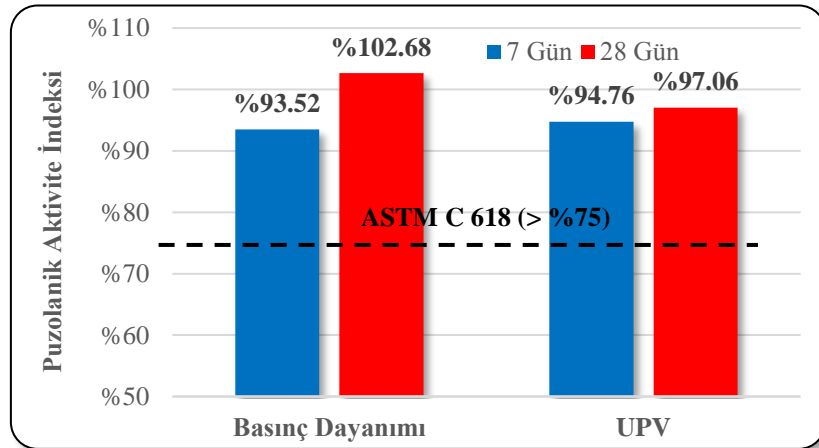
### 6.1. Pomzanın Puzolanik Aktivite Deneyi Sonuçları

Pomzanın puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harç numunelerin, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve UPV değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Doğal puzolanlarla hazırlanan 7 ve 28 günlük harç numunelerin dayanım aktivite indeksi ASTM C 618 standardına göre en az %75 olmalıdır [157].

**Tablo 6.1** Puzolanik aktivite deneyi numunelerinin basınç dayanımı ve UPV değerleri

Seri	Ort. Basınç Day. (MPa)	Ort. UPV (m/s)
K7	36.40	4145.33
K28	46.23	4553.50
T7	34.04	3928.00
T28	47.47	4419.50

Denklem 5.2 yardımı ile hesaplanan puzolanik aktivite indeksi değerleri (Şekil 6.1) incelendiğinde 7 günlük basınç dayanımının kontrol karışımına yaklaştığı, 28 günlük dayanımın ise % 102.68’lik indeks değeri ile kontrol karışımının üzerinde olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 6.1** Pomzanın 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksleri

UPV sonuçları baz alındığında ise yine 7 ve 28 günlük UPV değerlerinin kontrol karışımına yakın çıktığı fakat kontrol karışımın UPV değerinin altında olduğu görülmektedir. 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indekslerinin ASTM C 618 [157] standardının önerdiği en az %75 sınırının üzerinde olduğu görülmektedir. Her iki deney sonuçlarına göre kür süresi arttıkça puzolanik aktivite indeksinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. 28 gün sonunda öğütülmüş pomza kullanılan karışımların çimentolu karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı elde ettiği görülmüştür. Mineral katkılı çimentolar yüksek silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) içeriğine sahiptir. Bu malzemeler, suyun varlığında, kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) oluşturmak için Portland çimentosu reaksiyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ile reaksiyona girer. Bu jeller agregaları bağlar ve betona daha fazla mukavemet kazandırır [158]. Bu sebeple erken yaşlarda kontrol karışıma göre düşen dayanım ileriki yaşlarda yükselmeye başlamıştır.

## **6.2. Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hamur Numunelerin Deney Sonuçları**

### **6.2.1. Sabit Kür Koşullarında Hamur Numunelerin Deney Sonuçları**

Sabit kür koşullarında (48 saatlik  $65^\circ\text{C}$  etüv kürü) alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin en uygun malzeme miktarlarını tespit etmek için deneyler yapılmıştır. Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin priz süreleri, basınç dayanımları, yoğunlukları, porozite değerleri, toplam su emme değerleri ve mikro yapı değerlendirilmesi (SEM ve FTIR analizi) deneyler sonucunda elde edilmiş ve aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

#### **6.2.1.1. Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri**

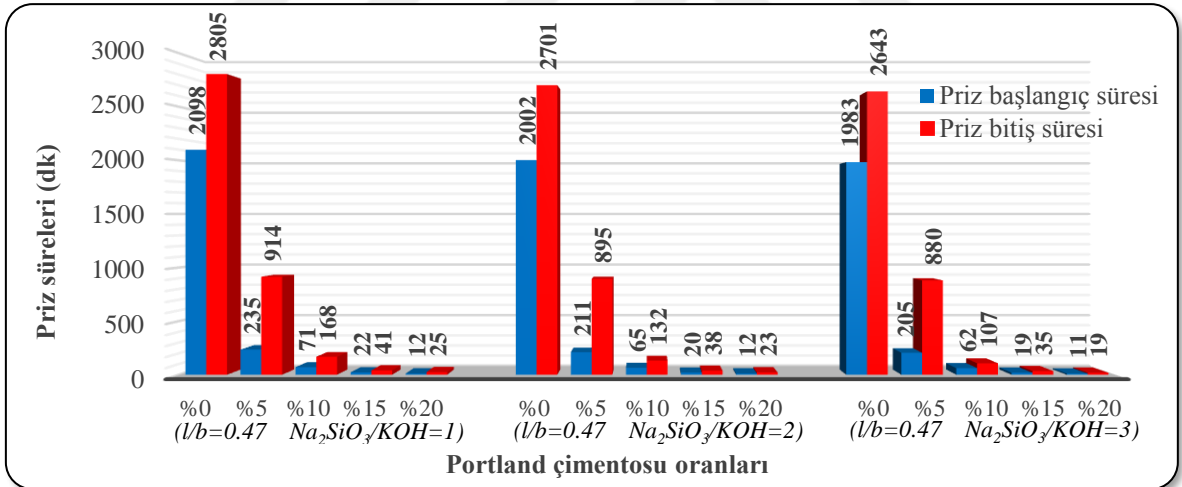
Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur karışımların priz başlangıç ve bitiş süreleri Vicat aleti kullanılarak ortam koşullarında tespit edilmiştir. Bağlayıcı malzemesi sadece pomza ve pomza + Portland çimentosu olan sodyum silikat ve potasyum hidroksit çözeltileri ile aktive edilen 45 farklı hamur serisinin priz başlangıç ve bitiş süreleri Tablo 6.2'de verilmiştir. Priz süreleri; karışımlardaki çimento miktarı, alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı üzerinden değerlendirilmiştir.

**Tablo 6.2** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamurların priz başlangıç ve bitiş süreleri

Seri	Priz Başlangıç Süresi (dk)	Priz Bitiş Süresi (dk)
P-47-1	2098	2805
P-47-2	2002	2701
P-47-3	1983	2643
P-50-1	2125	3064
P-50-2	2087	2902
P-50-3	2035	2801
P-53-1	2187	3261
P-53-2	2106	2973
P-53-3	2079	2911
H5-47-1	235	914
H5-47-2	211	895
H5-47-3	205	880
H5-50-1	248	922
H5-50-2	226	903
H5-50-3	211	889
H5-53-1	261	945
H5-53-2	235	944
H5-53-3	223	875
H10-47-1	71	168
H10-47-2	65	132
H10-47-3	62	107
H10-50-1	75	175
H10-50-2	68	141
H10-50-3	67	124
H10-53-1	82	185
H10-53-2	73	152
H10-53-3	71	133
H15-47-1	22	41
H15-47-2	20	38
H15-47-3	19	35
H15-50-1	25	46
H15-50-2	22	43
H15-50-3	21	41
H15-53-1	28	50
H15-53-2	26	45
H15-53-3	24	43
H20-47-1	12	25
H20-47-2	12	23
H20-47-3	11	19
H20-50-1	15	31
H20-50-2	13	27
H20-50-3	14	23
H20-53-1	17	34
H20-53-2	16	28
H20-53-3	15	25

### 6.2.1.1.1. Portland Çimentosu Miktarının Priz Sürelerine Etkisi

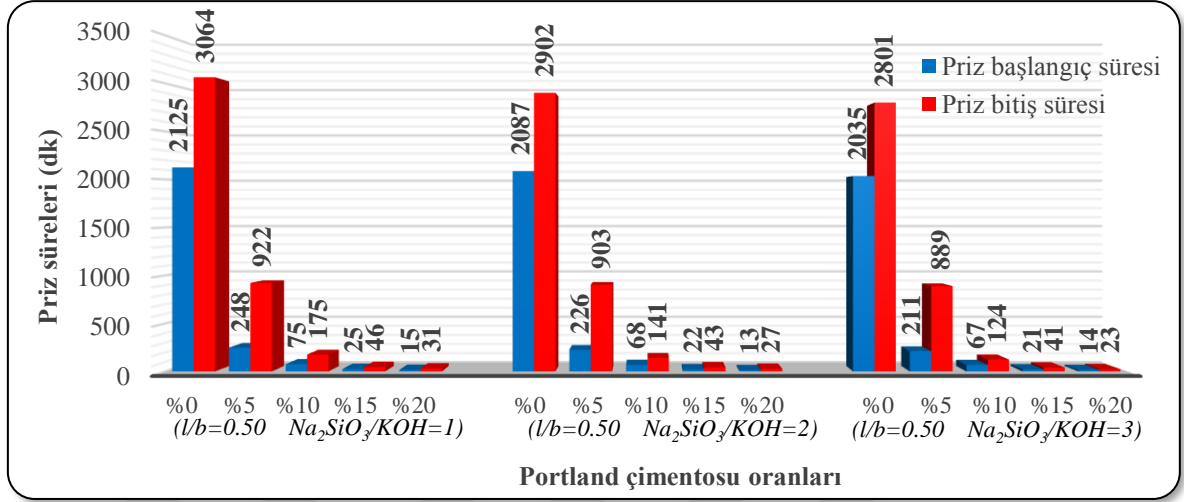
Portland çimentosu miktarının priz başlangıç ve bitiş sürelerine etkisi Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te verilmiştir. Şekil 6.2, alkali çözelti/bağlayıcı oranı (l/b) 0.47 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sırasıyla 1, 2 ve 3 olan karışımların her birinin içeriğindeki Portland çimentosu miktarına (%0, %5, %10, %15 ve %20) göre priz sürelerini göstermektedir. Şekil 6.2 incelendiğinde, priz başlangıç sürelerinin 11-2098 dakika arasında, priz bitiş sürelerinin ise 19-2805 dakika arasında değiştiği görülmektedir. En düşük priz süreleri (11-19 dk)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 3, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 ve Portland çimentosu içeriği %20 olan H20-47-3 serisinde elde edilmiştir. En yüksek priz süreleri (2098-2805 dk) ise  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 ve Portland çimentosu içeriği %0 olan P-47-1 serisinde elde edilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sabit olan serilerde Portland çimentosu içeriğinin %20'ye kadar artması priz sürelerini genel olarak %99 azaltmıştır.



Şekil 6.2 l/b=0.47 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}=1, 2$  ve  $3$  sabit oranlarında Portland çimentosu miktarının priz sürelerine etkisi

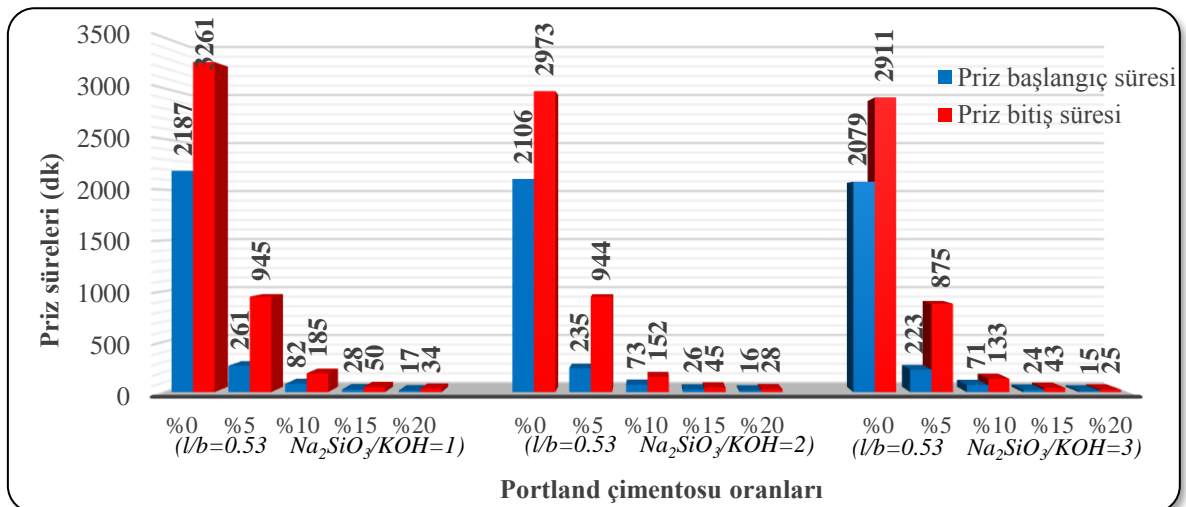
Şekil 6.3, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sırasıyla 1, 2 ve 3 olan serilerin her birinin Portland çimentosu içeriğine göre priz süresi değişimini vermektedir. Priz başlangıç süreleri 14-2125 dakika arasında değişmekteyken priz bitiş süreleri 23-3064 dakika arasında değişmektedir. En düşük priz başlangıç ve bitiş süreleri (14-23 dakika) H20-50-3 serisinde elde edilirken en yüksek priz başlangıç ve bitiş süresi (2125-3064 dakika) P-50-1 serisinde elde edilmiştir. Sabit alkali çözelti/bağlayıcı ile sabit

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranlarında Portland çimentosunun %20'ye kadar artması bütün serilerde priz sürelerini yaklaşık %99 azaltmıştır.



Şekil 6.3  $l/b=0.50$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}=1, 2$  ve  $3$  sabit oranlarında Portland çimentosu miktarının priz sürelerine etkisi

Şekil 6.4, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.53 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sırasıyla 1, 2 ve 3 olan serilerin her birinin Portland çimentosu içeriğine göre priz sürelerinin değişimini vermektedir. Priz başlangıç süreleri 15-2187 dakika arasında değişmekteyken priz bitiş süreleri 25-3261 dakika arasında değişmektedir. En düşük priz süreleri (15-25 dakika) H20-53-3 serisinde elde edilirken en yüksek priz süreleri (2187-3261) P-53-1 serisinde elde edilmiştir. Sabit alkali çözelti/bağlayıcı ile sabit  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranlarında Portland çimentosunun %20'ye kadar artması bütün serilerde priz sürelerini yaklaşık %99 azaltmıştır.



Şekil 6.4  $l/b=0.53$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}=1, 2$  ve  $3$  sabit oranlarında Portland çimentosu miktarının priz sürelerine etkisi

Elde edilen sonuçlar, alkalilerle aktive edilmiş malzeme içeriğindeki Portland çimentosu miktarının priz sürelerinin belirlenmesinde önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Alkalilerle aktive edilmiş malzeme üretmek için kaynak malzemeye Portland çimentosu eklenmesi priz sürelerini ciddi anlamda kısaltmıştır.

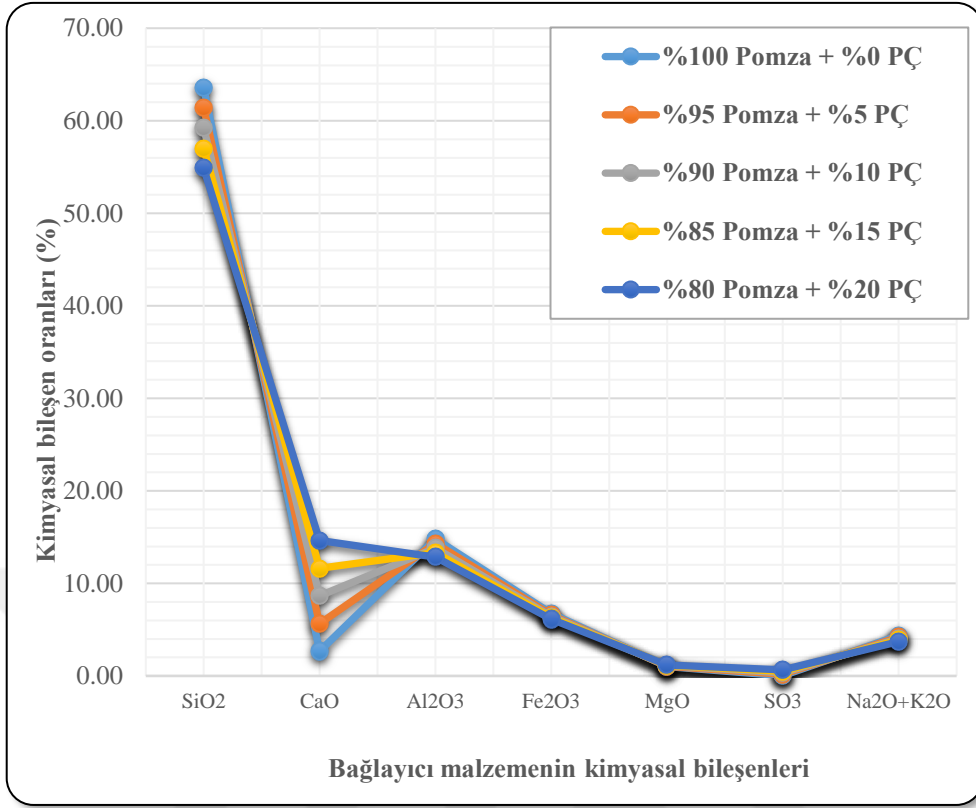
Tablo 6.3'te bağlayıcı malzeme içeriğine göre karışımdaki kimyasal bileşenlerin kümülatif toplamları verilmiştir. Portland çimentosu kullanılmayan sadece pomza içeriğine sahip bağlayıcının CaO oranı %2.66 iken, Portland çimentosu içeriği %20 olan bağlayıcının CaO oranı ise %14.64'tür.

**Tablo 6.3** Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşenleri

Bağlayıcı malzeme miktarları	SiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O (%)
%100 Pomza + %0 PÇ	63.57	2.66	14.81	6.75	1.02	0.02	4.36
%95 Pomza + %5 PÇ	61.39	5.66	14.32	6.60	1.06	0.18	4.20
%90 Pomza + %10 PÇ	59.22	8.65	13.82	6.44	1.10	0.34	4.03
%85 Pomza + %15 PÇ	57.04	11.65	13.33	6.29	1.14	0.50	3.87
%80 Pomza + %20 PÇ	54.86	14.64	12.83	6.13	1.18	0.66	3.71

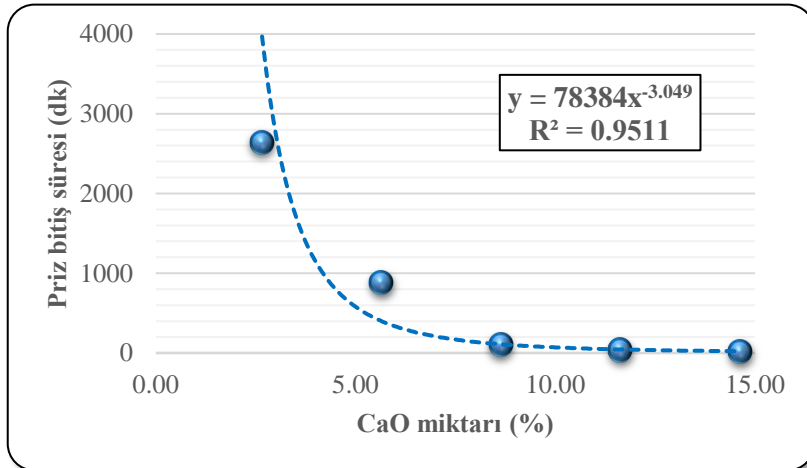
Wijaya vd. [23], uçucu küllü geopolimerlerin priz sürelerini inceledikleri çalışmalarında üretilen hamur numunelerin priz sürelerinin, uçucu kül içindeki CaO içeriğinden büyük ölçüde etkilendiğini belirtmiştir. Daha yüksek CaO içeriğinin priz sürelerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Şekil 6.5'teki grafiğe göre kaynak malzeme içerisindeki Portland çimentosu miktarı arttıkça CaO miktarı da artmaktadır. Bunun sebebi Portland çimentosunun pomzaya göre daha fazla CaO içeriğine sahip olmasıdır.



Şekil 6.5 Bağlayıcı malzemelerin içeriğine göre kimyasal bileşenlerinin miktarları

Şekil 6.6’da bağlayıcı malzemedeki CaO miktarı ile priz bitiş süresi arasındaki ilişki verilmiştir. Örnek olarak, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı 3 olan karışımların Portland çimentosu miktarı arttıkça priz bitiş süresinin azaldığı görülmektedir. Bağlayıcı içerisindeki CaO miktarı ile priz bitiş süresi arasında yaklaşık üssel bir ilişki vardır ( $R^2=0.9511$ ). Bu da CaO içeriğinin artmasıyla priz süresinin katlanarak azalacağını göstermektedir. Bu karışımın priz süresini  $y = 78384x^{-3.049}$  denklemi ile tahmin etmek mümkündür.

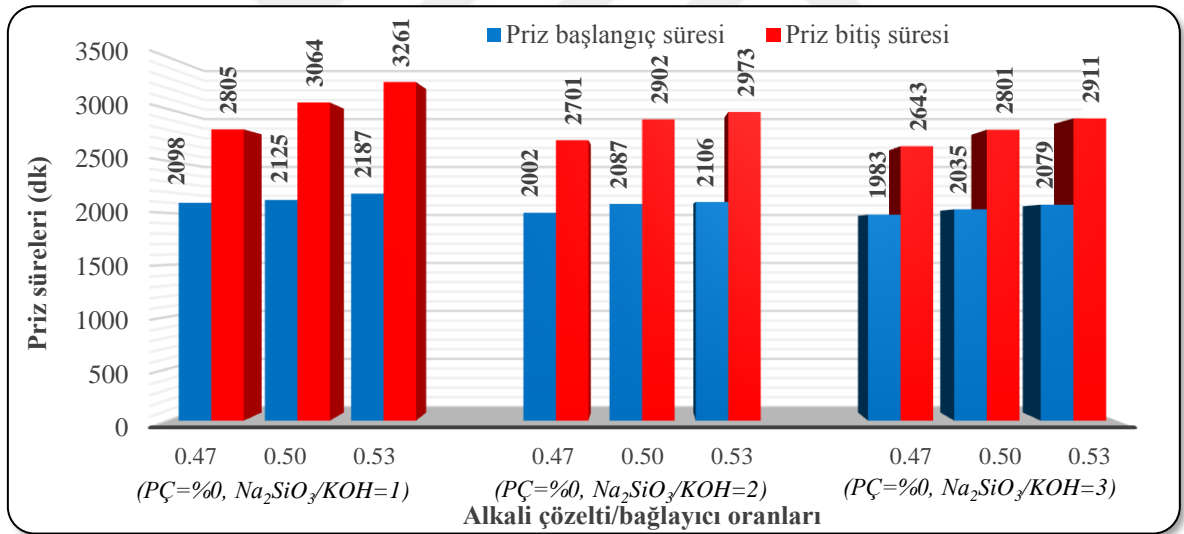


Şekil 6.6 CaO miktarı ile priz bitiş süresi arasındaki ilişki

Genel olarak 45 farklı seri içerisinde en düşük priz süreleri; %20 çimento ikameli,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 3 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47 olduğu H20-47-3 serisinde elde edilmiştir. Bu serinin sırasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri 11 ve 19 dakikadır. En yüksek priz süreleri ise; çimentosuz (%100 pomza içerikli),  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.53 olduğu P-53-1 serisinde elde edilmiştir. Bu serinin ise priz başlangıç ve bitiş süreleri 2187 ve 3261 dakikadır.

### 6.2.1.1.2. Alkali Çözelti/Bağlayıcı Oranının Priz Sürelerine Etkisi

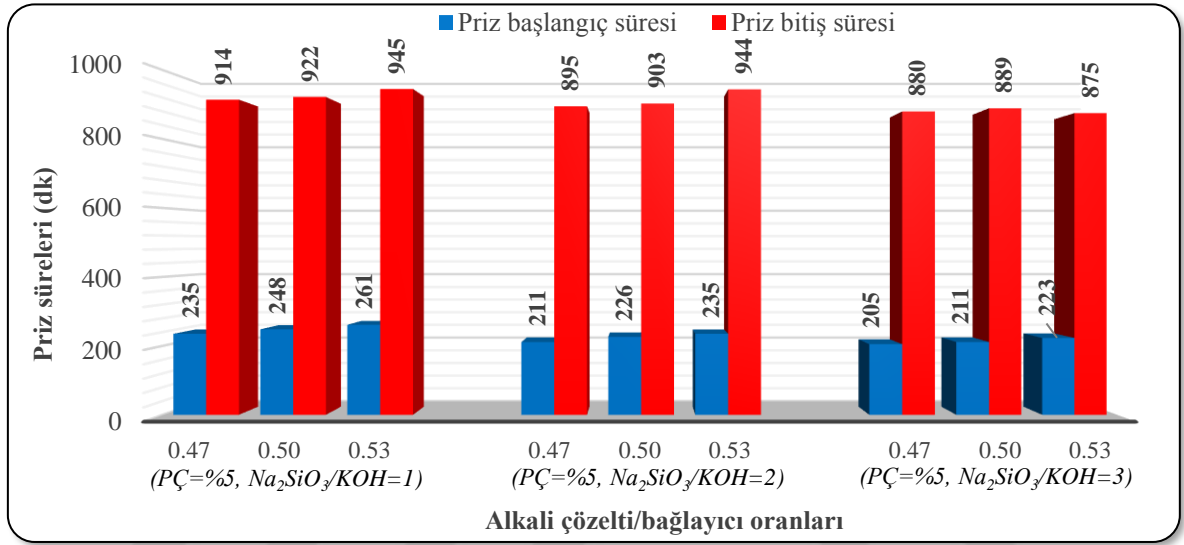
Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin priz sürelerini etkileyen faktörlerden biri de alkali çözelti/bağlayıcı oranıdır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranın 15 farklı karışım grubunun priz sürelerine etkisi Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.7 PC=%0 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}=1, 2,$  ve  $3$  sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi

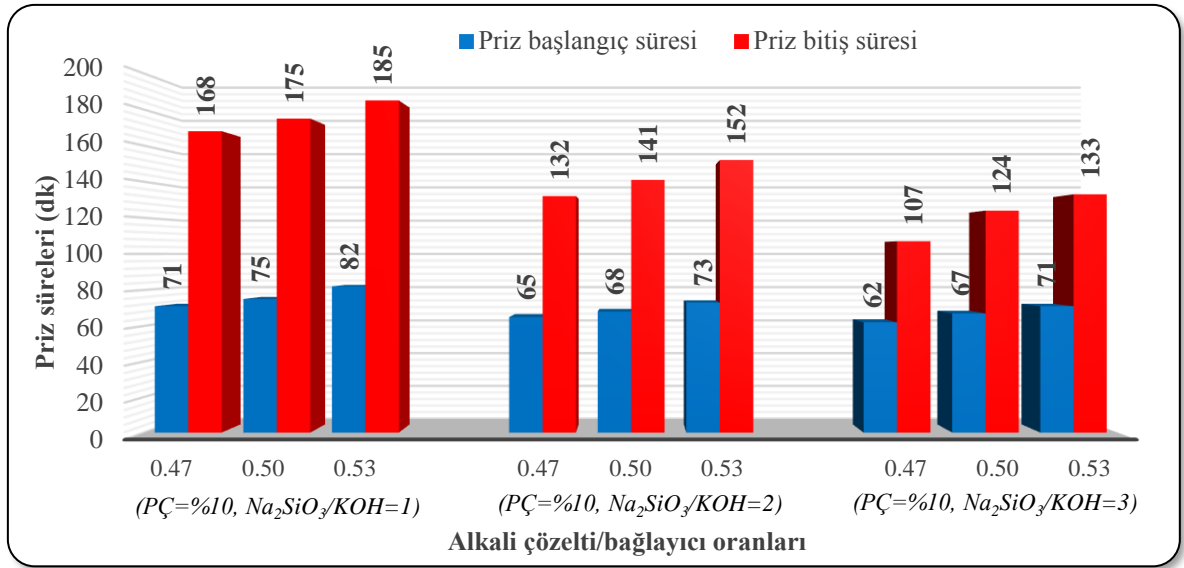
Şekil 6.7, içeriğinde Portland çimentosu bulunmayan ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sırasıyla 1, 2 ve 3 olan alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamurların priz sürelerindeki değişimi alkali çözelti/bağlayıcı oranı üzerinden vermektedir. Karışımların alkali çözelti/bağlayıcı oranları arttıkça priz sürelerinin de uzadığı tespit edilmiştir. En düşük priz başlangıç ve bitiş süreleri (1983-2643 dk) P-47-3 serisinde elde edilirken, en yüksek priz başlangıç ve bitiş süreleri (2187-3261 dk) P-53-1 serisinde elde edilmiştir. Portland çimentosu içermeyen ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1 olan serilerde alkali çözelti/bağlayıcı

oranının 0.47'den 0.53'e çıkması priz başlangıç ve bitiş sürelerini sırasıyla %4.2 ve %16.2 arttırmıştır. Portland çimentosu içermeyen ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 2 olan serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.53'e çıkması priz başlangıç ve bitiş sürelerini sırasıyla %5.2 ile %10.0 arttırmıştır. Portland çimentosu içermeyen ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 3 olan serilerde ise alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.53'e çıkması priz başlangıç ve bitiş sürelerini sırasıyla %4.8 ve %10.1 arttırmıştır.



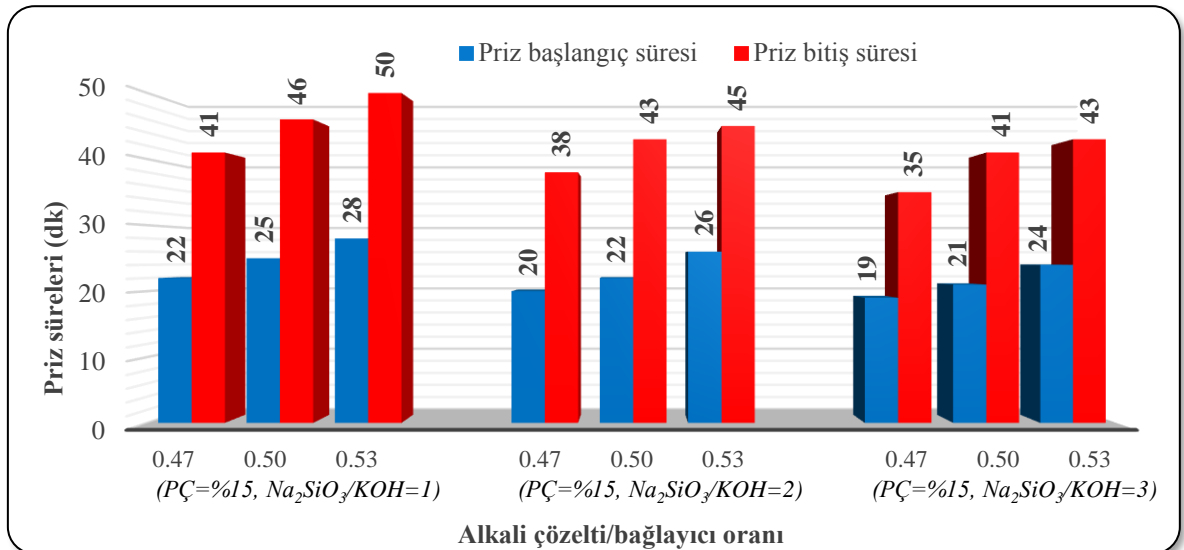
**Şekil 6.8**  $\text{PÇ}=\%5$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}=1, 2, \text{ ve } 3$  sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi

İçeriğinde %5 Portland çimentosu bulunan ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sırasıyla 1, 2 ve 3 olan karışımlarda alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi Şekil 6.8'de verilmiştir. Priz başlangıç süreleri 205-261 dakika arasında değişirken priz bitiş süreleri 875-945 dakika arasında değişmektedir. En düşük priz başlangıç süresi (205 dk) H5-47-3 serisinde elde edilirken en yüksek priz başlangıç süresi (261 dk) H5-53-1 serisinde elde edilmiştir. En düşük priz bitiş süresi (875 dk) H5-53-3 serisinde elde edilirken en yüksek priz bitiş süresi (945 dk) H5-53-1 serisinde elde edilmiştir. Şekil 6.8, alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.53'e çıkmasının priz başlangıç sürelerini yaklaşık %8.7 ile %11.37 arasında arttırdığını göstermektedir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı 1 ve 2 olan serilerde priz bitiş süreleri sırasıyla %3.39 ve %5.47 artmıştır. %5 Portland çimentosu içeriğine sahip ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 3 olan serinin alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.53'e çıkması priz bitiş süresini bir miktar azaltmıştır (%0.56).



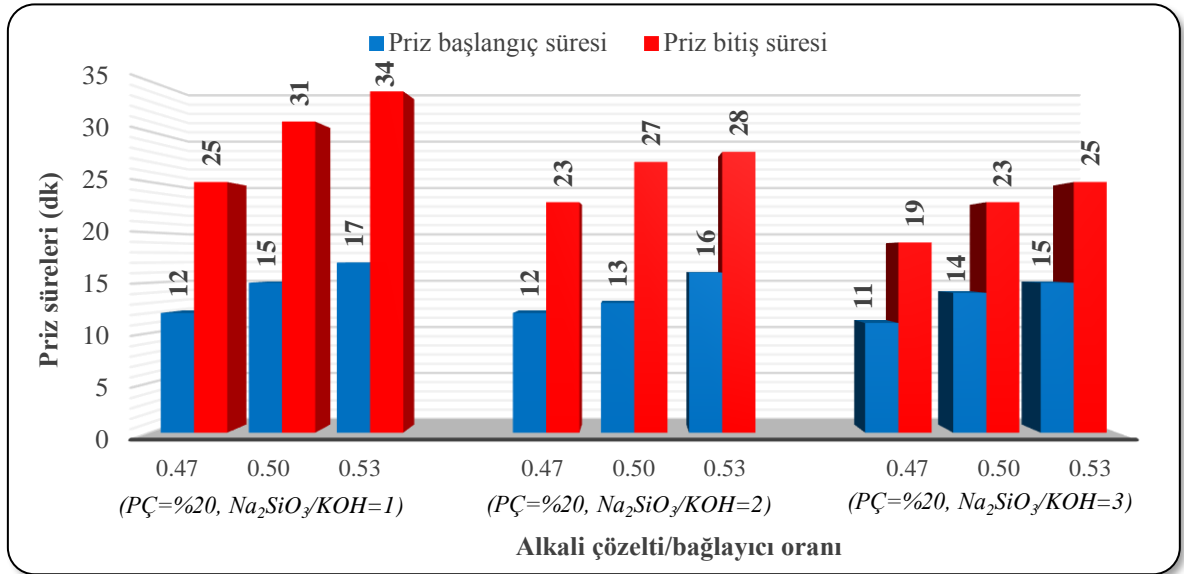
**Şekil 6.9** PC=%10 ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH=1, 2, ve 3 sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi

Şekil 6.9’da, Portland çimentosu içeriği %10 ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranı 1, 2 ve 3 olan karışımlarda alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi gösterilmektedir. En düşük priz başlangıç ve bitiş süreleri (62-107 dk) H10-47-3 serisinde elde edilirken en yüksek priz süreleri (82-185 dk) H10-53-1 serisinde elde edilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47’den 0.53’e çıkması priz başlangıç sürelerini %12.31 ile %15.49 arasında arttırırken priz bitiş sürelerini %10.11 ile %24.29 arasında arttırmıştır.



**Şekil 6.10** PC=%15 ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH=1, 2, ve 3 sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi

Portland çimentosu içeriği %15 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı 1, 2 ve 3 olan serilerin priz sürelerine alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi Şekil 6.10'da gösterilmiştir. En düşük priz başlangıç ve bitiş süreleri (19-35 dk) H15-47-3 serisinde elde edilirken, en yüksek priz süreleri (28-50 dk) H15-53-1 serisinde elde edilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.53'e artması priz başlangıç sürelerini %26.31 ile %30.00 arasında arttırırken priz bitiş sürelerini %18.42 ile %22.85 arasında arttırmaktadır.



Şekil 6.11  $\text{PC}=\%20$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}=1, 2, \text{ ve } 3$  sabit oranlarında alkali çözelti/bağlayıcı oranının priz sürelerine etkisi

Şekil 6.11'de, Portland çimentosu içeriği %20 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1, 2 ve 3 olan karışımlarda alkali çözelti/bağlayıcı oranındaki değişimin priz sürelerine etkisi görülmektedir. En düşük priz süreleri (11-19 dk) H20-47-3 serisinde elde edilirken, en yüksek priz süreleri (17-34 dk) H20-53-1 serisinde elde edilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.53'e çıkması priz başlangıç sürelerini %21.74 ile %36.00 arasında arttırırken priz bitiş sürelerini %33.33 ile %41.66 arasında arttırmıştır.

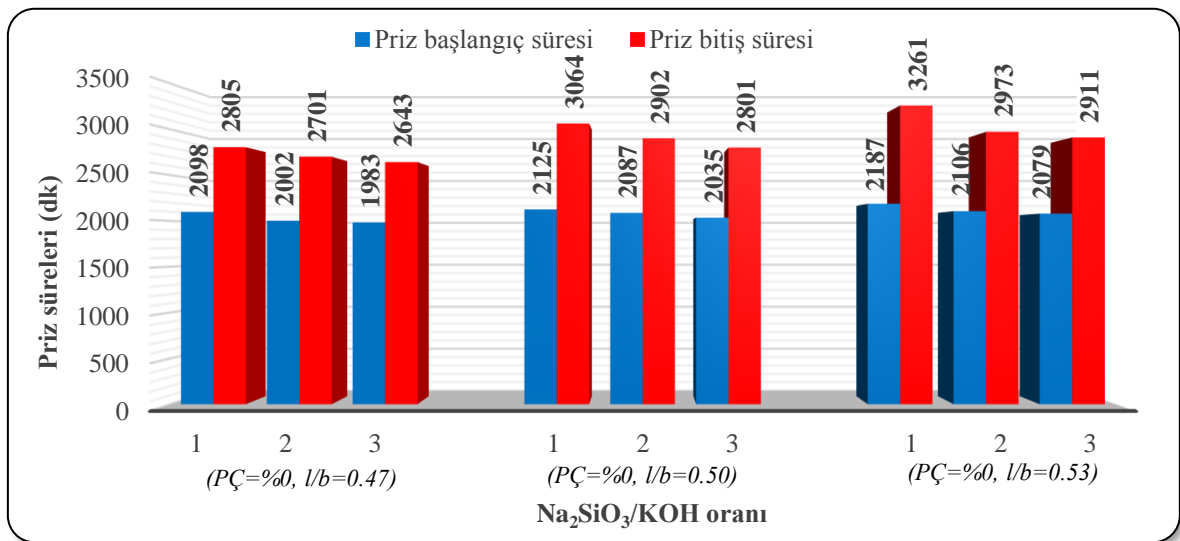
Grafikler incelendiğinde alkali çözelti/bağlayıcı miktarı arttıkça priz sürelerinin de arttığı tespit edilmiştir. Priz sürelerindeki en fazla artış Portland çimentosu içeriği %20 olan serilerde elde edilmiştir. En düşük artış ise Portland çimentosu kullanılmayan karışımlarda elde edilmiştir.

Karışımların alkali çözelti/bağlayıcı oranı arttıkça karışıma ilave edilen su oranı da artmış olacaktır. Su, geopolimerizasyonda rol almakta ve alüminosilikat yapıların çözünmesini sağlamaktadır. Düşük oranlardaki su/katı miktarı kaynak malzemenin

çözünmesinde yeterli olmayabilir ve bu da karışımın hızlı bir şekilde priz almasına neden olur. Su/katı oranının artması ile kaynak malzemenin çözünmesi daha yüksek su içeriği nedeniyle devam eder ve bu da karışımın yavaş bir şekilde sertleşmesine yol açar [142].

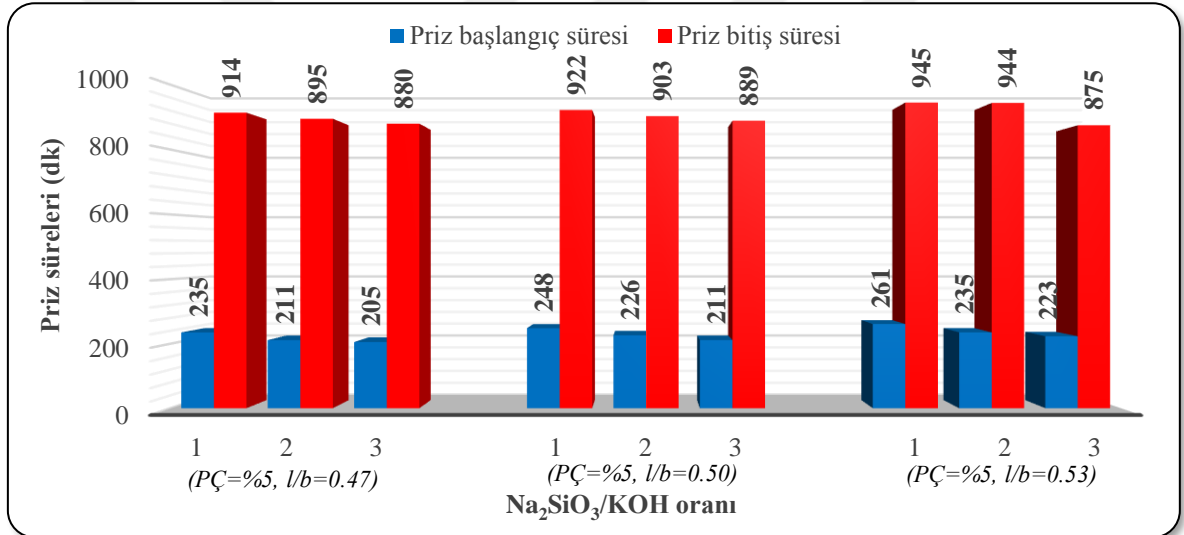
### 6.2.1.1.3. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH Oranının Priz Sürelerine Etkisi

Karışımlardaki Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının priz başlangıç ve bitiş sürelerine etkisi Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmiştir. Şekil 6.12, içeriğinde Portland Çimentosu bulunmayan ve alkali çözelti/bağlayıcı (l/b) oranı 0.47, 0.50 ve 0.53 olan alkalilerle aktive edilmiş karışımların priz sürelerinin Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranı ile değişimini göstermektedir. En yüksek priz başlangıç ve bitiş süresi (2187-3261 dk) P-53-1 serisinde elde edilirken, en düşük priz süreleri (1983-2643) ise P-47-3 serisinde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeriği ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranı sabit iken Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının artması priz sürelerini düşürmektedir. Portland çimentosu içermeyen ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan karışımlarda Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının 1'den 3'e çıkması, priz başlangıç ve bitiş sürelerini sırasıyla %5.48 ve %5.77 azaltmıştır. Portland çimentosu içermeyen ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımlarda Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının 1'den 3'e çıkması priz başlangıç ve bitiş sürelerini sırasıyla %4.23 ve %8.58 azaltmıştır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.53 olan karışımlarda ise Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının artması priz başlangıç ve bitiş sürelerini %4.93 ve %10.73 azaltmıştır.



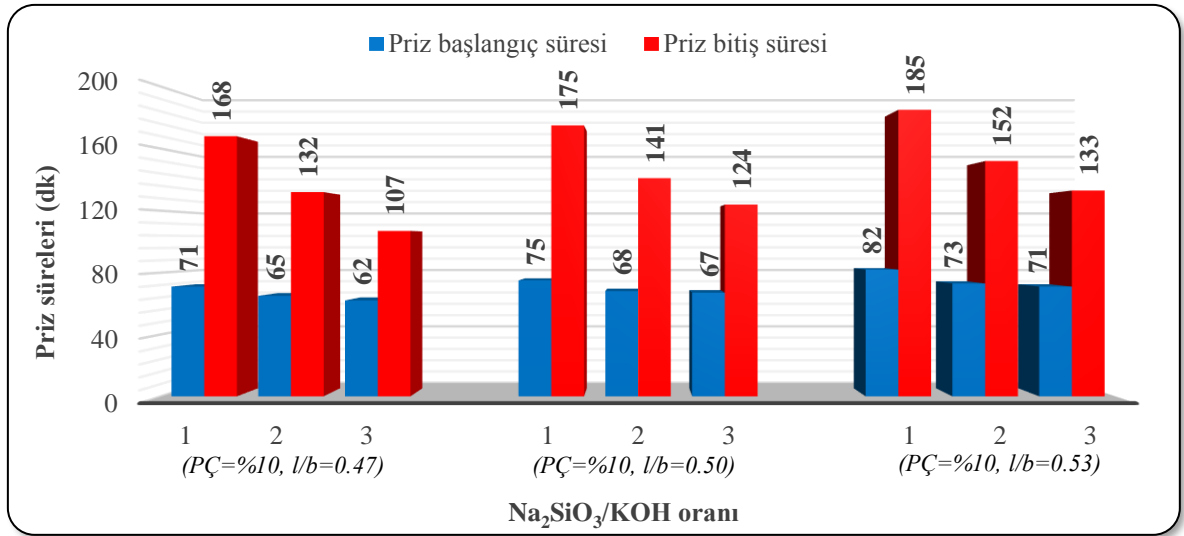
Şekil 6.12 PÇ=%0 ve l/b=0.47, 0.50 ve 0.53 sabit oranlarında Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının priz sürelerine etkisi

Şekil 6.13, Portland çimentosu içeriği %5 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı sırasıyla 0.47, 0.50 ve 0.53 olan karışımlardaki  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının priz sürelerine etkisini göstermektedir. Priz başlangıç süreleri 205 ile 261 dakika arasında değişirken priz bitiş süreleri 875 ile 945 dakika arasında değişmektedir. En uzun priz bitiş süresi (945 dk) H5-53-1 serisinde elde edilirken en düşük priz bitiş süresi H5-53-3 (875 dk) serisinde elde edilmiştir. En uzun priz başlangıç süresi (261 dk) yine H5-53-1 serisinde elde edilirken en düşük priz başlangıç süresi (205 dk) H5-47-3 serisinde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeriği %5 olan bu serilerde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 3'e çıkması priz başlangıç sürelerini %12.76 ile %14.56 aralığında düşürmüştür. Priz bitiş sürelerini ise %3.58 ile %7.41 aralığında azaltmıştır.



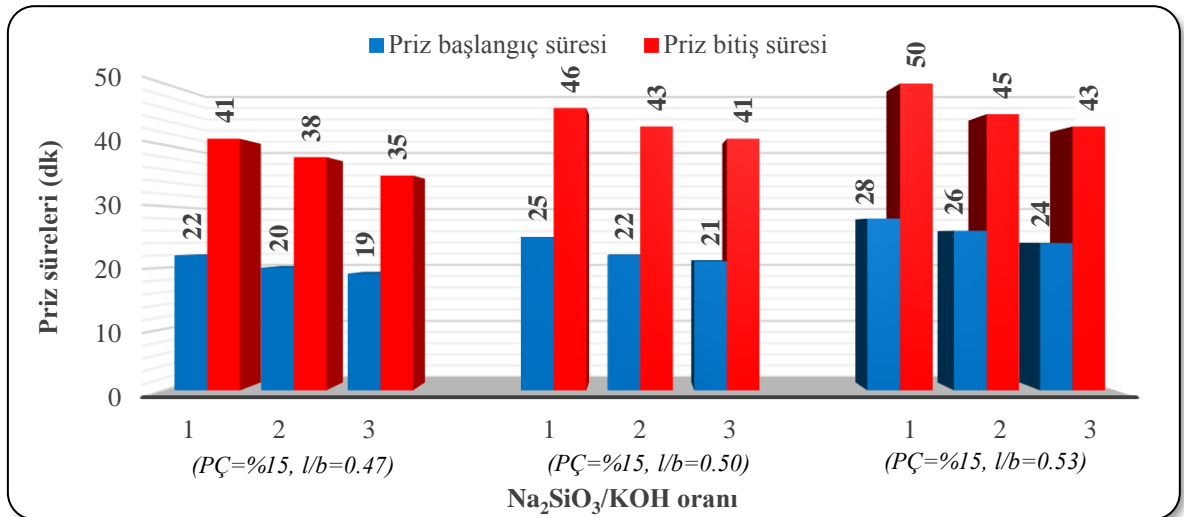
Şekil 6.13 PÇ=%5 ve l/b=0.47, 0.50 ve 0.53 sabit oranlarında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının priz sürelerine etkisi

Şekil 6.14, Portland çimentosu içeriği %10 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı sırasıyla 0.47, 0.50 ve 0.53 olan karışımların priz sürelerinin değişimini  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı üzerinden vermektedir. En düşük priz başlangıç ve bitiş süreleri (62-107 dk) H10-47-3 serisinde elde edilirken, en yüksek priz süreleri (82-185 dk) H10-53-1 serisinde elde edilmiştir. Bu serilerde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 3'e çıkması priz başlangıç sürelerini %10.66 ile %13.41 aralığında azaltmıştır. Priz bitiş sürelerini ise %28.11 ile %36.31 aralığında azaltmıştır.



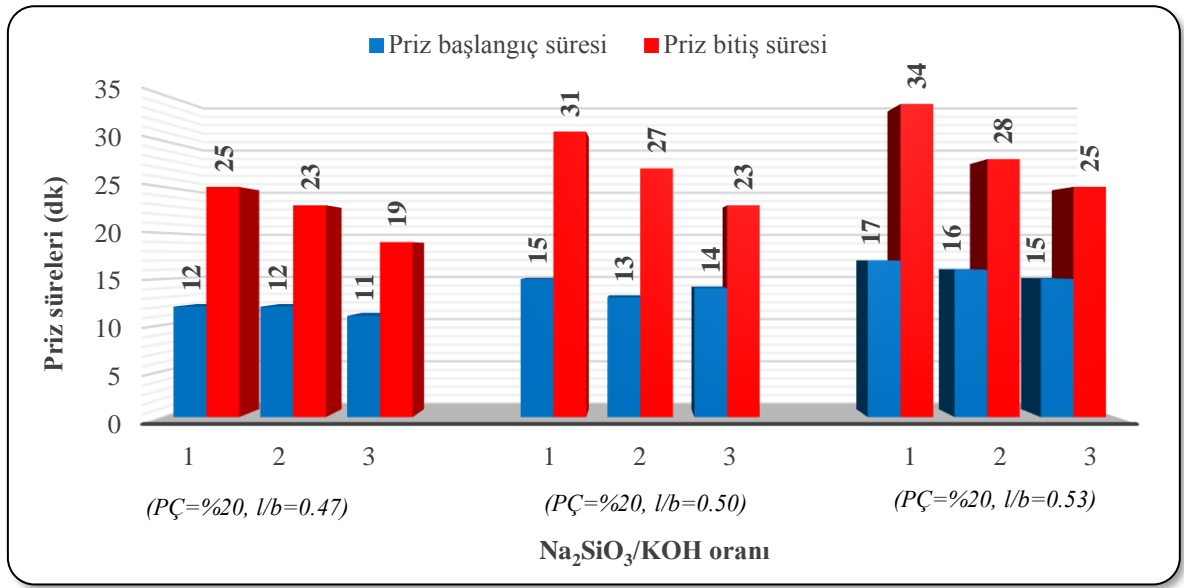
Şekil 6.14 PÇ=%10 ve l/b=0.47, 0.50 ve 0.53 sabit oranlarında Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının priz sürelerine etkisi

Portland çimentosu içeriği %15 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı sırasıyla 0.47, 0.50 ve 0.53 olan karışımların priz sürelerine Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının etkisi Şekil 6.15'te verilmiştir. En düşük priz süreleri (19-35 dk) H15-47-3 serisinde elde edilirken en yüksek priz süreleri (28-50 dk) H15-53-1 serisinde elde edilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının 1'den 3'e çıkması priz başlangıç sürelerini %13.64 ile %16.00 aralığında düşürmüştür. Priz bitiş sürelerini ise %10.87 ile %14.63 aralığında azaltmıştır.



Şekil 6.15 PÇ=%15 ve l/b=0.47, 0.50 ve 0.53 sabit oranlarında Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının priz sürelerine etkisi

Şekil 6.16, Portland çimentosu içeriği %20 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı sırasıyla 0.47, 0.50 ve 0.53 olan karışımların  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının priz sürelerine etkisini vermektedir. En düşük priz başlangıç ve bitiş süresi (11-19 dk) H20-47-3 serisinde elde edilirken, en yüksek priz başlangıç ve bitiş süreleri (17-34 dk) ise H20-53-1 serisinde elde edilmiştir. Bu serilerde,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 3'e çıkması priz başlangıç sürelerini %8.33 ile %13.33 aralığında azaltırken priz bitiş sürelerini %24.00 ile %26.47 aralığında azaltmıştır.



Şekil 6.16 PÇ=%20 ve l/b=0.47, 0.50 ve 0.53 sabit oranlarında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının priz sürelerine etkisi

Grafikler incelendiğinde,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının artması priz sürelerinin düşmesine neden olmuştur. Bu düşüşler yaklaşık olarak %3 ile %36 aralığındadır. Lee [125], uçucu kül ve cürufu alkalilerle aktive ettiği çalışmasında, alkali çözelti içerisindeki sodyum silikat miktarının artmasının priz sürelerini düşürdüğünü tespit etmiştir.

Alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin priz süreleri karışımın Portland çimentosu içeriği, alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı üzerinden incelenmiştir. Priz sürelerine üç parametre de etki etmektedir. Portland çimentosu içeriği ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının artması priz sürelerini düşürürken artan alkali çözelti/bağlayıcı oranı ise priz sürelerini yükseltmiştir. Fakat priz sürelerine en fazla etkiyi Portland çimentosu içeriği yapmıştır.

### 6.2.1.2. UPV ve Basınç Dayanımı

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin 28 günlük UPV ve basınç dayanımı değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir. Numuneler 60°C etüv sıcaklığında 48 saat bekletildikten sonra deney gününe kadar ortam koşullarında saklanmıştır. Önce UPV değerleri ölçülen numuneler daha sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.

**Tablo 6.4** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin UPV ve basınç dayanımı değerleri

Seri	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (Mpa)
P-47-1	2512	18.36
P-47-2	2516	22.36
P-47-3	2717	24.80
P-50-1	2283	13.04
P-50-2	2336	14.04
P-50-3	2646	20.64
P-53-1	2392	14.91
P-53-2	2392	14.48
P-53-3	2646	19.32
H5-47-1	2975	35.56
H5-47-2	3145	43.28
H5-47-3	3215	45.84
H5-50-1	2955	33.80
H5-50-2	3145	35.24
H5-50-3	3145	36.08
H5-53-1	3049	29.48
H5-53-2	3145	32.52
H5-53-3	3145	35.56
H10-47-1	3145	38.00
H10-47-2	3049	40.92
H10-47-3	3247	47.28
H10-50-1	3049	37.76
H10-50-2	3145	38.28
H10-50-3	3247	40.00
H10-53-1	2955	31.52
H10-53-2	3145	37.36
H10-53-3	3145	38.12
H15-47-1	3145	40.00
H15-47-2	3215	43.52
H15-47-3	3247	46.68
H15-50-1	2959	30.56
H15-50-2	3049	33.52
H15-50-3	3145	38.20
H15-53-1	2815	25.56
H15-53-2	2955	29.40
H15-53-3	3145	40.40

**Tablo 6.4** (devam)

H20-47-1	2874	30.64
H20-47-2	3145	45.64
H20-47-3	3323	53.36
H20-50-1	2793	34.32
H20-50-2	2973	34.72
H20-50-3	3215	44.12
H20-53-1	2793	26.00
H20-53-2	2959	27.00
H20-53-3	3049	38.80

Basınç dayanımı testinden sonra küp hamur numunenin kırılmış hali Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekildeki kırılma biçimi, TS EN 12390-3 [152] standardına göre tatmin edici beton küp numune kırılma şekline uymaktadır.

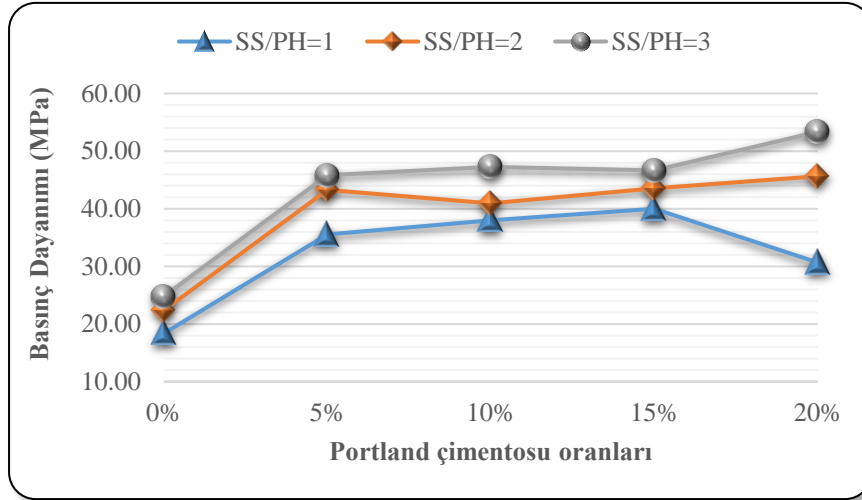


**Şekil 6.17** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren küp hamur numunenin kırılma biçimi

Aşağıda başlıklar altında basınç dayanımına etki eden faktörler açıklanmıştır. Portland çimentosu miktarı, alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının basınç dayanımına etkisi grafikler üzerinden anlatılmıştır.

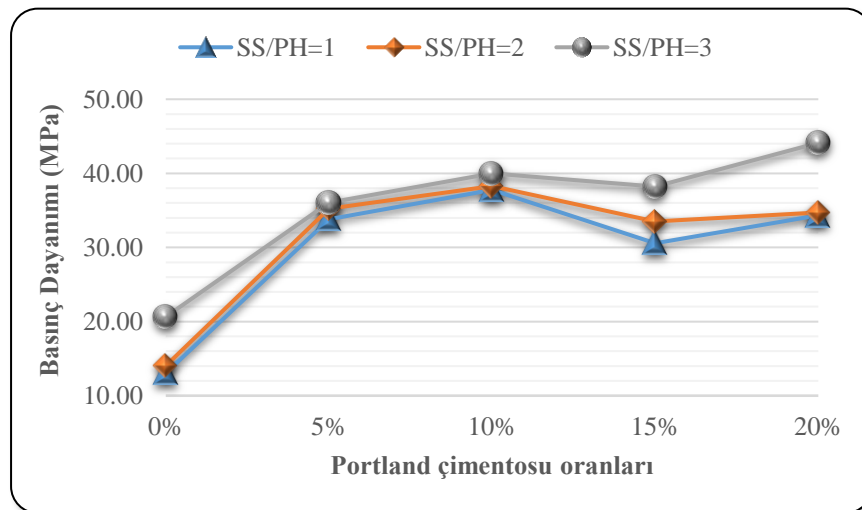
#### **6.2.1.2.1. Portland Çimentosu Miktarının Basınç Dayanımına Etkisi**

Portland çimentosu ilavesinin alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin basınç dayanımına etkisi aşağıda Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de verilmiştir.



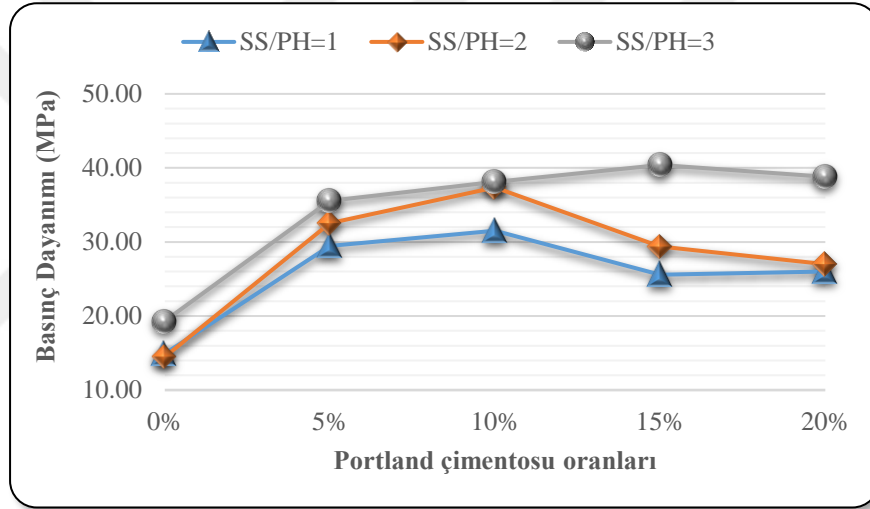
**Şekil 6.18** Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan karışımların Portland çimentosu miktarına göre basınç dayanımı değişikliği

Şekil 6.18, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  (SS/PH) oranının 1, 2 ve 3 olduğu farklı durumlar için Portland çimentosu miktarının artışının basınç dayanımına etkisini göstermektedir. Şekildeki grafik incelendiğinde, bahsedilen sabitler altında, Portland çimentosu miktarının artması basınç dayanımlarını genel olarak arttırmıştır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 3 olan numunelerde, Portland çimentosu miktarının %0'dan %20'ye çıkması basınç dayanımını %115.16 arttırmıştır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 2 olduğu numunelerde bu artış %104.11 iken  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1 olan numunelerde %66.88'dir. En düşük basınç dayanımı değeri (18.36 MPa) Portland çimentosu içermeyen P-47-1 serisinde elde edilirken en yüksek basınç dayanımı değeri (53.36 MPa) %20 Portland çimentosu içeriğine sahip H20-47-3 serisinde elde edilmiştir.



**Şekil 6.19** Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımların Portland çimentosu miktarına göre basınç dayanımı değişikliği

Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranları 1, 2 ve 3 olan serilerde Portland çimentosu miktarındaki artışın basınç dayanımına etkisi Şekil 6.19'da verilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının üç farklı değerinde de Portland çimentosu miktarının %10'dan %15 artması basınç dayanımlarını bir miktar düşürmüştü fakat %20'ye çıkınca tekrar yükseltmiştir. En düşük basınç dayanımı (13.04 MPa) Portland çimentosu içermeyen P-50-1 serisinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı (44.12 MPa) H20-50-3 serisinde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeriğinin %0'dan %20'ye çıkması basınç dayanımlarını %113.76 ile %163.19 aralığında arttırmıştır. En fazla artış  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1 olduğu serilerde gerçekleşmiştir.



Şekil 6.20 Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.53 olan karışımların Portland çimentosu miktarına göre basınç dayanımı değişikliği

Şekil 6.20'de, alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.53 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının sırasıyla 1, 2 ve 3 olduğu serilerin her birinde Portland çimentosu miktarındaki artışın basınç dayanımına etkisi verilmektedir. Portland çimentosu miktarının %10'a kadar çıkması her üç serinin de basınç dayanımının artmasına sebep olmuştur. Fakat %10'dan %15'e ve %15'ten %20'ye çıkınca  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1 ve 2 olduğu durumlarda basınç dayanımları bir miktar azalmıştır. En düşük basınç dayanımı 14.48 MPa'lık değeri ile P-53-2 serisinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı 40.40 MPa değeri ile H15-53-3 serisinde elde edilmiştir. Portland çimentosu miktarının %0'dan %20'ye çıkması basınç dayanımlarını %74.38 ile %100.83 aralığında arttırmıştır. En fazla artış  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 3 olan serilerde elde edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, Portland çimentosu miktarındaki artışın alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin basınç dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir. Portland çimentosu miktarının %0'dan %20'ye çıkması farklı serilerde basınç dayanımlarını %66.88 ile %163.19 aralığında arttırmıştır. Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20 incelendiği zaman, bütün serilerde %5 Portland çimentosu ilavesinin basınç dayanımı artışını diğer oranlara göre daha fazla hızlandırdığı tespit edilmiştir. Bütün seriler incelendiğinde %5 Portland çimentosu ilavesi ile elde edilen en düşük basınç dayanımı yaklaşık 30 MPa seviyelerindedir. Ayrıca %20 Portland çimentosu ilavesinin priz sürelerini yaklaşık %99 azaltması işlenebilirliği kullanım amacına göre zorlaştırabilir. Böylelikle, işlenebilirliğin ön planda olduğu durumlarda düşük Portland çimentolu malzemeler dayanımın daha önemli olduğu noktalarda ise daha yüksek (%20'ye kadar) Portland çimentolu malzemeler kullanılmalıdır.

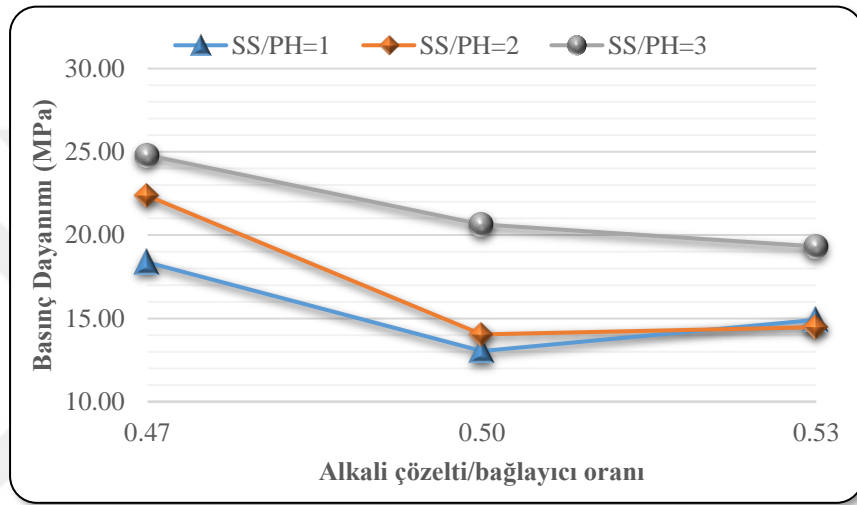
Rivera vd. [84], hem uçucu kül hem de kazan cürufu ile ürettikleri geopolimerlerde Portland çimentosu ilavesinin basınç dayanımları arttırdığını belirtmiştir. Çalışmada kullanılan her iki kaynak malzemenin de CaO oranı düşük seviyededir (~ %0.76). Uçucu küle yaklaşık %30 oranında Portland çimentosu ilavesinin basınç dayanımını yaklaşık üç kat arttırdığı tespit edilmiştir. Yazarlar bu durumu, kalsiyum kaynağı olan Portland çimentosu ilavesinin malzemenin sertleşmesini ve dayanım kazanmasını hızlandırdığı şeklinde açıklamıştır. Palomo vd. [112], çimento harmanının yüksek kalsiyum içeriğine sahip olmasından ötürü C-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluştuğunu ve bu jellerin esas olarak betonun mukavemet kazanmasındaki önemli yapılar olduğunu belirtmiştir. Böylelikle alkalilerle aktive edilen hibrit sistemlerin iyi bir erken dayanıma sahip olduğunu vurgulamışlardır.

#### **6.2.1.2.2. Alkali Çözelti/Bağlayıcı Oranının Basınç Dayanımına Etkisi**

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23, Şekil 6.24 ve Şekil 6.25'teki grafiklerde verilmiştir.

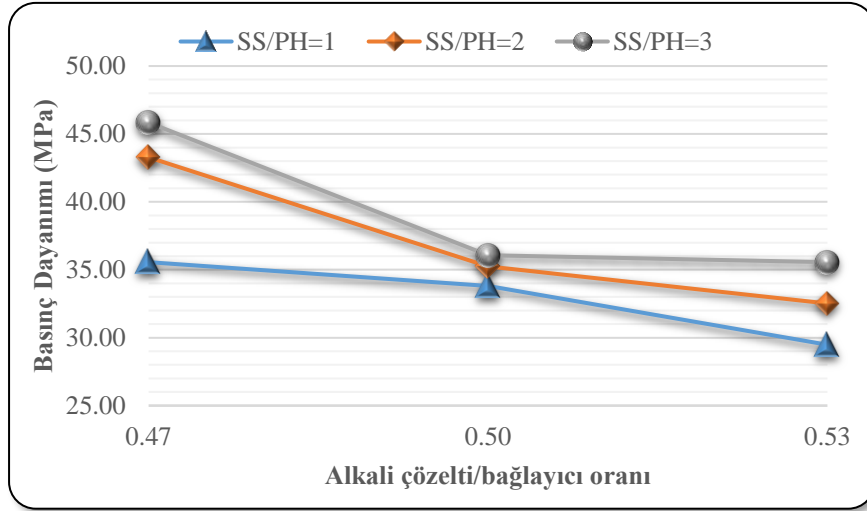
Şekil 6.21, Portland çimentosu miktarı %0 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1, 2 ve 3 olan serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranının basınç dayanımına etkisi verilmiştir. Bütün karışımlar üç farklı alkali çözelti/bağlayıcı oranı (0.47, 0.50 ve 0.53) ile hazırlanmıştır. Grafik incelendiğinde, alkali çözelti miktarının 0.47'den 0.53'e çıkması ile basınç

dayanımlarının azaldığı görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1 ve 2 olduğu karışımlarda alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.50'den 0.53'e çıkması basınç dayanımlarını bir miktar arttırırken her iki orandaki basınç dayanımı 0.47 oranındaki basınç dayanımından düşük kalmıştır. En yüksek basınç dayanımı (24.80 MPa) P-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (13.04 MPa) P-50-1 serisinde elde edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1, 2 ve 3 olduğu durumlarda basınç dayanımlarındaki düşüşler sırasıyla %18.79, %35.24 ve %22.10 olarak gerçekleşmiştir.



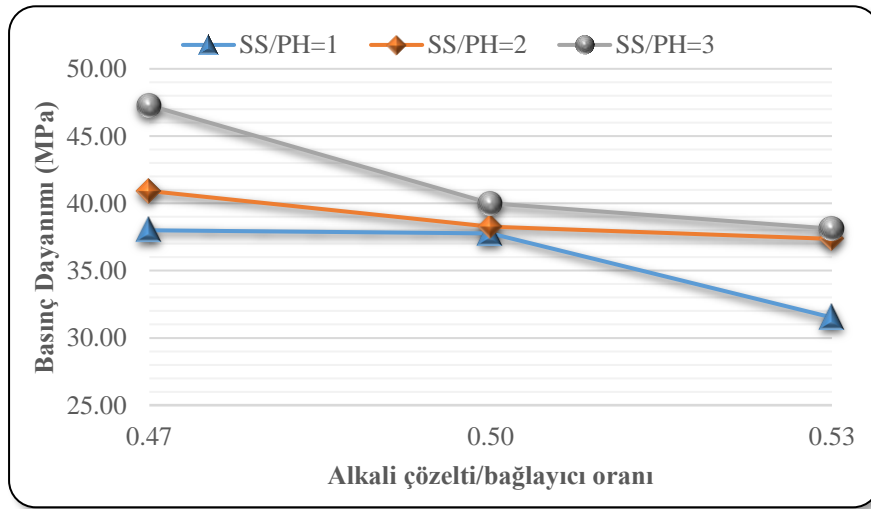
Şekil 6.21 Portland çimentosu miktarı %0 olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi

Şekil 6.22, Portland çimentosu miktarı %5 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1, 2 ve 3 olan serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranının basınç dayanımına etkisi verilmiştir. Bütün serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımları düşmüştür. En yüksek basınç dayanımı (45.84 MPa) H5-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (29.48 MPa) H5-53-1 serisinde elde edilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.53'e çıkması basınç dayanımlarını;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1 olan serilerde %17.10,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 2 olduğu serilerde %24.86 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 3 olduğu serilerde %22.43 azaltmıştır.



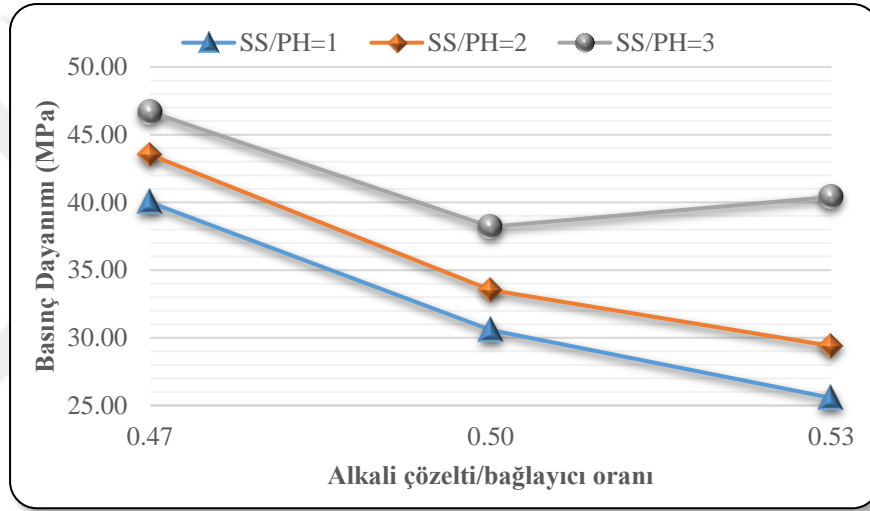
**Şekil 6.22** Portland çimentosu miktarı %5 olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi

Şekil 6.23'teki grafik, Portland çimentosu içeriği %10 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1, 2 ve 3 olduğu her durum için alkali çözelti/bağlayıcı oranının basınç dayanımlarına etkisini vermektedir. Bütün serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımları düşmüştür. En yüksek basınç dayanımı (47.28 MPa) H10-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (31.52 MPa) H10-53-1 serisinde elde edilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47'den 0.53'e çıktığı zaman,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1, 2 ve 3 olduğu durumlarda basınç dayanımlarındaki düşüşler sırasıyla %17.05, %8.70 ve %38.12 olarak gerçekleşmiştir.



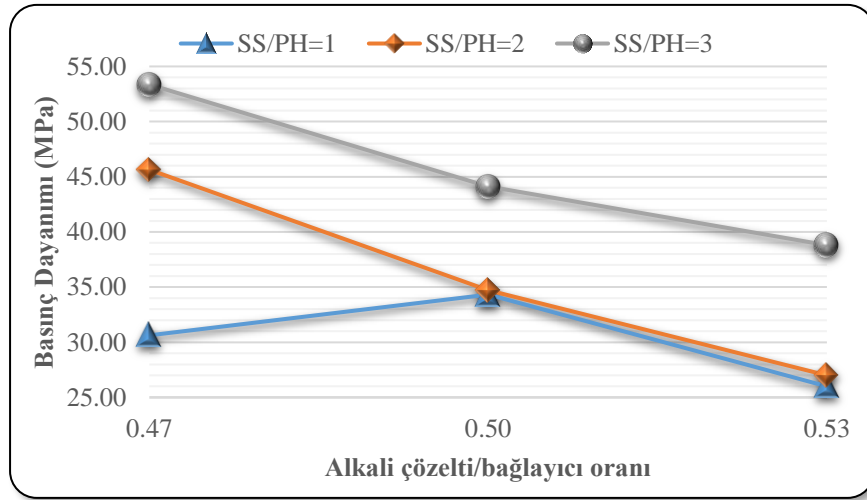
**Şekil 6.23** Portland çimentosu miktarı %10 olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi

Şekil 6.24'teki grafik, Portland çimentosu içeriği %15 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1, 2 ve 3 olduğu her durum için alkali çözelti/bağlayıcı oranının basınç dayanımlarına etkisini vermektedir. Genel olarak alkali çözelti/bağlayıcı oranındaki artış basınç dayanımlarını düşürürken  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 3 olduğu serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.50'den 0.53'e çıkması basınç dayanımını bir miktar arttırmıştır. En yüksek basınç dayanımı (46.68 MPa) H15-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (25.56 MPa) H15-53-1 serisinde elde edilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47'den 0.53'e çıktığı zaman,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1, 2 ve 3 olduğu durumlarda basınç dayanımlarındaki düşüşler sırasıyla %36.10, %32.44 ve %13.45 olarak gerçekleşmiştir.



**Şekil 6.24** Portland çimentosu miktarı %15 olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi

Şekil 6.25, Portland çimentosu miktarı %20 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1, 2 ve 3 olan serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranının basınç dayanımına etkisi verilmiştir. Grafik incelendiğinde, alkali çözelti miktarının 0.47'den 0.53'e çıkması ile basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1 olduğu serilerde alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.47'den 0.50'ye çıkması basınç dayanımlarını bir miktar arttırmıştır. En yüksek basınç dayanımı (53.36 MPa) H20-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (26.00 MPa) H20-53-1 serisinde elde edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1, 2 ve 3 olduğu durumlarda basınç dayanımlarındaki düşüşler sırasıyla %15.14, %40.84 ve %27.29 olarak gerçekleşmiştir.



**Şekil 6.25** Portland çimentosu miktarı %20 olan karışımların basınç dayanımına alkali çözelti/bağlayıcı oranının etkisi

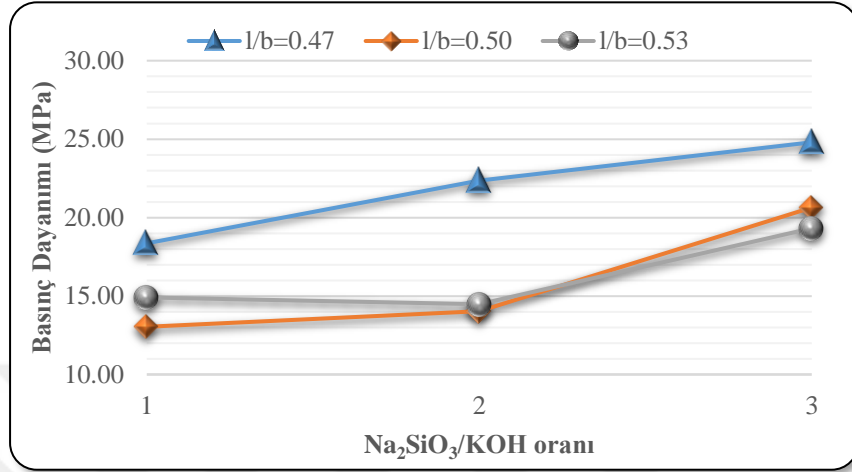
Yukarıdaki grafikler, alkali çözelti/bağlayıcı oranının artması ile basınç dayanımlarının düştüğünü göstermektedir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı serilerin basınç dayanımlarını %8.70 ile %40.84 aralığında değiştirmiştir. Bakharev [159] ve Kong [160], alkali çözelti/bağlayıcı oranı ile sertleşmiş geopolimer gözenekliliği arasında bir ilişki olduğunu ve artan gözenekliliğin sertleşmiş geopolimerlerin mukavemetini düşürdüğünü belirtmiştir. Betondaki boşluklar su veya hava ile dolmaktadır. Kong ve Sanjayan [161], sıvı/katı oranının geopolimerlerde boşluk hacmini etkilediği için dolaylı olarak geopolimerlerin dayanımını da etkilediğini vurgulamıştır.

### 6.2.1.2.3. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ Oranının Basınç Dayanımına Etkisi

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranın alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin basınç dayanımlarına etkisi Şekil 6.26, Şekil 6.27, Şekil 6.28, Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da verilmiştir.

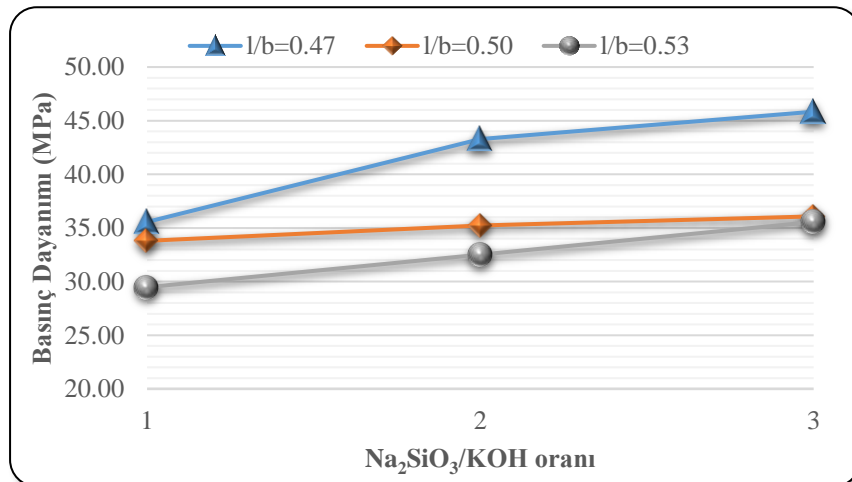
Şekil 6.26, Portland çimentosu içermeyen ve sabit alkali çözelti/bağlayıcı oranlarına (0.47, 0.50 ve 0.53) sahip hamur numunelerde,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının basınç dayanımına etkisini göstermektedir. Bu serilerde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 3'e çıkması basınç dayanımlarını arttırmıştır. Sadece alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.53 olan serilerde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 2'ye çıkması basınç dayanımını bir miktar düşürmüştür. En yüksek basınç dayanımı (24.80 MPa) P-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (13.04 MPa) P-50-1 serisinde elde edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 3'e

çıkması ile alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan serilerin basınç dayanımı %35.08, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 olan serilerin basınç dayanımı %58.28 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.53 olan serilerin basınç dayanımı ise %29.58 artmıştır.



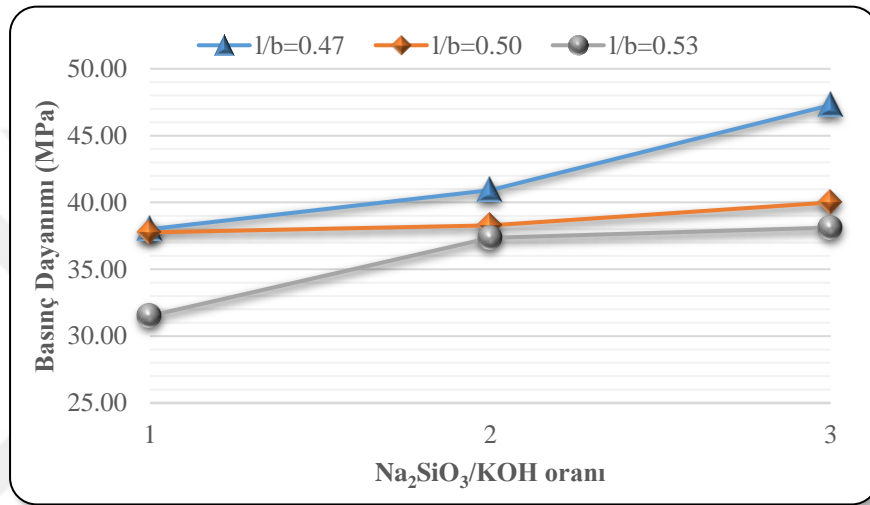
**Şekil 6.26** Portland çimentosu miktarı %0 olan karışımların basınç dayanımına Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının etkisi

Şekil 6.27’de, Portland çimentosu miktarı %5 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47, 0.50 ve 0.53 olan serilerde Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının basınç dayanımına etkisi verilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının artması bütün serilerde basınç dayanımını arttırmıştır. En yüksek basınç dayanımı (45.84 MPa) H5-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (29.48 MPa) H5-53-1 serisinde elde edilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının 1’den 3’e çıkması ile basınç dayanımları alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan serilerde %28.91, 0.50 olan serilerde %6.75 ve 0.53 olan serilerde ise %20.62 artmıştır.



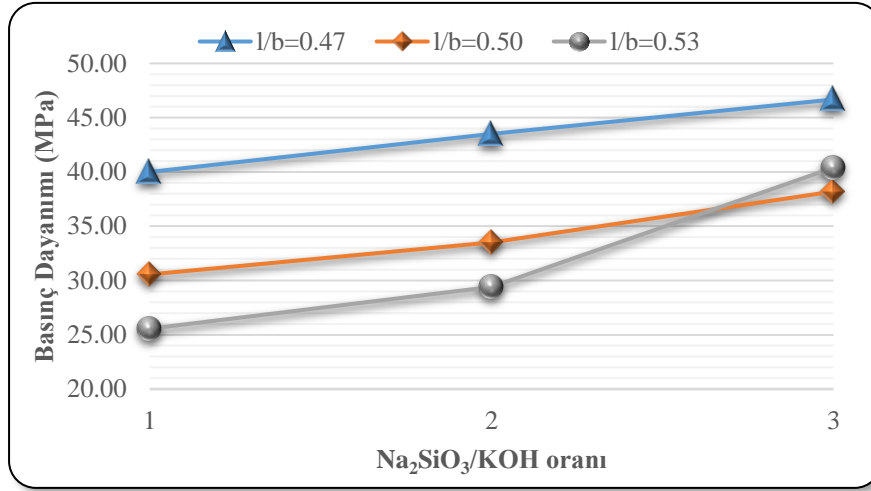
**Şekil 6.27** Portland çimentosu miktarı %5 olan karışımların basınç dayanımına Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının etkisi

Şekil 6.28, Portland çimentosu içeriği %10 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı sırasıyla 0.47, 0.50 ve 0.53 olan serilerin her birinde,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının basınç dayanımına etkisini göstermektedir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının artması bütün serilerde basınç dayanımını arttırmıştır. En yüksek basınç dayanımı (46.68 MPa) H15-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (25.56 MPa) ise H15-53-1 serisinde elde edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 3'e çıkması basınç dayanımlarını alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan serilerde %24.42, 0.50 olan serilerde %5.93 ve 0.53 olan serilerde %20.94 arttırmıştır.



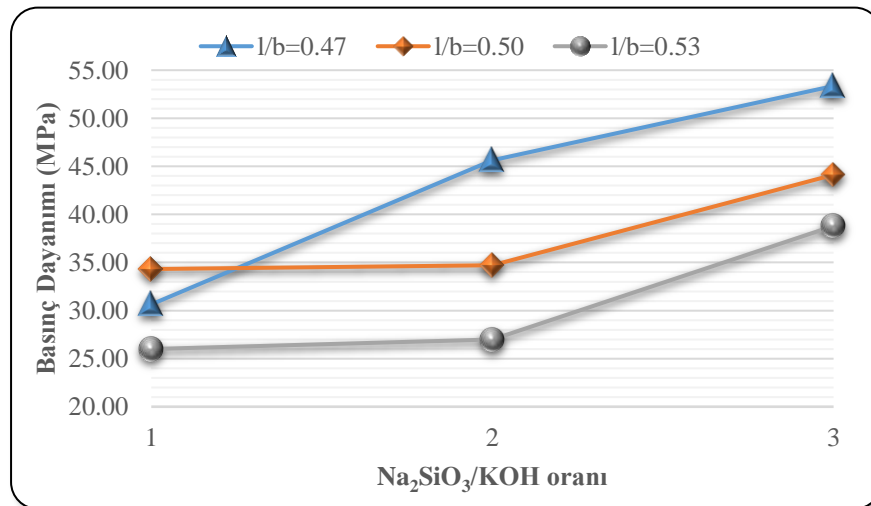
**Şekil 6.28** Portland çimentosu miktarı %10 olan karışımların basınç dayanımına  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının etkisi

Portland çimentosu içeriği %15 ve alkali çözelti/bağlayıcı miktarı 0.47, 0.50 ve 0.53 olan serilerin her birinde,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının basınç dayanımına etkisi Şekil 6.29'da verilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı arttıkça basınç dayanımlarının yükseldiği görülmektedir. 46.68 MPa değerindeki en yüksek basınç dayanımı H15-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı 25.56 MPa değeri ile H15-53-1 serisinde elde edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının 1'den 3'e çıkması ile alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan serilerin basınç dayanımı %16.70, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 olan serilerin %25.00 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.53 olan serilerin ise %58.06 artmıştır.



**Şekil 6.29** Portland çimentosu miktarı %15 olan karışımların basınç dayanımına Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının etkisi

Şekil 6.30, Portland çimentosu içeriği %20 ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı sırasıyla 0.47, 0.50 ve 0.53 olan serilerin her birinde, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının basınç dayanımına etkisini göstermektedir. Grafik incelendiğinde Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının artması ile basınç dayanımlarını yükseldiği görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı (53.36 MPa) H20-47-3 serisinde elde edilirken en düşük basınç dayanımı (26.00 MPa) ise H20-53-1 serisinde elde edilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının 1'den 3'e çıkması basınç dayanımlarını; alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 olan serilerde %74.15, 0.50 olan serilerde %28.55 ve 0.53 olan serilerde %49.23 yükseltmiştir.

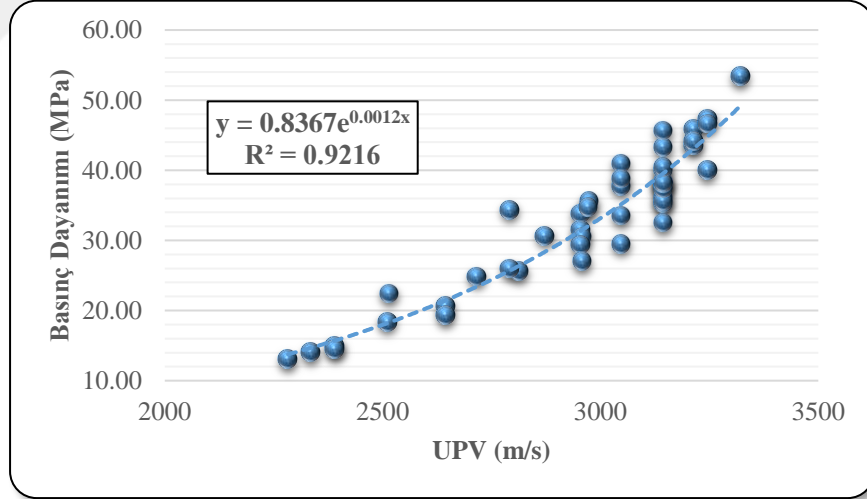


**Şekil 6.30** Portland çimentosu miktarı %20 olan karışımların basınç dayanımına Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranının etkisi

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranının artması ile basınç dayanımları yükselmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranındaki artış ile karışımdaki Na içeriği de artmakta ve daha stabil mukavemet özellikleri gösteren malzemeler oluşmaktadır [161]. Bakharev [162], hızlı dayanım gelişiminin özellikle  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  gibi yüksek sodyum konsantrasyonuna sahip çözeltilerin kullanıldığı geopolimerlerde gerçekleştiğini belirtmiştir.

#### 6.2.1.2.4. Basınç Dayanımı ile UPV Değerleri Arasındaki İlişki

Şekil 6.30'da alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin basınç dayanımları ile UPV değerleri arasındaki ilişki verilmiştir. Basınç dayanımı ve UPV değerleri arasında doğrusal olmayan üssel bir ilişki olmakla beraber bu ilişkinin iyi bir korelasyona ( $R^2=0.92$ ) sahip olduğu görülmektedir. Alkalilerle aktive edilmiş hamur serileri için, UPV değerlerinden  $y=0.8367e^{0.0012x}$  formülü ile basınç dayanımlarını tahmin etmek mümkündür.



Şekil 6.31 Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ile UPV değerleri arasındaki ilişki

#### 6.2.1.3. Yoğunluk, Toplam Su Emme ve Porozite Deneyi Sonuçları

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin yoğunlukları, toplam su emmeleri ve poroziteleri deneyler sonucunda elde edilmiş olup Tablo 6.5'te verilmiştir.

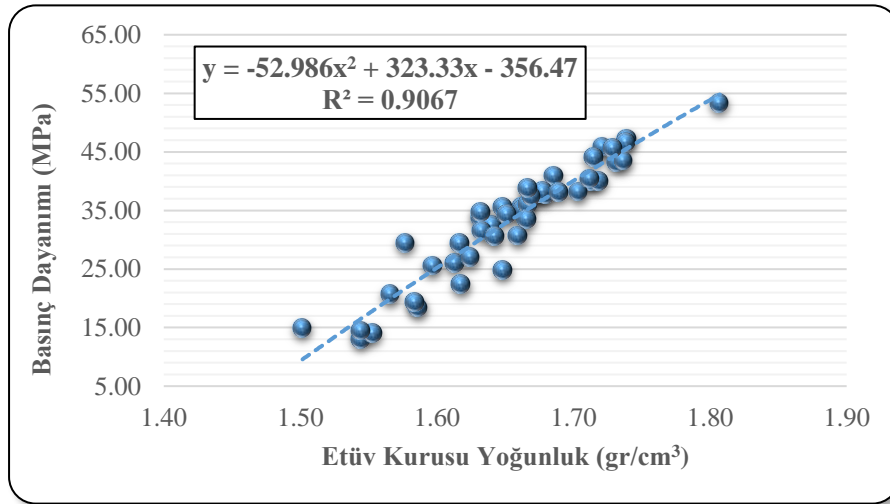
**Tablo 6.5** Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin yoğunlukları, toplam su emmeleri ve poroziteleri

Seriler	Etüv Kuru Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	DKY Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Görünür Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Toplam Su Emme (%)	Porozite (%)
P-47-1	1.59	1.86	2.19	17.39	27.60
P-47-2	1.62	1.89	2.21	16.62	26.90
P-47-3	1.65	1.91	2.22	15.56	25.65
P-50-1	1.54	1.83	2.15	18.18	28.08
P-50-2	1.55	1.83	2.15	17.92	27.83
P-50-3	1.57	1.84	2.16	17.47	27.36
P-53-1	1.50	1.81	2.17	20.56	30.88
P-53-2	1.54	1.83	2.17	18.59	28.71
P-53-3	1.58	1.86	2.19	17.50	27.72
H5-47-1	1.66	1.91	2.22	15.17	25.21
H5-47-2	1.73	1.95	2.22	12.68	21.95
H5-47-3	1.72	1.95	2.23	13.33	22.95
H5-50-1	1.63	1.89	2.20	15.91	25.96
H5-50-2	1.66	1.90	2.19	14.54	24.18
H5-50-3	1.67	1.91	2.19	14.36	23.94
H5-53-1	1.58	1.84	2.15	16.82	26.52
H5-53-2	1.64	1.88	2.17	14.88	24.41
H5-53-3	1.65	1.89	2.18	14.75	24.32
H10-47-1	1.68	1.92	2.23	14.77	24.76
H10-47-2	1.69	1.93	2.22	14.22	23.97
H10-47-3	1.74	1.96	2.23	12.57	21.88
H10-50-1	1.68	1.92	2.22	14.54	24.42
H10-50-2	1.68	1.92	2.22	14.51	24.34
H10-50-3	1.71	1.95	2.24	13.80	23.65
H10-53-1	1.63	1.90	2.21	16.02	26.17
H10-53-2	1.67	1.92	2.22	14.83	24.75
H10-53-3	1.69	1.93	2.22	14.05	23.74
H15-47-1	1.72	1.94	2.21	13.03	22.40
H15-47-2	1.74	1.95	2.21	12.36	21.46
H15-47-3	1.74	1.95	2.19	11.89	20.67
H15-50-1	1.64	1.89	2.17	14.78	24.29
H15-50-2	1.67	1.90	2.17	14.03	23.37
H15-50-3	1.70	1.93	2.20	13.29	22.65
H15-53-1	1.60	1.85	2.14	15.89	25.37
H15-53-2	1.62	1.87	2.16	15.57	25.17
H15-53-3	1.71	1.93	2.20	12.94	22.16
H20-47-1	1.66	1.92	2.24	15.53	25.77
H20-47-2	1.73	1.94	2.19	12.18	21.07
H20-47-3	1.81	2.00	2.24	10.79	19.50
H20-50-1	1.65	1.89	2.18	14.57	24.06
H20-50-2	1.63	1.88	2.18	15.32	25.00
H20-50-3	1.72	1.94	2.21	12.96	22.23
H20-53-1	1.61	1.87	2.17	15.81	25.51
H20-53-2	1.62	1.88	2.18	15.61	25.35
H20-53-3	1.67	1.91	2.19	14.37	23.95

Alkalilerle aktive edilmiş sertleşmiş hamur numunelerin yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerlerinin basınç dayanımları ile ilişkileri sırasıyla Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te verilmiştir.

En yüksek etüv kuru yoğunluğu ( $1.81 \text{ g/cm}^3$ ) H20-47-3 serisinde elde edilmiştir. Bu seri basınç dayanım değerinin de en yüksek olduğu seridir (53.36 MPa). En düşük etüv kuru yoğunluk değeri ( $1.50 \text{ g/cm}^3$ ) ise Portland çimentosu içermeyen, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.53 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 1 olan P-53-1 serisine aittir. Serilerin doymuş kuru yüzey yoğunlukları  $1.81 \text{ g/cm}^3$  ile  $2.00 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmektedir. Yine benzer şekilde, en yüksek doymuş kuru yüzey yoğunluk H20-47-3 serinde elde edilirken en düşük ise P-53-1 serisinde elde edilmiştir. Numunelerin görünür yoğunlukları  $2.15 \text{ g/cm}^3$  ile  $2.24 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmektedir.

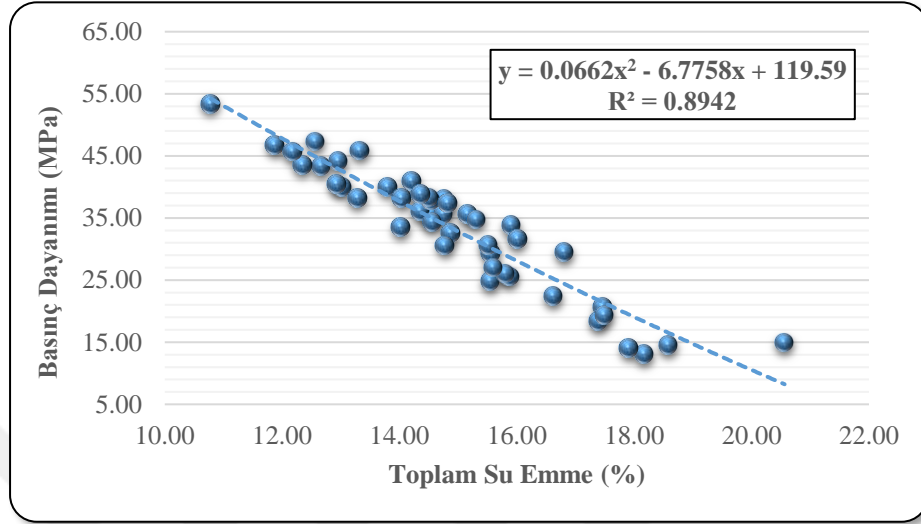
Şekil 6.32, alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin etüv kuru yoğunluklarının basınç dayanımlarıyla ilişkisini göstermektedir. Genel olarak etüv kuru yoğunluk değerleri arttıkça basınç dayanımları da artmıştır. Etüv kuru yoğunluğu değerleri ile basınç dayanımları arasında ikinci dereceden ilişki olup, iyi bir korelasyon ( $R^2=0.9067$ ) mevcuttur. Numunelerin basınç dayanımlarını, etüv kuru yoğunluklardan  $y=-52.986x^2+323.33x-356.47$  denklemi ile tahmin etmek mümkündür.



**Şekil 6.32** Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ve etüv kuru yoğunlukları arasındaki ilişki

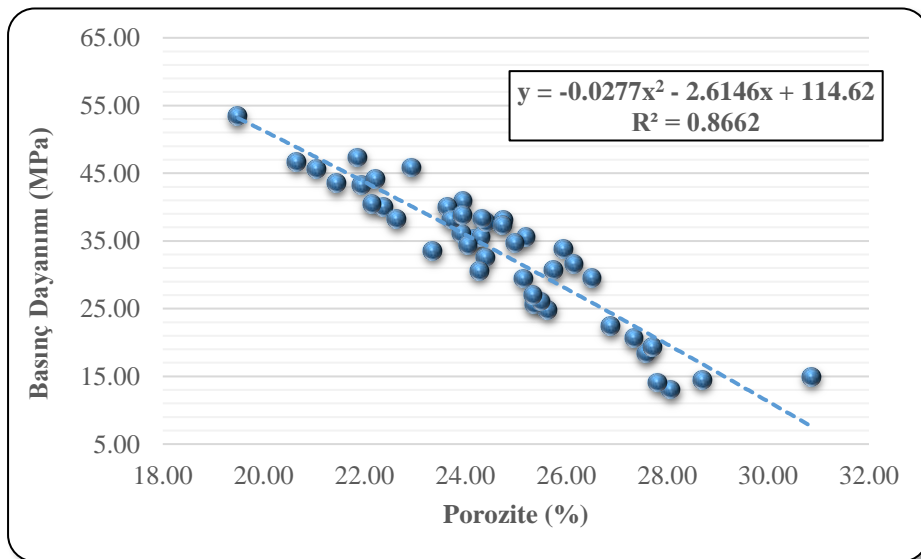
Şekil 6.33'te alkalilerle aktive edilmiş sertleşmiş hamur numunelerin toplam su emme değerleri ve basınç dayanımları arasındaki ilişki verilmiştir. Genel olarak toplam su emme değerleri arttıkça basınç dayanımları düşmektedir. Şekildeki grafik incelendiğinde basınç dayanımı ile toplam su emme değeri arasında negatif bir ilişki olduğu ve  $R^2$ 'nin 0.90'a

çok yakın olması ilişkinin güçlü olduğunu göstermektedir. Numunelerin basınç dayanımlarını ikinci dereceden  $y=0.0662x^2-6.7758x+119.59$  denklemi ile tahmin etmek mümkündür.



Şekil 6.33 Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ve toplam su emmeleri arasındaki ilişki

Şekil 6.34, sertleşmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ile porozite değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Genel olarak porozite değerleri arttıkça basınç dayanımları düşmektedir. Basınç dayanımı ve porozite değerleri arasında doğrusal olmayan polinomsal negatif bir ilişki olmakla beraber bu ilişkinin  $R^2$  katsayısının değeri 0.8662'dir. Basınç dayanımları,  $y=-0.0277x^2-2.6146x+114.62$  denklemi tespit edilebilir.

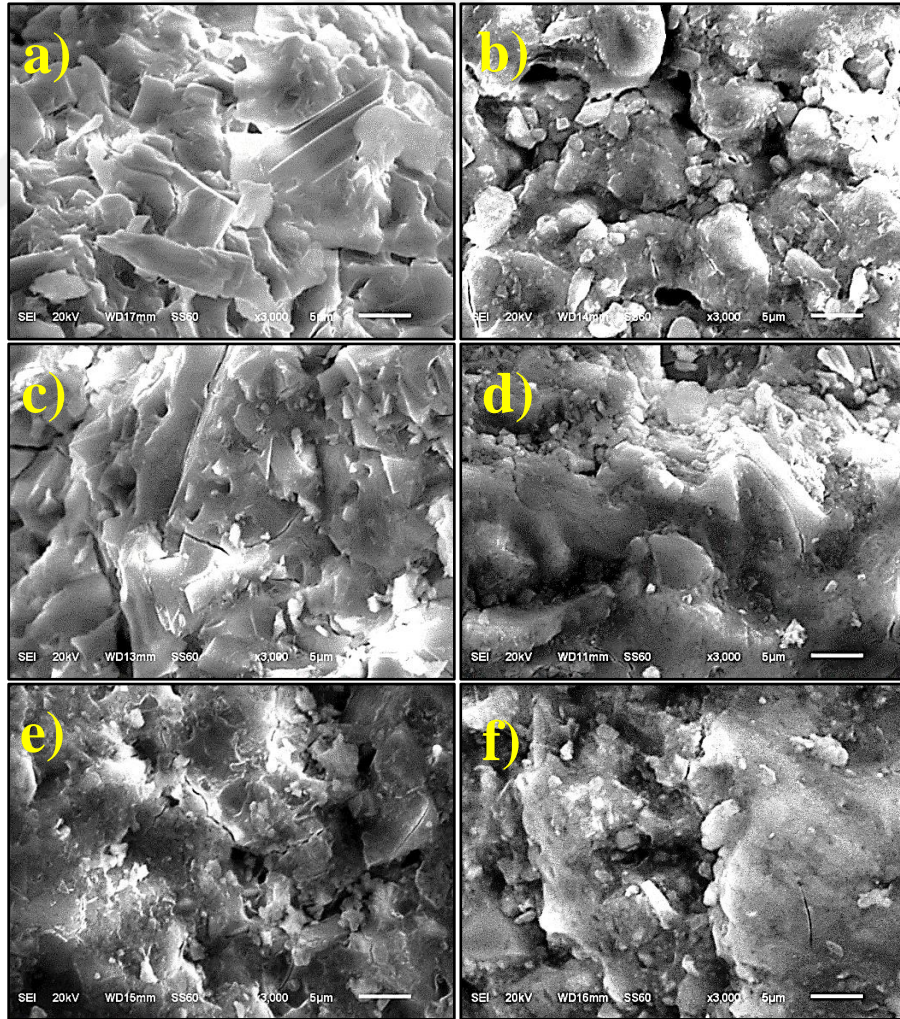


Şekil 6.34 Alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerin basınç dayanımları ve poroziteleri arasındaki ilişki

#### 6.2.1.4. Mikro Yapı Analizi Sonuçları

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin mikro yapı incelemesinin yapılabilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) / enerji ayırmalı X-ışını (EDX) ve fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılmıştır.

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin SEM/EDX ile yüksek çözünürlüklü görüntüleri çekilerek malzemelerin mikro yapıları incelenmiştir. Portland çimentosu içeriğine göre (%0, %5, %10, %15 ve %20) en yüksek mukavemetli seriler seçilmiştir. Şekil 6.35'te Portland çimentosu içermeyen P-47-1 ve P-47-3 serileri, %5 Portland çimentosu içeren H5-47-3, %10 Portland çimentosu içeren H10-47-3, %15 Portland çimentosu içeren H15-47-3 ve %20 Portland çimentosu içeren H20-47-3 serilerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu serilerin basınç dayanımları sırasıyla; 18.36, 24.80, 45.84, 47.28, 46.68 ve 53.36 MPa'dır.



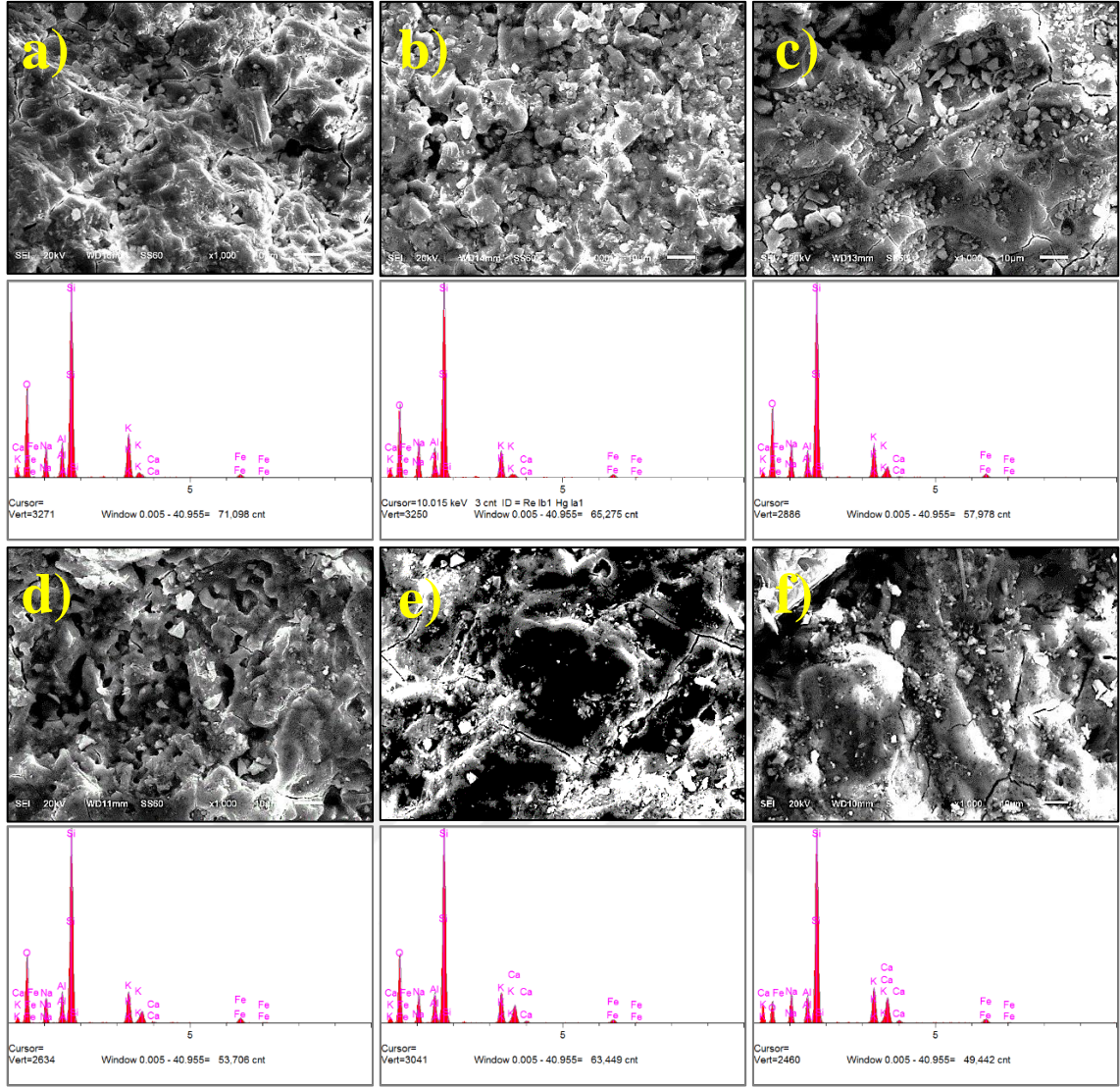
Şekil 6.35 Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren bağlayıcıların SEM görüntüleri; a) P-47-1, b) P-47-3, c) H5-47-3, d) H10-47-3, e) H15-47-3 ve f) H20-47-3

Şekil 6.35 incelendiğinde reaksiyona girmemiş bazı partiküllerin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.35 a)'da tamamen geopolimer reaksiyonlarına katılmamış potasyum kristalleri görünmektedir. Bunun sebebi, potasyumun tamamen çözünmemesi veya ortamda yeteri kadar amorf silikanın bulunmamasıdır [17, 163]. Ayrıca hibrit sistemler çimento miktarı arttıkça daha yoğun bir hal almaktadır. Reaksiyona girmemiş zayıf kalıntılar ve düşük yoğunluklu geopolimer yapısı, hibrit sisteme göre düşük basınç dayanımının nedenlerinden biridir. Rivera vd. [84], hibrit sistemin geopolimere göre daha yüksek dayanımının, matrisi yoğunlaştıran daha büyük miktarda bağlayıcı jel üretimine bağlı olduğunu belirtmiştir. Portland çimentosu miktarı arttıkça hem dayanım artmakta hem de malzeme yapısı daha yoğun hale gelmektedir.

Pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların EDX analizi sonuçları Tablo 6.6 ve Şekil 6.36'da verilmiştir.

**Tablo 6.6** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren bağlayıcıların EDX analizi sonuçları

Seri	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)	Seri	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
<b>P-47-1</b>	O	45.98	60.62	<b>P-47-3</b>	O	43.56	58.09
	Na	7.00	6.42		Na	7.85	7.29
	Mg	0.10	0.08		Mg	0.13	0.11
	Al	5.36	4.19		Al	5.55	4.39
	Si	30.77	23.12		Si	32.82	24.93
	K	8.70	4.69		K	7.36	4.02
	Ca	0.55	0.29		Ca	0.87	0.46
	Fe	1.54	0.58		Fe	1.86	0.71
<b>H5-47-3</b>	O	41.97	56.67	<b>H10-47-3</b>	O	41.26	56.28
	Na	8.27	7.77		Na	6.50	6.17
	Mg	0.13	0.12		Mg	0.13	0.12
	Al	4.63	3.71		Al	5.33	4.31
	Si	33.36	25.66		Si	34.22	26.60
	K	7.24	4.00		K	7.06	3.94
	Ca	2.49	1.34		Ca	2.82	1.54
	Fe	1.90	0.74		Fe	2.69	1.05
<b>H15-47-3</b>	O	41.59	56.51	<b>H20-47-3</b>	O	36.00	50.94
	Na	7.16	6.77		Na	7.93	7.81
	Mg	0.11	0.10		Mg	0.13	0.12
	Al	5.12	4.12		Al	5.15	4.32
	Si	33.38	25.84		Si	34.74	28.00
	K	6.60	3.67		K	7.37	4.27
	Ca	4.17	2.26		Ca	6.37	3.60
	Fe	1.87	0.73		Fe	2.31	0.93



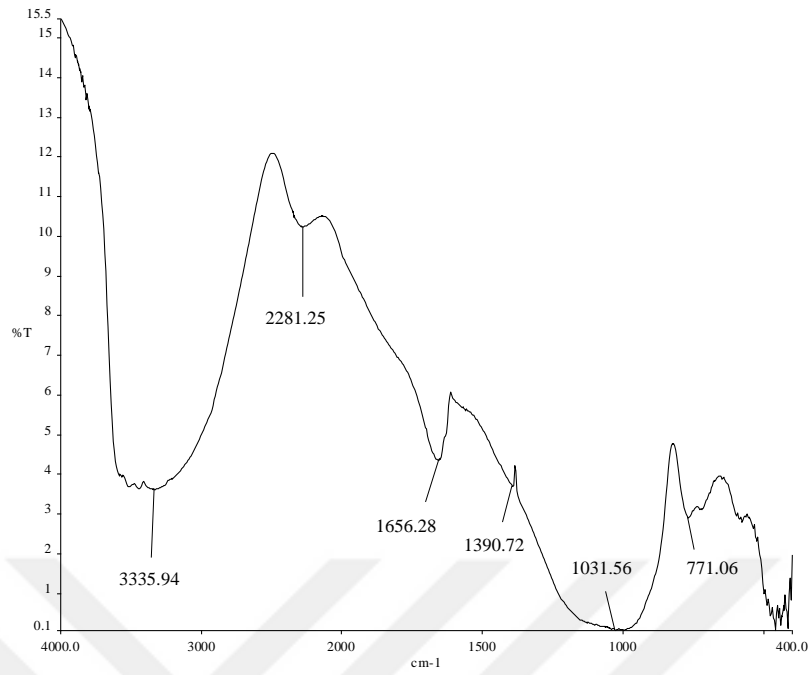
**Şekil 6.36** Alkallerle aktive edilmiş pomza içeren bağlayıcıların EDX verileri; a) P-47-1, b) P-47-3, c) H5-47-3, d) H10-47-3, e) H15-47-3 ve f) H20-47-3

Şekil 6.36 incelendiğinde ortamda O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca ve Fe elementlerinin bulunduğu görülmektedir. Tablo 6.6'daki EDX analiz sonuçlarına göre Portland çimentosu miktarı arttıkça silisyum ve kalsiyumun atomik oranın arttığı sodyum, alüminyum ve potasyumun yakın değerler seyrettiği görülmektedir. Silisyumun atomik yüzdesi, P-47-1 serisinde %23.12 iken H20-47-3 serisinde %28.00'dir. Kalsiyumun atomik yüzdesi, Portland çimentosu kullanılmayan P-47-1 ve P-47-3 serilerinde sırasıyla 0.29 ve 0.46 iken %20 Portland çimentosu kullanılan H20-47-3 serisinde %3.60'tır. Serilerin Si/K ve Si/Al oranları yükseldikçe basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı en düşük olan P-47-1 serisinin Si/K ve Si/Al oranları sırasıyla %3.54 ve %5.52 iken basınç dayanımı en yüksek olan H20-47-3 serisinin Si/K ve Si/Al oranları sırasıyla %6.56 ve 6.49'dur. Serilerin Si/Ca ve Al/Ca oranları düştükçe basınç dayanımları yükselmektedir. En

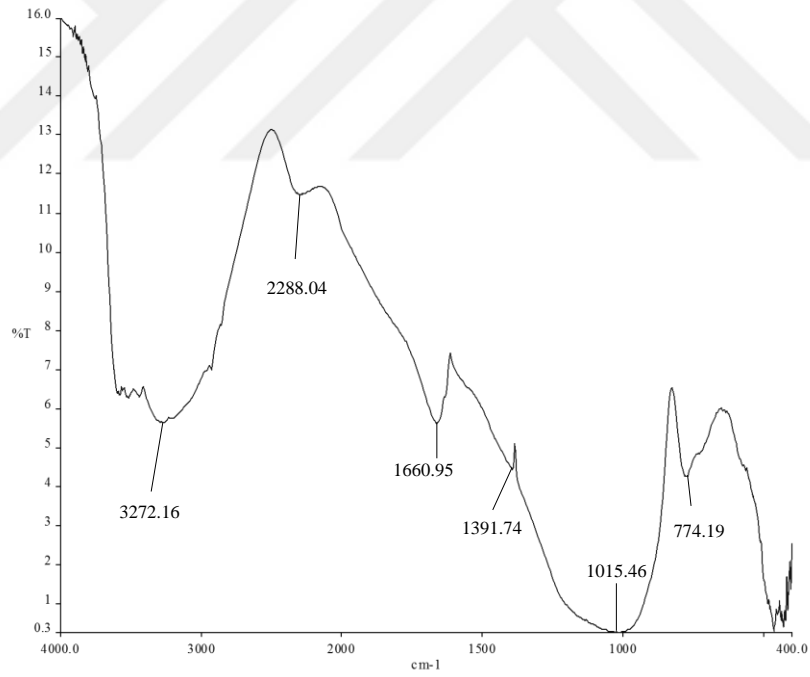
düşük basınç dayanımına sahip P-47-1 serisinin Si/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla %79.29 ve %14.36 iken en yüksek basınç dayanımına sahip H20-47-3 serisinin Si/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla %7.78 ve %1.20'dir. EDX sonuçlarına göre, matris yapısında daha fazla Ca atomunun bulunduğu ve bunun da daha fazla C-S-H / C-A-S-H veya (K,C)-A-S-H jelleri meydana getirdiği söylenebilir.

P-47-1, P-47-3, H5-47-3, H10-47-3, H15-47-3 ve H20-47-3 serilerinin kızılötesi spektroskopileri sırasıyla Şekil 6.37, Şekil 6.38, Şekil 6.39, Şekil 6.40, Şekil 6.41 ve Şekil 6.42 verilmiştir. FTIR analiz sonuçları göre; birinci çukur değerleri  $400\text{ cm}^{-1}$  ile  $500\text{ cm}^{-1}$  arasında, ikinci çukur değerleri  $763.22\text{ cm}^{-1}$  ile  $774.19\text{ cm}^{-1}$  arasında, üçüncü çukur değerleri  $959.65\text{ cm}^{-1}$  ile  $1031.56\text{ cm}^{-1}$  arasında, dördüncü çukur değerleri  $1388.67\text{ cm}^{-1}$  ile  $1398.11\text{ cm}^{-1}$  arasında, beşinci çukur değerleri  $1643.55\text{ cm}^{-1}$  ile  $1656.28\text{ cm}^{-1}$  arasında, altıncı çukur değerleri  $2236.43\text{ cm}^{-1}$  ile  $2288.04\text{ cm}^{-1}$  arasında, yedinci çukur değerleri ise  $3272.16\text{ cm}^{-1}$  ile  $3471.58\text{ cm}^{-1}$  arasında değiştiği görülmektedir. Serilerin Portland çimentosu miktarları arttıkça üçüncü çukur değerleri düşmektedir.

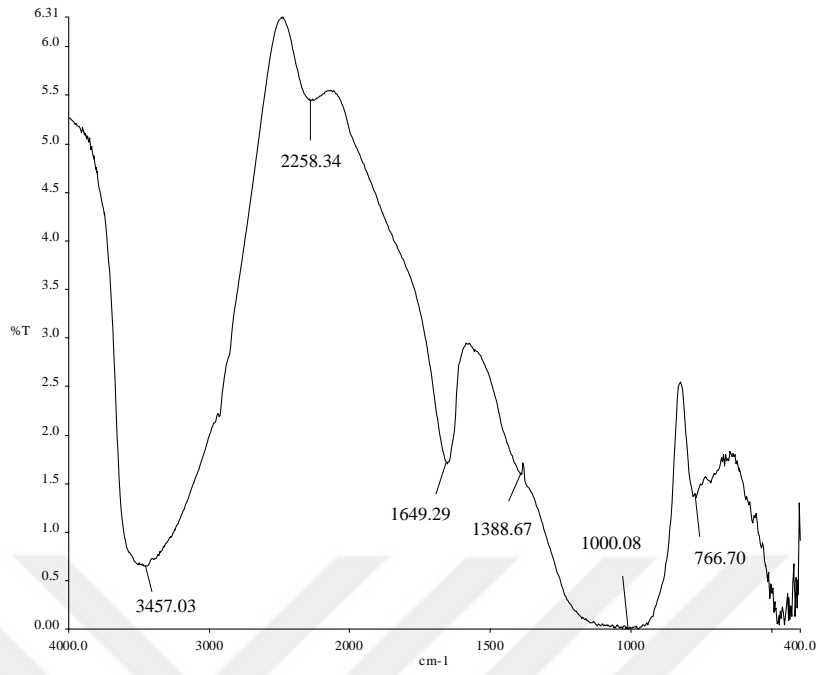
Portland çimentosunun hidrasyonu ile betonun mukavemetinden sorumlu karakteristik C-S-H jelleri meydana gelir [49]. Literatürde, yaklaşık  $920\text{-}970\text{ cm}^{-1}$  arasındaki (asimetrik Si-O-Si veya Al-O-Si bağları) emilim, tipik C-S-H jeli ile karakterize edilir [49, 164, 165]. Buna ek olarak, daha yüksek frekanslar ( $980\text{-}1020\text{ cm}^{-1}$ ) bir geopolimerizasyon ürünü olan N-A-S-H jelleri ile ilgilidir [166, 167]. Şekil 6.37 ve Şekil 6.38'de görüldüğü gibi, Portland çimentosu içermeyen P-47-1 ile P-47-3 serileri geopolimerizasyonu sonucunda K-A-S-H tipi jellerin meydana geldiği söylenebilir. %20 Portland çimentosu içeren H20-47-3 serisinin yaklaşık  $959.65\text{ cm}^{-1}$  frekansı C-A-S-H veya (K,C)-A-S-H tipi jellerin oluştuğunu göstermektedir. Rivera vd. [84], alkalilerle aktive edilmiş hibrit sistemlerin geopolimerlerden daha yüksek dayanıma sahip olmasını, hibrit sistemlerde her iki tip jelin (N-A-S-H ve C-S-H/C-A-S-H) oluşmasından kaynaklandığını belirtmiştir.  $1650\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki frekans değerleri, O-H ve H-O-H bağlarının gerilme ve deformasyon titreşimleri ile karakterize edilir [84, 163, 168]. Bu geniş bant, zayıf bağlı su moleküllerini gösterir.



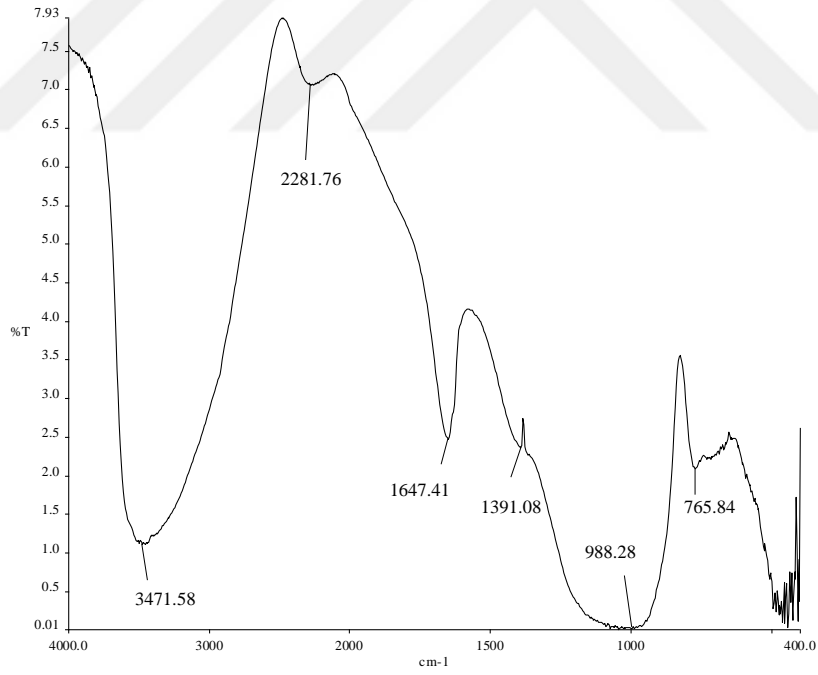
Şekil 6.37 P-47-1 serisinin FTIR analizi



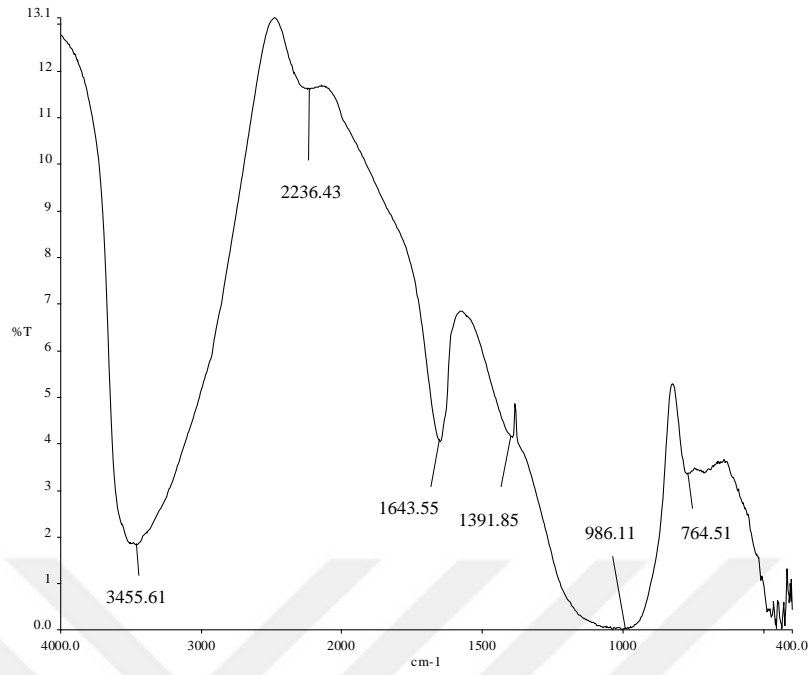
Şekil 6.38 P-47-3 serisinin FTIR analizi



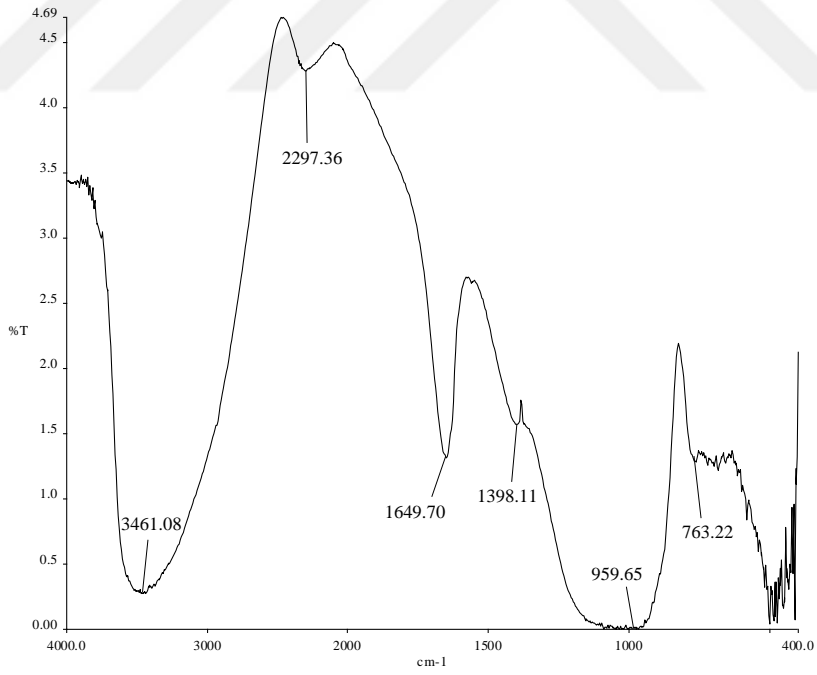
**Şekil 6.39** H5-47-3 serisinin FTIR analizi



**Şekil 6.40** H10-47-3 serisinin FTIR analizi



Şekil 6.41 H15-47-3 serisinin FTIR analizi



Şekil 6.42 H20-47-3 serisinin FTIR analizi

## 6.2.2. Kür Koşullarının Etkisi

Sabit kür koşullarında alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamurların en uygun malzeme oranlarının tespiti için deneyler yapılmış ve basınç dayanımı en yüksek seri H20-47-3 olarak belirlenmiştir. Bu seri; içeriğinde %20 Portland çimentosu bulunan, alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0.47 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı 3 olan alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıdır. Portland çimentosu içermeyen basınç dayanımı en yüksek seri ise P-47-3 serisidir. Bu serinin alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı sırasıyla 0.47 ve 3'tür. Bu aşamada Portland çimentosu içeren ve içermeyen yukarıdaki iki serinin kür koşulları incelenmiş ve aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

Portland çimentosu içeren ve içermeyen alkalilerle aktive edilmiş 3, 28 ve 90 günlük hamur numunelerin farklı etüv koşullarındaki basınç dayanımları ve UPV değerleri sırasıyla Tablo 6.7, Tablo 6.8 ve Tablo 6.9'da verilmiştir.

**Tablo 6.7** Alkalilerle aktive edilmiş 3 günlük hamur numunelerin farklı kür koşullarındaki UPV ve basınç dayanımları

Seri İsim	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)	Seri İsim	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)
P3-20	2122	3.21	H3-20	2414	13.40
P3-40-24	2196	10.07	H3-40-24	2487	18.04
P3-40-48	2277	12.25	H3-40-48	3025	29.40
P3-40-72	2384	14.36	H3-40-72	3012	31.44
P3-60-24	2502	15.15	H3-60-24	3125	37.76
P3-60-48	2515	18.91	H3-60-48	3185	45.92
P3-60-72	2565	17.56	H3-60-72	3225	53.80
P3-80-24	2614	26.04	H3-80-24	3112	38.04
P3-80-48	3125	32.08	H3-80-48	3321	55.64
P3-80-72	3154	34.38	H3-80-72	3395	59.48
P3-100-24	2965	28.22	H3-100-24	3687	83.64
P3-100-48	3002	28.64	H3-100-48	3699	86.51
P3-100-72	2964	29.34	H3-100-72	3705	89.72
P3-120-24	2798	24.80	H3-120-24	3357	57.20
P3-120-48	2695	25.36	H3-120-48	3402	57.05
P3-120-72	2635	25.55	H3-120-72	3368	55.64

**Tablo 6.8** Alkalilerle aktive edilmiş 28 günlük hamur numunelerinin farklı kür koşullarındaki UPV ve basınç dayanımları

Seri İsim	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)	Seri İsim	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)
P28-20	2275	14.15	H28-20	3075	41.07
P28-40-24	2515	18.52	H28-40-24	3075	43.96
P28-40-48	2575	20.06	H28-40-48	3025	45.71
P28-40-72	2615	23.21	H28-40-72	3204	47.52
P28-40-96	2649	24.01	H28-40-96	3075	47.21
P28-60-24	2575	19.62	H28-60-24	3211	47.44
P28-60-48	2778	24.80	H28-60-48	3266	53.36
P28-60-72	2756	26.03	H28-60-72	3350	54.04
P28-60-96	2649	25.81	H28-60-96	3275	53.84
P28-80-24	2895	28.85	H28-80-24	3218	48.11
P28-80-48	3122	34.91	H28-80-48	3367	55.24
P28-80-72	3187	36.11	H28-80-72	3625	62.88
P28-80-96	3054	33.25	H28-80-96	3501	60.73
P28-100-24	3075	29.68	H28-100-24	3624	85.62
P28-100-48	2985	31.30	H28-100-48	3668	88.61
P28-100-72	2875	28.39	H28-100-72	3714	91.09
P28-100-96	2675	27.05	H28-100-96	3645	86.07
P28-120-24	2742	25.11	H28-120-24	3375	58.79
P28-120-48	2815	25.62	H28-120-48	3425	58.24
P28-120-72	2516	22.33	H28-120-72	3325	56.14
P28-120-96	2575	23.06	H28-120-96	3284	53.25

**Tablo 6.9** Alkalilerle aktive edilmiş 90 günlük hamur numunelerinin farklı kür koşullarındaki UPV ve basınç dayanımları

Seri İsim	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)	Seri İsim	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)
P90-20	2615	23.87	H90-20	3575	65.21
P90-40-24	2793	26.31	H90-40-24	3498	68.23
P90-40-48	2805	27.61	H90-40-48	3521	69.85
P90-40-72	2793	26.91	H90-40-72	3607	71.22
P90-40-96	2775	27.35	H90-40-96	3564	70.81
P90-60-24	2865	28.27	H90-60-24	3564	68.77
P90-60-48	2975	29.61	H90-60-48	3587	70.54
P90-60-72	3012	30.31	H90-60-72	3645	73.65
P90-60-96	3059	31.02	H90-60-96	3605	70.74
P90-80-24	2745	27.95	H90-80-24	3625	69.94
P90-80-48	3115	35.31	H90-80-48	3594	72.36
P90-80-72	3175	37.54	H90-80-72	3657	76.52
P90-80-96	3149	36.30	H90-80-96	3567	69.85
P90-100-24	2775	25.21	H90-100-24	3689	87.70
P90-100-48	2675	24.60	H90-100-48	3705	89.31
P90-100-72	2684	23.56	H90-100-72	3758	93.52
P90-100-96	2649	20.15	H90-100-96	3696	86.59
P90-120-24	2675	22.47	H90-120-24	3625	60.21
P90-120-48	2706	23.01	H90-120-48	3575	60.11
P90-120-72	2649	20.65	H90-120-72	3398	59.61
P90-120-96	2515	18.97	H90-120-96	3402	57.25

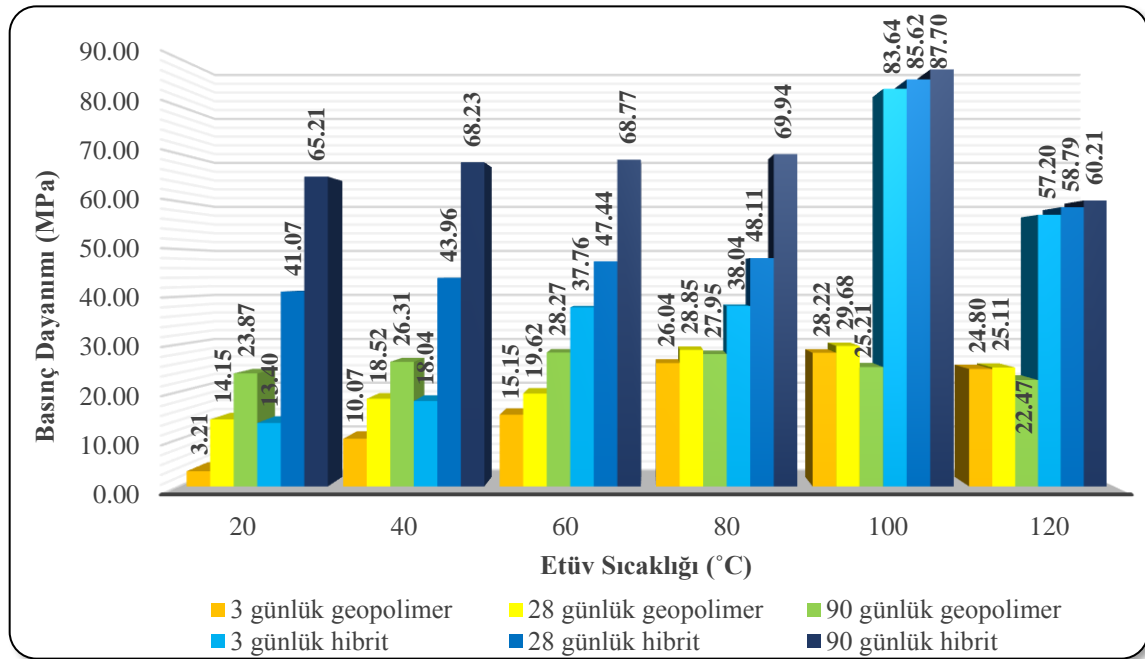
Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların kür koşulları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımına, 100°C etüv sıcaklığında 72 saat bekletilen 90 günlük numunelerin ulaştığı tespit edilmiştir. Bu serinin (H90-100-72) basınç dayanımı ve UPV değerleri sırasıyla 93.52 MPa ve 3758 m/s'dir. En düşük basınç dayanımı (13.40 MPa) ise ortam koşullarında kür edilen H3-20 serisinde elde edilmiştir.

Pomza içeren geopolimerlerin kür koşulları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımına, 80°C etüv sıcaklığında 72 saat bekletilen 90 günlük numunelerin ulaştığı tespit edilmiştir. Bu serinin (P90-80-72) basınç dayanımı ve UPV değerleri sırasıyla 37.54 MPa ve 3175 m/s'dir. En düşük basınç dayanımı (3.21 MPa) ise ortam koşullarında kür edilen P3-20 serisinde elde edilmiştir.

### 6.2.2.1. Sabit Etüv Kürü Süresinde Etüv Sıcaklığının Basınç Dayanımına Etkisi

Pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklıklarının (20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C ve 120°C ) basınç dayanımına etkisi Şekil 6.43, Şekil 6.44, Şekil 6.45 ve Şekil 6.46'da verilmiştir.

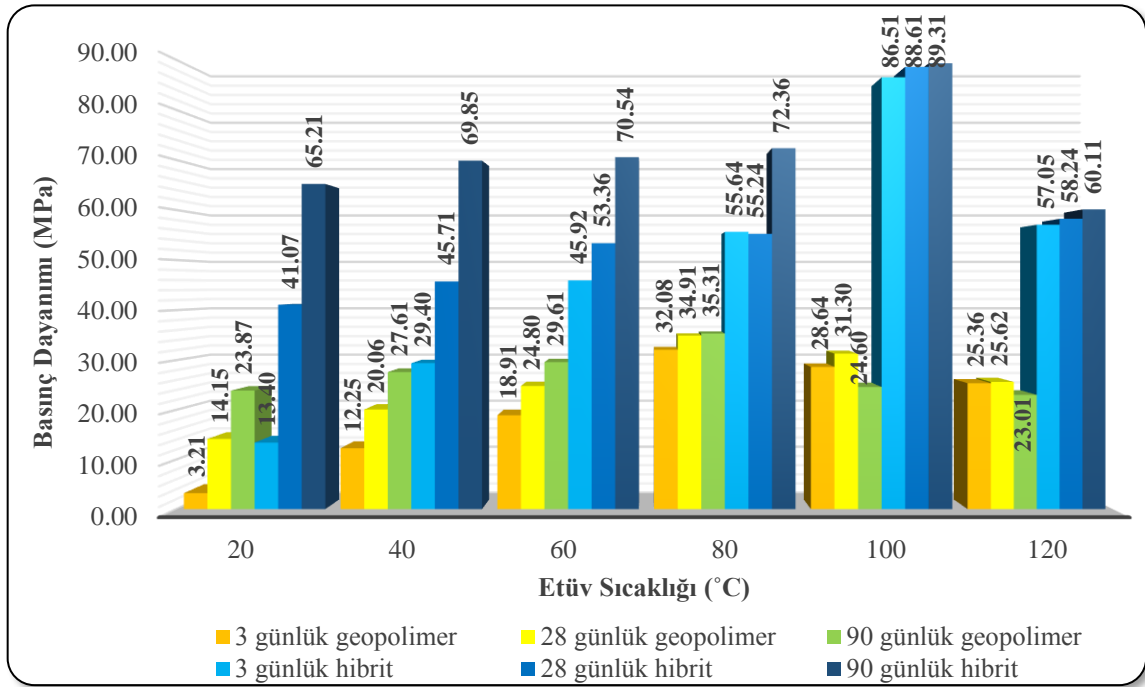
Şekil 6.43, 24 saat etüv küründe bekletilen Portland çimentosu içeren ve içermeyen 3, 28 ve 90 günlük numunelerin etüv sıcaklıklarının basınç dayanımlarına etkisini göstermektedir.



Şekil 6.43 24 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi

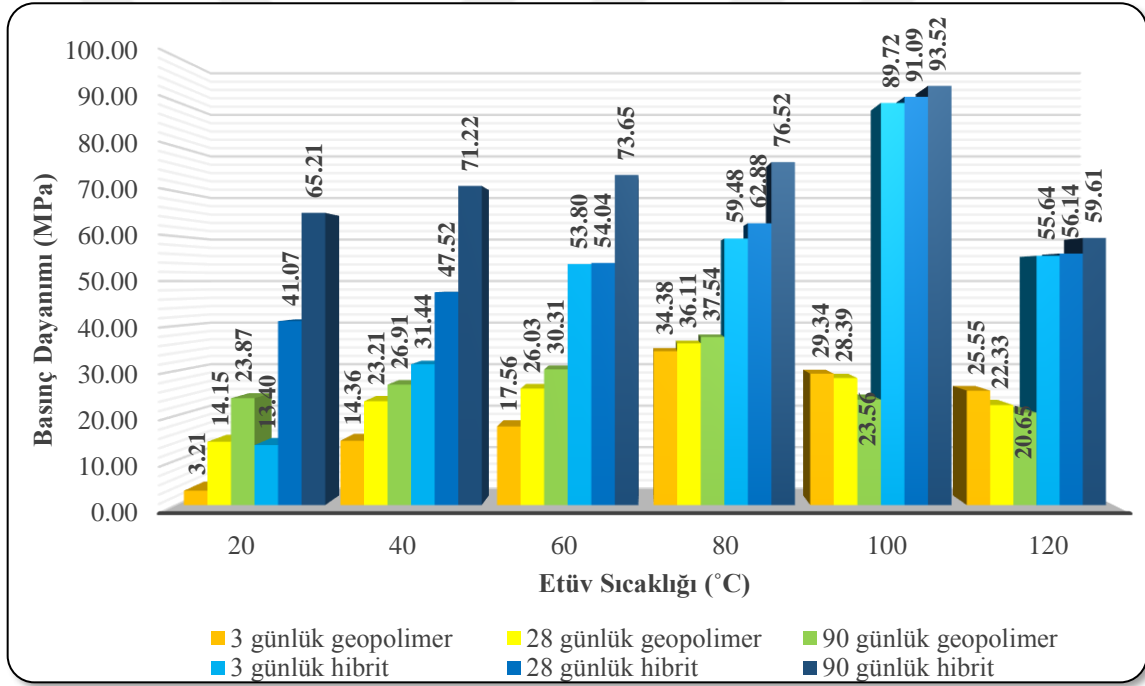
Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların en yüksek basınç dayanımı (87.70 MPa), 100°C etüv sıcaklığında 24 saat bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içermeyen geopolimerlerin en yüksek basınç dayanımı da (29.68 MPa), 100°C etüv sıcaklığında 24 saat bekletilen 28 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren ve içermeyen numunelerde basınç dayanımları genel olarak 100°C'ye kadar artmış ve 100°C'den sonra düşmeye başlamıştır. Portland çimentosu içeren 90 günlük numunelerde etüv sıcaklığı 100°C'den 120°C'ye çıktığında basınç dayanımı %31.35 düşüş göstermiştir. Aynı alkali çözelti/bağlayıcı ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranlarına sahip ve aynı etüv koşullarında kür edilen Portland çimentosu içeren H90-100-24 serisinin basınç dayanımı, Portland çimentosu içermeyen P90-100-24 serisinin basınç dayanımının yaklaşık 3.5 katıdır. 24 saat etüvde bekletilen Portland çimentosu içermeyen numunelerde en düşük basınç dayanımı (3.21 MPa) 20°C'lik etüv sıcaklığında elde edilmiştir. Aynı kür koşullarındaki Portland çimentosu içeren numunede ise en düşük basınç dayanımı 13.40 MPa'dır.

Şekil 6.44, 48 saat etüv küründe bekletilen Portland çimentosu içeren ve içermeyen 3, 28 ve 90 günlük numunelerin etüv sıcaklıklarının basınç dayanımlarına etkisini göstermektedir.



Şekil 6.44 48 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi

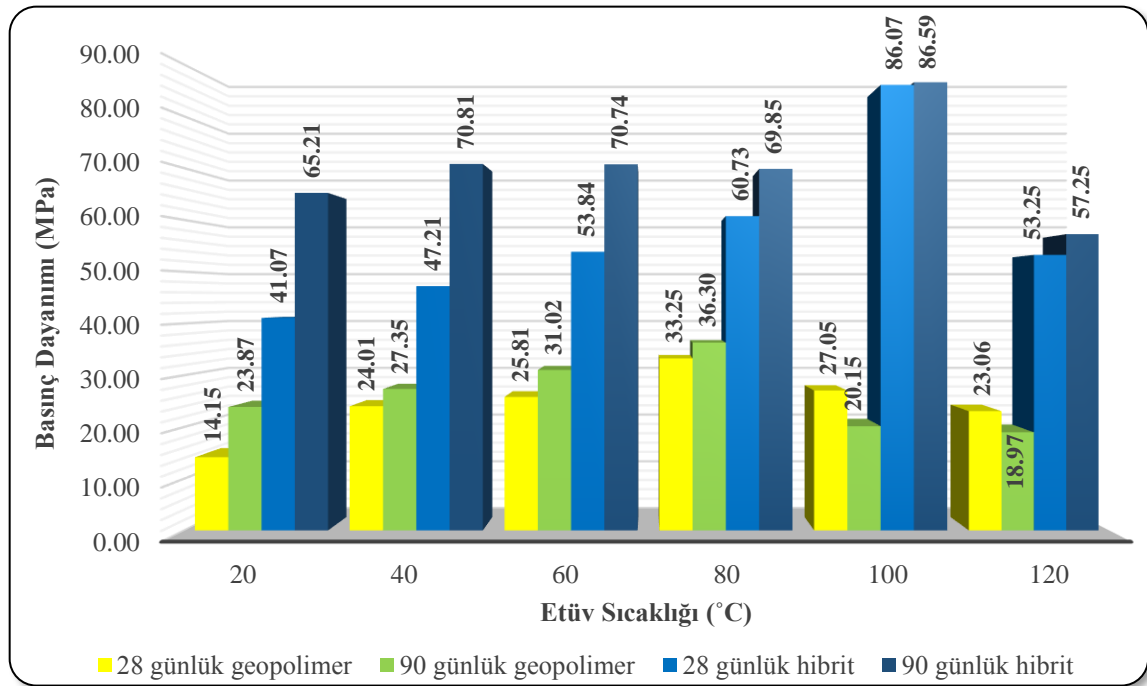
Portland çimentosu içeren serilerde en yüksek basınç dayanımı (89.31 MPa), 100°C etüv sıcaklığında 48 saat bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içermeyen serilerde ise en yüksek basınç dayanımı (35.31 MPa) 80°C etüv sıcaklığına maruz kalan 90 günlük numunede elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren numunelerin basınç dayanımı 100°C sıcaklığa kadar artarken 120°C’de düşüş göstermiştir. Portland çimentosu içermeyen serilerde ise bu artış 80°C sıcaklığa kadar devam ederken 80°C’den sonra düşüş göstermiştir. Portland çimentosu içeren 90 günlük numunelerde etüv sıcaklığı 100°C’den 120°C’ye çıktığında basınç dayanımı %32.69 düşüş göstermiştir. Portland çimentosu içeren H90-100-48 serisinin basınç dayanımı, Portland çimentosu içermeyen P90-100-48 serisinin basınç dayanımının yaklaşık 3.6 katıdır.



**Şekil 6.45** 72 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi

Şekil 6.45, 72 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamur numunelerinin etüv sıcaklıklarının basınç dayanımlarına etkisini vermektedir. Portland çimentosu içeren serilerde en yüksek basınç dayanımı (93.52 MPa), 100°C etüv sıcaklığına maruz kalan 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içermeyen serilerde ise en yüksek basınç dayanımı (37.54 MPa), 80°C etüv sıcaklığına maruz kalan 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren numunelerin basınç dayanımı 100°C’ye kadar artarken bu sıcaklıktan sonra

düşüş göstermiştir. Portland çimentosu içermeyen numunelerin basınç dayanımı ise 80°C sıcaklığa kadar artış göstermiş ve bu sıcaklıktan sonra düşmeye başlamıştır. 90 günlük Portland çimentosu içeren numunelerde etüv sıcaklığı 100°C'den 120°C'ye çıktığında basınç dayanımı %36.26 düşüş göstermiştir. Aynı alkali çözelti/bağlayıcı ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranlarına sahip ve aynı etüv koşullarında kür edilen Portland çimentosu içeren H90-100-72 serisinin basınç dayanımı, Portland çimentosu içermeyen P90-100-72 serisinin basınç dayanımının yaklaşık 4 katıdır.



**Şekil 6.46** 96 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların etüv sıcaklığının basınç dayanımına etkisi

Şekil 6.46, 96 saat etüv küründe bekletilen pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamur numunelerin basınç dayanımlarına etüv sıcaklıklarının etkisini vermektedir. Bu grafikte sadece 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri yer almaktadır. Diğer etüv sıcaklıklarında olduğu gibi Portland çimentosu içeren serilerde en yüksek basınç dayanımı (86.59 MPa), 100°C etüv sıcaklığında bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Yine benzer şekilde Portland çimentosu içermeyen serilerde ise en yüksek basınç dayanımı (36.30 MPa), 80°C etüv sıcaklığında bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren serilerin basınç dayanımı 100°C sıcaklığa kadar artarken Portland çimentosu içermeyen serilerin basınç dayanımı ise 80°C'ye kadar artış göstermiştir. 90 günlük Portland çimentosu içeren

numunelerde etüv sıcaklığı 100°C'den 120°C'ye çıktığında basınç dayanımı %33.88 düşüş göstermiştir. Aynı alkali çözelti/bağlayıcı ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/KOH oranlarına sahip ve aynı etüv koşullarında kür edilen Portland çimentosu içeren H90-100-96 serisinin basınç dayanımı, Portland çimentosu içermeyen P90-100-96 serisinin basınç dayanımının yaklaşık 4.3 katıdır.

Genel olarak Portland çimentosu içeren hibrit bağlayıcıların basınç dayanımlarında 100°C etüv sıcaklığından sonra düşüş görülmüştür. Portland çimentosu içermeyen numunelerde ise basınç dayanımları, 24 saatlik etüv süresi dışında, 80°C etüv sıcaklığından sonra düşüş göstermiştir. Ortam koşullarında (20°C) kür edilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 13.40 MPa, 41.07 MPa ve 65.21 MPa'dır. Ortam koşullarında kür edilen pomza içeren geopolimerlerin 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ise sırasıyla 3,21 MPa, 14,15 MPa ve 23,87 MPa'dır. Bu sonuçlar göstermektedir ki ortam koşullarında kür edilen Portland çimentosu içeren numunelerin Portland çimentosu içermeyen numunelere göre basınç dayanımları üzerinden ciddi bir avantajı bulunmaktadır. Ortam koşullarında kür edilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcılar 90 günlük sürede 65.21 MPa değerine ulaşabilmektedir. Bu değer Portland çimentosu içermeyen numuneden elde edilen değer yaklaşık 2.7 katıdır. Portland çimentosu içeren numunelerin en yüksek basınç dayanımı (93.52), 100°C etüv sıcaklığında 72 saat bekletilen 90 günlük numunede elde edilmiştir. Bağlayıcı malzeme içerisinde bulunan Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda çıkan ısı geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmıştır. Bu durum Portland çimentosu içeren numunelerin Portland çimentosu içermeyen numunelere göre ortam koşullarında daha fazla basınç dayanımı elde edilmesini sağlamıştır. 120°C'de numunelerin basınç dayanımlarının düşmesinin sebebi, yüksek sıcaklıklarda reaksiyon ürünlerinin bozulmasına bağlanabilir [100, 169].

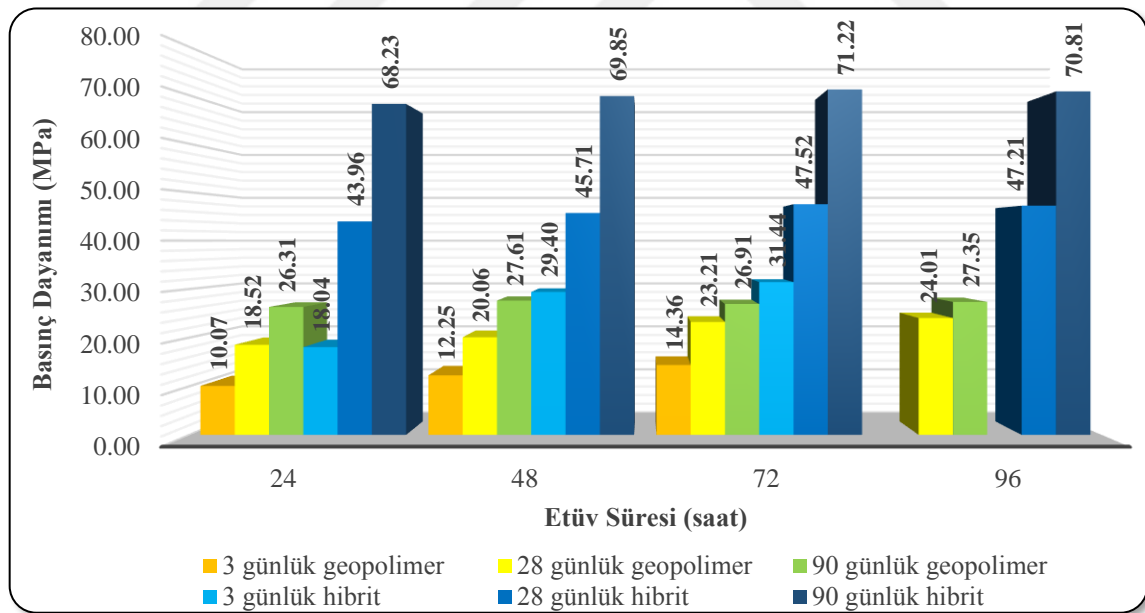
Bu çalışmada üretilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların optimum etüv sıcaklığının 100°C olduğu tespit edilmiştir. Kani ve Allahverdi [170], pomza ile ürettikleri geopolimerleri 45°C, 65°C ve 85°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kürde bekletmiş ve etüv sıcaklığı arttıkça numunelerin basınç dayanımlarının da arttığını tespit etmiştir. En yüksek basınç dayanımı 85°C sıcaklıkta elde edilirken bu sıcaklıktan sonraki durumlar incelenmemiştir. Qu vd. [75] yaptıkları çalışmada cüruf, uçucu kül ve Portland çimentosu klinkeri ile alkalilerle aktive edilmiş hibrit bağlayıcılar üretmiştir. Bu çalışmada iki farklı etüv sıcaklığında (25°C ve 85°C ) numuneler kür edilmiş ve en yüksek basınç dayanımının 85°C sıcaklıkta elde edildiği belirtilmiştir. Etüv sıcaklığının 25°C'den 85°C'ye çıkmasının

malzemenin içinde gerçekleşen birincil reaksiyonları hızlandırdığı ve yaklaşık 30 MPa basınç dayanımı elde edilebildiği vurgulanmıştır. Yazarlar, 85°C başlangıç sıcaklığının daha polimerize jellerin oluşumunu sağladığını ve 90 günlük süre içerisinde etrenjit oluşumunu engellediğini belirtmiştir.

#### 6.2.2.2. Sabit Etüv Kürü Sıcaklığında Etüv Süresinin Basınç Dayanımına Etkisi

Pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamur bağlayıcıların etüv sürelerinin (24, 48, 72 ve 96 saat) basınç dayanımına etkisi Şekil 6.47, Şekil 6.48, Şekil 6.49, Şekil 6.50 ve Şekil 6.51’de verilmiştir. 3 günlük (72 saat) bekleme sürelerinde 96 saat etüv koşulları incelenemediği için grafiklerde 3 günlük geopolimer ve hibrit sistemlerin basınç dayanımları yer almamaktadır.

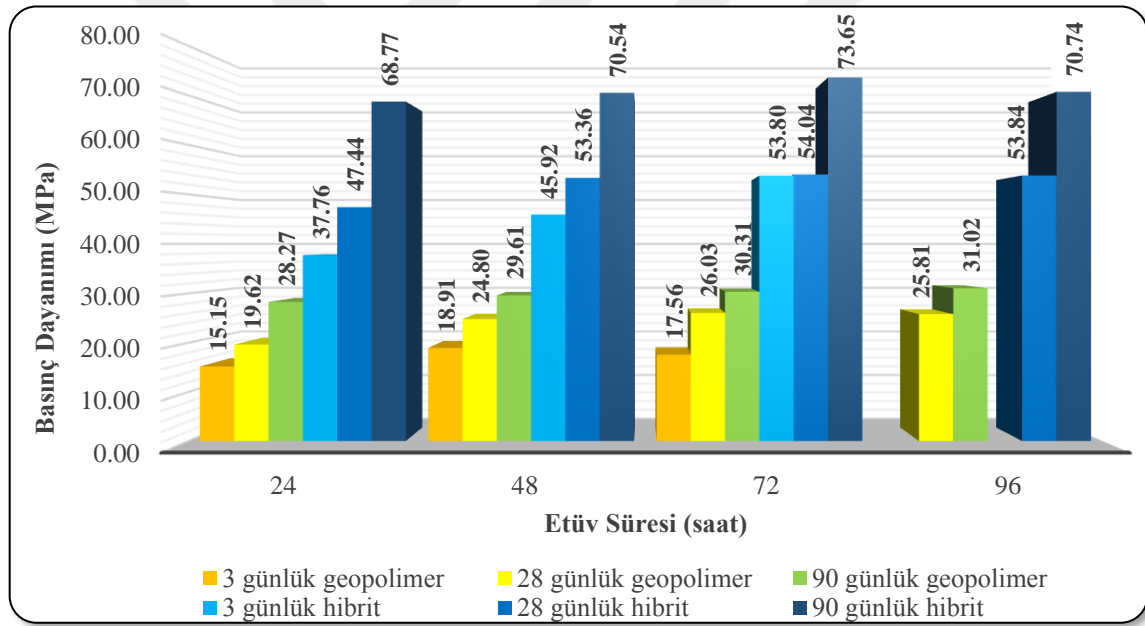
40°C etüv sıcaklığına maruz kalan pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların basınç dayanımlarına etüv sürelerinin etkisi Şekil 6.47’de verilmiştir.



Şekil 6.47 40°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi

Portland çimentosu içeren serilerde en yüksek basınç dayanımı (71.22 MPa), 72 saat etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içermeyen serilerde en yüksek basınç dayanımı (27.61 MPa) ise 48 saat etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren numunelerin

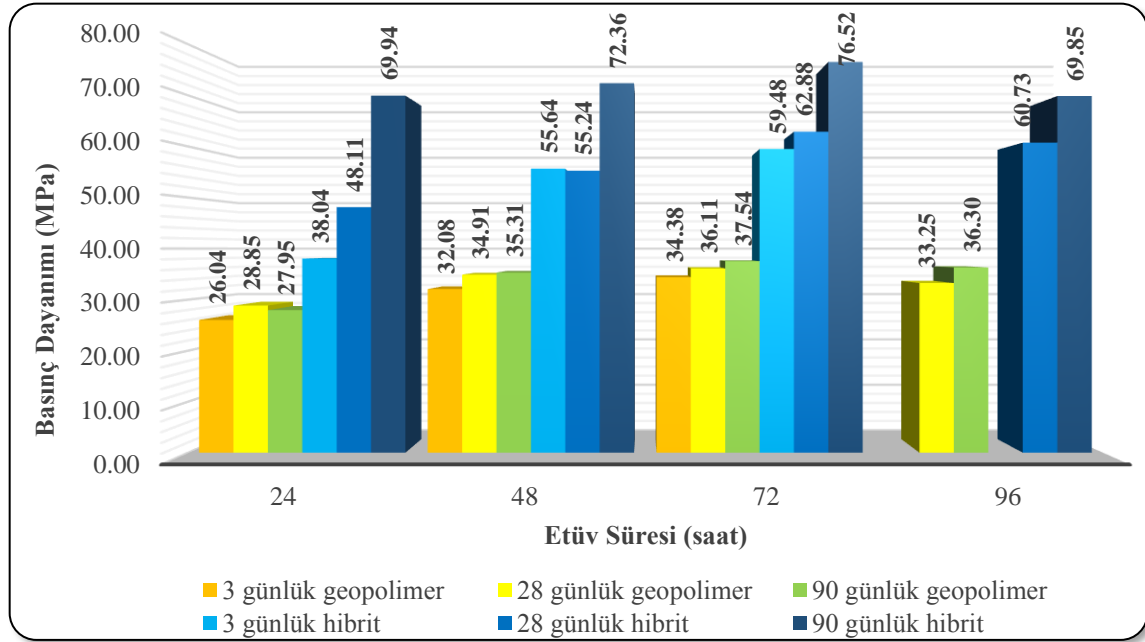
basınç dayanımları 72 saatlik etüv kürüne kadar artmış, 96 saatlik etüv küründe ise bir miktar düşmüştür. Portland çimentosu içermeyen serilerde ise 90 günlük numunelerin basınç dayanımı 48 saatlik etüv küründe en yüksek değere ulaşırken 72 saatlik etüv küründe bir miktar düşmüştür. 96 saatlik etüv küründe bir miktar daha artarak dalgalı bir ilerleme göstermiştir. Portland çimentosu içermeyen 28 günlük serilerde etüv süresi arttıkça basınç dayanımı da artış göstermiştir. Portland çimentosu içeren 90 günlük numunelerin etüv sürelerinin 24'ten 72 saate çıkması basınç dayanımını sadece %4.38 arttırmıştır. Bu değer 28 günlük numunelerde ise %8.10'dur. Portland çimentosu içermeyen 90 günlük numunelerin etüv sürelerinin 24'ten 48 saate çıkması basınç dayanımını %4.94 arttırmıştır. 28 günlük numunelerde etüv süresinin 24'ten 96 saate çıkması basınç dayanımını %29.64 arttırmıştır.



**Şekil 6.48** 60°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi

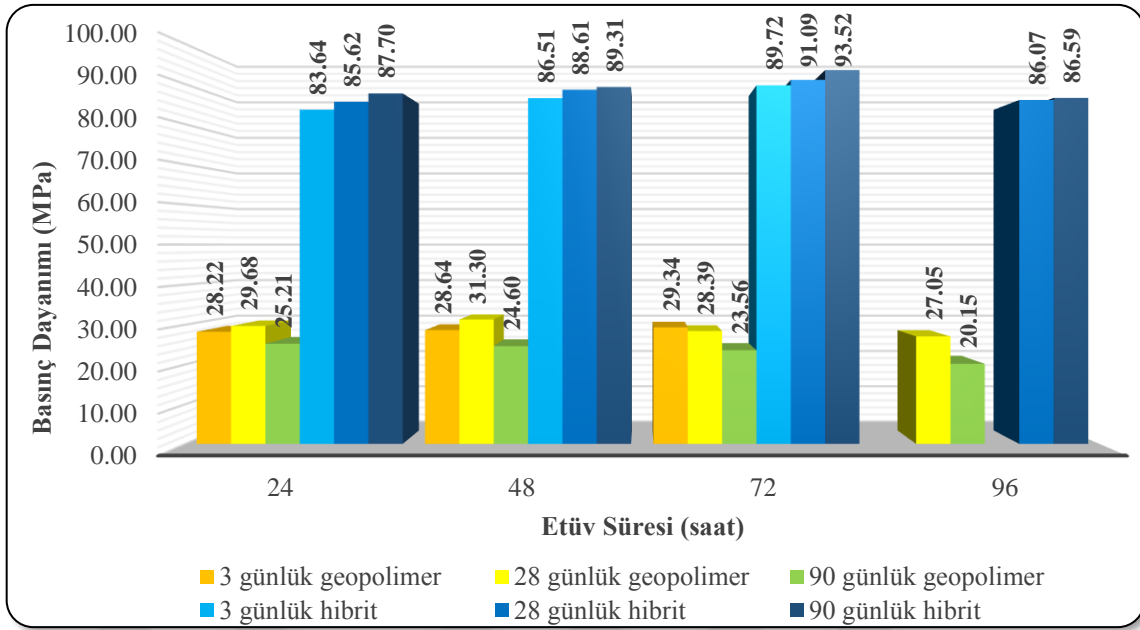
Şekil 6.48'te, 60°C etüv sıcaklığına maruz kalan pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamur numunelerin basınç dayanımına etüv sürelerinin etkisi verilmiştir. Portland çimentosu içeren hibrit bağlayıcıların en yüksek basınç dayanımı (73.65 MPa) 72 saatlik etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içermeyen numunelerde en yüksek basınç dayanımı (31.02 MPa) ise 96 saatlik etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren 90 günlük numunelerin basınç dayanımları 72 saatlik etüv kürüne

kadar artmış 96 saatlik etüv küründe ise bir miktar düşmüştür. Bu düşüş yaklaşık %4 civarındadır. Portland çimentosu içermeyen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları 96 saatlik etüv kürüne kadar artmıştır. 28 günlük numunelerin basınç dayanımları ise 72 saatlik etüv kürüne kadar artmış 96 saatlik etüv küründe ise 72 saatlik etüv kürüne göre %0.85 düşüş göstermiştir.



**Şekil 6.49** 80°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi

Şekil 6.49’da, 80°C etüv sıcaklığına maruz kalan pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamur numunelerin basınç dayanımına etüv sürelerinin etkisi verilmiştir. Portland çimentosu içeren hibrit bağlayıcıların en yüksek basınç dayanımı (76.52 MPa) 72 saat etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içermeyen serilerde ise en yüksek basınç dayanımı (37.54 MPa) yine aynı şekilde 72 saatlik etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren numunelerin basınç dayanımı 72 saatlik etüv kürüne kadar artarken 96 saatlik etüv küründe bir miktar düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş 28 günlük numunelerde %3.42 seviyelerinde iken 90 günlük numunelerde %8.72 olarak gerçekleşmiştir. Portland çimentosu içermeyen numunelerin etüvde bekleme süresinin 72 saatten 96 saate çıkması 90 günlük numunelerde basınç dayanımını %3.30 düşürmüştür. Bu düşüş 28 günlük numunelerde %7.92 seviyelerindedir. Portland çimentosu içeren ve içermeyen numunelerin en düşük basınç dayanımları sırasıyla 38.04 MPa ve 26.04 MPa’dır.

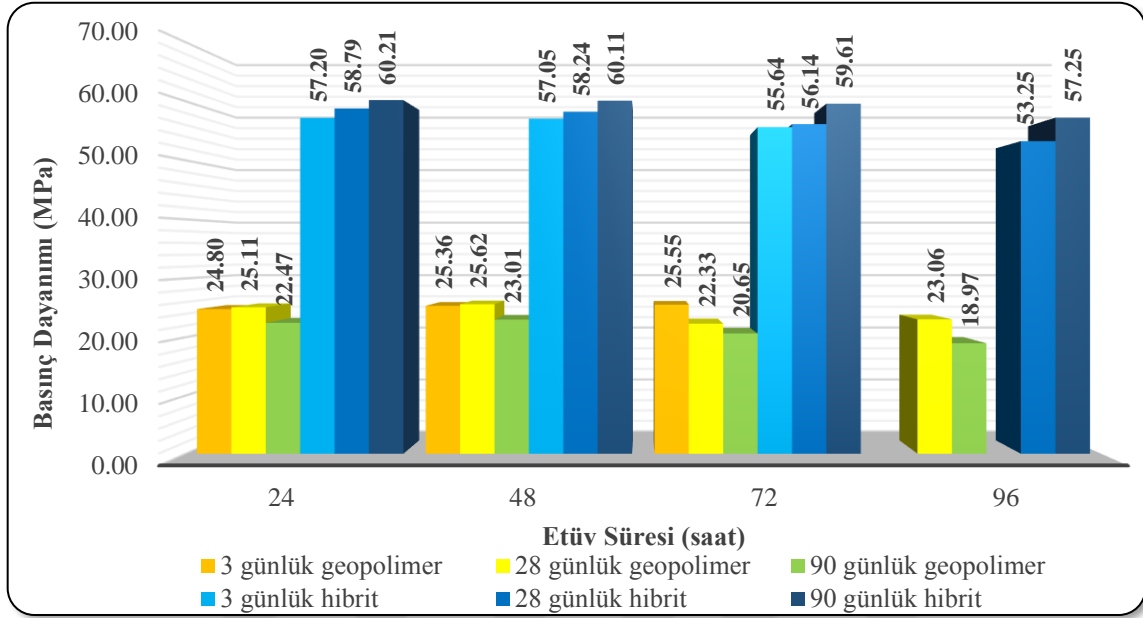


Şekil 6.50 100°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi

100°C etüv sıcaklığına maruz kalan pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların basınç dayanımlarına etüv sürelerinin etkisi Şekil 6.50'de verilmiştir. Portland çimentosu içeren hibrit bağlayıcılarda en yüksek basınç dayanımı (93.52 MPa) 72 saatlik etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilirken Portland çimentosu içermeyen serilerde en yüksek basınç dayanımı (31.30 MPa) 48 saat etüv küründe bekletilen 28 günlük numunelerde elde edilmiştir. Portland çimentosu içeren hibrit bağlayıcıların basınç dayanımları 72 saatlik etüv kürüne kadar artarken 96 saatlik etüv küründe bir miktar düşmüştür. Bu düşüş 28 günlük numunelerde %5.51 iken 90 günlük numunelerde %7.41'dir. Portland çimentosu içermeyen 90 günlük numunelerde basınç dayanımı etüv süresi arttıkça azalmaktadır. 28 günlük numunelerin basınç dayanımı 48 saatlik etüv süresinde en yüksek değerine ulaşırken 48 saatten sonraki etüv sürelerinde düşüş yaşanmıştır. 3 günlük numunelerin basınç dayanımı ise etüv süreleri arttıkça yaklaşık yatay bir seyir izlemiştir.

Şekil 6.51'de, 120°C etüv sıcaklığına maruz kalan pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamur numunelerin basınç dayanımına etüv sürelerinin etkisi verilmiştir. Portland çimentosu içeren hibrit bağlayıcılarda en yüksek basınç dayanımı (60.21 MPa) 24 saat etüv küründe bekletilen 90 günlük numunelerde elde edilirken Portland çimentosu içermeyen serilerde ise en yüksek basınç dayanımı (25.62 MPa) 48 saatlik etüv küründe bekletilen 28 günlük numunelerde elde edilmiştir. Etüv kürü

süresi arttıkça Portland çimentosu içeren numunelerin basınç dayanımı azalmıştır. Portland çimentosu içermeyen serilerde de etüv süresi arttıkça basınç dayanımı genel olarak düşmüştür.



**Şekil 6.51** 120°C sıcaklığındaki etüv kürünün süresinin pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımına etkisi

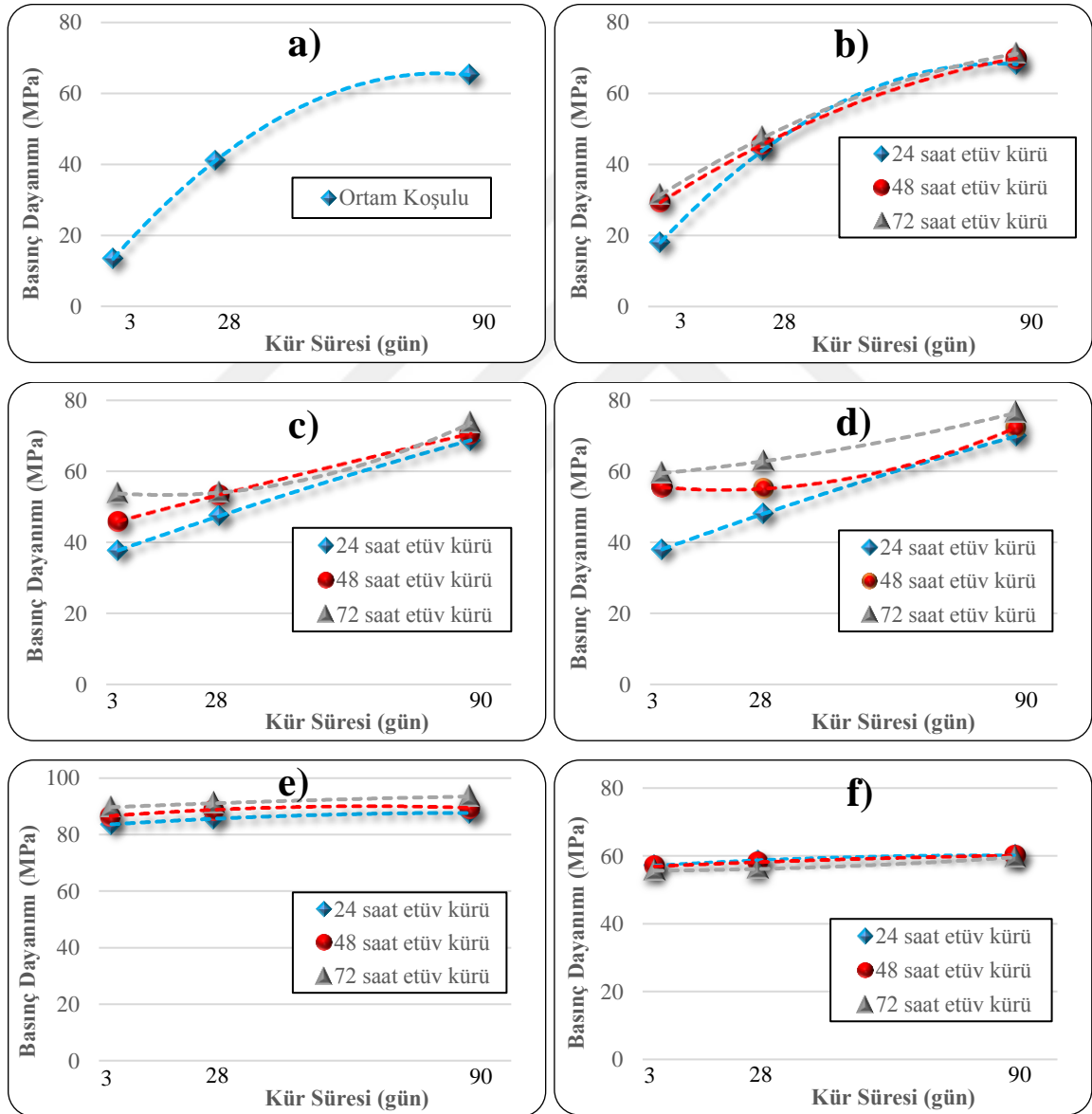
Yukarıdaki grafikler incelendiğinde, alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcılarda; 24, 48, 72 ve 96 saatlik etüvde bekleme süreleri sonucunda elde edilen basınç dayanımları arasında çok fazla fark olmadığı tespit edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımının çoğu 24 saatlik etüv süresinde elde edilebilmiştir. 120°C etüv sıcaklığının dışında en uygun etüvde bekleme süresi 72 saat olarak belirlenmiştir. 96 saatlik etüvde bekleme süresi basınç dayanımında bir miktar düşüşe sebep olmuştur.

Portland çimentosu içermeyen serilerde ise en yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği etüv kürü süreleri değişkenlik göstermiştir. En yüksek basınç dayanımı (37.54 MPa) 72 saatlik etüv küründe gerçekleşirken, etüv sıcaklıkları arttıkça etüv süreleri genel olarak basınç dayanımlarını olumsuz etkilemiştir.

Bu çalışmada üretilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların optimum etüv süresi 72 saat olarak belirlenmiştir. Görhan vd. [100], yüksek sıcaklıklarda kür edilen geopolimerlerin etüvde bekleme sürelerinin artmasının, malzeme yapısını zayıflattığını ve malzeme içerisindeki suyun bünyeyi terk etmesine sebep olduğundan çatlak oluşumuna neden olduğunu belirtmiştir.

### 6.2.2.3. Kür Sürelerinin Basınç Dayanımına Etkisi

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların ve pomza içeren geopolimerlerin kür sürelerinin basınç dayanımlarına etkisi sırasıyla Şekil 6.52 ve Şekil 6.53'te verilmiştir. Farklı etüv kürü sıcaklıkları (ortam koşulu, 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C ve 120°C) ve etüv sürelerine (24, 48 ve 72 saat) maruz kalmış 3, 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir.



Şekil 6.52 Farklı etüv sıcaklıklarına ve sürelerine maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların basınç dayanımına kür sürelerinin etkisi; a) 20°C, b) 40°C, c) 60°C, d) 80°C, e) 100°C, f) 120°C

Şekil 6.52’de, farklı sıcaklıklarda kür edilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların kür sürelerinin basınç dayanımlarına etkisi verilmiştir. Şekildeki grafikler incelendiğinde, etüv kürü sıcaklığı arttıkça 3 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark azalmaktadır. 100°C ve 120°C etüv sıcaklığında kür edilen numunelerin 3 ve 90 günlük basınç dayanımları yakın değerler elde etmiştir.

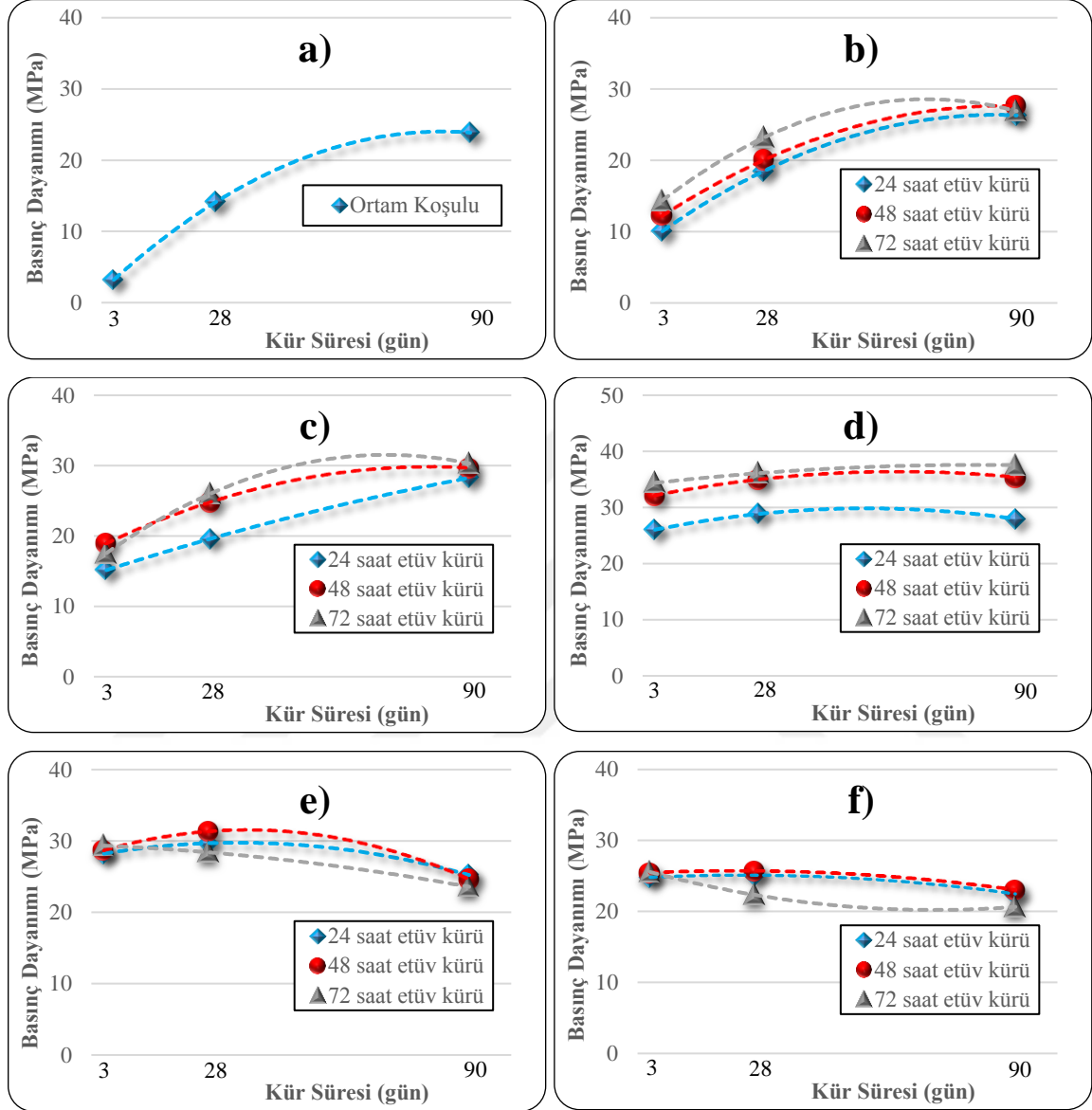
Tablo 6.10’da, alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren 3 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımları arasındaki fark verilmiştir. Ortam koşullarında kür edilen numunelerin basınç dayanımları arasındaki fark %386.64 iken bu değer 120°C etüv sıcaklığında 72 saat bekletilen numunelerde %7.14’tür. Etüv sıcaklıkları arttıkça 3 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımları arasındaki fark azalmaktadır. Etüv sıcaklığı yükseldikçe alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin basınç dayanımlarının büyük bir kısmı erken yaşlarda elde edilebilmiştir.

**Tablo 6.10** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit numunelerin 3 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark

Etüv sıcaklığı (°C)	Etüv süresi (saat)	Basınç dayanımındaki artış (%)
Ortam	-	386.64
40	24	278.22
	48	137.59
	72	126.53
60	24	82.12
	48	53.61
	72	36.90
80	24	83.86
	48	30.05
	72	28.65
100	24	4.85
	48	3.24
	72	4.24
120	24	5.26
	48	5.36
	72	7.14

Şekil 6.53’te, farklı sıcaklıklarda kür edilen pomza içeren geopolimerlerin kür sürelerinin basınç dayanımlarına etkisi verilmiştir. Şekildeki grafikler incelendiğinde, etüv kürü sıcaklığı arttıkça 3 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark azalmaktadır.

100°C ve 120°C etüv sıcaklığında kür edilen numunelerde ise 90 günlük basınç dayanımları 3 günlük basınç dayanımlarına göre bir miktar azalma göstermiştir.



**Şekil 6.53** Farklı etüv sıcaklıklarına ve sürelerine maruz kalmış pomza içeren geopolimerlerin basınç dayanımına kür sürelerinin etkisi; a) 20°C, b) 40°C, c) 60°C, d) 80°C, e) 100°C, f) 120°C

Tablo 6.11’de, pomza içeren geopolimerlerin 3 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark verilmiştir. En yüksek basınç dayanım artışı ortam koşullarında kür edilen numunelerde elde edilirken en düşük basınç dayanım artışı 80°C etüv sıcaklığında 24 saat bekletilen numunelerde elde edilmiştir. Ortam koşullarında kür edilen numunelerin 90 günlük basınç dayanımı 3 günlük basınç dayanımına göre %643.61 artış göstermiştir. 80°C etüv sıcaklığına kadar basınç dayanımları artarken 100°C ve 120°C etüv sıcaklığında 90

günlük basınç dayanımı 3 günlük basınç dayanımına göre azalma göstermiştir. 120°C etüv sıcaklığında 72 saat bekletilen numunelerin 90 günlük basınç dayanımı 3 günlük basınç dayanımına göre %19.18 azalmıştır.

**Tablo 6.11** Pomza içeren geopolimer numunelerin 3 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark

Etüv sıcaklığı (°C)	Etüv süresi (saat)	Basınç dayanımındaki artış (%)
Ortam	-	643.61
	24	161.27
40	48	125.39
	72	87.40
60	24	86.60
	48	56.58
	72	72.61
80	24	7.33
	48	10.07
	72	9.19
100	24	-10.67
	48	-14.11
	72	-19.70
120	24	-9.40
	48	-9.27
	72	-19.18

Pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit malzemelerin farklı etüv sıcaklıkları ve farklı etüv süreleri üzerinden değerlendirilen 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. 3 ve 90 günlük Portland çimentosu içeren numunelerin basınç dayanımları arasındaki fark etüv sıcaklıkları arttıkça azalmaktadır. Portland çimentosu içermeyen numuneler de ise etüv sıcaklıkları yükseldikçe 90 günlük numunelerin basınç dayanımı, 3 günlük numunelerin basınç dayanımından düşük çıkmıştır. Portland çimentosu içeren numunelerin kür sürelerinin basınç dayanımlarına etkisi Salman vd.'nin [81] yürüttüğü çalışmayla benzerlik göstermektedir. Salman vd. [81], yüksek kalsiyum içeriğine sahip çelik cürufunu sodyum silikat ve potasyum hidroksitle aktive ettikleri çalışmalarında kür sıcaklıklarının (60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C ve 110°C) ve sürelerinin (3, 7, 28 ve 90 gün) etkilerini incelemişlerdir. 3 günlük kür süresinden 90 günlük kür süresine basınç dayanımları artış göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda 3 günlük ve 90

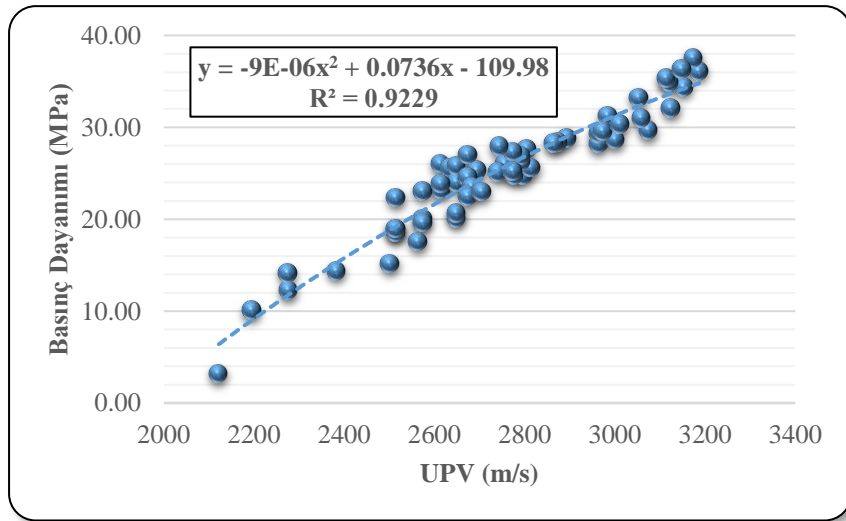
günlük basınç dayanımları arasında belirgin bir artış gözlemlenirken yüksek sıcaklıklarda 3 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasındaki fark azalmıştır.

Yüksek sıcaklıklarda (100°C ve 120°C) kür edilen Portland çimentosu içermeyen numunelerin 90 günlük basınç dayanımının 3 günlük basınç dayanımından düşük çıkması, ilerleyen yaşlardaki kuruma büzülmesinden kaynaklanmaktadır. Bu negatif fark Portland çimentosu içeren numunelerde gözlenmemiştir.

#### 6.2.2.4. Basınç Dayanımları ile UPV Değerleri Arasındaki İlişki

Pomza içeren geopolimerler ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların UPV değerleri ile basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 6.54 ve Şekil 6.55'te verilmiştir.

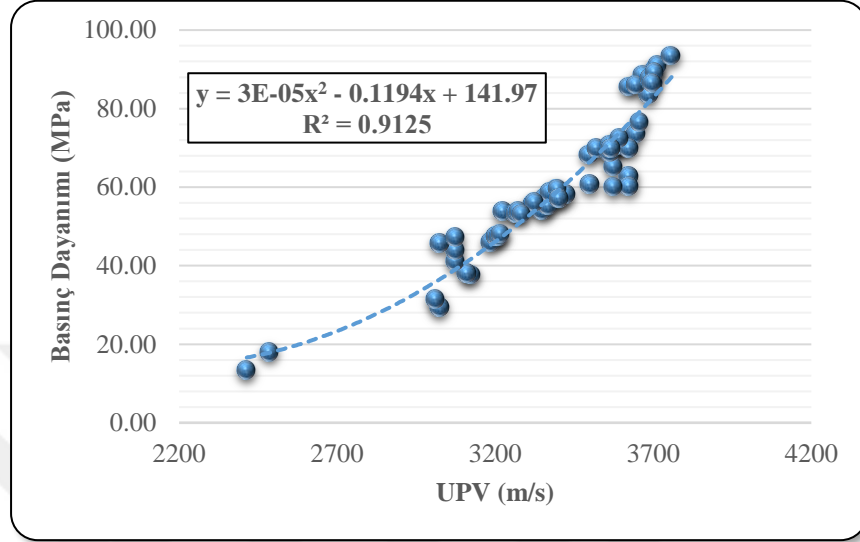
Şekil 6.54, pomza içeren geopolimerlerin UPV değerleri ile basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi vermektedir. Genel olarak UPV değerleri arttıkça basınç dayanımları da artmıştır. UPV değerleri ile basınç dayanımları arasında ikinci dereceden bir ilişki olup iyi bir korelasyon ( $R^2=0.9229$ ) mevcuttur. Numunelerin basınç dayanımları, UPV değerlerinden  $y=-9E-06x^2+0.0736x-109.98$  denklemi ile hesaplanabilmektedir.



Şekil 6.54 Farklı kür koşullarına maruz kalmış pomza içeren geopolimerlerin basınç dayanımı ve UPV değerleri arasındaki ilişki

Şekil 6.55'te alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların UPV değerleri ile basınç dayanımları arasındaki ilişki verilmiştir. Genel olarak UPV değerleri arttıkça basınç dayanımları da artmıştır. Grafiğin incelenmesinden UPV değerleri ile basınç

dayanımı arasında pozitif bir ilişki olduğu ve  $R^2=0.9125$  olmasından ötürü ilişkinin güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların basınç dayanımını UPV değerlerinden  $y=3E-05x^2-0.1194x+141.97$  denklemi ile tahmin etmek mümkündür.



**Şekil 6.55** Farklı kür koşullarına maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit malzemelerin basınç dayanımı ve UPV değerleri arasındaki ilişki

### 6.3. Alkalilerle Aktive Edilmiş Pomza İçeren Hibrit Harçların Deney Sonuçları

Tez çalışmasının ilk kısmında alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin en uygun malzeme oranları belirlenirken ikinci aşamasında ise en uygun kür koşulları incelenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda, harç üretiminde kullanılacak alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların en uygun malzeme miktarları ve kür koşulları Tablo 6.12’de verilmiştir.

**Tablo 6.12** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçlarda kullanılacak malzeme oranları ve kür koşulları

<b>Malzeme oranları</b>	
Alkali Çözelti/bağlayıcı=	0.47
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /KOH=	3
Portland çimentosu miktarı=	%20
<b>Kür koşulları</b>	
Etüv sıcaklığı=	100°C
Etüv süresi=	72 saat

Tablo 6.12’de verilen malzeme miktarları ve etüv koşulları ile harç karışım hesabı yapılmış (Tablo 5.6) ve 28 günlük numunelerin öncelikle en uygun bağlayıcı dozajı incelenmiş daha sonra ise en yüksek basınç dayanımını veren bağlayıcı dozajına sahip harç serisinin yüksek sıcaklıklara karşı direnci araştırılmıştır.

### 6.3.1. Bağlayıcı Dozajının Etkisi

Bağlayıcı miktarının alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçlar üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için 4 farklı bağlayıcı dozajı ( $350 \text{ kg/m}^3$ ,  $450 \text{ kg/m}^3$ ,  $550 \text{ kg/m}^3$  ve  $650 \text{ kg/m}^3$ ) belirlenmiştir. Bağlayıcı dozajları belirlendikten sonra Tablo 5.6’deki karışım oranlarına göre harç üretimine geçilmiş (Şekil 6.56) ve  $40 \times 40 \times 160$  mm ebatlarında kalıplar kullanılarak dökülen numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim ağırlığı, toplam su emmesi ve poroziteleri deneyler üzerinden tespit edilmiştir.



Şekil 6.56 Taze haldeki alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harç karışımı

#### 6.3.1.1. Bağlayıcı Dozajının Eğilme ve Basınç Dayanımına Etkisi

$350 \text{ kg/m}^3$ ,  $450 \text{ kg/m}^3$ ,  $550 \text{ kg/m}^3$  ve  $650 \text{ kg/m}^3$  dozajlarında hazırlanan  $40 \times 40 \times 160$  mm ebatlarındaki 28 günlük harç numunelerin önce eğilme dayanımları daha sonra ikiye ayrılan her bir parça üzerinden basınç dayanımları incelenmiştir. Şekil 6.57’de bağlayıcı dozajı  $650 \text{ kg/m}^3$  olan harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımı deneyinden sonraki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.57 Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların eğilme ve basınç dayanımı deneyleri

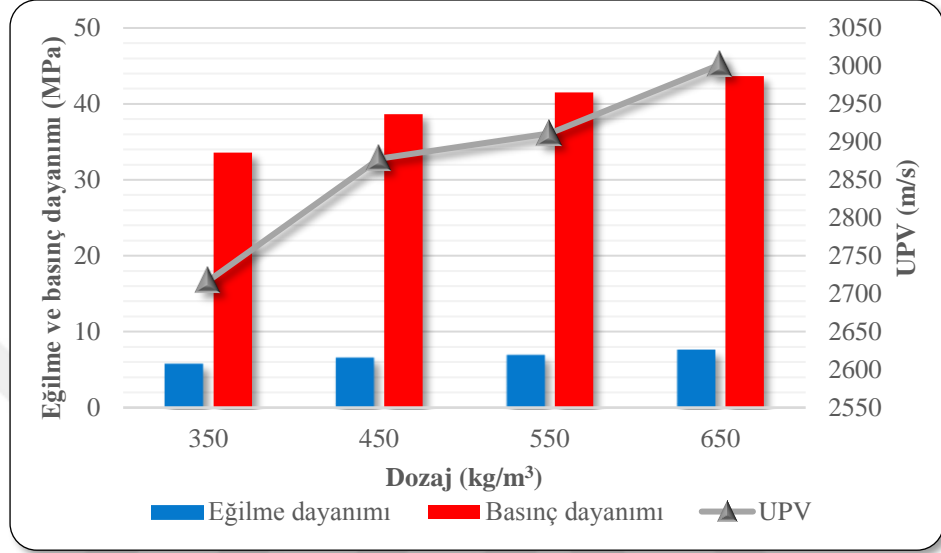
Tablo 6.13'te, alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların UPV değerleri, eğilme dayanımları ve basınç dayanımları verilmiştir.

**Tablo 6.13** Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve UPV değerleri

Bağlayıcı Dozajı (kg/m <sup>3</sup> )	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	UPV (m/s)
350	5.73	33.60	2717
450	6.51	38.65	2878
550	6.87	41.50	2911
650	7.54	43.66	3002

Tablo 6.13 ve Şekil 6.58 incelendiğinde, bağlayıcı dozajı arttıkça eğilme dayanımları, basınç dayanımlar ve UPV değerleri artış göstermiştir. En yüksek eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve UPV değeri (sırasıyla 7.54 MPa, 43.66 MPa ve 3002 m/s), bağlayıcı dozajı 650 kg/m<sup>3</sup> olan harçlarda elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve UPV

değeri ise (sırasıyla 7.54 MPa, 43.66 MPa ve 3002 m/s), bağlayıcı dozajı 350 kg/m<sup>3</sup> olan harçlarda elde edilmiştir. Bağlayıcı dozajının 350 kg/m<sup>3</sup>'ten 650 kg/m<sup>3</sup>'e çıkması ile eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve UPV değerlerindeki artış sırasıyla %31.59, %29.94 ve %10.49'dur.



Şekil 6.58 Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve UPV değerleri

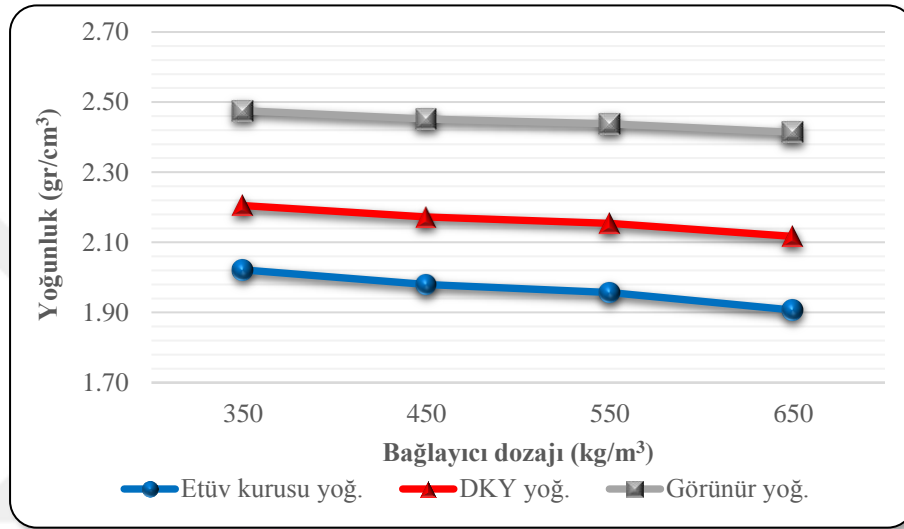
### 6.3.1.2. Bağlayıcı Dozajının Yoğunluk, Toplam Su Emme ve Porozite Değerlerine Etkisi

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların etüv kuru, DKY ve görünür yoğunluklarının değerleri Tablo 6.14'te, bağlayıcı dozajı ile değişimleri ise Şekil 6.59'da verilmiştir.

Tablo 6.14 Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerleri

Seriler	Etüv kuru yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	DKY yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Görünür yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Toplam su emme (%)	Porozite (%)
H350	2.02	2.20	2.48	10.02	19.82
H450	1.98	2.17	2.45	9.66	19.73
H550	1.96	2.15	2.44	9.68	19.11
H650	1.91	2.12	2.41	9.31	18.34

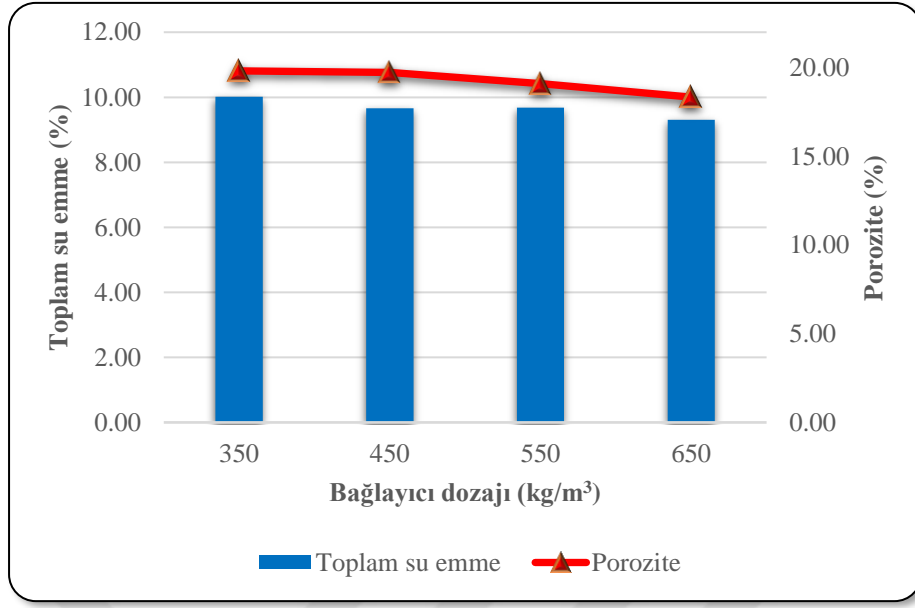
Bağlayıcı dozajı arttıkça yoğunluk değerlerinde azalmalar tespit edilse de yoğunluk değerleri genel olarak yatay bir seyir izlemiştir. Bağlayıcı dozajı 350 kg/m<sup>3</sup> olan harçlarda etüv kurusu, DKY ve görünür yoğunluk değerleri sırasıyla 2.02, 2.20 ve 2.48 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Bağlayıcı dozajı 650 kg/m<sup>3</sup> olan harç numunelerin etüv kurusu, DKY ve görünür yoğunlukları ise sırasıyla 1.91, 2.12 ve 2.41 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Bağlayıcı dozajının 350 kg/m<sup>3</sup>'ten 650 kg/m<sup>3</sup>'e çıkması ile etüv kurusu yoğunluk %5.67, DKY yoğunluk %3.99 ve görünür yoğunluk %2.49 azalmıştır.



**Şekil 6.59** Bağlayıcı dozajının alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların yoğunluğuna etkisi

Bağlayıcı dozajı düştükçe yoğunlukların artması, birim ağırlığı bağlayıcı malzemenin daha yüksek olan agregalardan kaynaklanmaktadır. Bağlayıcı miktarı düştükçe birim hacimde yerini alan agregalar yoğunlukları az da olsa yükseltmiştir. Wazien vd. [171], uçucu kül ile ürettikleri harçlarda kullanılan kumun yoğunluğunun bağlayıcı malzemenin yoğunluğundan yüksek olmasından ötürü, bağlayıcı/kum oranının yükselmesi ile harç numunelerin yoğunluklarının düştüğünü tespit etmiştir.

Şekil 6.60'ta, alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren harçların bağlayıcı dozajının toplam su emme ve poroziteye etkisi verilmiştir. Harç numuneler içerisindeki bağlayıcı dozajının artması ile toplam su emme ve porozite değerleri düşmüştür. Bağlayıcı dozajının 350 kg/m<sup>3</sup>'ten 650 kg/m<sup>3</sup>'e yükselmesi ile toplam su emme ve porozite değerleri yaklaşık %7 azalmıştır. Aynı zamanda toplam su emme ve porozite değerleri düştükçe dayanım değerleri yükselmiştir.

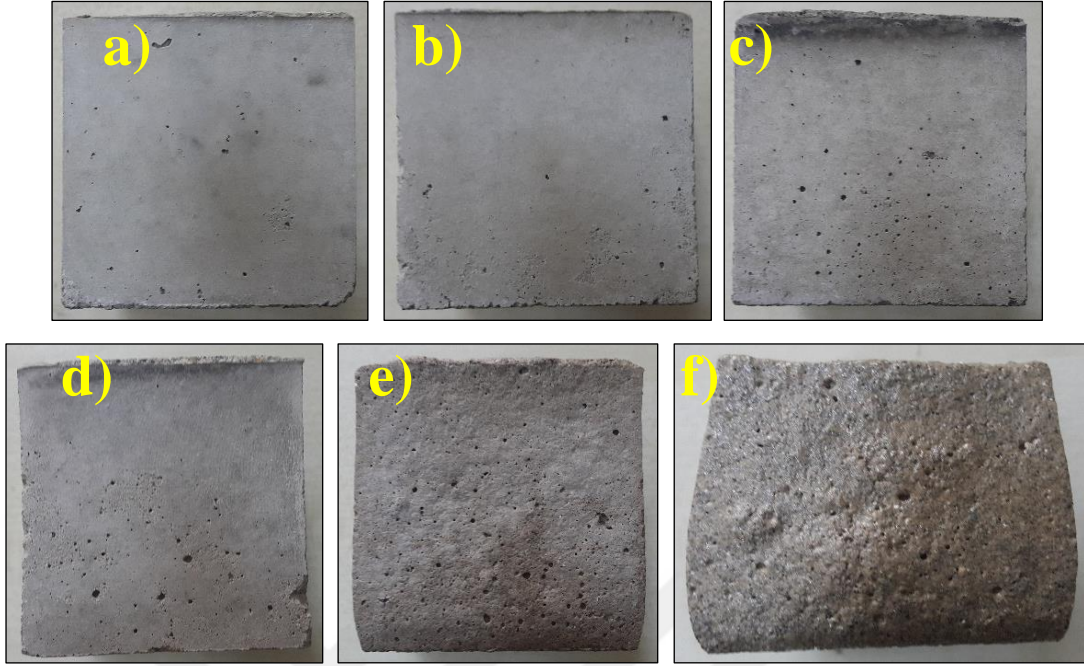


**Şekil 6.60** Bağlayıcı dozajının alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların toplam su emme ve porozitesine etkisi

### 6.3.2. Yüksek Sıcaklık Direnci

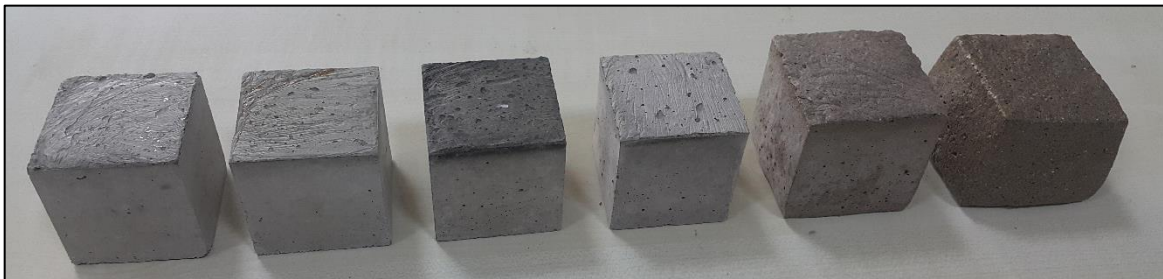
Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçlarda en yüksek basınç dayanımı veren bağlayıcı dozajı 650 kg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Malzeme oranları, etüv koşulları ve bağlayıcı dozajı belirlendikten sonra harç karışımlar hazırlanmış ve 50×50×50 mm ebatlarındaki kalıplara dökülmüştür. 28 gün sonra harç numuneler yüksek sıcaklık fırınında Tablo 5.7’de belirlenen sürelerde bekletilmiştir. 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklarına maruz kalan harç numunelerin; UPV, basınç dayanımı ve ağırlık kayıpları deneyler sonucunda tespit edilmiş ve mikro yapıları incelenmiştir.

Hedef sıcaklıkta 1 saat kalacak şekilde yüksek sıcaklıklara maruz kalan alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harç numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 6.61’de verilmiştir. 600°C’ye kadar numune yüzeylerinde çok fazla değişiklikler gözlenmezken 800°C ve 1000°C sıcaklıklarda numunelerin renginin griden açık kahverengine dönüştüğü görülmüştür. Hiçbir numunede yüzeyde çatlaklara rastlanmamıştır. 1000°C sıcaklıkta numunenin yüzeyi camsı ve parlaktır.



**Şekil 6.61** Yüksek sıcaklığa maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların yüzey görüntüleri; a) etüv kuru, b) 200°C, c) 400°C, d) 600°C, e) 800°C ve f) 1000°C

Şekil 6.62’de yüksek sıcaklıklara maruz kalmış harç numunelerin boyut değişimleri görülmektedir. 600°C sıcaklığa kadar boyutlarda herhangi bir değişim gözlenmezken 800°C ve 1000°C sıcaklıkta boyutların bir miktar arttığı görülmüştür. Yüksek sıcaklıklar, malzeme içerisindeki suyu buharlaştırırken gözenekler oluşmuş ve bir miktar hacimsel büyümeye yol açmıştır.



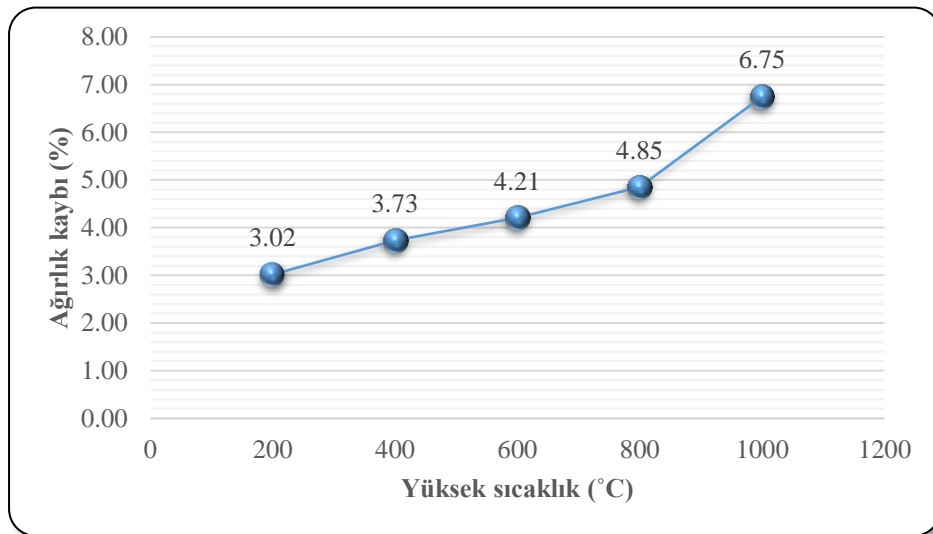
**Şekil 6.62** Yüksek sıcaklığa maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların boyut değişimi (soldan sağa; etüv kuru, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C)

Tablo 6.15 ve Şekil 6.63'te yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş hibrit harçların ağırlık kayıpları verilmiştir.

**Tablo 6.15** Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların ağırlık kayıpları

Seri	Yüksek Sıcaklık (°C)	Ağırlık kaybı (%)
H-200	200°C	3.02
H-400	400°C	3.73
H-600	600°C	4.21
H-800	800°C	4.85
H-1000	1000°C	6.75

Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların ağırlık kayıpları yüksek sıcaklıklara çıktıkça artmaktadır. En yüksek ağırlık kaybı (%6.75) 1000°C sıcaklıkta gerçekleşirken düşük ağırlık kaybı (%3.02) 200°C sıcaklıkta meydana gelmiştir. 800°C sıcaklıktan sonra ağırlık kaybında hızlı bir değişim gerçekleşmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki ağırlık kaybı malzemenin dehidratasyona uğramasından kaynaklanmaktadır [172]. Bu çalışmada yüksek sıcaklıklardaki ağırlık kayıpları %3.02 ve %6.75 arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklardan sonra ağırlık kayıplarının az olması; çatlak, pullanma ve dökülme olmamasından kaynaklanmaktadır. Değirmenci [173] yaptığı çalışmasında farklı puzolanlar içeren geopolimerlerin yüksek sıcaklık direncini incelemiştir. Yazar, yüksek sıcaklıklara çıktıkça ağırlık kayıplarının arttığını ve ağırlık kaybının %1 ile %7.5 arasında değiştiğini belirtmiştir.



**Şekil 6.63** Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların ağırlık kayıpları

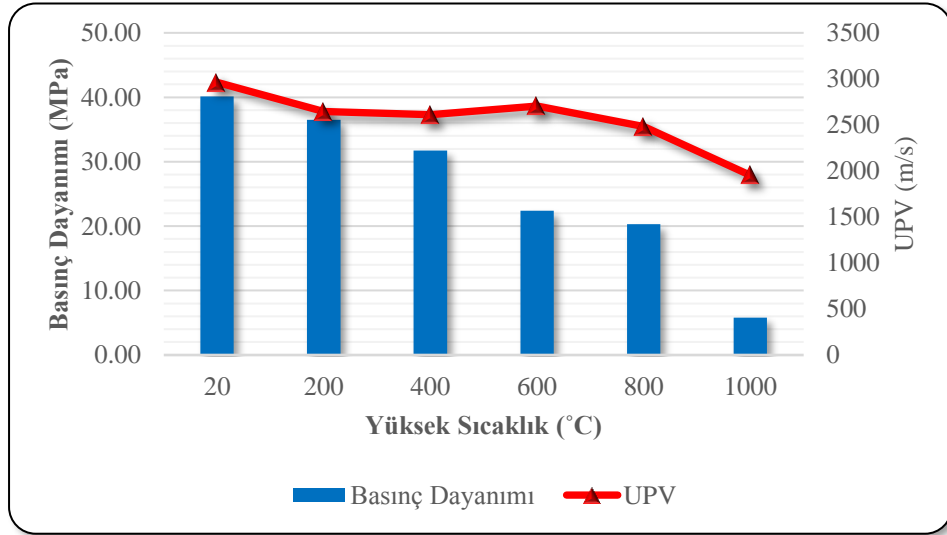
### 6.3.2.1. Yüksek Sıcaklıkların UPV ve Basınç Dayanımına Etkisi

200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklığa maruz kalan alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların UPV değerleri ve basınç dayanımları Tablo 6.16 ve Şekil 6.64'te verilmiştir.

**Tablo 6.16** Yüksek sıcaklara maruz kalmış harçların UPV değerleri ve basınç dayanımları

Seri	UPV (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)
H-20	2962	40.11
H-200	2646	36.48
H-400	2545	31.76
H-600	2755	22.42
H-800	2482	20.33
H-1000	1952	5.81

Şekil 6.64 incelendiğinde yüksek sıcaklık derecesi arttıkça basınç dayanımları ve UPV değerleri düşmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmayan alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların ortalama basınç dayanımı 40.11 MPa iken, 1000°C sıcaklıkta bekletilen numunelerin 5.81 MPa'dır.



**Şekil 6.64** Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış harçların UPV değerleri ve basınç dayanımları

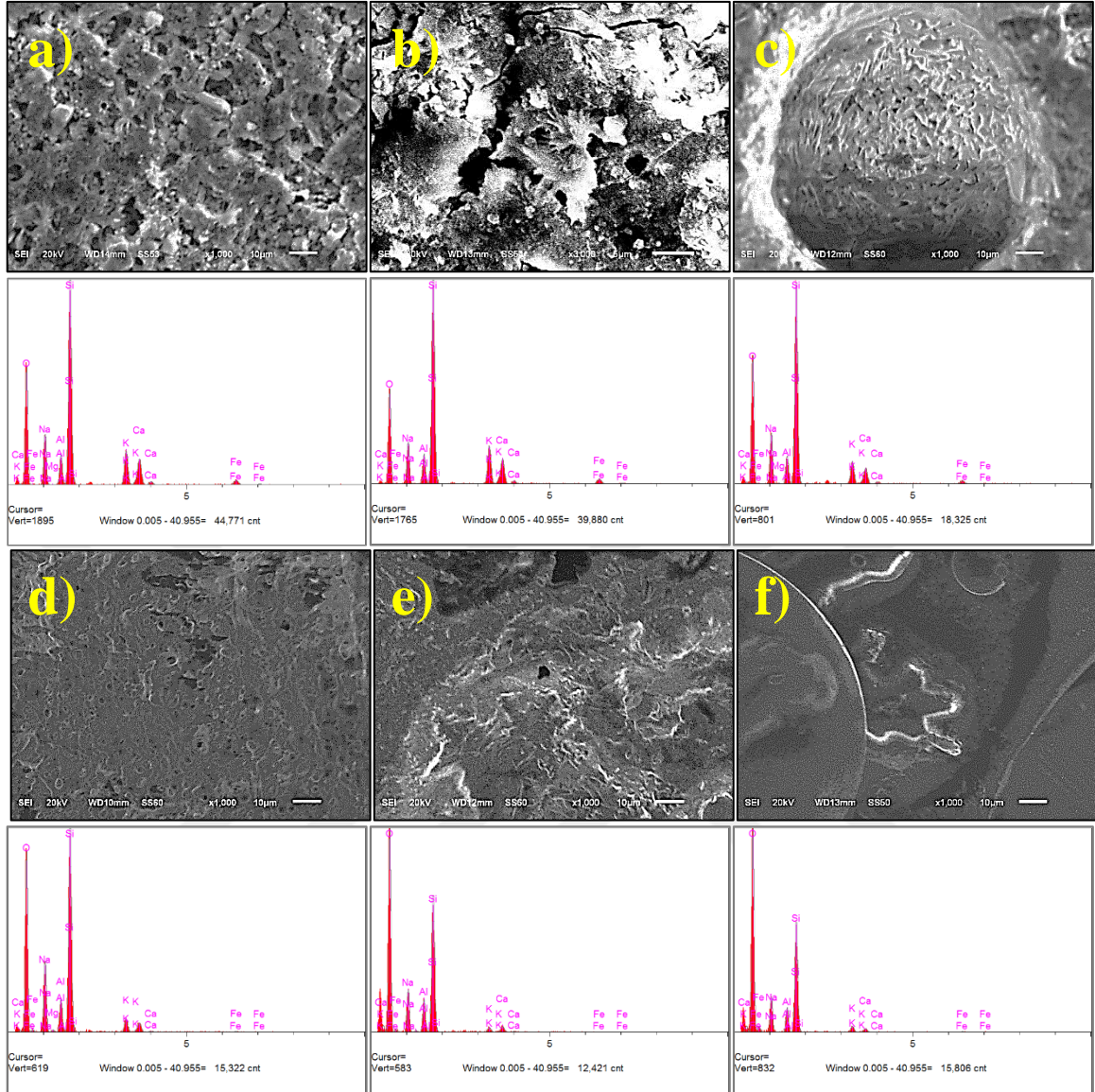
Yüksek sıcaklık fırınına girmeyen numunelerin ortalama UPV değeri 2962 m/s'dir. Sıcaklık yükseldikçe UPV değerleri düşmekte ve 1000°C sıcaklıkta bu değer 1952 m/s olmaktadır. 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıktaki dayanım kayıpları sırasıyla

%9.06, %20.83, %44.11, %49.32 ve %85.52'dir. Yine bu sıcaklıklardaki UPV değerlerindeki kayıplar ise sırasıyla %10.67, %14.08, %6.99, %16.21 ve %34.14'tür. Kısacası sıcaklığın 20°C'den 1000°C'ye çıkması basınç dayanımını %9.06 ile %85.52 aralığında düşürürken, UPV değerlerini %10.67 ile %34.14 aralığında azaltmıştır. Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harç numuneler 800°C sıcaklığa kadar dayanımının yaklaşık %50'sini kaybetmiştir. Neville [174], silisli agregalarla üretilen betonların basınç dayanımının 600°C sıcaklıkta yaklaşık %50, 800°C sıcaklıkta ise yaklaşık %80 azaldığını belirtmiştir. Doğal ve yapay puzolanlar ile üretilen geopolimerlerin yüksek sıcaklık dirençleri incelenmiş ve 600°C sıcaklıkta dayanımın büyük ölçüde düştüğü belirtilmiştir [173]. Bernal vd. [175], yüksek fırın cürufunu çeşitli aktivatörlerle aktive edip yüksek sıcaklıklar karşısındaki değişimlerini incelemişlerdir. Sodyum silikat ile aktifleştirdikleri yüksek fırın cürufu hamurların 800°C ve 1000°C sıcaklıkta basınç dayanımları elde edilememiştir.

#### **6.3.2.2. Yüksek Sıcaklıkların Mikro Yapıya Etkisi**

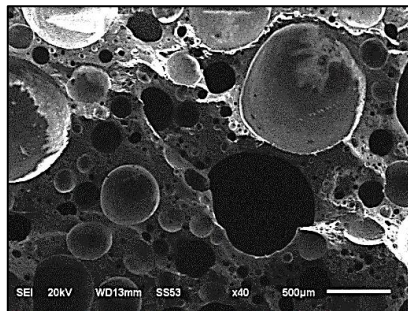
Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların mikro yapılarının incelenebilmesi için SEM görüntüleri çekilmiş ve bağ yapıları hakkında bilgi edinmek için FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. SEM/EDX ile malzeme içerisindeki elementlerin oranları hakkında bilgi edinilmiştir. Bu amaçla yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numuneler ile 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları her sıcaklık derecesi için Şekil 6.65'te verilmiştir.

Numuneler, 800°C'de dayanımın yaklaşık %50'sini 1000°C'de ise yaklaşık %85'nin kaybetmiştir. Suyun daha fazla buharlaşması hidrasyon ürünlerinin ayrışmasına ve malzemenin iç yapısının bozulmasına neden olabilir. SEM görüntüleri, yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerde 20°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelere göre daha az yapının olduğunu göstermektedir. Bu durum, iç yapıların parçalandığını ve bunun da malzemenin dayanım kaybına yol açan hidrasyon ürünlerinin ayrışmasının bir nedeni olabileceğini göstermektedir [176].



**Şekil 6.65** Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların SEM görüntüsü (x1000) ve EDX analizi; a) 20°C, b) 200°C, c) 400°C, d) 600°C, e) 800°C ve f) 1000°C

Yüksek sıcaklıklarda (1000°C) suyun buharlaşması ile malzeme bünyesini terk etmesi alkalilerle aktive edilmiş malzeme yapısında küçük gözenekler oluşumuna sebep olmuştur (Şekil 6.66).



**Şekil 6.66** 1000°C sıcaklığa maruz kalmış numunenin SEM görüntüsü (x40)

Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, alkalilerle aktive edilmiş malzeme yapısındaki kalan sulardan dışarı atılan buhar ile bu gözenekler genişlemiş ve daha sonra çatlaklar, görünüş ve dış bozulma olmaksızın gelişmiştir. Bu nedenle, basınç dayanımı büyük ölçüde azaltılmıştır [83]. Geopolimerlerin ve geopolimer betonların yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybına uğramalarının sebeplerinden biri de geopolimer matrisi ve agrega bileşenleri arasındaki termal uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır [172].

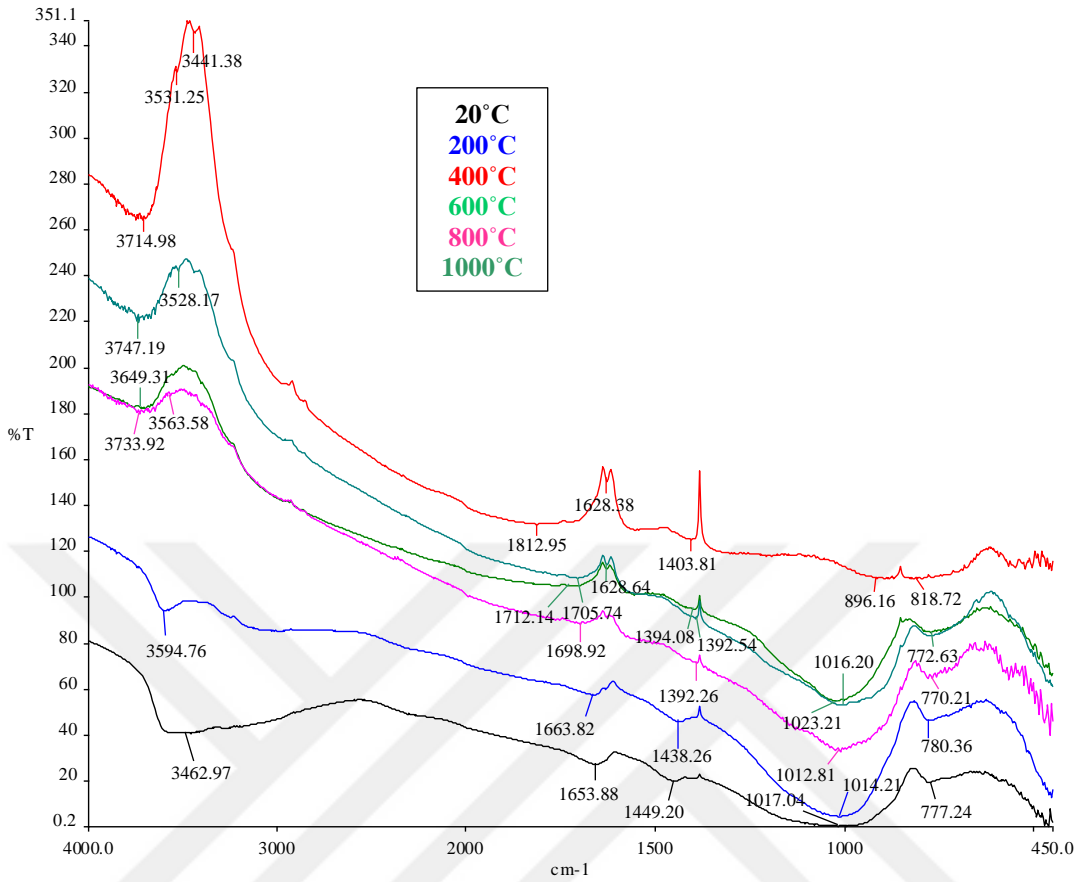
Numunelerin 1000°C'de ısıtıldıktan sonraki SEM görüntüleri ile (Şekil 6.65 f ve Şekil 6.66) yüzey görüntüleri (Şekil 6.61 f), yoğun bir matrisin camsı yüzeye sahip sünger benzeri gözenekli bir yapıya dönüşümünü desteklemektedir [177].

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit malzemelerin EDX analiz sonuçları Tablo 6.17'de verilmiştir. Bu tabloda, yüksek sıcaklıklar sonrasında malzeme içyapılarındaki elementlerin atomik oranları verilmiştir. Sıcaklık derecesi 20°C'den 1000°C'ye çıktıkça Al oranı pek fazla değişikliğe uğramazken Si, Ca ve K atomik oranları azalmaktadır. Silisyum miktarı %19.27'den %11.95'e, kalsiyum miktarı %2.35'ten %0.33'e, potasyum miktarı ise %2.91'den %0.56'ya düşmüştür. Sıcaklık derecesi yükseldikçe EDX verileri Si/Al ve Si/Na oranlarının düştüğünü göstermektedir. 20°C sıcaklığa maruz kalan malzemenin Si/Al ve Si/Na oranları sırasıyla 6.31 ve 2.13 iken 1000°C sıcaklığa maruz kalan malzemenin Si/Al ve Si/Na oranları sırasıyla 4.01 ve 1.52'dir. 20°C sıcaklıktan 1000°C sıcaklığa çıkıldığında Si/K oranı ise yükselmektedir. En düşük Si/K oranı (4.76) 20°C sıcaklıkta elde edilirken en yüksek Si/K oranı (33.28) 800°C sıcaklıkta elde edilmiştir. Aynı şekilde Si/Ca oranı da yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça artmaktadır. En düşük Si/Ca oranı (8.21) 20°C sıcaklıkta meydana gelirken en yüksek Si/Ca oranı (35.81) 1000°C sıcaklıkta elde edilmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş malzemeler alüminosilikat yapılarına sahiptirler. Yüksek sıcaklık derecesi yükseldikçe Si/Al oranı azalmaktadır. Si/Al oranı yüksek olan yüksek sıcaklık ortamına maruz kalmamış numunelerin dayanımları, Si/Al oranı daha düşük olan yüksek sıcaklıklara maruz kalmış malzemelerin dayanımlarından daha yüksektir. He vd. [178] yaptıkları çalışmada, Si/Al oranı yüksek olan geopolimer numunelerin Si/Al oranı düşük olan geopolimer numunelerden daha fazla dayanıma sahip olduğunu tespit etmiştir. Kalsiyumun C-S-H bağ yapısını oluşturan yapı taşlarından biri olduğundan ötürü hibrit sistemlerde dayanıma büyük etkisi vardır. Yüksek sıcaklık derecesi arttıkça kalsiyum miktarları azalmış ve dayanımlar düşmüştür.

**Tablo 6.17** Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış numunelerin EDX analizi sonuçları

Sıcaklık	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)	Sıcaklık	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
20°C	O	48.22	62.68	600°C	O	53.72	66.18
	Na	9.98	9.03		Na	12.85	11.02
	Mg	0.07	0.06		Mg	0.38	0.31
	Al	3.96	3.05		Al	4.31	3.15
	Si	26.02	19.27		Si	24.92	17.49
	K	5.47	2.91		K	2.08	1.05
	Ca	4.52	2.35		Ca	1.50	0.74
	Fe	1.77	0.66		Fe	0.22	0.08
200°C	O	45.17	60.12	800°C	O	62.46	73.56
	Na	8.80	8.15		Na	9.86	8.08
	Mg	0.06	0.05		Mg	0.32	0.25
	Al	4.19	3.31		Al	5.07	3.54
	Si	28.21	21.39		Si	20.32	13.63
	K	6.74	3.67		K	0.85	0.41
	Ca	4.73	2.51		Ca	1.13	0.53
	Fe	2.09	0.80		Fe	0.00	0.00
400°C	O	50.10	63.88	1000°C	O	65.55	76.12
	Na	10.63	9.43		Na	9.71	7.85
	Mg	0.12	0.10		Mg	0.11	0.08
	Al	3.96	2.99		Al	4.33	2.98
	Si	26.88	19.53		Si	18.07	11.95
	K	3.96	2.07		K	1.18	0.56
	Ca	2.90	1.48		Ca	0.72	0.33
	Fe	1.43	0.52		Fe	0.34	0.11

Kızılötesi spektroskopisi (FTIR), molekül düzeyde materyallerdeki farklı kimyasal bağların tanımlanmasını sağlar. Şekil 6.67’de, yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların kızılötesi spektroskopileri verilmiştir. Yüksek sıcaklıkların etkisinde kalan numunelerin FTIR analiz sonuçlarına göre; birinci çukur değerleri  $770.21 \text{ cm}^{-1}$  ile  $818.72 \text{ cm}^{-1}$  arasında, ikinci çukur değerleri  $1016.20 \text{ cm}^{-1}$  ile  $1023.21 \text{ cm}^{-1}$  arasında, üçüncü çukur değerleri  $1392.26 \text{ cm}^{-1}$  ile  $1449.20 \text{ cm}^{-1}$  arasında, dördüncü çukur değerleri  $1628.64 \text{ cm}^{-1}$  ile  $1698.92 \text{ cm}^{-1}$  arasında, beşinci çukur değerleri ise  $3462.97 \text{ cm}^{-1}$  ile  $3747.19 \text{ cm}^{-1}$  arasında değişmektedir.



**Şekil 6.67** Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış alkallerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların kızılötesi spektroskopisi (FTIR) sonuçları

Sistemdeki moleküler suyun yapısı, 1650-3500  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki O-H germe bandı ve H-O-H bağları ile karakterize edilir. Bu durum, alkali aktivasyondan sonra oluşan hidratlanmış ürünlerdeki su ile ilişkili olabilir. 950-1200  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki bant Si-O-T (T: tetrahedral Si veya Al) bağlarının asimetrik germe titreşim modu ile ilişkilidir [84, 163, 168, 175, 179, 180]. Yaklaşık 1450  $\text{cm}^{-1}$ 'lik geniş bir absorpsiyon bandı, alkali metal hidroksit ve jellerin kolayca indüklenen atmosferik karbonasyonuna bağlı olarak  $\text{CO}_3^{2-}$  iyonlarının asimetrik gerilmesi ile karakterize edilir [181-183].

Şekil 6.67 incelendiğinde yüksek sıcaklığa maruz kalmamış numunelerin 3462.97  $\text{cm}^{-1}$  titreşim frekansı 1000°C sıcaklıkta 3747.19  $\text{cm}^{-1}$  değerine ulaşmıştır ve bu da sıcaklık arttıkça su moleküllerinin bünyeyi terk ettiğini göstermektedir.

$\text{CO}_3^{2-}$ 'nin karakteristik absorpsiyon bantları yüksek sıcaklık dereceleri arttıkça belirginliğini kaybettiği, bu da sodyum karbonatın erimesi ve kalsiyum karbonatın ayrıştığını göstermektedir [184]. Bu çukur derinliklerini azalması silikat ağındaki genel bozukluğun göstergesidir [185]. Şekil 6.67'deki spektrum 900  $\text{cm}^{-1}$  ile 1100  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki

bant değişikliğini göstermektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numunelerin bu bant aralığındaki frekans değeri  $977.35 \text{ cm}^{-1}$  iken  $1000^\circ\text{C}$  sıcaklığa maruz kalan numunelerin frekans değeri  $1023.21 \text{ cm}^{-1}$ 'dir.

SEM/EDX ve FTIR analizleri sonucunda, yüksek sıcaklık derecelerinin yükselmesi ile, geopolimerizasyon sonucunda üretilen malzemenin bağ yapılarının zayıfladığı ve değiştiiği, bünyeyi terk eden suyun malzeme içerisinde gözenekler oluşturduğu ve silikat yapılarının bozulmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Kalsiyum oranının düşmesi ile hidrasyon sonucunda oluşan ve dayanımdan sorumlu olan C-S-H yapıları azalmaktadır.



## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcıların üretilebilirliği incelenmiştir. Bu amaçla, hamur/harç karışımlar hazırlanmış ve yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Puzolanik aktivite deneyi sonucunda Bitlis yöresine ait pomzanın 28 günlük harçların dayanımını arttırdığı ve puzolanik aktivite sergilediği tespit edilmiştir.
- Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin priz sürelerine; Portland çimentosu miktarı,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  ve alkali çözelti/bağlayıcı oranlarının etkisi incelenmiştir. Bütün serilerde, %20 Portland çimentosu ilavesi priz başlangıç ve bitiş sürelerini ciddi anlamda kısaltmıştır (%99).
- $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı arttıkça priz süreleri düşerken alkali çözelti/bağlayıcı oranının artması priz sürelerini yükseltmiştir.
- Priz sürelerine en fazla etkiyi Portland çimentosu içeriği yapmıştır.
- Bağlayıcı malzeme içeriğindeki CaO miktarının artmasının priz sürelerini kısalttığı tespit edilmiştir.
- Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren bağlayıcıların sabit etüv kürü koşullarında ( $60^\circ\text{C}$ -48 saat) basınç dayanımları incelenmiş ve en yüksek basınç dayanımı (53.36 MPa) %20 Portland çimentosu içeriğine sahip H20-47-3 serisinde elde edilmiştir.
- Portland çimentosu içeriği ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  oranı arttıkça alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin basınç dayanımları artarken alkali çözelti/bağlayıcı oranının artması basınç dayanımlarını düşürmüştür.
- Portland çimentosu ilavesinin artmasıyla priz süreleri düşerken basınç dayanımları yükselmiştir. %20 Portland çimentolu alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların priz süreleri düşük olduğu için işlenebilirliği de düşmektedir. İşlenebilirliğin ön planda olduğu durumlarda düşük Portland çimentolu, dayanımın daha önemli olduğu noktalarda ise daha yüksek (%20'ye kadar) Portland çimentolu alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemeler kullanılabilir.
- $60^\circ\text{C}$  etüv sıcaklığında 48 saat bekletilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hamur numunelerin yoğunlukları arttıkça basınç dayanımları da artmıştır. Basınç

dayanımlarının, porozite ve toplam su emme ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.

- SEM/EDX ve FTIR analizleri sonucunda, Portland çimentosu ilavesi ile alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren malzemelerin içyapı yoğunluğunun arttığı ve artan Ca içeriği ile birlikte hibrit sistemlerde görülen C-S-H bağ yapılarının oluştuğu tespit edilmiştir.
- Pomza içeren geopolimer ve alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların en uygun kür koşulları incelenmiştir. Pomza içeren hibrit sistemde basınç dayanımı 100°C sıcaklığa kadar artarken bu sıcaklıktan sonra düşüş gözlenmiştir. Portland çimentosu içermeyen geopolimer sistemde ise en yüksek basınç dayanımı 80°C sıcaklıkta gerçekleşmiştir.
- En uygun etüv kürü süresi geopolimer ve hibrit sistemlerde 72 saat olarak belirlenmiş ve bu süreden sonra basınç dayanımları düşmeye başlamıştır.
- Etüv sıcaklıkları arttıkça üretilen numunelerin 3 günlük ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark azalmıştır.
- 72 saat 100°C etüv sıcaklığında bekletilen alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit hamurların 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 89.72 MPa, 91.09 MPa ve 93.52 MPa'dır.
- Ortam koşullarında kür edilen 90 günlük alkalilerle aktive edilmiş hibrit sistemlerde yaklaşık 65 MPa dayanım elde edilebilmiştir.
- En uygun malzeme oranları ve kür koşulları tespit edildikten sonra 4 farklı bağlayıcı dozajında alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harç numuneler üretilmiş ve en yüksek basınç dayanımı (43.66 MPa) dozajı 650 kg/m<sup>3</sup> olan numunelerde elde edilmiştir.
- 650 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile hazırlanan harç numunelerin etüv kurusu, doygun kuru yüzey ve görünür yoğunlukları sırasıyla 1.91 gr/cm<sup>3</sup>, 2.12 gr/cm<sup>3</sup> ve 2.41 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Toplam su emme ve porozite değerleri ise sırasıyla %9.31 ve %18.34'tür.
- Alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit harçların yüksek sıcaklık dirençleri incelenmiş ve yüksek sıcaklık dereceleri arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. 800°C sıcaklıkta harç numuneler basınç dayanımlarının %49.32'sini kaybederken, 1000°C sıcaklıkta bu kayıp %85.52'dir.

- Yüksek sıcaklık dereceleri arttıkça numunelerin yüzeylerinin renginin griden açık kahverengiye dönüştüğü tespit edilmiştir. 600°C sıcaklığa kadar herhangi bir boyut değişikliği ve yüzeyde çatlaklar gözlenmemiştir. SEM görüntüleri, malzeme içerisindeki suyun bünyeyi terk etmesinin yüksek sıcaklıklarda malzeme içerisinde gözenek oluşumuna ve basınç dayanım kaybına sebep olduğunu göstermiştir.
- Yapılan deneyler sonucunda, Bitlis yöresine ait pomzanın alkalilerle aktive edilebileceği kanaatine varılmıştır.
- Potasyum hidroksit ile geopolimer malzemeler üretilmektedir.
- Az miktarda Portland çimentosu ilavesi ile alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcılarda yüksek dayanımlar elde edilebilmiştir.
- Üretilen hibrit sistemler, hızlı priz alabilmesinden ötürü tamir harçlarında ve prefabrik yapı elemanlarında kullanılabilir.
- Ortam koşullarında, herhangi etüv sıcaklığı gerektirmeyen ve yeterli dayanıma sahip alkalilerle aktive edilmiş pomza içeren hibrit bağlayıcılar üretmek mümkündür.
- Ülkemizdeki pomza rezervleri göz önüne alındığında, pomzanın alkalilerle aktive edilmiş sistemlerde kullanılabilirliği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Andrew, R.M.**, 2018. Global CO<sub>2</sub> Emissions From Cement Production, *Earth System Science Data*, 10, 195-217.
- [2] **Erdoğan, T. Y.**, 2010. Beton. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- [3] **Gartner, E.**, 2004. Industrially Interesting Approaches to “low-CO<sub>2</sub>” Cements, *Cement and Concrete Research*, 34, 1489–1498.
- [4] **Hendriks, C. A., Worrell, E., De Jager, D.**, 2002. Emission Reduction of Greenhouse Gases from The Cement Industry, *Greenhouse Gas Control Technologies Conference*, Kyoto, Japan, 1-4 October.
- [5] **CEMBUREAU**, 2017. Activity Report, Brussels.
- [6] **Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., Fernandez-Jimenez, A.**, 2014. A Review on Alkaline Activation: New Analytical Perspectives, *Materiales de Construcción*, 64, 1-24.
- [7] **Torres-Carrasco, M., Puertas, F.**, 2017. Alkaline Activation of Aluminosilicates as an Alternative to Portland Cement: A Review, *Romanian Journal of Materials*, 47, 3–15.
- [8] **Suraneni, P., Fu, T., Jafari Azad, V., Isgor, O.B., Weiss, J.**, 2018. Pozzolanicity of Finely Ground Lightweight Aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 88, 15–120.
- [9] **TOPÇU, İ. B. ve Canbaz, M.**, 2001. Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri, *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, XIV, 11-23.
- [10] **Yazici, 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.
- [11] **Sarıdemir, M.**, 2013. Effect of Silica Fume and Ground Pumice on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Concrete, *Construction and Building Materials*, 49, 484-489.
- [12] **Provis, J.L., Palomo, A., Shi, C.**, 2015. Advances in Understanding Alkali-Activated Materials, *Cement and Concrete Research*, 78, 110–125.
- [13] **Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S.**, 2008. Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products, *Construction and Building Materials*, 22, 305–1314.
- [14] **Bocullo, V., Vaiciukyniene, D., Kantautas, A., Borg, R.P., Briguglio, C.**, 2017. Alkaline Activation of Hybrid Cements Binders Based on Industrial by-Products, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 19, 65–73.

- [15] **Garcia-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A.,** 2012. Hybrid Alkaline Cements. Part I: Fundamentals, *Romanian Journal of Materials*, 42, 330–335.
- [16] **Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., Ramezani-pour, A.A.,** 2011. Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, 33, 251–260.
- [17] **Yadollahi, M.M., Benli, A., Demirboğa, R.,** 2015. The Effects of Silica Modulus and Aging on Compressive Strength of Pumice-Based Geopolymer Composites, *Construction and Building Materials*, 94, 767–774.
- [18] **Bouzoubaa, N., Lachemi, M.,** 2001. Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results, *Cement and Concrete Research*, 31, 413–420.
- [19] **Bhanja, S., Sengupta, B.,** 2003. Optimum Silica Fume Content and Its Mode of Action on Concrete, *Materials Journal*, 100, 407–412.
- [20] <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/pumice/mcs-2018-pumic.pdf>, Pumice and pumicite, 21 Ağustos 2018.
- [21] **Gündüz, L., Rota, A., Hüseyin, A.,** 2001. Türkiye ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme Karakteristiği Analizi, 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 18-19 Ekim, s. 175-188.
- [22] **Antoni, A., Wijaya, S.W., Hardjito, D.,** 2016. Factors Affecting the Setting Time of Fly Ash-Based Geopolymer, *Materials Science Forum*, 841, 90–97.
- [23] **Wijaya, A. L., Ekaputri, J.J. Triwulan,** 2017. Factors Influencing Strength and Setting Time of Fly Ash Based-Geopolymer Paste, *International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF)*, 138, 1-9.
- [24] **Fernandez-Jimenez, A., Flores, E., Maltseva, O., García-Lodeiro, I., Palomo, A.,** 2013. Hybrid Alkaline Cements Part III Durability and Industrial Applications, *Romanian Journal of Materials*, 43, 195–200.
- [25] **Xu, H., Van Deventer, J.S.J.,** 2000. The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247–266.
- [26] **Davidovits, J.,** 2005. The Poly(sialate) Terminology: A Very Useful and Simple Model for The Promotion and Understanding of Green-Chemistry, *4th World Congress Geopolymer*, Saint-Quentin, France, s. 9–12.
- [27] **Davidovits, J.,** 1994. Properties of Geopolymer Cements, *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, s. 131-149.
- [28] **Davidovits, J.,** 1994. Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement, *Journal of Materials Education*, 16, 91-139.

- [29] **Shi, C., Jimenez, A.F., Palomo, A.**, 2011. New Cements for The 21st Century: The Pursuit of an Alternative to Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, 41, 750-763.
- [30] **Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., Bolio, H.**, 2011. Sustainable Cement Production-Present and Future, *Cement and Concrete Research*, 41, 642-650.
- [31] **Li, C., Sun, H., Li, L.**, 2010. A Review: The Comparison Between Alkali-Activated Slag (Si+Ca) and Metakaolin (Si+Al) Cements, *Cement and Concrete Research*, 40, 1341-1349.
- [32] **Palacios, M., Puertas, F.**, 2007. Effect of Shrinkage-Reducing Admixtures on the Properties of Alkali-Activated Slag Mortars and Pastes, *Cement and Concrete Research*, 37, 691-702.
- [33] **Puertas, F., Torres-Carrasco, M.**, 2014. Use of Glass Waste as an Activator in the Preparation of Alkali-Activated Slag Mechanical Strength and Paste Characterisation, *Cement and Concrete Research*, 57, 95-104.
- [34] **Torres-Carrasco, M., Palomo, J.G., Puertas, F.**, 2014. Sodium Silicate Solutions from Dissolution of Glasswastes Statistical Analysis, *Materiales de Construcción*, 64, 1-14.
- [35] **Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T.**, 1999. Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- [36] **Rangan, B.V., Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J.**, 2005. Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Proc. World Congr. Geopolymer*, Saint Quentin, France, 2005: s. 133-137.
- [37] **Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., Cao, T.**, 2010. High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 264-271.
- [38] **Alonso, S., Va, T., Puertas, F., Marto, S.**, 2000. Alkali-Activated Fly Ash / Slag Cement Strength Behaviour and Hydration Products, *Cement and Concrete Research*, 30, 1625-1632.
- [39] **Shi, C., Roy, D., Krivenko, P.**, 2003. *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor & Francis, London.
- [40] **Provis, J.L., Bernal, S.A.**, 2014. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials, *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- [41] **Hakkinen, T.**, 1987. Durability of Alkali-Activated Slag Soncrete, *Nordic Concrete Research*, 6, 81-94.
- [42] **Wang, S.D.**, 1991. Review of Recent Research on Alkali-Activated Concrete in China, *Magazine of Concrete Research*, 43, 29-35.

- [43] **Davidovits, J.**, 1991. Geopolymers - Inorganic Polymeric New Materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
- [44] **Wastiels, J., Wu, X., Faignet, S., Patfoort, G.**, 1994. Mineral Polymer Based on Fly Ash, *Journal of Resource Management and Technology*, 22, 135-141.
- [45] **Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Khairul Nizar, I., Mastura, W.I.W.**, 2011. Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement-A Review, *Asian Journal of Scientific Research*, 1, 247-253.
- [46] **Akbari, H., Mensah-Biney, R., Simms, J.**, 2015, Production of Geopolymer Binder from Coal Fly Ash to Make Cement-less Concrete, World of Coal Ash (WOCA) Conference, Nashville, 5-7 May.
- [47] **Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Criado, M.**, 2005. Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: A Descriptive Model, *Cement and Concrete Research*, 35, 1204–1209.
- [48] **Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K.H., Kim, K.S., Monteiro, P.J.M.**, 2014. Characterization of Natural Pozzolan-Based Geopolymeric Binders, *Cement and Concrete Composites*, 53, 97-104.
- [49] **Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., Kovalchuk, G., Ordonez, L.M., Naranjo, M.C.**, 2007. Opc-Fly Ash Cementitious Systems: Study of Gel Binders Produced During Alkaline Hydration, *Journal of Materials Science*, 42, 2958–2966.
- [50] **Puertas, F., Gonzalez-Fonteboa, B., Gonzalez-Taboada, I., Alonso, M.M., Torres-Carrasco, M., Rojo, G., Martinez-Abella, F.**, 2018. Alkali-Activated Slag Concrete: Fresh and Hardened Behaviour, *Cement and Concrete Composites*, 85, 22–31.
- [51] **Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., Lorenzen, L.**, 1997. The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilize Toxic Metals: Part I. Theory and Applications, *Minerals Engineering*, 10, 659-669.
- [52] **Robayo-Salazar, R.A., Rivera, J.F., Mejia de Gutierrez, R.**, 2017. Alkali-Activated Building Materials Made with Recycled Construction and Demolition Wastes, *Construction and Building Materials*, 149, 130-138.
- [53] **Haddad, R.H., Alshbuol, O.**, 2016. Production of Geopolymer Concrete Using Natural Pozzolan: A Parametric Study, *Construction and Building Materials*, 114, 699-707.
- [54] **Jafari Nadoushan, M., Ramezani-pour, A.A.**, 2016. The Effect of Type and Concentration of Activators on Flowability and Compressive Strength of Natural Pozzolan and Slag-Based Geopolymers, *Construction and Building Materials*, 111, 337–347.
- [55] **Jackson, M.D., Landis, E.N., Brune, P.F., Vitti, M., Chen, H., Li, Q., Kunz, M.**, 2014. Mechanical Resilience and Cementitious Processes in Imperial Roman Architectural Mortar, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1-6.

- [56] **Kani, E.N., Allahverdi, A.**, 2009. Effect of Chemical Composition on Basic Engineering Properties of Inorganic Polymeric Binder Based on Natural Pozzolan, *Ceramics Silikaty*, 53, 195–204.
- [57] **Kani, E.N., Allahverdi, A., Provis, J.L.**, 2012. Efflorescence Control in Geopolymer Binders Based on Natural Pozzolan, *Cement and Concrete Composites*, 34, 25–33.
- [58] **Kamseu, E., Ngouloure, Z.N.M., Ali, B.N., Zekeng, S., Melo, U.C., Rossignol, S., Leonelli, C.**, 2015. Cumulative Pore Volume, Pore Size Distribution and Phases Percolation in Porous Inorganic Polymer Composites: Relation Microstructure and Effective Thermal Conductivity, *Energy and Buildings*, 88, 45–56.
- [59] **Lemougna, P.N., Mackenzie, K.J.D., Jameson, G.N.L., Chinje, H.R.U.F.**, 2013. The Role of Iron in The Formation of Inorganic Polymers (Geopolymers ) from Volcanic Ash: a <sup>57</sup>Fe Mössbauer Spectroscopy Study, *Journal of Materials Science*, 48, 5280–5286.
- [60] **N.Y. Mostafa, El-Hemaly, S.A.S., Al-Wakeel, E.I., El-Korashy, S.A., Brown, P.W.**, 2001. Characterization and Evaluation of the Hydraulic Activity of Water-Cooled Slag and Air-Cooled Slag, *Cement and Concrete Research*, 31, 467-474.
- [61] **Li, D., Xu, Z., Luo, Z., Pan, Z., Cheng, L.**, 2002. The Activation and Hydration of Glassy Cementitious Materials, *Cement and Concrete Research*, 32, 1145–1152.
- [62] **Swamy, R.N., Bouikni, A.**, 1990. Some Engineering Properties of Slag Concrete as Influenced by Mix Proportioning and Curing, *Materials Journal*, 87, 210-220.
- [63] **Pal, S.C., Mukherjee, A., Pathak, S.R.**, 2003. Investigation of Hydraulic Activity of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 1481-1486.
- [64] **Krivenko, P.**, 1994. Progress in Alkaline Cements, *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, s. 11-129.
- [65] **Glukhovsky, V.**, 1994. Ancient, Modern and Future Concretes, *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, s. 1-8.
- [66] **Yılmaz, T., Erçikdi, B., Cihangir, F.**, 2017. Yüksek Fırın Cürufu ve Perlit İkamesinin Çimentolu Macun Dolgunun Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32, 239-251.
- [67] **Delikurt, B.C., Sevim, U.K.**, 2015. Sugözü Uçucu Külünün Betonun Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4, 47-58.
- [68] **Glukhovsky, V., Rostovkaya, G. S., Rumyna, G.V.**, 1980. High Strength Slag-Alkali Cement, 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, France, 164-168.
- [69] **Aydin, S.**, 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- [70] **Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S.,** 2008. Alkali-Activated Binders: A Review Part 2 About Materials and Binders Manufacture, *Construction and Building Materials*, 22, 1315-1322.
- [71] **Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.,** 2013. Hydration Kinetics in Hybrid Binders: Early Reaction Stages, *Cement and Concrete Composites*, 39, 82-92.
- [72] **Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., Van Deventer, J.S.J.,** 2007. Geopolymer Technology: The Current State of the Art, *Journal of Materials Science*, 42, 2917-2933.
- [73] **Xu, H., Van Deventer, J.S.J.,** 2003. The Effect of Alkali Metals on the Formation of Geopolymeric Gels from Alkali-Feldspars, *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 216, 27-44.
- [74] **Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., MacPhee, D.E.,** 2011. Compatibility Studies Between N-A-S-H and C-A-S-H Gels. Study in the Ternary Diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ , *Cement and Concrete Research*, 41, 923-931.
- [75] **Qu, B., Martin, A., Pastor, J.Y., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A.,** 2016. Characterisation of Pre-Industrial Hybrid Cement and Effect of Pre-Curing Temperature, *Cement and Concrete Composites*, 73, 281-288.
- [76] **Bernal, S.A.,** 2015. Effect of the Activator Dose on the Compressive Strength and Accelerated Carbonation Resistance of Alkali Silicate-Activated Slag/Metakaolin Blended Materials, *Construction and Building Materials*, 98, 217-226.
- [77] **Tuyan, M., Andiç-Çakir, Ö., Ramyar, K.,** 2018. Effect of Alkali Activator Concentration and Curing Condition on Strength and Microstructure of Waste Clay Brick Powder-Based Geopolymer, *Composites Part B*, 135, 242-252.
- [78] **Salih, M.A., Farzadnia, N., Abang Ali, A.A., Demirboğa, R.,** 2015. Effect of Different Curing Temperatures on Alkali Activated Palm Oil Fuel Ash Paste, *Construction and Building Materials*, 94, 116-125.
- [79] **İlkentapar, S., Atiş, C.D., Karahan, O., Görür Avşaroğlu, E.B.,** 2017. Influence of Duration of Heat Curing and Extra Rest Period After Heat Curing on the Strength and Transport Characteristic of Alkali Activated Class F Fly Ash Geopolymer Mortar, *Construction and Building Materials*, 151, 363-369.
- [80] **Mustafa Al Bakria, A.M., Kamarudin, H., Bin Hussain, M., Khairul Nizar, I., Zarina, Y., Rafiza, A.R.,** 2011. The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers, *Physics Procedia*, 22, 286-291.
- [81] **Salman, M., Cizer, Ö., Pontikes, Y., Vandewalle, L., Blanpain, B., Van Balen, K.,** 2014. Effect of Curing Temperatures on the Alkali Activation of Crystalline Continuous Casting Stainless Steel Slag, *Construction and Building Materials*, 71, 308-316.

- [82] **Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M.W.**, 2016. Influence of Different Curing Temperatures and Alkali Activators on Properties of GBFS Geopolymer Mortars Containing Fly Ash and Palm-Oil Fuel Ash, *Construction and Building Materials*, 125, 1229-1240.
- [83] **Yadollahi, M.M., Benli, A., Demirboğa, R.**, 2015. Effects of Elevated Temperature on Pumice Based Geopolymer Composites, *Plastics, Rubber and Composites*, 44, 226-237.
- [84] **Rivera, J.F., De Gutierrez, R.M., Mejia, J.M. Gordillo, M.**, 2014. Hybrid Cement Based on the Alkali Activation of by-Products of Coal, *Journal of Construction*, 13, 31-39.
- [85] **Khale, D., Chaudhary, R.**, 2007. Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review, *Journal of Materials Science*, 42, 729-746.
- [86] **Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.**, 2005. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator, *Cement and Concrete Research*, 35, 1984-1992.
- [87] **Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., Van Deventer, J.S.J.**, 2005. Understanding the Relationship Between Geopolymer Composition Microstructure and Mechanical Properties, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Aspects*, 269, 47-58.
- [88] **Taylor, H.F.W.**, 1997. Cement Chemistry, Thomas Telford, London.
- [89] **García-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.**, 2015. Low Environmental Impact Hybrid Cements: Reducing Clinker Content, *Journal of the Latin-American Association of Quality Control, Pathology and Recovery of Construction*, 5, 1-15.
- [90] **Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Sobrados, I., Sanz, J.**, 2006. The Role Played by the Reactive Alumina Content in the Alkaline Activation of Fly Ashes, *Microporous Mesoporous Materials*, 91, 111-119.
- [91] **Skvara, F., Kopecky, L., Myskova, L., Smilauer, V., Alberovska, L., Vinsova, L.**, 2009. Aluminosilicate Polymers - Influence of Elevated Temperatures, Efflorescence, *Ceramics Silikaty*, 53, 276-282.
- [92] **Skvara, F., Kopecky, L., Smilauer, V., Bittnar, Z.**, 2009. Material and Structural Characterization of Alkali Activated Low-Calcium Brown Coal Fly Ash, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 711-720.
- [93] **Garcia-Lodeiro, I., Donatello, S., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.**, 2016. Hydration of Hybrid Alkaline Cement Containing a Very Large Proportion of Fly Ash: A Descriptive Model, *Materials*, 9, 1-16.
- [94] **Jamkar, S.S., Ghugal, Y.M., Patankar, S.V.**, 2013. Effect of Fly Ash Fineness on Workability and Compressive Strength of Geopolymer Concrete, *Indian Concrete Journal*, April, 57-62.

- [95] **Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K.**, 2009. Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 44-50.
- [96] **Shekhovtsova, J., Zhernovsky, I., Kovtun, M., Kozhukhova, N., Zhernovskaya, I., Kearsley, E.**, 2018. Estimation of Fly Ash Reactivity for Use in Alkali-Activated Cements - A Step Towards Sustainable Building Material and Waste Utilization, *Journal of Cleaner Production*, 178, 22-23.
- [97] **Andersson, R., Gram, H.E.**, 1988. Alkali-Activated Slag; Part I Properties of Alkali-Activated Slag, *Swedish Cement and Concrete Research Institute*, Stockholm, s. 1-63.
- [98] **Nematollahi, B., Sanjayan, J.**, 2014. Effect of Different Superplasticizers and Activator Combinations on Workability and Strength of Fly Ash Based Geopolymer, *Materials and Design*, 57, 667-672.
- [99] **Kirschner, A.V., Harmuth, H.**, 2004. Investigation of Geopolymer Binder with Respect to Their Application for Building Materials, *Ceramics-Silikaty*, 48, 117-120.
- [100] **Görhan, G., Aslaner, R., Şinik, O.**, 2016. The Effect of Curing on the Properties of Metakaolin and Fly Ash-Based Geopolymer Paste, *Composite Part B*, 97, 329-335.
- [101] **Bai, T., Song, Z.G., Wu, Y.G., Di Hu, X., Bai, H.**, 2018. Influence of Steel Slag on the Mechanical Properties and Curing Time of Metakaolin Geopolymer, *Ceramics International*, 44, 15706-15713.
- [102] **Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M.**, 2011. Effect of Curing Profile on Kaolin-based Geopolymers, *Physics Procedia*, 22, 305-311.
- [103] **Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camoes, A.F., Jamshidi, M., Ding, Y.**, 2012, Durability of Alkali-Activated Binders: A Clear Advantage Over Portland Cement or an Unproven Issue?, *Construction and Building Materials*, 30, 400-405.
- [104] **Cheng, T.W., Chiu, J.P.**, 2003. Fire-Resistant Geopolymer Produce by Granulated Blast Furnace Slag, *Minerals Engineering*, 16, 205-210.
- [105] **Shi, C., Jimenez, A.F., Palomo, A.**, 2011. New Cements for the 21st Century: The Pursuit of an Alternative to Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, 41, 750-763.
- [106] **Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., Wang, H.**, 2014. Geopolymer Foam Concrete: An Emerging Material for Sustainable Construction, *Construction and Building Materials*, 56, 113-127.
- [107] **Temuujin, J., Minjigmaa, A., Lee, M., Chen-Tan, N., Van Riessen, A.**, 2011, Characterisation of Class F Fly Ash Geopolymer Pastes Immersed in Acid and Alkaline Solutions, *Cement and Concrete Composites*, 33, 1086-1091.

- [108] **Bilek, V., Hurta, J., Done, P., Zidek, L., Zajdlik, T.**, 2016. Hybrid Alkali Activated Concretes-Conception and Development for Practical Application, *Solid State Phenomena*, 249, 3-7.
- [109] **Martauz, P., Janotka, I., Strigac, J., Bacauvcik, M.**, 2016. Fundamental Properties of Industrial Hybrid Cement: Utilization in Ready-Mixed Concretes and Shrinkage-Reducing Applications, *Materiales de Construcción*, 66, 322.
- [110] **Yip, C.K., Lukey, G.C., Van Deventer, J.S.J.**, 2004, The Coexistence of Geopolymeric Gel and Calcium Silicate Hydrate at the Early Stage of Alkaline Activation, *Cement and Concrete Research*, 35, 1688-1697.
- [111] **Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.**, 2013. Variation in Hybrid Cements Over Time Alkaline Activation of Fly Ash-Portland Cement Blends, *Cement and Concrete Research*, 52, 112-122.
- [112] **Palomo, A., Maltseva, O., Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A.**, 2013. Hybrid Alkaline Cements. Part II: The Clinker Factor, *Romanian Journal of Materials*, 43, 74-80.
- [113] **Alonso, S., Palomo, A.**, 2001. Alkaline Activation of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature, Activator Concentration and Solids Ratio, *Materials Letters*, 47, 55-62.
- [114] **Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A.**, 2003. Mineralogical and Microstructural Characterisation of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Pastes, *Cement and Concrete Composites*, 25, 287-292.
- [115] **Higuera, I., Varga, C., Palomo, J.G., Gil-Maroto, A., Vazquez, T., Puertas, F.**, 2012. Mechanical Behaviour of Alkali-Activated Blast Furnace Slag-Activated Metakaolin Blended Pastes Statistical Study, *Materiales de Construcción*, 62, 163-181.
- [116] **Bernal, S.A., Mejia de Gutierrez, R., Ruiz, F., Quinones, H., Provis, J.L.**, 2012. High-Temperature Performance of Mortars and Concretes Based on Alkali-Activated Slag/Metakaolin Blends, *Materiales de Construcción*, 62, 471-488.
- [117] **Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., MacPhee, D.E.**, 2010. Effect of Calcium Additions on N-A-S-H Cementitious Gels, *Journal of the American Ceramic Society*, 93, 1934-1940.
- [118] **Fernandez-Jimenez, A., Garcia-Lodeiro, I., Donatello, S., Maltseva, O., Palomo, A.**, 2014. Specific Examples of Hybrid Alkaline Cement, MATEC Web of Conferences, 11, 01001.
- [119] **Fernandez-Jimenez, A., Sobrados, A., Sanz, I., Palomo, A.**, 2011. Hybrid Cements with Very Low OPC Content, 13th International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, Spain, s. 141.

- [120] **Donatello, S., Maltseva, O., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.,** 2014. The Early Age Hydration Reactions of a Hybrid Cement Containing a Very High Content of Coal Bottom Ash, *Journal of the American Ceramic Society*, 97, 929-937.
- [121] **Donatello, S., Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.,** 2014. Some Durability Aspects of Hybrid Alkaline Cements, *MATEC Web of Conferences*, 11.01008.
- [122] **Janotka, I., Bacuvcik, M., Martauz, P., Strigac, J.,** 2014. Chemical Resistance of Novel Hybrid Cement in Various Aggressive Solutions, *RILEM International Workshop on Performance-Based Specification and Control of Concrete Durability*, Zagreb, Croatia, 11-13 June, s. 17-24.
- [123] **Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.,** 2001. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, McGraw-Hill.
- [124] **Sanitskii, M.A.,** 1999. Alkaline Portland Cements, içinde: *2nd International Conference Alkaline Cements and Concretes*, Kyiv, Ukraine, s. 315-336.
- [125] **Lee, N.K., Lee, H.K.,** 2013. Setting and Mechanical Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Concrete Manufactured at Room Temperature, *Construction and Building Materials*, 47, 1201-1209.
- [126] **Zhang, Z., Li, L., Ma, X., Wang, H.,** 2016. Compositional, Microstructural and Mechanical Properties of Ambient Condition Cured Alkali-Activated Cement, *Construction and Building Materials*, 113, 237-245.
- [127] **Seraj, S., Cano, R., Ferron, R.D., Juenger, M.C.G.,** 2017. The Role of Particle Size on the Performance of Pumice as a Supplementary Cementitious Material, *Cement and Concrete Composites*, 80, 135-142.
- [128] **Karataş, M. Benli, A., Ergin, A.,** 2017. Influence of Ground Pumice Powder on the Mechanical Properties and Durability of Self-Compacting Mortars, *Construction and Building Materials*, 150, 467-479.
- [129] **Kılıç, A., Sertabipoğlu, Z.,** 2014. Effect of Heat Treatment on Pozzolanic Activity of Volcanic Pumice Used as Cementitious Material, *Cement and Concrete Composites*, 57, 128-132.
- [130] **Almalkawi, A.T., Hamadna, S., Soroushian, P.,** 2017. One-part Alkali Activated Cement Based Volcanic Pumice, *Construction and Building Materials*, 152, 367-374.
- [131] **Özodabaş, A., Yılmaz, K.,** 2013. Improvement of the Performance of Alkali Activated Blast Furnace Slag Mortars with Very Finely Ground Pumice, *Construction and Building Materials*, 48, 26-34.
- [132] **Allahverdi, A., Mehrpour, K., Kani, E.N.,** 2007. Investigating the Possibility of Utilizing Pumice-Type Natural Pozzolan in Production of Geopolymer Cement, *Ceramics-Silikaty*, 52, 16-23.

- [133] **Hardjito, D., Cheak, C.C., Lee Ing, C.H.**, 2008. Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-based Geopolymer Mortar, *Modern Applied Science*, 2, 3-11.
- [134] <http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/maden-haritalari/bitlis>, MTA, Bitlis İli Maden Haritası, 27 Ekim 2018.
- [135] **Varol, O.O.**, 2016. Bitlis ve Van İllerinde Pomza Madencilğine Genel Bir Bakış, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 55, 27-34.
- [136] **Özkan, Ş.G., Tuncer, G.**, 2001. Pomza Madencilğine Genel Bir Bakış, *4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 18-19 Ekim.
- [137] **Li, X. Yang, W., Zou, Q., Zuo, Y.**, 2010. Investigation on Microstructure, Composition and Cytocompatibility of Natural Pumice for Potential Biomedical Application, *Tissue Engineering: Part C*, 16, 427-434.
- [138] **Lyon, R.E., Balaguru, P.N., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J., Davidovics, M.**, 1997. *Fire Resistant Aluminosilicate Composites*, *Fire and Materials*, 21, 67-73.
- [139] **Putri, M., Regina, G.L.D., Ade, L.N.F., Haiyina, H.A., Nura, H.H.**, 2018. Synthesis of Zeolites from Lombok Pumice as Silica Source for Ion Exchanger, *1st IBSC: Towards The Extended Use Of Basic Science For Enhancing Health, Environment, Energy And Biotechnology*, January, s.244-247.
- [140] **Allahverdi, A., Mehrpour, K., Kani, E.N.**, 2008. Taftan Pozzolan-Based Geopolymer Cement, *IUST International Journal of Engineering Science*, 19, 1-5.
- [141] **TS EN 1008**, 2003. Beton- Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [142] **Siyal, A.A., Azizli, K.A., Man, Z., Ullah, H.**, 2016. Effects of Parameters on the Setting Time of Fly Ash Based Geopolymers Using Taguchi Method, *Procedia Engineering*, 148, 302-307.
- [143] **Hajimohammadi, A., Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J.**, 2010. Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation, *Chemistry of Materials*, 22, 5199-5208.
- [144] **TS EN 196-1**, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [145] **TS 802**, 2009. Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [146] **Bondar, D.**, 2009. Alkali Activation of Iranian Natural Pozzolans for Producing Geopolymer Cement and Concrete, Dr. Thesis, Department of Civil and Structural Engineering University of Sheffield, Sheffield, UK.

- [147] **ASTM C 311**, 2004. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, ASTM.
- [148] **TS EN 196-3**, 2002. Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [149] **Abo-Qudais, S.A.**, 2005. Effect of Concrete Mixing Parameters on Propagation of Ultrasonic Waves, *Construction and Building Materials*, 19, 257-263.
- [150] **Del Río, L.M., López, F., Esteban, F.J., Tejado, J.J., Mota, M., González, I., San Emeterio, J.L., Ramos, A.**, 2006. Ultrasonic Characterization of Granites Obtained From Industrial Quarries of EXTREMADURA (Spain), *Ultrasonics*, 44, 1057-1061.
- [151] **Hobbs, B., Tchoketch Kebir, M.**, 2007. Non-Destructive Testing Techniques for the Forensic Engineering Investigation of Reinforced Concrete Buildings, *Forensic Science International*, 167, 167-172.
- [152] **TS EN 12390-3**, 2003. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3:Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [153] **Felekoğlu, B., Türkel, S.**, 2004. Yükleme Hızının Beton Basınç Dayanımına ve Elastisite Modülüne Etkisi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6, 65-75.
- [154] **Büyüksırt, T., Kuleaşan, H.**, 2014. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ve Gıda Analizlerinde Kullanımı, 39, 235-241.
- [155] **Lin, S.Y., Wang, S.L.**, 2012. Advances in Simultaneous DSC-FTIR Microspectroscopy for Rapid Solid-State Chemical Stability Studies: Some Dipeptide Drugs as Examples, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 461-478.
- [156] **Yaddollahi, M. M.**, 2013. Hasankale Pomzasından Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Geopolimer Çimentosunun Üretilebilirliğinin Araştırılması, *Doktor Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [157] **ASTM C 618**, 2004. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use, ASTM.
- [158] **Mboya, H.A., King'ondou, C.K., Njau, K.N., Mrema, A.L.**, 2017. Measurement of Pozzolanic Activity Index of Scoria, Pumice, and Rice Husk Ash as Potential Supplementary Cementitious Materials for Portland Cement, *Advances in Civil Engineering*, 2017, 1-13.
- [159] **Bakharev, T.**, 2006. Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing, *Cement and Concrete Research*, 36, 1134-1147.
- [160] **Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., Sagoe-Crentsil, K.**, 2007. Comparative Performance of Geopolymers Made with Metakaolin and Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures, *Cement and Concrete Research*, 37, 1583-1589.

- [161] **Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G.**, 2008. Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 30, 986-991.
- [162] **Bakharev, T.**, 2005. Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing, *Cement and Concrete Research*, 35, 1224-1232.
- [163] **Gao, K., Lin, K.L., Wang, D., Hwang, C.L., Shiu, H.S., Chang, Y.M., Cheng, T.W.**, 2014. Effects SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O Molar Ratio on Mechanical Properties and the Microstructure of nano-SiO<sub>2</sub> Metakaolin-based Geopolymers, *Construction and Building Materials*, 53, 503-510.
- [164] **Bhat, P.A., Debnath, N.C.**, 2011. Theoretical and Experimental Study of Structures and Properties of Cement Paste: The Nanostructural Aspects of C-S-H, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 72, 920-933.
- [165] **García Lodeiro, I., Macphee, D.E., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A.**, 2009. Effect of Alkalis on Fresh C-S-H Gels. FTIR Analysis, *Cement and Concrete Research*, 39, 147-153.
- [166] **Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.**, 2005. Mid-Infrared Spectroscopic Studies of Alkali-Activated Fly Ash Structure, *Microporous and Mesoporous Materials*, 86, 207-214.
- [167] **Palomo, A., Criado, M., Ferna, A.**, 2007. Alkali Activation of Fly Ash: Effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O Ratio Part I: FTIR Study, *Microporous and Mesoporous Materials*, 106, 180-191.
- [168] **Abdollahnejad, Z. Hlavacek, P., Miraldo, S., Pacheco-Torgal, F., de Aguiar, J.L.B.**, 2014. Compressive Strength, Microstructure and Hydration Products of Hybrid Alkaline Cements, *Materials Research*, 17, 829-837.
- [169] **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.
- [170] **Kani, E.N., Allahverdi, A.**, 2009. Effects of Curing Time and Temperature on Strength Development of Inorganic Polymeric Binder Based on Natural Pozzolan, *Journal of Materials Science*, 44, 3088-3097.
- [171] **Wazien, A.Z.W., Abdullah, M.M.A.B., Abd Razak, R., Rozainy, M.A.Z.M.R., Tahir, M.F.M.**, 2016. Strength and Density of Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature for Use as Repair Material, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133.
- [172] **Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G.**, 2010. Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete, *Cement and Concrete Research*, 40, 334-339.
- [173] **Değirmenci, F.N.**, 2017. Freeze-Thaw and Fire Resistance of Geopolymer Mortar based on Natural and Waste Pozzolans, *Ceramics-Silikaty*, 62, 41-49.
- [174] **Neville, A.M.**, 1995. Properties of Concrete, Prentice Hall.

- [175] **Bernal, S.A., Rodríguez, E.D., Mejía de Gutiérrez, R., Provis, J.L.**, 2015. Performance at High Temperature of Alkali-Activated Slag Pastes Produced With Silica Fume and Rice Husk Ash Based Activators, *Materiales de Construcción*, 65, e049.
- [176] **Lee, H., Vimonsatit, V., Chindaprasirt, P., Boonserm, K.**, 2014. Preliminary Study of Lime-Pozzolan Based Cement after Exposed to High Temperatures, *International Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engineering*, 1, 6-12.
- [177] **Vasquez-Molina, D., Mejia-Arcila, J.M., Gutierrez, R.M.**, 2016. Mechanical and Thermal Performance of a Geopolymeric and Hybrid Material Based on Fly Ash, *DYNA*, 195, 216-223.
- [178] **He, P., Wang, M., Fu, S., Jia, D., Yan, S., Yuan, J., Xu, J., Wang, P., Zhou, Y.**, 2016. Effects of Si/Al Ratio on the Structure and Properties of Metakaolin Based Geopolymer, *Ceramics International*, 42, 14416-14422.
- [179] **Lee, W.K.W., Van Deventer, J.S.J.**, 2003. Use of Infrared Spectroscopy to Study Geopolymerization of Heterogeneous Amorphous Aluminosilicates, *Langmuir*, 19, 8726-8734.
- [180] **Yu, P., Kirkpatrick, R.J., Poe, B., McMillan, P.F., Cong, X.**, 1999. Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy, *Journal of the American Ceramic Society*, 82, 742-748.
- [181] **Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F., Santoro, L.**, 2008. Coal Fly Ash as Raw Material for the Manufacture of Geopolymer-based Products, *Waste Management*, 28, 416-423.
- [182] **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.
- [183] **Lecomte, I., Henrist, C., Liegeois, M., Maseri, F., Rulmont, A., Cloots, R.**, 2006. (Micro)-Structural Comparison Between Geopolymers, Alkali-Activated Slag Cement and Portland Cement, *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 3789-3797.
- [184] **Ye, J., Zhang, W., Shi, D.**, 2014. Effect of Elevated Temperature on the Properties of Geopolymer Synthesized From Calcined Ore-Dressing Tailing of Bauxite and Ground-Granulated Blast Furnace Slag, *Construction and Building Materials*, 59, 41-48.
- [185] **Rovnanik, P., Bayer, P., Rovnanikova, P.**, 2013. Characterization of Alkali Activated Slag Paste After Exposure to High Temperatures, *Construction and Building Materials*, 47, 1479-1487.

## ÖZGEÇMİŞ

Bilal BALUN, 1984 yılında Bingöl’de doğdu. İlk ve ortaöğretimini Bingöl’de tamaladıktan sonra 2002 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünü kazandı. 2004’te Mimarlık bölümünü bıraktıktan sonra aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne yerleşti. 2008’de lisans programından mezun olduktan sonra 2 yıl boyunca çeşitli projelerde (yurt içi-yurt dışı) inşaat mühendisi olarak çalıştı. 2010 yılında Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı. 2013 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamaladıktan sonra aynı yıl aynı programdan doktora eğitimine başladı.