

**HASANKALE POMZASINDAN ALKALİ AKTİVASYON
YÖNTEMİYLE GEOPOLİMER ÇİMENTOSUNUN
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehrzağ MOHABBI YADDOLLAHI

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Prof.Dr. Ramazan DEMİRBOĞA
2013**

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

HASANKALE POMZASINDAN ALKALİ AKTİVASYON
YÖNTEMİYLE GEOPOLİMER ÇİMENTOSUNUN
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehrzad MOHABBI YADDOLLAHI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ERZURUM

2013

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

HASANKALE POMZASINDAN ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİYLE GEOPOLİMER
ÇİMENTOSUNUN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA danışmanlığında, **Mehrza MOHABBI YADOLLAHI** tarafından hazırlanan bu çalışma **27/09/2013** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **Doktora tezi** olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rüstem GÜL

İmza

Üye : Prof. Dr. Hamit AKBULUT

İmza

Üye : Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN

İmza

Üye : Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: BAP-2011/152 ve BAP-2012/440

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

HASANKALE POMZASINDAN ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİYLE GEOPOLİMER ÇİMENTOSUNUN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehrzağ MOHABBI YADOLLAHI

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ramazan Demirboğa

Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir ve çevre üzerinde büyük bir etkisi vardır. Sanayide, üretimi esnasında en çok enerji tüketilen inşaat malzemesi Portland çimentosudur. Portland çimentosu üretimi esnasında ortaya çıkan karbondioksit; sera gazı ve küresel ısınmanın en temel sebeplerindedir. Bu yüzden araştırmacılar, inşaat sektöründe alternatif bağlayıcı geliştirmek için çaba göstermektedirler. Geopolimer teknolojinin uygulaması bu alternatiflerden birisidir. Gerçekten de geopolimerler beton imalatında ve inşaat mühendisliğinde yeni bir bağlayıcı madde olarak ortaya çıkmaktadır. Üstün kimyasal, mekanik ve teknik özelliklerinden başka geopolimerler Portland çimentosundan daha az miktarda sera gazı ortaya çıkarmaktadırlar. Uçucu kül esaslı ve cüruf esaslı geopolimerler üzerinde dünyada araştırmalar ve uygulamalar yapılmıştır. Ama pomza esaslı geopolimerler üzerinde dünyada çok az çalışmalara rastlanmaktadır. Bu çalışmada, çimento boyutunda öğütölmüş pomza agregasından 0,52, 0,60 ve 0,68 silika modölü, %4, %7 ve %10 Na₂O ve 0,36, 0,40 ve 0,44 su/bağlayıcı oranlarında 9 farklı geopolimer karışımından üretilen hamurlar üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu karışımlar için kür işlemi olarak ısı işlem (0, 12, 24, 48 ve 96 saat) ve bekleme süresi (0, 6, 12 ve 24 saat) olarak farklı kür sürelerine tabi tutulmuşlardır. Bu karışımlara ve kür sürelerine bağılı olarak birim ağırlık, ultra ses geçiş hızı, basınç mukavemeti, hacim değişikliği (büzölmesi) ve karışımların mikroyapı değişikliği incelenmiştir. Ayrıca en mukavemetli hamur karışımından üretilen harcın mukavemeti ve betonun yüksek sıcaklıktan (100~800°C) önce ve sonra birim ağırlıkları, ultra ses geçiş hızı, basınç mukavemetleri, ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklıklardaki mukavemet değişiklikleri incelenmiştir. En yüksek basınç mukavemeti; 0,68 silika modölüne ve 0,36 su/bağlayıcı oranına sahip hamur numunelerde elde edilmiştir. Ek olarak yapay sinir ağırları yöntemiyle geopolimer çimentoların mukavemet tahmini için karışım hesaplarına bağılı bir model önerilmiştir.

2013, 199 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geopolimer çimento, geopolimer beton, alkali-aktivatör, yapay sinir ağırları, pomza

ABSTRACT

PhD Thesis

THE INVESTIGATION OF HASANKALE PUMICE BASED GEOPOLYMER CEMENT PRODUCTION BY ALKALI AKTIVATION METHOD

Mehrzad MOHABBI YADOLLAHI

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ramazan Demirboğa

Nowadays concrete is the most widely used construction material and the environment impact of Portland cement is significant. In industry Portland cement is the most energy consuming construction material. Emitted carbon dioxide during the Portland cement production is the most basic cause of greenhouse gases and global warming. Therefore, researchers strive to develop an alternative binder in construction industry. Geopolymer technology application is one of these applications. Indeed geopolymer concrete manufacture is a new binder that has been emerged in civil engineering. In addition of superior chemical, mechanical and technical properties of Portland cement geopolymers produce lesser amount of greenhouse gases. Fly ash and slag based geopolymers have been investigated on the world but very few studies are found on the pumice-based geopolymers. In this study pumice aggregates have been ground in cement fineness and 9 different mixtures have been prepared with different silica modules (0.52, 0.60 and 0.68), different Na₂O content (4%, 7% and 10%) and different water/binder ratios (0.36, 0.40 and 0.44) for geopolymer matrixes investigation. different heat treatment duration (0, 12, 24, 48 and 96 hour) and pre-curing waiting time (0, 6, 12 and 24 hour) have been conducted for these mixtures curing. Unit weight, UPV, compressive strength, volume changes (shrinkages) and microstructures concern with curing times for selected mixtures have been studied. Also the compressive strength, unit weight for mortars and compressive strength, unit weight, UPV and thermal conductivity values for mortars and concretes produced from the best geopolymer mixtures, before and after high temperatures (100~800°C), have been evaluated. The maximum compressive strength has been obtained from mixture with silica module=0.68 and water/binder ratio=0.36. In addition, an artificial neural network model has been proposed for geopolymer cement compressive strength estimation.

2013, 199 pages

Keywords: Geopolymer cement, geopolymer concrete, pumice, alkali-activator, ANN

TEŞEKKÜR

Çalışmanın her aşamasında yardım, teşvik ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA'ya,

Çalışmaya fikirleri, bilgileri ve tecrübesi ile önemli katkılar sağlayan Sayın Prof. Dr. Rüstem GÜL'e,

Tez çalışması sürecinde sağladığı olanaklardan ve bu çalışmaya verdikleri destekten ötürü Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarında emeği geçen Sayın Dr. Rıza POLAT ve Dr. Fatma KARAGÖL'e şükranlarımı sunarım.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve her zaman yanımda olan çok değerli arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

BAP-2011/152 ve BAP-2012/440 nolu projelere vermiş olduğu destekten ötürü Atatürk Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Mehrzad MOHABBI YADOLLAHI

Eylül, 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ivi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışma Alanının Yeri ve Coğrafi Özellikleri.....	1
1.2. Amaç.....	2
1.3. Portland Çimentosu ve Çevre	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
2.1. Portland Çimento Alternatifleri.....	7
2.2. Alkali Aktivatörler	10
2.3. Geopolimer	16
2.4. Geopolimer Çimento	25
2.5. Geopolimer Beton	26
2.6. Puzolan Malzemelerin Tanımı ve Genel Sınıfları	29
2.6.1. Pomza	29
2.6.1.a. Pomzanın tanımı ve oluşumu	29
2.6.1.b. Pomzanın kullanımı ve genel özellikleri	33
2.6.1.c. Pomzanın diğer endüstriyel alanlardaki uygulamaları	34
2.6.2. Uçucu kül	35
2.6.3. Yüksek fırın cürufu	37
2.7. Uçucu Kül Esaslı Çimentolar ve Betonlar	38
2.8. Düşük Kalsiyumlu ve Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Beton	42
2.9. Geopolimer Beton Bileşenleri	42
2.10. Geopolimer Beton Üretiminde Karışım, Döküm ve Kür	42
2.11. Cüruf ile İlgili Yapılan Çalışmalar	43
2.12. Pomza Esaslı Çimentolar.....	45
2.13. Yapay Sinir Ağları	47

2.13.1. Yapay sinir ağları tanımı	47
2.13.2. Nöronun biyolojik yapısı ve nöron modeli.....	49
2.13.3. Yapay sinir ağlar yöntemiyle sorunların tahmini	51
2.13.4. Sinir ağı tasarımı	51
2.13.5. Sinir ağı simülatörü model mimarisi	52
2.13.6. Yapay sinir ağlar yönteminde veri hazırlama süreci	53
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	55
3.1. Deney Programının Tanıtımı.....	55
3.2. Materyal.....	55
3.2.1. Deneylede kullanılan malzemeler	55
3.2.2. Karma suyu.....	55
3.2.3. Geopolimer üretiminde kullanılan sodyum hidroksit	56
3.2.4. Geopolimer üretiminde kullanılan sodyum silikat	56
3.2.5. Geopolimer üretiminde kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi	57
3.2.6. Agrega	57
3.3. Deneylede Kullanılan Aletler.....	58
3.3.1. Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı	58
3.3.2 Yüksek sıcaklık fırını	59
3.3.3. Sarsma tablası (<i>flow</i>) deneyi.....	60
3.3.4. Fritsch mill öğütme cihazı	61
3.3.5. Ultra ses hızı ölçüm cihazı	61
3.3.6. Kalıplar.....	62
3.3.7. Pres cihazı.....	64
3.3.8. Kür fırını.....	64
3.3.9. Hidrometre	65
3.3.10. Hamur ve beton karıştırıcısı	65
3.3.11. Vikat aleti	66
3.3.12. Çimento inceliğinin belirlenmesinde kullanılan Blaine aleti	67
3.3.13. X-Işini difraksiyon spektroskopisi cihazı	68
3.3.14. Fourier transform infrared (kızılötesi) spektroskopisi (FTIR)	69
3.3.15. Taramalı elektron mikroskopu (SEM)	71

3.3.16. Hassas terazi	73
3.4. Yöntem	73
3.4.1. Testler için yapılan hazırlıklar	73
3.4.2. Geopolimer hamuru üretilmesi ve çözünme iyon prosedürü	76
3.4.3. Geopolimerlerde en uygun alkali çözeltinin belirlenmesi deneyleri.....	76
3.4.4. Geopolimerlerde en uygun malzeme ve kürün belirlenmesi deneyleri.....	77
3.4.5. Geopolimer özelliklerinin belirlenmesinde priz süresi tayini deneyleri.....	78
3.4.6. Kür süresinin geopolimerlerin mukavemetine etkisi.....	79
3.4.7. Isıl işlemden önce bekleme süresinin geopolimerlerin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi	79
3.4.8. Hacimsel büzülme	79
3.4.9. Geopolimerlerde mikro yapı analizleri ve karakterizasyonu	80
3.4.10. Basınç mukavemeti deneyi	81
3.4.11. Geopolimer beton için yapılan deney yöntemleri	81
3.4.11.a. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler	81
3.4.11.b. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)	82
3.4.11.c. Çok ince malzemenin muhtevası	83
3.4.11.d. Çok ince malzemenin kalitesi.....	84
3.4.11.e. Tane yoğunluğu ve su emme	84
3.4.12. Geopolimer beton deneylerinin parametrelerinin oluşturulması.....	87
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	89
4.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Öğütülmüş Pomza	89
4.2. Öğütülmüş Pomzanın XRD Değerlendirmesi	91
4.3. Öğütülmüş Pomzanın FTIR Değerlendirmesi	92
4.4. Öğütülmüş Pomzanın Granülometri Eğrisi	93
4.5. Pomza Esaslı Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri.....	94
4.5.1. Sodyum hidroksit ile aktive edilen geopolimerlerde silika modülünün, Na ₂ O miktarının ve kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi ve sonuçları.....	94
4.5.2. Geopolimer hamurlarda basınç mukavemeti ile UPV değerleri arasındaki ilişkinin incelenmesi	101

4.5.3. Sabit silika oranlarında Na ₂ O miktarının priz süresine olan etkisi	101
4.5.4. Sabit ve değişen su/bağlayıcı oranlarında Na ₂ O miktarının priz süresinde olan etkisi.....	103
4.5.5. Kür süresinin geopolimer hamurlarının basınç mukavemeti üzerindeki etkisi	104
4.5.6. Sertleşmiş ve taze geopolimerlerin yoğunluklarının karşılaştırılması	106
4.5.7. Kür aşamasında ısıt işlemler süresinin ve kürden önce bekletilme süresinin geopolimerlerin 28 günlük mukavemeti üzerindeki etkisi	110
4.5.8. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı geopolimer hamur numunelerde ısıt işlemler sıcaklığının basınç mukavemetine etkisi	113
4.5.9. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı geopolimerlerde farklı ısıt işlemler aşamalarında su/bağlayıcı miktarının geopolimerlerin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi.....	116
4.5.10. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı geopolimerlerde farklı ısıt işlemler aşamalarında kür süresinin geopolimerlerin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi	118
4.5.11. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı 3, 5 ve 7. grup geopolimer karışımlarının hacimsel değişimleri	122
4.6. Yapay Sinir Ağlar Yöntemiyle Pomza Esaslı Geopolimerlerin Basınç Mukavemetinin Tahmin Edilmesi	124
4.6.1. Geopolimerlerin basınç mukavemetlerinin modellenmesinde kullanılan sinir ağının özellikleri.....	125
4.7. En mukavemetli Karışımın Yüksek Sıcaklığa Maruz Kaldıktan Sonra Mekanik Özelliklerindeki Değişim	130
4.8. Geopolimerlerin Mikro Yapı Analizlerinin Sonuçları	132
4.8.1. Kızılötesi spektroskopisi	132
4.8.1.a. Üretilen dokuz pomza esaslı geopolimer karışımlarının kızılötesi spektroskopisi sonuçları	133
4.8.1.b. En mukavemetli karışımın yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kızılötesi spektroskopisi sonuçları	139

4.8.2. SEM görüntüleri yardımıyla geopolimerlerde mikroyapı analizlerinin değerlendirilmesi.....	144
4.9. Standart Geopolimer Harç Üretimi ve Numune Yaşının Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	164
4.10. Geopolimer Beton Üretimi.....	166
4.10.1. Agrega deneyleriyle ilişkin bulgular	166
4.10.2. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)	166
4.10.3. Tane yoğunluğu ve su emme.....	168
4.10.4. Çok ince malzemenin muhtevası.....	168
4.10.5. Çok ince malzemenin kalitesi.....	168
4.10.6. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi.....	169
4.10.7. Karışım oranlarının belirlenmesi.....	169
4.10.8. Üretilen pomza esaslı geopolimer betonun hacim kontrolü.....	170
4.10.9. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı	171
4.10.10. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	172
4.10.10. a. Çökme deneyi	172
4.10.10. b. Taze betonda birim ağırlık	173
4.10.11. Sertleşmiş beton deneyleri.....	173
4.10.11.a. Sertleşmiş geopolimer betonda birim ağırlık.....	174
4.10.11.b. Sertleşmiş geopolimer betonda basınç mukavemeti tayini	174
4.10.11.c. Sertleşmiş geopolimer betonlarda YS-yoğunluk ilişkisi	181
4.10.11.d. Sertleşmiş betonda YS- ısı iletkenlik değerleri (W/Mk) ilişkisi tayini ...	183
4.10.11.e. Sertleşmiş betonda YS- UPV(m/s) ilişkisi tayini	185
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	187
KAYNAKLAR	190
ÖZGEÇMİŞ	200

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Erzurum ili Pasinler ilçesi civarında Demirdöven pomza yatağının haritası ...	1
Şekil 2.1. Atmosferik CO ₂ konsantrasyonu (ppm) ile dünya PÇ üretiminin (milyon ton) yıllara göre değişimi	9
Şekil 2.2. 2015 yılı için çimento çeşitleri dağılımı (toplam 3500 milyon ton)	10
Şekil 2.3. Geopolimerlerin moleküler ağları.....	17
Şekil 2.4. Geopolimer reaksiyonları	18
Şekil 2.5. Geopolimerlerde kovalan bağlar.....	19
Şekil 2.6. Geopolimerlerde atomik oranlara göre 4 ana bileşen	21
Şekil 2.7. Na ₂ O yardımıyla camsı silikadan poly siloxonate üretimi	22
Şekil 2.8. Oligomerlerden poly (sialate) üretimi	22
Şekil 2.9. Başarılı uygulamalarda geopolimer türleri	23
Şekil 2.10. Yol kaplaması onarım malzemesi olarak Amerika'da Pyrament kullanımı.....	24
Şekil 2.11. Köpüklü geopolimer	24
Şekil 2.12. Potasyum esaslı geopolimer çimentosunun priz alma süreci	25
Şekil 2.13. Pomza agregasının oluşum evreleri	30
Şekil 2.14. Pomza agregasının gözenekli yapısı	31
Şekil 2.15. Geopolimerlerin sülfata karşı etkilenmesi	40
Şekil 2.16. Basit bir nöron yapısı.....	49
Şekil 2.17. Basit nöron modeli.....	50
Şekil 2.18. YSA' nın genel blok şeması.....	50
Şekil 2.19. Geriye yayılma (<i>back propagation</i>) eğitim algoritması ile çok katmanlı ileri beslemeli (<i>feed-forward</i>) yapay sinir ağı (<i>MFNN</i>)	53
Şekil 3.1. Elenerek tane sınıflarına ayrılmış olan agregalar	58
Şekil 3.2. Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı	59
Şekil 3.3. Yüksek sıcaklık fırını.....	59
Şekil 3.4. Fırına ait sıcaklık–zaman grafiği	60
Şekil 3.5. Sarsma tablası deney aleti.....	60
Şekil 3.6. Pomzayı öğütmek için kullanılan FRITSCH Mill öğütme cihazı	61

Şekil 3.7. Ultra ses hızı ölçüm cihazı	62
Şekil 3.8. Ultrases hızı ölçüm cihazı blok şeması.....	62
Şekil 3.9. Beton ve hamur numune üretiminde kullanılan kalıplar	63
Şekil 3.10. Beton deneylerinde 100x200mm boyutlarında plastik malzemedен yapılmış portatif silindir beton kalıpları	63
Şekil 3.11. Beton pres aleti	64
Şekil 3.12. Kür ve kurutma fırını	64
Şekil 3.13. Hidrometre cihazı	65
Şekil 3.14. Geopolimer üretiminde kullanılan laboratuvar tipi karıştırıcı	66
Şekil 3.15. Vikat aletleri	66
Şekil 3.16. Klasik Blaine cihazı.....	67
Şekil 3.17. Örnek olarak bir XRD cihazı.....	68
Şekil 3.18. FTIR cihazı	71
Şekil 3.19. Şematik olarak SEM cihazının çalışması	72
Şekil 3.20. Hassas terazi ve hacimsel rötre deney düzeneği.....	73
Şekil 4.1. Hasankale pomzasının X-ışını difraksiyon spektroskopisi sonucu	91
Şekil 4.2. Pomza numunesinin FTIR spektrum grafiği.....	92
Şekil 4.3. Deneylede kullanılan öğütölmüş pomzanın granölometri eğrisi.....	93
Şekil 4.4. Pomza esaslı geopolimerlerin genel görünümü.....	94
Şekil 4.5. Na ₂ O miktarının 28 günlük basınç mukavemeti üzerindeki etkisi	98
Şekil 4.6. Na ₂ O miktarının 28 günlük UPV değerleri üzerindeki etkisi.....	99
Şekil 4.7. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na ₂ O miktarının basınç mukavemeti üzerindeki etkisi	100
Şekil 4.8. Farklı modellerde UPV ve basınç mukavemetleri arasında olan ilişki.....	101
Şekil 4.9. Sabit silika oranlarda Na ₂ O miktarının priz başlama süresine etkisi.....	102
Şekil 4.10. Sabit silika oranlarda Na ₂ O miktarının priz sona erme süresine etkisi	102
Şekil 4.11. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na ₂ O miktarının priz başlama süresine etkisi	103
Şekil 4.12. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na ₂ O miktarının priz sona erme süresine etkisi	103

Şekil 4.13. Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (65°C kür için)	106
Şekil 4.14. Kurutulmuş ve taze geopolimerlerin yoğunluklarının karşılaştırılması	107
Şekil 4.15. Taze ve kurutulmuş geopolimerlerde Na ₂ O miktarının etkisi (SM=0,52)	108
Şekil 4.16. Taze ve kurutulmuş geopolimerlerde Na ₂ O miktarının etkisi (SM=0,60)	109
Şekil 4.17. Taze ve kurutulmuş geopolimerlerde Na ₂ O miktarının etkisi (SM=0,68)	109
Şekil 4.18. Kür aşamasında ısıtma süresinin geopolimerin 28 günlük mukavemeti üzerinde etkisi (65°C kür için)	111
Şekil 4.19. Ön bekleme süresinin 3 günlük basınç mukavemetine olan etkisi (65°C kür için).....	113
Şekil 4.20. 25°C’de ısıtma işleminden sonra Na ₂ O miktarının 28 günlük basınç mukavemetine etkisi.....	114
Şekil 4.21. 45°C’de ısıtma işleminden sonra Na ₂ O miktarının 28 günlük basınç mukavemetine etkisi.....	115
Şekil 4.22. 85°C’de ısıtma işleminden sonra Na ₂ O miktarının 28 günlük basınç mukavemetine etkisi.....	115
Şekil 4.23. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na ₂ O miktarının basınç mukavemetine etkisi (25°C ısıtma işleminde).....	117
Şekil 4.24. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na ₂ O miktarının basınç mukavemetine etkisi (45°C ısıtma işleminde)	117
Şekil 4.25. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na ₂ O miktarının basınç mukavemetine etkisi (85°C ısıtma işleminde).....	118
Şekil 4.26. Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (25°C kür için)	119
Şekil 4.27. Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (45°C kür için)	120
Şekil 4.28. Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (85°C kür için).....	121

Şekil 4.29. 3, 5 ve 7 nolu karışımların ilk 24 saateki hacimsel davranışı.....	123
Şekil 4.30. MATLAB programında öğrenimden sonra öğrenim kutusundan bir görünüm	127
Şekil 4.31. MATLAB programında öğrenimden sonra <i>gradient descent</i> değişmesi.....	128
Şekil 4.32. Geopolimerlerde YSA yönteminden alınan sonuçlar ile deneylerden alınan sonuçların karşılaştırılması.....	129
Şekil 4.33. Geopolimerlerde YSA yönteminden alınan sonuçlar ile deneylerden alınan sonuçların Çizelge 4.18'e göre karşılaştırılması	129
Şekil 4.34. Yedinci karışımdan üretilen geopolimerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç mukavemetindeki değişim.....	131
Şekil 4.35. Yedinci karışımdan üretilen geopolimerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra yoğunluklardaki değişim	131
Şekil 4.36. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen dokuz karışımın FTIR sonucularının karşılaştırılması.....	134
Şekil 4.37. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen birinci karışımın FTIR sonucu.....	135
Şekil 4.38. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen ikinci karışımın FTIR sonucu	135
Şekil 4.39. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen üçüncü karışımın FTIR sonucu	136
Şekil 4.40. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen dördüncü karışımın FTIR sonucu	136
Şekil 4.41. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen beşinci karışımın FTIR sonucu.....	137
Şekil 4.42. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen altıncı karışımın FTIR sonucu.....	137
Şekil 4.43. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın FTIR sonucu.....	138
Şekil 4.44. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen sekizinci karışımın FTIR sonucu.....	138

Şekil 4.45. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen dokuzuncu karışımın FTIR sonucu.....	139
Şekil 4.46. En mukavemetli karışımların yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kızılötesi spektroskopi sonuçları	139
Şekil 4.47. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 100°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	140
Şekil 4.48. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	140
Şekil 4.49. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 300°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	141
Şekil 4.50. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	141
Şekil 4.51. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 500°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	142
Şekil 4.52. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	142
Şekil 4.53. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 700°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	143
Şekil 4.54. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu	143
Şekil 4.55. Yedinci karışımda yüksek sıcaklıktan önce oluşan geopolimer (N-A-S-H jeli)	144
Şekil 4.56. Yedinci karışımdan yüksek sıcaklıktan önce birinci spektrumda EDX sonuçları	145
Şekil 4.57. Yedinci karışımda yüksek sıcaklıktan önce oluşan geopolimer (N-A-S-H jeli)	145
Şekil 4.58. Yedinci karışımdan yüksek sıcaklıktan önce ikinci spektrumda EDX sonuçları	146
Şekil 4.59. Yedinci karışımın 1000 kat büyütülmüş mikroyapısı.....	147
Şekil 4.60. Kalın ve ince sodyum kristalleri ve kısmen geopolimerleşmiş pomza.....	147

Şekil 4.61. Geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün, N-A-S-H jeli ve kenarındaki oluşan çatlaklar.....	147
Şekil 4.62. Kısmen geopolimerleşen pomza ve reaksiyona girmeyen sodyum kristalleri.....	148
Şekil 4.63. Kalın ve ince sodyum kristalleri	148
Şekil 4.64. Geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün	149
Şekil 4.65. Yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	150
Şekil 4.66. Yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	150
Şekil 4.67. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunenin mikro yapısı	152
Şekil 4.68. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede ara ürün, Na-A-S-H jeli ve kenarındaki çatlaklar.....	152
Şekil 4.69. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün	153
Şekil 4.70. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede geopolimerleşme	153
Şekil 4.71. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün ve Na-A-S-H jeli.....	154
Şekil 4.72. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	155
Şekil 4.73. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	155
Şekil 4.74. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (ara ürün bölgesinden)	156
Şekil 4.75. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları (ara ürün bölgesinden)	156
Şekil 4.76. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (ara ürün bölgesinden)	157
Şekil 4.77. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	158
Şekil 4.78. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	159
Şekil 4.79. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	159
Şekil 4.80. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	160
Şekil 4.81. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	160

Şekil 4.82. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	161
Şekil 4.83. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı ...	162
Şekil 4.84. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	162
Şekil 4.85. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (gözenekli yapı)	163
Şekil 4.86. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (amorfluk ve sıkı yapıya sahip Na-A-S-H jeli)	163
Şekil 4.87. Standart geopolimer harçlarda numune yaşının basınç mukavemetine etkisini	165
Şekil 4.88. Beton bileşiminde kullanılan agrega granülometri eğrisi	167
Şekil 4.89. Geopolimer betonların 48 saat fırında kür edilmesi	171
Şekil 4.90. Üretilen beton numunelerinin görünüşü	172
Şekil 4.91. Üretilen beton numunelerinin ve hamurların yüksek sıcaklıklara maruz kalandan sonra yan görünüşü	176
Şekil 4.92. Üretilen beton numunelerinin ve hamurların yüksek sıcaklıklara maruz kalandan sonra üstten görünüşü	177
Şekil 4.93. Geopolimer betonlarda YS-basınç mukavemeti ilişkisi	177
Şekil 4.94. Geopolimer betonlarda YS-basınç mukavemeti ilişkisi	178
Şekil 4.95. Geopolimer betonlarda YS-yoğunluk ilişkisi	182
Şekil 4.96. Geopolimer betonlarda YS-yoğunluk ilişkisi	183
Şekil 4.97. Geopolimer betonlarda YS-ısı iletkenlik değeri (W/Mk) ilişkisi	184
Şekil 4.98. Geopolimer betonlarda YS-ısı iletkenlik değeri (W/Mk) ilişkisi	184
Şekil 4.99. Geopolimer betonlarda YS- UPV (m/s) ilişkisi	186
Şekil 4.100. Geopolimer betonlarda YS- UPV (m/s) ilişkisi	186

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Portland çimentolar ile alternatif çimentoların üretiminde oluşan CO ₂ miktarları.....	8
Çizelge 2.2. Si/Al oranına bağlı geopolimerlerin uygulamaları	23
Çizelge 2.3. Farklı malzemelerin geçirgenlik değerleri (cm/s)	26
Çizelge 2.4. Türkiye pomza rezervleri dağılımı	32
Çizelge 2.5. Asidik pomza ile bazik pomzanın kimyasal bileşimi	33
Çizelge 2.6. Türkiye’deki pomza agregalarının genel olarak fiziksel ve kimyasal özellikleri	35
Çizelge 2.7. Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları	37
Çizelge 2.8. Bilgisayar ile insan beyni arasındaki çalışma sistem yapısının karşılaştırılması.....	48
Çizelge 3.1. Deneilerde kullanılan sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	56
Çizelge 3.2. Deneilerde kullanılan sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri ..	56
Çizelge 3.3. GLENIUM C303 Akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri	57
Çizelge 3.4. Üretilen seriler ve kullanılan alkali çözeltiler	77
Çizelge 3.5. TS706 EN 12620’de belirtilen çok ince malzeme muhtevasının en yüksek değerlerine göre belirlenmiş sınıflar.....	83
Çizelge 4.1. Öğütülmüş pomza agregasının fiziksel analiz sonuçları	89
Çizelge 4.2. Öğütülmüş pomza agregasının kimyasal analiz sonuçları.....	90
Çizelge 4.3. Öğütülmüş pomza agregasının XRD sonuçları	91
Çizelge 4.4. Deneilerde kullanılan öğütülmüş pomzanın granülometri değerleri	93
Çizelge 4.5. Hasankale pomzasından üretilen geopolimerlerin karışım hesapları	95
Çizelge 4.6. Geopolimerlerin priz süreleri, UPV değerleri, sarsma tablası sonuçları ve 28 günlük basınç değerleri	96
Çizelge 4.7. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (65°C kür için)	105
Çizelge 4.8. Kurutulmuş ve taze geopolimerlerin yoğunluklarının karşılaştırılması ...	107
Çizelge 4.9. Kür aşamasında ısı işlem süresinin geopolimerin 28 günlük mukavemeti üzerinde etkisi (65°C kür için)	110

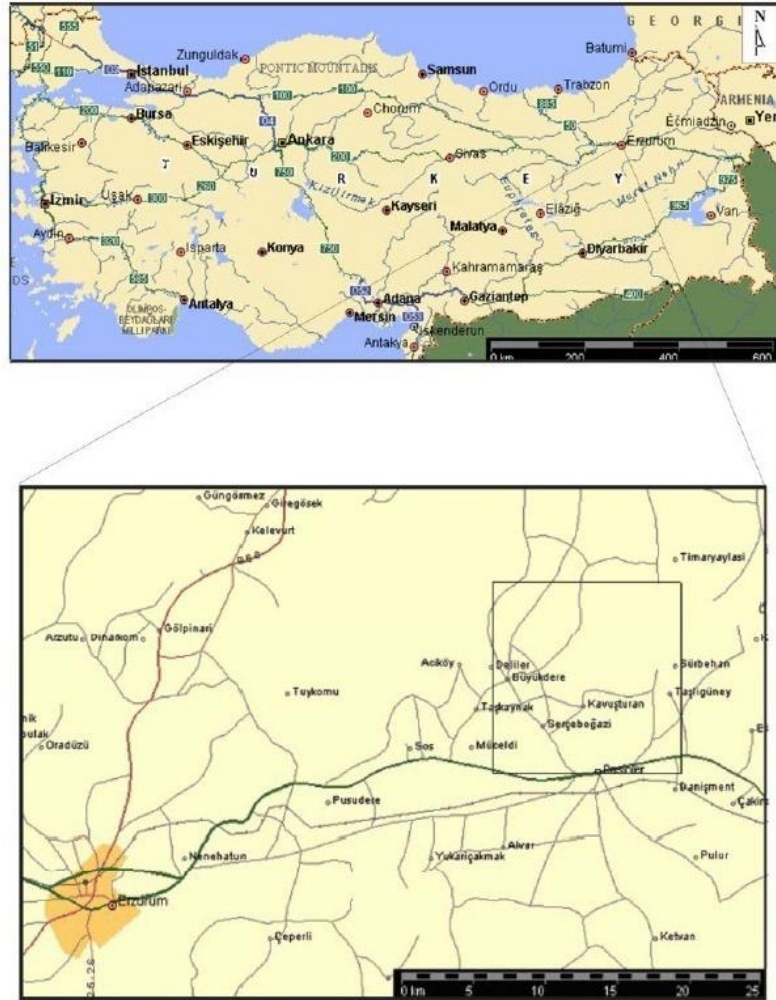
Çizelge 4.10. Ön bekleme süresinin 3 günlük basınç mukavemetinde olan etkisi (65°C kür için).....	112
Çizelge 4.11. Farklı sıcaklıklarda ısıtılardan sonra numunelerin basınç mukavemeti	114
Çizelge 4.12. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (25°C kür için)	119
Çizelge 4.13. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (45°C kür için)	120
Çizelge 4.14. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (85°C kür için)	121
Çizelge 4.15. Hacimsel Rötne Sonuçları (%).....	122
Çizelge 4.16. Geopolimerlerin basınç mukavemetinin tahmin edilmesinde kullanılan YSA özellikleri.....	125
Çizelge 4.17. Deneylelerden alınan basınç mukavemeti ve UPV sonuçları ve karışımında kullanılan giriş değerleri	126
Çizelge 4.18. Geopolimerlerde YSA yönteminden alınan sonuçlar ile deneylelerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması	128
Çizelge 4.19. Yedinci karışımından üretilen geopolimerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç mukavemeti ve yoğunluklardaki değişimi.....	130
Çizelge 4.20. Alumino-silikat malzemelerin içerdiği bağların titreşim frekansları.....	132
Çizelge 4.21. Hasankale pomzası ve Hasankale pomzasından üretilen geopolimerlerin içerdiği bağların dalga boyutları	133
Çizelge 4.22. Yedinci karışımında yüksek sıcaklıktan önce birinci spektrumda EDX sonuçları	145
Çizelge 4.23. Yedinci karışımında yüksek sıcaklıktan önce ikinci spektrumda EDX sonuçları	146
Çizelge 4.24. Yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	151
Çizelge 4.25. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	155
Çizelge 4.26. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları (ara ürün bölgesinden)	157
Çizelge 4.27 Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	159

Çizelge 4.28. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları	162
Çizelge 4.29. Standart geopolimer harçlarda numune yaşının basınç mukavemetine etkisini	165
Çizelge 4.30. Geopolimer beton karışımları için elek analiz sonuçları	166
Çizelge 4.31. Beton bileşiminde kullanılan agrega granülometri özellikleri.....	167
Çizelge 4.32. Tane yoğunluğu ve su emmesi	168
Çizelge 4.33. Çok ince malzemenin muhtevası	168
Çizelge 4.34. 1000dm ³ geopolimer beton için karışım hesabı.....	170
Çizelge 4.35. Betonda kullanılan malzemelerin yoğunlukları.....	170
Çizelge 4.36. Üretilen geopolimerin betonun fiziko-mekanik özellikleri	176

1. GİRİŞ

1.1. Çalışma Alanının Yeri ve Coğrafi Özellikleri

İnceleme alanı Erzurum ilinin doğusunda Pasinler ilçesi civarında yaklaşık olarak 170 km²'lik sahayı kapsamaktadır (Şekil 1.1). İnceleme alanındaki diğer yerleşim birimleri Taşlıgüney, Tımar, Üğümü, Kavuşturan, Yayladağ, Serçeboğazı, Aşıtlar, Kurbançayırı, Büyükdere ve Kotandüzü köyleridir (Kılıç 2006).



Şekil 1.1. Erzurum ili Pasinler ilçesi civarında Demirdöven pomza yatağının haritası

1.2. Amaç

Beton, Türkiyede ve dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi olma özelliğini halen korumaktadır. Bu nedenle günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzeme normal Portland çimentosudur. Tüketimdeki bu yüksek oran enerji, ekonomik ve çevresel problemleride ortaya çıkarmıştır. Dünyada toplam CO₂ yayılımının %7'si çimento üretiminden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu yüzden Portland çimentosuna alternatif çimentolar üretmek güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Ayrıca çimento, yüksek sıcaklıkta (1400-1500°C) üretildiği için önemli ölçüde enerji tüketimi ve dolayısıyla yüksek maliyetlerle elde edilmektedir. Birçok araştırmada; yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi doğal ya da yapay puzolanların aktive edilmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Türkiyede çok miktarda bulunan pomzayı normal Portland çimentosuna alternatif olarak aktive edilerek kullanıldığında; enerji, ekonomiklik ve çevresel problemlerin azaltılması gibi birçok açıdan yararlı olacağı beklenmektedir ve prefabrik elemanların üretimlerinde gereken işlemlerde daha kolaylık sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışmada,

- Türkiyede mevcut bulunan pomza stoku aktif bir şekilde değerlendirilecektir.
- Doğal malzemelerin kullanılmasıyla Portland çimentosunun üretiminden dolayı meydana gelen CO₂ emisyonu azalacaktır.
- Çimento üretimi esnasında harcanan enerji kaybının azaltılması amaçlanmaktadır.
- Normal Portland çimentosuna alternatif olarak üretilecek geopolimer çimento ile üretilen geopolimerlerin priz alma süresi mineral katkılı çimentolara göre kısaltılması araştırılacaktır.
- Bu çalışmada pomzanın alkali aktivatörlerle aktif hale getirilerek bağlayıcı madde olarak kullanılmasıyla literatürdeki boşluğu dolduracağı beklenmektedir.
- Geopolimer çimento ile üretilen betonun yüksek sıcaklık mukavemeti direncinin iyi olduğu literatürden bilinmektedir. Bağlayıcı madde olarak aktive edilmiş pomzadan

üretilen betonun ve hamurun yüksek sıcaklık (YS) direncini kontrol edilecektir.

- Pomzanın alkali aktivasyon mekanizması ile ilgili bilgiler ortaya konulmuş olacaktır.
- Pomzayı daha aktif hale getirecek ve mekanik özelliklerini iyileştirecek alkali oranı ve molaritesi belirlenecektir.
- Portland çimentosunun yerine kullanılacak aktive edilmiş pomza oranlarıyla üretilen hamurların, harçların ve betonların bazı fiziko-mekanik özellikleri (ultra ses geçiş hızı, ısı iletkenlik (TC) katsayısı ve yoğunlukları) tespit edilecektir.
- Su/bağlayıcı oranının aktive edilmiş pomzanın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılacaktır.
- Aktive edilmiş pomza ile üretilmiş numuneler için en iyi kür şartları tespit edilmiş olacaktır.
- Pomza ile aktif edilmiş betonlara hedef basınç mukavemeti ile ilgili karışım tasarımı oluşturulacaktır.
- Yapay sinir ağlar yöntemiyle farklı koşullar altında üretilen geopolimerlerin basınç mukavemetinin tahmini için bir modelin oluşturulması incelenecektir.
- Geopolimer hamur numunelerin içyapıları SEM ve FTIR ölçümleri ile değerlendirilecektir.

1.3. Portland Çimentosu ve Çevre

1800'lerden bu yana, yani normal çimentonun üretilmesinden sonra, normal çimentodan üretilen beton dünyanın en yaygın yapı malzemesi olmuştur ve şu an malzemeler içerisinde su hariç en çok kullanılan malzemedir (Duxson *et al.* 2008). Diğer taraftan çimento üretiminin ayrılmaz bir kısmında; üretim esnasında yüksek miktarda karbondioksit (CO₂) ortaya çıkması ve büyük miktarda enerji tüketilmesidir. Bu büyük çevresel bir sorundur. Ancak yapı malzemelerine olan yüksek talep nedeniyle çimento özelliklerini sağlayan ekonomik bir alternatif malzeme hazır olana kadar bu sorun kaçınılmaz görünmektedir. Dünyada bu sorun iyice tanımlanmıştır. Bu soruna neden olan en önemli faktör çimento üretiminde yüksek miktarda sıcaklığa gereksinim

duyulmasıdır. Çimento üretiminde kullanılan fırınlarda sıcaklık 1400°C'ye varmaktadır. Bunun sonucu olarak CO₂ salınımının yarısı çimento üretimi esnasında kullanılan yakıttan ve diğer yarısı ise kalsinasyonda kalsiyum karbonatın kalsiyum oksite dönüşmesinden kaynaklanmaktadır (Hendriks *et al.* 2003).

Sera gazı salınımı ve küresel ısınma günümüzde tüm insanlığın en büyük sorunlarındanıdır. Bu sorunlara yol açabileceği deniz seviyelerinin yükselmesi, iklim değişiklikleri gibi problemler insanoğlunu kaygılandırmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması ve arazi kullanımını değişikliği ile artan sera gazının, yer kürenin ortalama yüzey sıcaklığında olan etkisi dünya üzerinde daha fazla risklere neden olmaktadır ve deniz seviyeleri üzerinde etkileri daha korkunç duruma gelmektedir.

Huntzinger (2009) tarafından yapılan bir çalışmada çevre sorunlarını ölçmek için Portland çimentosu ve diğer üç değişik teknolojidenden üretilen bağlayıcıların "küresel ısınma faktörü" incelemiştir (Huntzinger *et al.* 2009). 1-Katkılı çimento (doğal puzolanlar) 2- Çimento üretimi esnasında ortaya çıkan tozlar (yan ürünler) ile bağlayıcı üretilmesi 3- Çimento üretiminde CO₂ üretimine neden olan aşamaların azaltılması ile üretilen çimentolar. Bu yöntemler arasında farklı oranlarda çimento yerine doğal puzolanlar kullanışamsı küresel ısınma faktörü azaltıcısı olarak en etkili yöntem tanımlanmıştır. Ama gerçekte, sanayide, yüksek çimento talebi nedeniyle fırınlar kapasite kullanımını üzerinde faaliyet göstermektedir. Bu nedenle katkılı çimentolar karbondioksit azaltmak için çok yararlı yöntem olamaz. Sonuç olarak mevcut olan yöntemlerin hepsi atmosfer hasarlarına neden olmaktadır ve Portland çimentosu yerine alternatif bağlayıcılar kullanarak bu hasarlar önlenabilir.

Çoğu araştırmacı tarafından alternatif bağlayıcı araştırmalarına rağmen beton üretiminde kullanılan çimentonun üretiminde azalma görülmemektedir. Bu yüzden Portland çimentosuna alternatif bağlayıcıların üretimi araştırılması gerekmektedir. Portland çimentolarına alternatif bağlayıcılar geliştirildiği takdirde, aynı miktarda

normal çimentoğa göre geopolimer çimento ile betonların üretilmesinde sera gazı salınımı daha az olacaktır.

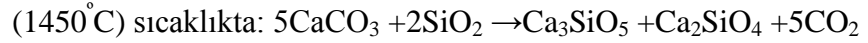
Normal çimento esaslı altyapı sistemlerinin sürdürülebilirliği iki faktör tarafından belirlenmektedir: 1-Malzemenin çevre dostu olması ve 2- Dayanıklılık. Çimentolu sistemlerde malzemenin çevre dostu olması 3 faktöre bağlıdır: malzeme üretimi için gereken kaynaklara (su, kireçtaşı, vb.), üretim prosedüründe çevre kirliliğine yol açan maddelere (öncelikle CO₂ gazının kalsinasyon aşamasında meydana gelmesi) ve kullanılan enerji (yani malzemenin üretiminde, taşımada ve yükleme esnasında tüketilen enerjiler). Çevre dostu ve dayanıklı yeni yapı malzemeleri yapıların uzun vadeli maliyetlerini azaltabilir. Böyle dayanıklı ve çevre dostu olan malzeme gelişmiş sürdürülebilir sistemlere yol açacaktır (Sakuich 2011).

2009 yılında dünyada yaklaşık 2,8Gt yani yaklaşık 6km³ hacminde normal çimento üretilmiştir. 2010 yılında ABD’de çimento miktarının 99Mt’dan 70Mt miktarına düşmesine rağmen büyük üreticilerin çimento üretim miktarı 2008 yılının seviyelerinde kalmıştır. Bu seviye 2000 yılına göre %78 artış göstermektedir (Gartner 2004; Van Oss 2010). Normal çimento üretiminin artması dünya nüfusunun artması ve alt yapı sistemlerinin gelişmesiyle bu yüzyılın sonuna kadar 2 kat olması beklenmektedir (Lawson *et al.* 2008).

Sanayileşmiş ve gelişmiş ülkelerde normal Portland çimentosu üretimi yeni inşaatlar için ve mevcut yapıların tamir ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde artırılacak. ABD tek başına 7 milyar m³ beton tüketmektedir ve bu miktarın çoğunluğu en az 20 yıllık binalar içindir ve her yıl bu miktara 350 milyon m³ ilave edilmektedir (Emmons *et al.* 2006).

Beton bir yapının neredeyse bir yüzyıl ömrü olmasına rağmen şiddetli koşullarda bazı sistemlerde bazen beş yıl gibi kısa sürelerde pahalı bakım gerekmektedir (Emmons *et al.* 2006). Modern bir alt yapı oluşturmak için normal Portland çimentosu kullanılmaktadır ve kullanılmasının en önemli sorunu CO₂ gazının atmosfere bırakılmasıdır. Kimyasal

olarak normal Portland çimentosu trikalsiyum ve dikalsiyum silikat karışımlarından meydana gelmektedir. Normal çimento üretimi kireç taşının ve silikatların yüksek sıcaklıklarda pişirmesine dayanır. Aşağıdaki denklemlere göre bir ton çimento üretimi yaklaşık yarım ton CO₂ üretimine neden olmaktadır (Hendriks *et al.* 2003; Hardjito *et al.* 2004; Davidovits 2011):



Yüksek oranda çimento talebi olan ülkeler küçük ölçekli fırınların büyük verimli fırınlara çevirmektedirler. Özellikle Çin 2030 yılında çimento ihtiyacının %95'ini yeni fırınlardan üretilmesini planlamıştır (Taylor *et al.* 2006).

CO₂ gazının kireç taşı kalsinasyonundan meydana gelmesi kimyasal reaksiyonların bir parçası olduğundan bu emisyonu azaltmak için kimyasal formüllerde değişik yapmak en yararlı çözüm olmaktadır. Toplamda insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının %5-%8'i çimento sektörüne aittir (Davidovits 1994a; Worrell *et al.* 2001; Hendriks *et al.* 2004; Duxson *et al.* 2007a,b; Damtoft *et al.* 2008; Duxson *et al.* 2008; Scrivener *et al.* 2008).

Ayrıca normal çimento üretimi yoğun enerji tüketilen bir işlemdir. Çimento fırınlarında gerekli sıcaklığı sağlamak için kullanılan enerji ve öğütme cihazlarının çalışması için kullanılan enerji toplam 4-5Gj olmaktadır ve bunun sonucunda 0,5 ton CO₂ gazı meydana gelmektedir. Tüketilen bu enerji miktarı dünya endüstriyel enerji tüketiminin %5'idir (Davidovits 1994a; Worrell *et al.* 2001; Hendriks *et al.* 2004; Phair *et al.* 2006; Taylor *et al.* 2006; Scrivener *et al.* 2008).

Yakın gelecekte çimento üretimine ait *antropojenik* CO₂ emisyonlarının miktarı dünyada üretilen CO₂ miktarının yaklaşık %10'una varacaktır (Liu *et al.* 1995; Worrell *et al.* 2000; Capros *et al.* 2001; Von Bahr *et al.* 2003; Szabó *et al.* 2006; Taylor *et al.* 2006 Huntzinger *et al.* 2009).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Portland Çimento Alternatifleri

Genellikle çimento ve beton kelimelerinin anlamları arasında karışıklık meydana gelmektedir hâlbuki çimento bir bağlayıcı ama beton çimento ve agrega ve sudan üretilen bir kompozit malzemedir. Altyapı dünyasındaki gelişmeler devam ettikçe gelecekte beton için yüksek bir talep olduğu öngörülebilir. Beton üretiminde çimentoya dayanıklılık yönünden alternatif olarak, çimento yerine kısmen uçucu kül, silis dumanı gibi puzolan malzemeler kullanılmaktadır. Bu mineral katkıları ile bir miktar çimento kullanımını azalacaktır fakat geopolimer çiment kullanıldığı takdirde çimento tüketimi önemli derecede azalacaktır dolayısıyla CO₂ salınımı azalacaktır. Çimentoya alternatif malzemelerin henüz inşaat sektöründe etkili ve önemli bir yeri olmamasını söylersek yanlış olmayacaktır. Ancak çevresel açıdan sürdürülebilir betonla araştırmalarda yalnız çimento yerine başka bir malzeme kullanmakla değil belki katkılı çimentolar kullanmakta bir yöntem sayılır. Bu çimentolarda puzolanlar normal çimentoya karıştırılmaktadır bu puzolanlar uçucu kül, cüruf ve pomza olabilir.

Literatürdeki araştırmalarda kül esaslı geopolimerlerin erken mukavemetleri, aside karşı dirençleri, sülfat karsısındaki davranışları, büzülme ve rötreleri incelenmiştir (Allahverdi *et al.* 2001a; Allahverdi *et al.* 2001b; Allahverdi *et al.* 2001c; Bakharev 2005a,b,c; Song *et al.* 2005; Allahverdi *et al.* 2006; Wallah *et al.* 2006; Thokchom *et al.* 2009 a,b). Daha dayanıklı ve çevre dostu bir malzeme oluşturulması için farklı çalışmalar yapılmıştır (Duxson *et al.* 2007; Meyer 2009; Weil *et al.* 2009; Damineli *et al.* 2010; Komnitsasa 2011).

Geopolimer çimentolar ve betonların gelecekte normal çimento ve normal çimentodan üretilen betonların yerine kullanılması beklenmektedir ve şu an çimento için bir alternatif gibi düşünülmektedir. Şimdiye kadar geopolimerlerin çevresel etkileri üzerinde sınırlı sayıda araştırmalar yapılmıştır ve sonuçlara göre standart türde

geopolimerlerin üretilmesi normal çimentoya göre, küresel ısınma üzerinde daha az bir etkisi olacağı anlaşılmıştır (Duxson *et al.* 2007a,b; Meyer 2009; Damireli *et al.* 2010). Weil *et al.* (2009) çalışmalarında küresel ısınma, enerji ve kaynak tüketiminin incelenmesi için iki geopolimer karışımı hazırlamıştır. Bu çalışmanın sonunda uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimerlerin üretiminde normal çimentoya göre daha az CO₂ üretildiği gösterilmiştir. Çimento fabrikalarında CO₂ miktarının düşürülmesi için en uygun yöntem uygun oranda Si/Al oranına sahip geopolimer hammaddesi bulmaktır (Komnitsasa 2011).

Normal Portland çimentosunun yaygın kullanılması kendisini oluşturan hammaddelerin yerli ve ekonomik olmasındandır. Alternatif olarak üretilecek çimento bağlayıcılarının normal Portland çimento üretimine oranla endüstri için yeterli miktarda ve kullanılabilir olması gerekmektedir. Bazı alternatif malzemelerden üretilen çeşitli bağlayıcıların üretimi esnasında yaydıkları CO₂ salınım miktarları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Bu bağlayıcılar, kalsiyum alüminat esaslı çimentolar, kalsiyum sülfat esaslı çimentolar, magnezi çimentolar ve alkali aktive edilmiş çimentolardır. Bu son bağlayıcı çeşidi daha az karbondioksit salınımının yanında, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yanürünlerin yararlanılmasında kullanıldığı için giderek artan bir cazibeye sahiptir (McNulty 2009).

Çizelge 2.1. Portland çimentolar ile alternatif çimentoların üretiminde oluşan CO₂ miktarları

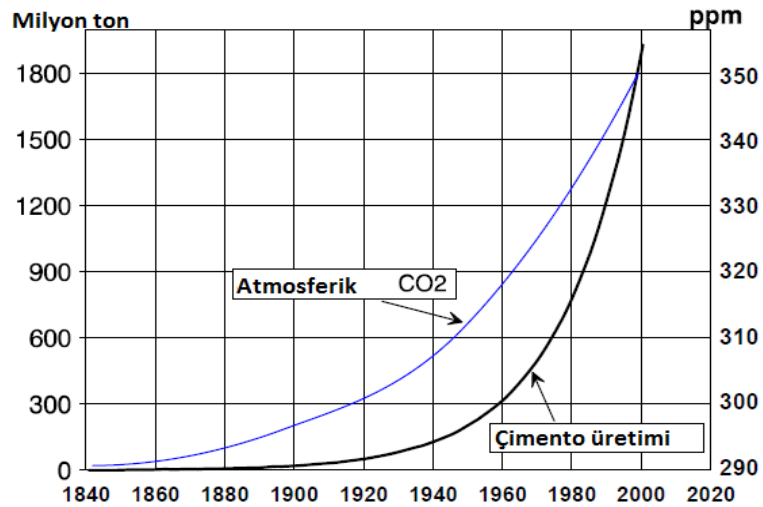
Çimento Bileşeni	Kullanılan Ana Malzeme	Üretilen CO ₂ Miktarı (1 g CO ₂ /1g Ürün)
M (Magnezyum oksit)	Magnezit	1,092
C (Sönmemiş kireç)	Kalker	0,785
C ₃ S (Alit)	Kalker + silika	0,578
C ₂ S (Belit)	Kalker + Silika	0,511
C ₃ A (Tri-kalsiyum alüminat)	Kalker + Alümina	0,489
C ₄ AF (Kalsiyum alüminoferrit)	Kalker + Alümina +Demir oksit	0,362

Çizelge 2.1. (devam)

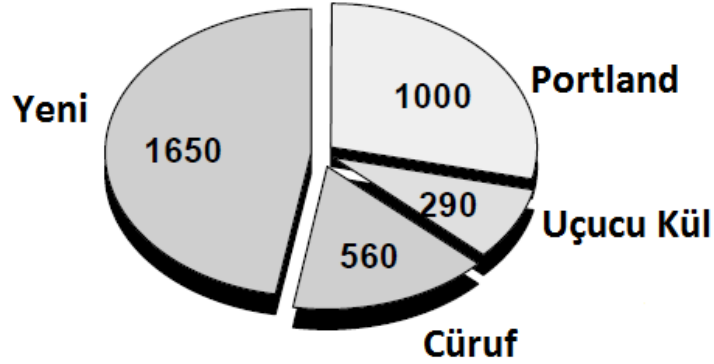
NS (Sodyum silikat)	Soda +Silika	0,361
CA (Monokalsiyum alüminat)	Kalker + Alümina	0,279
C_4A_3S	Kalker + Alümina +Anhidrit	0,216

Geopolimer çimentolar Portland çimentolardan farklı durumlarda üretilmektedirler. Geopolimerler yüksek yakıt giderleri ile yüksek sıcaklık fırınları gerektirmezler. Aynı zamanda fabrika ve malzeme yatırımı gerektirmezler. Doğal olarak oluşan alkali-silika-alüminatlar ve alümino-silikatların (jeolojik kaynakları bütün kıtalar üzerinde erişilebilenler) termal işlemi sürdürülebilir geopolimerik hammadde imkanı sağlamaktadır. Geopolimer çimento üretimi enerji tüketimini önemli derecede azaltır.

Geopolimer çimento üretimi çimento ve beton endüstrisinin CO_2 emisyonunun %80 oranında düşürmektedir. Atmosferik CO_2 konsantrasyonu ile dünya PÇ üretiminin yıllara göre değişimi Şekil 2.1’de verilmiştir. Ayrıca 2015 yılı için toplam çimento üretiminin 3500 milyon ton olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 2.2) (Davidovits 1994C).



Şekil 2.1. Atmosferik CO_2 konsantrasyonu (ppm) ile dünya PÇ üretiminin (milyon ton) yıllara göre değişimi



Şekil 2.2. 2015 yılı için çimento çeşitleri dağılımı (toplam 3500 milyon ton)

2.2. Alkali Aktivatörler

Aktivator; gerçekleşen kimyasal reaksiyonun yapısını etkilemeden kimyasal reaksiyon hızını değiştiren madde olarak tanımlanır. Sağlık (2009)'a göre aktivator, bir reaksiyonun hızını arttıran ve buna göre denklemde görülen maddedir. Sonuç olarak, aktivator, bir reaksiyonun sonucunu etkilemeden bir bileşiği istenilen reaksiyon oranına getiren maddedir. Günümüze kadar yapılmış aktivasyon çalışmalarının çoğu, bağlayıcılık değerinden dolayı cürufaların alkali aktivasyonu üzerine yapılmıştır. Durabiliteyi arttırmak için Portland çimento klinkeri ilave etmeden cüruf-alkali çimento üretmek, hem daha ekonomik hem de çevreye daha zararsızdır.

Geopolimerler, doğal puzolanların NaOH ve Na₂SiO₃ solüsyonuyla aktive edilmesiyle oluşan alümin silikat tipi maddelerdir. Geopolimerlerin moleküler yapısı alümin silikat ağlarından oluşur. Son yıllarda araştırmacılar genellikle; geopolimer çimento üretiminde ham maddeler üzerinde çalışmaktadırlar. Pek çok araştırma uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanlar ve alüminosilikat tipi atık endüstriyel malzemelerin kullanımı üzerinde yapılmıştır. Geopolimer çimentolar, portland çimentolarıyla kıyaslandığında ileri mühendislik özellikleri sergileyen aktive edilmiş bir malzeme grubudur. Yüksek basınç mukavemeti, priz süresinin kısılması ve boşluk oranının azalması gibi konularda betonun performansını iyileştirebildiği birçok araştırmada belirtilmiştir. Alkalilerin, geopolimerizasyon reaksiyonlarında yer alarak uçucu kül ve cüruf gibi ham maddeleri

aktive ettikleri düşünülmektedir. Alkalinitesi yüksek olan ortamlarda SiO_2 'nin bağları birbirinden ayrılıp, alkali jellerinin oluşmasına yol açar. Meydana gelen ürün geopolimer çimento olarak adlandırılmaktadır.

Geopolimer çimentoların üretiminde kullanılan toplam enerji, normal Portland çimentosu üretimindeki kullanılan enerjiye göre yaklaşık %40 daha az olmaktadır (Li *et al.* 2004).

Torgal *et al.* (2008a) çalışmalarında alümin ve silikat esaslı alkalilerle aktive edilebilecek ana malzemelerin; kaolinit kil, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun farklı oranlarda karışımı, uçucu küle metakaolinin farklı oranlarda karışımı, yüksek fırın cürufuyla metakaolinin farklı oranlarda karışımı ve cürufu kırmızı çamur karışımı malzemeler olduğunu belirtmişlerdir. Bu malzemeler üzerinde Ca-Si ve Ca-Al esaslı deneylerini yaparak, XRD ve kızılötesi ışınlarıyla hidrasyon gelişimi ölçülmüştür.

Kong *et al.* (2007) çalışmalarında metakaolin ve uçucu külü birlikte yüksek sıcaklığa tabi tutarak daha aktif bir duruma getirmişlerdir. Bunun nedeninin uçucu külün yüksek miktarda alümin ve silika içermesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Metakaolinin yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 800°C) amorf yapıya sahip olduğunu ve aktive bir alümino silikata dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmada agrega, akışkanlaştırıcı ve sıcaklığın geopolimer çimento üzerinde etkileri araştırılmıştır. Numune ebatları büyüdükçe basınç mukavemetinin termal çatlaklardan dolayı düştüğü belirtilmiştir. Agregatane çapları 10 mm'den küçük olursa kabuk atma daha çok olmaktadır. 10 mm'den daha büyük olması durumunda ise bu olayı önleyebileceği düşünülmüştür. Süperakışkanlaştırıcı katkının geopolimerli betonlarda mukavemeti düşürmekte ve toplam izlenebilirlikte önemli bir katkısı olmadığı belirtilmiştir Kong *et al.* (2010).

Atiş vd (2009) çalışmalarında portland çimentosu kullanmadan, cürufu aktive edecek yeni bir bağlayıcı madde kullanılmasını araştırmışlardır. Alkali aktivatör olarak sodyum

silikat, sodyum karbonat, sodyum hidroksit kullanılmış, 7, 28 ve 90 günlük basınç mukavemetleri, eğilmede çekme mukavemetleri ölçülmüş ve 6 aylık süreçteki kuruma rötreleri incelenmiştir. Aynı zamanda numunelerin hidrasyon gelişmesi incelenmiştir. Priz başlangıç ve bitiş zamanları normal portland çimentosuna göre sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive edilmiş çimentolarda daha erken, sodyum karbonatla aktive edilmiş çimentoların ise normal portland çimentosu ile aynı olduğu belirtilmiştir. Silis modülünün artmasıyla sıvı sodyum silikatın nihai mukavemet kazanmasında ve eğilmede çekme mukavemetinde etkisinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive edilen cüruflarla üretilen harçlar, daha gevrek, sodyum karbonatla üretilen harçların davranışının ise normal portland çimentosuna benzediği belirtilmiştir.

Collins *et al.* (1999) çalışmalarında normal kür sıcaklığında normal portland çimentosuyla üretilen betonun 1 günlük mukavemetine eşit olacak şekilde bir işlenebilirlik değeri; bağlayıcı olarak alkali aktive edilmiş cüruf içeren betonlar üzerine çalışmışlardır. İki aktivatör tipi (sodyum karbonat, sodyum hidroksit) ve sönmüş kireç ile birlikte sodyum silikat kullanılmıştır. Taze betonda çökme, çökme kaybı, hava içeriği, akma değerleri, alkali aktive betonun mekanik özellikleri incelenerek portland çimentosuyla üretilen betonlarla kıyaslanmıştır. Düşük erken mukavemet probleminin alkalilerle aktive edilen cürufla telafi edilebileceği belirtilmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş cürufla üretilen betonların basınç mukavemetlerinin, bütün kür sürelerinde normal portland çimentosu ile üretilen betonların basınç mukavemetlerinde daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Komljenovic *et al.* (2010) çalışmalarında; alkali aktive edilmiş uçucu küllü (F sınıfı) geopolimerlerin mekanik ve mikro yapı özelliklerini araştırmışlardır. Alkali aktivatör olarak Ca(OH)_2 , NaOH , $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$, KOH ve sodyum silikat (cam suyu) kullanılmıştır. Alkali aktivasyon metodunda en önemli parametrelerin; aktivatör özelliği ve yoğunluğu, uçucu küllü ise önemli olanın incelik olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu küllü geopolimerlerin ($<43\mu\text{m}$) basınç mukavemetinin genellikle yüksek olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek basınç mukavemeti sodyum silikat kullanılmasıyla elde

edilmiştir. Basınç mukavemetinin, Si/Al oranına büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir.

Qiao *et al.* (2009) yeni bir puzolanik malzemede kimyasal aktivatörlerin etkisini araştırmak için, mekanik ve termal muamele görmüş ince taneli (<14 mm) uçucu külü incelemiştir. Uçucu kül ince halde öğütülmüş, ısı işlem (800°C) görmüş ve Ca(OH)₂ ile karıştırılarak, partiküllerin aktive edilmesi için; Na₂SO₄, K₂SO₄, Na₂CO₃, K₂CO₃, NaOH, KOH ve CaCl₂ kimyasalları kullanılmıştır. Aktive edilmiş çimentonun mikro yapısı ve hidrasyon özellikleri X-ray ve termogravimetri yöntemleriyle incelenmiştir. Sonuç olarak; termal yöntem görmüş uçucu küllü numunelerin; öğütülmüş uçucu küllü numunelerden önemli bir şekilde daha reaktif olduğunu belirtmişlerdir. Na₂CO₃ katkısının; 28 günlük kür süresinde Ca(OH)₂ tüketimini ve basınç mukavemetini artırdığını açıklamışlardır. Bununla birlikte, Na₂SO₄, K₂SO₄, K₂CO₃, NaOH ve KOH katkılarının mukavemet ve hidrasyon reaksiyonunu yavaşlattığını ve bazı kimyasalların hidrojen gazı oluşumunu artırdığından dolayı daha çok boşluklu numuneler ürettiğini belirtmişlerdir. CaCl₂ eklenmesinin, termal uygulama gören uçucu küllü numunelerin hidrasyonunun da negatif etki gösterdiği açıklanmıştır.

Bakharev *et al.* (2000) çalışmalarında bağlayıcı olarak sadece alkali aktive cürüfla oluşturulan betondaki katkıların etkisini araştırmışlar ve aktivatör olarak sıvı sodyum silikat (cüruf ağırlığının %4-%7 Na) ve iki bileşenli aktivatör (NaOH + Na₂CO₃, cüruf ağırlığının %8'si Na olacak şekilde) kullanmışlardır. Alkali aktive edilmiş cürufun, betonun erken mukavemetini geliştirdiği belirtilmiştir. Fakat yüksek rötre ve düşük işlenebilirlik özelliklerinden dolayı uygulamada sıkıntılarının olacağını belirtmişlerdir. Sıvı sodyum silikatla üretilen betonun en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Hava sürükleyici katkı, rötre azaltıcı katkı ve alçının rötreyi azalttığını, işlenebilirliği geliştirdiğini, basınç mukavemetinde negatif etkiye sahip olmadığını ve hava sürükleyici katkının alkali aktive edilmiş cürüflü betonlarda, önemli bir etken olduğu sonucuna varmışlardır.

Shi *et al.* (2001) yaptıkları çalışmada doğal puzolanların puzolanik reaktivitelerinin aktivasyonunu araştırmak üzere üç metot uygulamışlardır. Bunlar; doğal puzolanların uzatılmış öğütülmesi (mekanik metot), puzolan içeren çimento hamurunun yüksek sıcaklıkta kür edilmesi (termal yöntem) ve Na_2SO_4 ve CaCl_2 gibi kimyasal aktivatörlerin kullanılması (kimyasal metot) olarak gerçekleştirilmiştir. Doğal puzolanların reaktiviteleri %80 doğal puzolan ve %20 hidrate kireç karışımı üzerinden değerlendirilmiştir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketim oranı, mukavemet gelişimi, nihai basınç mukavemeti ve maliyet parametreleri karşılaştırılmıştır. Üç aktivasyon yöntemi de kireç-puzolan hamurunun puzolanik reaksiyonunu ve mukavemet gelişimi oranlarını artırmıştır. Ancak, mekanik aktivasyon nihai mukavemet üzerinde önemli bir etki göstermezken, termal yöntem nihai mukavemeti azaltmış ve kimyasal aktivasyon (kireç-puzolan karışım kütlelerinin %4 oranında Na_2SO_4 veya $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ katılmasıyla) kireç-puzolan karışımlarının nihai mukavemetini etkin bir şekilde artırmıştır. Mekanik ve termal aktivasyon yöntemlerinin ek ekipman ve enerji ihtiyacı doğurduğu ve dolayısıyla malzeme maliyetinin arttığı belirtilmiştir. Kimyasal aktivatörlerin ise doğal puzolanın öğütülmesi esnasında veya puzolan içeren betonun karıştırılması esnasında katılabileceği ve bu yüzden ek ekipman ihtiyacının en az olacağı vurgulanmıştır.

Çevreye dost çimento üretmek için doğal puzolanların aktive edilmesi konusunda farklı teknikler üzerinde denemeler mevcuttur. Bunlardan 4 tanesi: (1) Mekanik metot (doğal puzolanların öğütülmesi), (2) Termal metot (puzolan içeren çimento hamurunun yüksek sıcaklıkta kür edilmesi), (3) Kimyasal metot (CaCl_2 , alkali oksitler ve Na_2SO_4 gibi kimyasal aktivatörlerin kullanılması), (4) Mikrodalga metodu, olarak bilinmektedir.

Puzolan tipleri üzerinde bu metotların etkileri başarılı bir şekilde araştırılmış ve bunlar arasında kimyasal metodun en etkili ve en ucuz metot olduğu belirtilmiştir. Mekanik metot inceliği artırmakta ve bunun sonucu olarak basınç mukavemeti artmakta, fakat uygulama da incelik; ekonomiklik, rötre ve priz süresi gibi performansları sınırlıdır. Daha iyi performans için puzolan inceliğinin Portland çimentosu inceliğinden daha fazla olmamalıdır.

Alkaliler 6 grupta sınıflandırılır (Glukhovsky 1981) burada M alkali iyonudur: (1) Alkaliler, MOH, (2) Zayıf asit tuzları, M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF. (3) Silikatlar (4) Alüminatlar, (5) Alüminosilikatlar ve (6) Güçlü asit tuzları, M_2SO_4 .

Palomo *et al.* (1999) çalışmalarında karışımda çözünebilir silis olduğunda alkali aktivatörlerin çok hızlı davranarak polimerizasyon reaksiyonlarında önemli rol oynadığını açıklamışlardır. Criado *et al.* (2005) gerçekleştirdikleri çalışmaya göre sodyum silikat kullanımının; polimerizasyon süreci sonrasında, daha yüksek silis içeren ve yüksek basınç mukavemetine sahip reaksiyon ürünleri ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

Fernandez *et al.* (2005) çalışmalarında alkali aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat kullanarak bir günlük külden hemen sonra basınç mukavemetinin 90 MPa çıktığını tespit etmişlerdir.

Bondar *et al.* (2011c) yaptıkları çalışmada, alkali aktivatör olarak cam suyu çözeltisi kullanılmıştır. En iyi aktivatörler sodyum silikat ve potasyum hidroksitin kullanımıyla oluşturulan çözelti olmuştur. KOH çözeltisinin 5 ve 7,5 M arasında maksimum olmasıyla, basınç mukavemeti gösterdiği tespit edilmiştir.

Anuar *et al.* (2011) çalışmalarında alkali sıvı olarak, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) karıştırılarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, geopolimer beton numuneler iki farklı molarlarda (8 M'lık ve 14 M'lık sodyum hidroksit NaOH) kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç mukavemetleri test edilmiştir. 14 M NaOH kullanıldığında basınç mukavemetinin maksimum olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, atık kağıt çamur külü ve molaritesi artırılan geopolimer betonun mukavemetinin arttığı gözlenmiştir.

Granizo *et al.* (2007) yaptıkları çalışmada iki farklı metakaolin farklı yüzeylerle hidrotermal koşulları (85°C, 2saat) altında (6-8-10-12-15-18-20 M Na

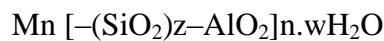
konsantrasyonları) aktivatörler olarak cam suyu ve (NaOH)'ten oluşan çözelti kullanılarak aktive etmişlerdir. Metakaolinin alkali aktivasyonun 100°C ısı altında güçlü ve dayanıklı çimento esaslı malzemeler verdiği belirtilmiştir. Metakaolinin alkali aktivasyonu ile elde edilen reaksiyon ürününün bileşimi, yapısı ve özellikleri, bileşendeki kaolin miktarı, özgül yüzeyi, kullanılan alkali aktivatör tipi, konsantrasyon ve bağlı miktarı vb faktörler tarafından etkilenmektedir.

2.3. Geopolimer

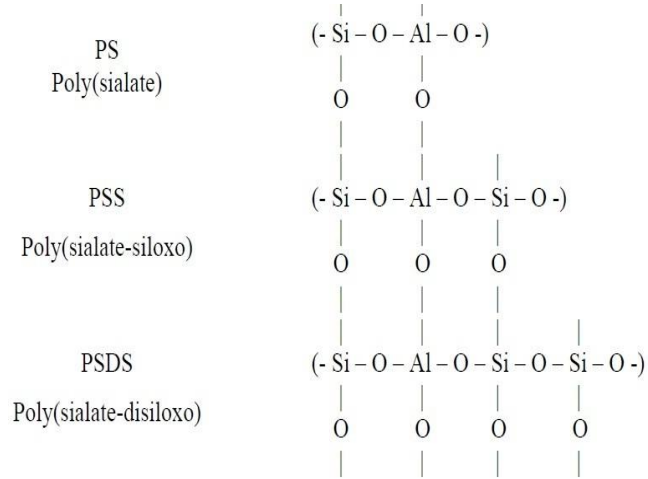
Geopolimer terimi ilk defa 1979 yılında Davidovits tarafından tanıtılmış ve geliştirilmiştir. Geopolimer olarak bilinen polimerler, aluminosilikat esaslı inorganik polimerlerdir yani jeokimyasal kaynaklı polimerler sayılmaktadır. Bu reaksiyonların başlaması için silisyum (Si) ve alüminyum (Al) ve alkali çözelti hammadde olarak gereklidir. Geopolimerlerin özellikleri, içerdiği Si-Al oranına ve kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) gibi bileşenlerinden büyük ölçüde etkilenmektedirler (Davidovits 1991; Barbosa *et al.* 2000; Xu *et al.* 2002). Geopolimerleşme aluminosilikatlar arasında yüksek alkalitesi olan ortamlarda meydana gelen kimyasal reaksiyonlardır ve sonuçta -Si-O-Al-O- bağları oluşmaktadır (Davidovits 1982; Davidovits 1991; Davidovits 1994C; Van Jaarsveld *et al.* 1997; Xu *et al.* 2000).

Aluminosilikat esaslı geopolimerlerin ailesinden sayılan poli (sialatlar) AlO_4 ve SiO_4 esaslı tetrahedral bağların oluşmasından meydana gelmektedirler. Ve sırasıyla alüminyum ve silisyum arasında oksijen bulunmaktadır (-Si-O-Al-O-).

Bu reaksiyonlarda Na^+ , K^+ , Li^+ ve Ca^{++} gibi pozitif iyonların olması Al^{3+} iyonlarının negatif yüklerin etkisini denkleştirmek için gereklidir. Bu polimerler zeolitlerle çok benzer bir kimyasal formülleri vardır ve bunların deneye dayalı formülü aşağıda gösterilmiştir (Davidovits 1991).



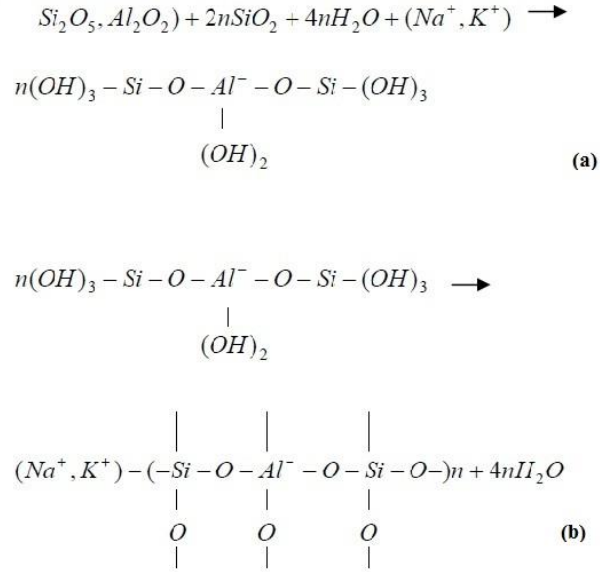
Bu denklemde M (alkalin elemanı ve pozitif bir katyondur), n yoğunlaşma derecesidir ve $w < 3$ olmalıdır ve z oluşacağı bağa göre 1, 2 ve 3 olabilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Geopolimerlerin moleküler ağları

Bu reaksiyonlara kaynak malzemeler doğal mineraller olabilir. Örnek olarak: kaolinite, kalsine edilmiş kaolinite ve kil (Meta kaolin) gösterilmiştir (Davidovits 1991; Barbosa *et al.* 2000; Xu *et al.* 2002). Alternatif olarak, uçucu kül, cüruf, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı geopolimer sentezi için hammadde olabilir. Çözünen alkali metaller sulu alkali hidroksitler veya sulu silikat çözümleriyle genellikle sodyum (Na) veya potasyum (K) esaslı metaller ile yoğunlaştırılır (Davidovits 1991).

Alkalin sıvılar, kaynak malzemelerinde silikon ve alüminyum atomların çözmek için ve geopolimer bağlayıcı üretimi için kullanılır. Geopolimerizasyon süreci çeşitli alümina-silikat oksitleri ve alkali koşullar altında olan silikatlar arasında hızlı bir kimyasal reaksiyon içerir ve Si-O-Al-O polimer bağları oluşur. Geopolimer malzemenin şematik oluşumu 2.4a ve 2.4b denklemleri tarafından açıklanabilir (Davidovits 1991).



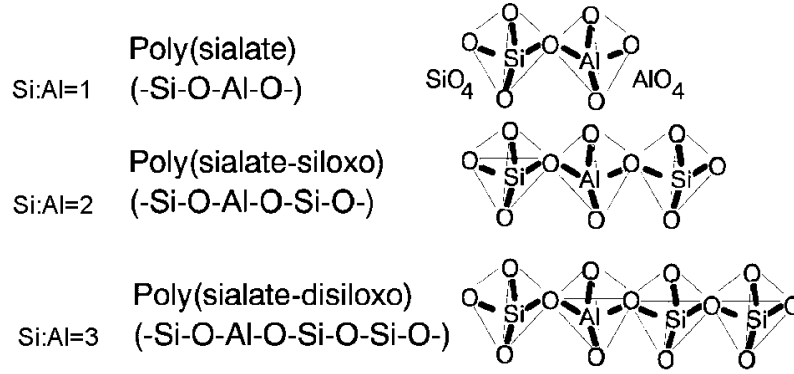
Şekil 2.4. Geopolimer reaksiyonları

(Si-Al içeren malzemeler) + (Alkaliler) = (Geopolimer ara bileşeni) (2.4a)

(Geopolimer ara bileşeni) + (Alkaliler) = (Geopolimer) (2.4b)

Denklem 2.4b’de görülebileceği gibi serbest su kimyasal reaksiyon sırasında geopolimer matrisinden ayrılmaktadır (Şekil 2.4). Geopolimerler oluşumunda suyun rolünü dikkate almak önemlidir. Bu su, kür ve kuruma süreçlerinde geopolimer matrisinden dışarı çıkmakta ve geopolimer matrisinde nano gözenekleri bırakmaktadır. Bu bir geçirimsiz beton üretiminde ve geopolimerin performansını iyileştirmede çok yararlıdır. Su karışımında işlenebilirliği sağlar ve reaksiyon işlemi sırasında suyun hiçbir rolü yoktur ve bu Portland çimentosunda suyun kimyasal reaksiyonu ve hidrasyonda olan rolünün tam tersinedir (Hardjito *et al.* 2005; Rangan 2008). Suyun karışımı terk etmesi geopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın mukavemeti gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır. Amorf geopolimerlerin yoğuşma sıcaklıkları 20°C’den 90°C’ye kadar, kristal olan geopolimerlerde otoklavda ve 150°C-200°C’de yoğuşma olur ve bu zeolitlere benzemektedir (Andini *et al.* 2008). Geopolimerler, birbirine zincir veya uzaysal olarak bağlanmış olan kovalent bağlara sahip moleküllerdir. Moleküler birimleri ve kimyasal grupları aşağıda gösterilmektedirler (Şekil 2.5).

- Si-O-Si-O- siloxo, poly (siloxo)
- Si-O-Al-O- sialate, poly (sialate)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly (sialate-siloxo)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly (sialate-disiloxo)
- P-O-P-O- phosphate, poly (phosphate)
- P-O-Si-O-P-O- phospho-siloxo, poly (phospho-siloxo)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly (phospho-sialate)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone



Şekil 2.5. Geopolimerlerde kovalan bağlar

Şu anda geopolimer malzemeler 9 ana dalda geliştirilmekte ve uygulanmaktadır:

- Polisiloksonat, polisilikat, çözünen silikatlar (Si/Al=1/0)
- Kaolinit/hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat (Si/Al=1/1)
- Metakaolin (MK-750) esaslı geopolimer, poli (sialate-silokso) (Si/Al=2/1)
- Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na) -sialate, (Si/Al=1, 2, 3)
- Kayaç esaslı geopolimer, poli (sialate-multisilokso) ($1 < \text{Si/Al} < 5$)
- Silis esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağlı poli (siloksonat) (Si/Al>5)
- Uçucu kül esaslı geopolimerler
- Fosfat esaslı geopolimer
- Organik maden esaslı geopolimer

-Terminoloji**Siloxo-Poly (siloxo)**

-Si-O- birimine siloxo ve onlardan üretilen polimerleşmiş makro moleküllere poly (siloxo) denilir.

Siloxonate -Poly (Siloxonate)

Alkali-siloxo birimleri siloxonate olarak adlandırılmaktadır ve kullanılan alkali birimleri de Na, K, Li ve Ca olabilir.

Silanol

Makro moleküllerin kenarında olan -Si-OH birime denilir.

Poly(sialate)

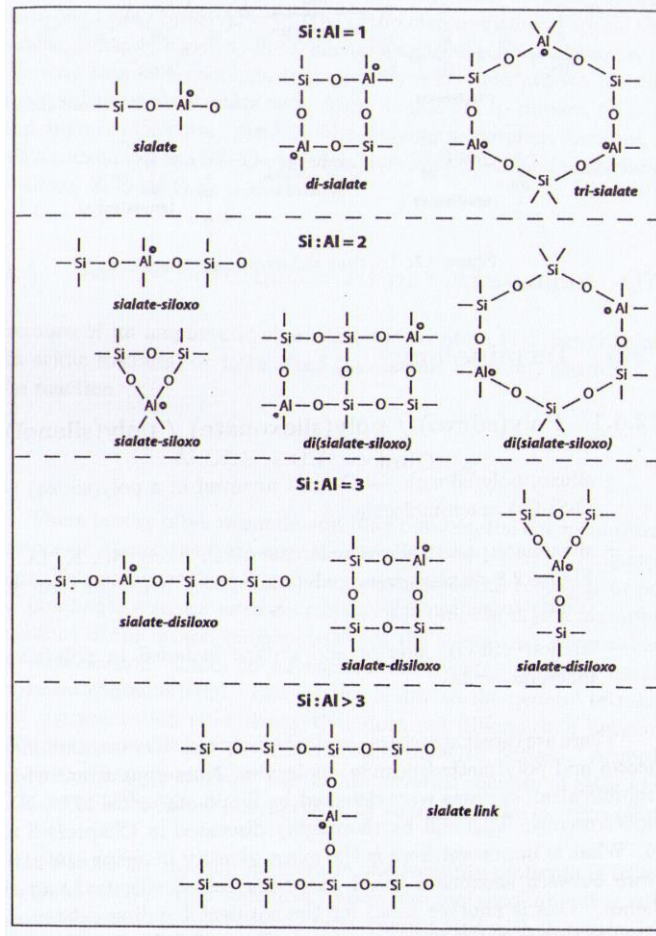
Sialate alkali-siloxo-aluminatlara kullanılan bir kısaltılmış ifadedir. Geopolimerler de en azından (Na, K, Li ve Ca)(Si-O-Al) bağlardan birisi olması gerekmektedir (Davidovits 1976). Bunlar atomik oranlara göre 4 ana bileşenlerdirler (Şekil 2.6).

Si/Al=1 sialate

Si/Al=2 sialate-siloxo

Si/Al=3 sialate-disiloxo

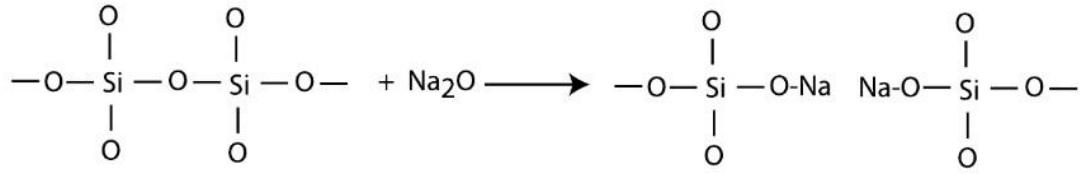
Si/Al>4 sialate bağlantı



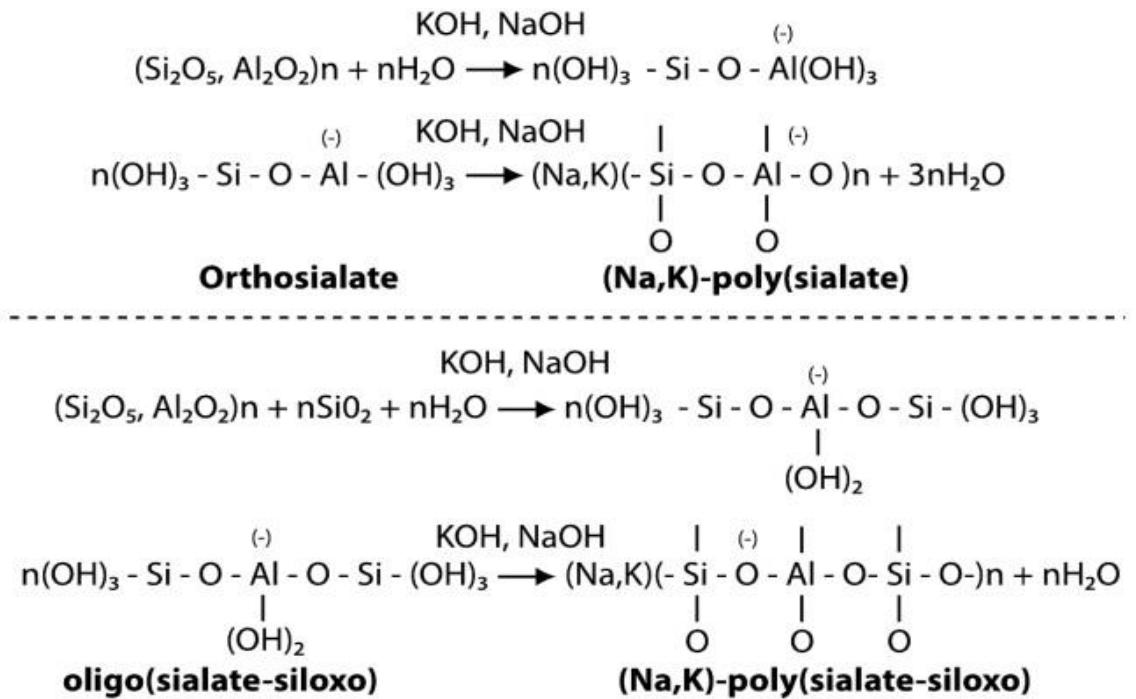
Şekil 2.6. Geopolimerler de atomik oranlara göre 4 ana bileşen (Davidovits 2011)

-Kimyasal Mekanizmalar

Na_2O yardımıyla camsı silikadan poly siloxonate üretime geçiş bu denklemde gösterilmiştir (Şekil 2.7). Küçük moleküller yani oligomerlerden (monomer dimer, trimer, tetramer ve pentamer) polimerleşme ve poly (sialate) üretimi aşağıdaki denklemlerle açıklana bilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.7. Na₂O yardımıyla camsı silikadan poly siloxonate üretimi (Davidovits 2011)



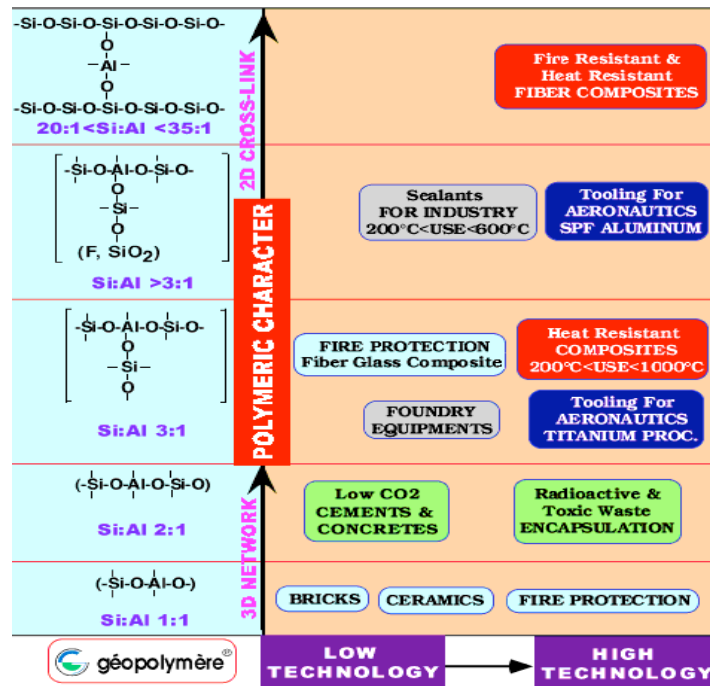
Şekil 2.8. Oligomerlerden poly (sialate) üretimi (Davidovits 2011)

Geopolimerleri hangi sınıfta yerleştirmek daha doğrudur? Geopolimerler yeni bir malzeme midirler? Yeni bir bağlayıcı mıdır? Ya beton üretimi için yeni bir çimento sayılabilirler mi? Bu soruların cevabı olarak, her üç sınıf doğrudur ve geopolimer bunların hepsidir. Şu anda geopolimerlerle modern inorganik kimyacılar, fizikçiler, koloit kimyası ile ilgilenenler, mineralogist, jeolojistler ve mühendisler ilgilenmektedirler. Geopolimerlerin çok olumlu özellikleri vardır. Ateşe dayanıklıdırlar, termal yalıtımcılardırlar, kullanılmaları için yüksek teknolojiye gerek yoktur ve daha az enerjiye gereksinim vardır. Çimentolarda, betonlarda ve kompozitlerde

kullanılmaktadırlar (Davidovits 2011). Davidovits'e göre Si/Al atom oranı poly (sialate) geopolimerlerin özelliklerini ve uygulamalarını belirler (Davidovits 1999). Düşük oranda Si/Al oranı (1/1, 2/1, 3/1) çok sert ve üç boyutlu bir ağ oluşturur. Yüksek Si/Al oranı, geopolimer malzemeye polimer bir karakter verir. Farklı Si/Al oranları farklı özellikler oluşturmaktadırlar (Çizelge 2.2). Başarılı uygulamalarda geopolimer türleri Şekil 2.9'da ve örnek uygulamaları Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Si/Al oranına bağlı geopolimerlerin uygulamaları (Davidovits 1999)

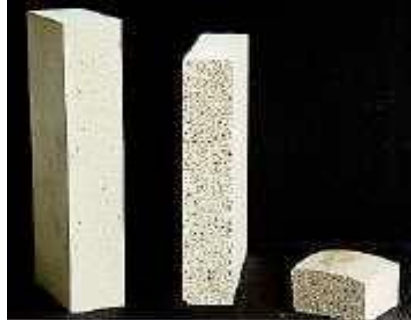
Si/Al Oranı	Özellikler/Uygulamalar
1/ 1	Sert, tuğla ve seramik
2/ 1	Çimento, beton ve atık kapsülleme
3/ 1	Döküm kalıpları ve ısıya karşı dayanıklı elyaf kompozitler
> 3/ 1	Mastikler ve yapıştırıcılar (reçine gibi)
> 20/ 1 ve < 35/1	Yangın ve ısıya dayanıklı karbon lifli hasır kompozitler



Şekil 2.9. Başarılı uygulamalarda geopolimer türleri (Davidovits 2002)



Şekil 2.10. Yol kaplaması onarım malzemesi olarak Amerika da Pyrament kullanımı



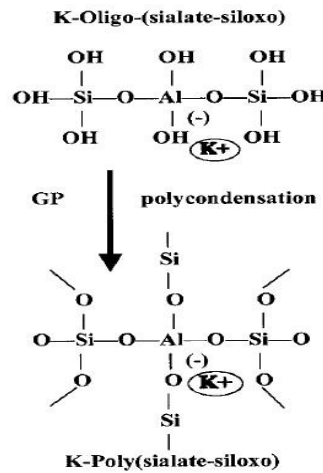
Şekil 2.11. Köpüklü geopolimer

Son yirmi yılda çeşitli çalışmalar, geopolimerin özellikleri, performansı ve uygulamalarını araştırmak için yapılmıştır. Çoğunlukla kalsine malzemeler yani cüruf, uçucu kül ve metakaolin, geopolimerizasyon sırasında kalsine olmayan malzemelere göre daha yüksek bir reaktivite göstermektedirler (Palomo *et al.* 1999; Xu *et al.*2000). Uçucu kül esaslı geopolimerler alkali aktivasyonun ilk aşamasında alümini zengin alümina-silikat jeli oluşturması nedeniyle mukavemetlerinde artışlar görünmektedir. Belki Si zenginleşmesi nedeniyle daha çok artabilir (Fernández *et al.* 2006). Ayrıca metakaolinden üretilen geopolimerlerde porozite artışı için çok fazla su gerekebilir ve çok yumuşak olma nedeniyle yapı malzemesi olarak kullanılmamaktadır. Metakaolinden üretilen geopolimerler yapıştırmacılar, kaplama ve hidro-seramiklerde uygulamaktadırlar. Ayrıca, geopolimerlerin mikro yapı özellikleri güçlü bir şekilde malzemelerin kaynaklarına bağlıdır (Duxson 2007b). Sonuç olarak, uygulamalar için

hem maliyet ve teknik performansı optimize etmek için, hem de hammadde reaktivitesi ve kimyasının anlaşılması için çok önemlidir.

2.4. Geopolimer Çimento

Kimyasal bağlı alkali aktive edilmiş çimentolar, çimento dünyasında yepyeni bir malzemedir. Çeşitli alümino silikatlı malzemeler geopolimer çimento üretimi için potansiyel oluşturur. Normalde bu tür çimentoların üretiminde katı atıklardan özellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufları veya puzolanik özelliği olan malzemeler kullanılmaktadır. Bu çimentonun bağlayıcılık özellikleri onun hammadde malzemelerinin özelliklerine, tanelerin özgül yüzeyine ve kullanılan aktivasyon yöntemine bağlıdır. Camsı cüruftan yapılan geopolimerler eski Sovyet'te ve Finlandiya'da yaygın halde kullanılmıştır. Bu kullanımlarda genellikle taneler çok ince öğütülmüştür ve 5000 cm²/gr kadar özgül yüzeyleri vardır ve karışımlarda su yerine %10-30 miktarında KOH veya NaOH kullanılmıştır. Alçı (CaSO₄.2H₂O) ve onun gibi diğer aktivatörlerde bazen aktivasyon için kullanılmıştır (Glasser 1995). Geopolimer çimentolar kireç esaslı bir bağlayıcı değildir ve su ve asit ile çözülmemektedir (Davidovits 1999). Potasyum esaslı alkalin çözeltide yoğunlaşma Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Potasyum esaslı geopolimer çimentosunun priz alma süreci (Davidovits 1999)

Bu yöntemle elde edilen malzemenin yapısal bütünlüğü ve makul bir mukavemeti vardır ve mukavemetinin %20-30'a kadar kısmına çok kısa bir sürede yani bir kaç saat içerisinde ulaşır. Kür süresinde sıcaklığı 35°C'ye yükseltmek için mikro dalga cihazdan yararlanabilmektedir (Davidovits 1994b). Geopolimer çimentolar kimyasal reaksiyonları esnasında arsenik, civa ve kurşun gibi zehirli kimyasal atıkları kendine emebilir ve bu konuda zeolitler ile kıyaslanabilir. Bu özellik geopolimerlerin asitlere karşı direncinden ve düşük geçirgenliğinden kaynaklanmaktadır (Davidovits 1994b).

Çizelge 2.3. Farklı malzemelerin geçirgenlik değerleri (cm/s)

Tip	Geçirgenlik değerleri (cm/s)
Kum	10^{-1} - 10^{-3}
Uçucu kül	10^{-6}
Kil	10^{-7}
Geopolimer çimento	10^{-7}
Portland çimento	10^{-7}
Granit	10^{-10}

Portland çimentoya göre üstün özelliklerine rağmen geopolimer bağlayıcıların kullanımı yüksek maliyetlerinden dolayı yaygın olmamıştır. Üretim maliyetlerini azaltılabildiğinde geopolimerler çok alanda kullanılabilirler. Mesela:

- Masif beton paneller, harçlar ve lif takviyeli levhalar,
- Yapı işlemlerinde kullanılan tuğlalar ve seramik fayanslar ve
- Uçak pisti ve yapısal yüzeylerde

2.5. Geopolimer Beton

2000'li yıllarından beri çevre koşullarına daha dayanıklı bir beton üretmek ve uçucu külün olumsuz etkilerini azaltmak için, uçucu kül esaslı geopolimerlerin üretimi araştırmaları hızlanmıştır.

Uçucu kül esaslı geopolimer betonların karışım hesabı için Avustralya'nın batısında yerleşen Curtin Üniversitesinde alkalilerin etkisi, su miktarı ve kür koşulları Hardjito *et al* (2005) tarafından incelenmiştir ve bunlara ilave olarak betonun fiziksel özellikleri de incelenmiştir. Sünme, rötre, sülfatlar ve asitlere dayanaklıkları ölçülmüştür (Wallah *et al.* 2006) ve bu konu hala dünyada araştırmacılar tarafından geliştirilmektedir.

Tayland'da ve bir başka çalışmada donatı ve geopolimer arasında olan bağlar incelenmiştir ve bu konu da en önemli çalışma karışım hesaplarını bulmak olmuştur. Bu literatürde 20 farklı karışım hesabı yapılmıştır ve bu karışımlarda alkalinite miktarları değiştirilmiştir. Basınç mukavemeti, donatı ve geopolimer arasında olan bağlar incelenmiştir. Bu çalışmada pirinç kabuğu külü ve silis dumanı, uçucu kül ile beraber kullanılmıştır. Silis dumanı kullanılan karışımlar daha mukavemetli elde edilmiştir. Pirinç kabuğu ise priz zamanını gecikmiştir ve daha çok kür zamanına ihtiyaç duyulmuştur. Bu araştırma sonucunda yüksek miktarda silis dumanı ve yoğun NaOH çözeltisiyle hazırlanan geopolimerlerin kullanılması tavsiye edilmiştir ve bu karışımla hazırlanan geopolimerler de donatı ve geopolimer arasında iyi bir kenetleme sağlanmıştır (Songpiriyakij *et al.* 2011).

Fransa'da betonun küresel ısınmaya olan etkisi ile ilgili yapılan çalışmada standart olarak uçucu kül ve cüruftan yapılan geopolimerlerin küresel ısınmada olan etkisi normal çimentodan üretilen betonlara göre daha düşük olduğu tahmin edilmiştir. Ama bu çalışmada sodyum silikat ve sodyum hidroksitin de başka tür zararlı olduklarını açıklamıştır. Bu çalışmada yan ürün malzemelerinden (zararlı) maddelerden geopolimer üretilmesi için hammadde olarak tavsiye edilip ve malzemenin Si/Al miktarının incelenmesini geopolimer üretiminden önce vurgulanmıştır (Habert *et al.* 2011).

Geopolimer ve geopolimer kompozitlerinden üretilen betonların yüksek sıcaklıkta dayanımları için yapılan araştırmada F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır ve numuneler 800°C'ye kadar sıcaklığa maruz bırakılmışlar. Geopolimerler hamurlarda %53 ve geopolimer betonlarda %65'e kadar mukavemetlerinde azalma meydana geldiği

belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıkta tanelerin %1,5-%2,5 arasında genleşmeleri betonun mukavemetinin daha çok azalmasına neden olmuştur. Bu çalışmada 15 farklı karışım kullanılmıştır. Yani farklı kür süresi ve farklı karışım hesapları kullanılmıştır (Kong *et al.* 2008). Aynı yazarlar farklı çalışmayı ise metakaolin üzerinde yapmışlardır. Çalışmada geopolimer yani yalnız bağlayıcı, harç ve beton geopolimerler üzerinde yapılmıştır ve sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivasyon için kullanılmıştır. Bu deneydeki değişkenler ve parametreler, tanelerin büyüklüğü ve süper akışkanlaştırıcıların tipi olmuştur. Sıcaklık 800°C'ye kadar yükseltilmiştir. 10 mm'den büyük taneler yüksek sıcaklıkta ve normal üretimde daha yüksek mukavemetler göstermiştir ve yüksek sıcaklıktaki hasarların nedeni agrega ve hamurun birbirine uyum sağlamamasından kaynaklanmıştır (Kong *et al.* 2010). Lifli geopolimerler üzerinde yapılan bir başka araştırmada, basınç mukavemeti, rötre, yüksek sıcaklıktaki dayanım ve eğilme mukavemeti incelenmiştir. Araştırmada yangına dayanıklı aluminosilikat parçaları kullanılmıştır. Sonuçlara göre yangına dayanıklı ve lifsiz geopolimerlerin her ikisi daha yüksek basınç ve eğilme mukavemeti gösterdiği belirtilmiştir. 600-1000°C sıcaklığa maruz kalan geopolimerler bu taneciklerle daha yüksek dayanıklılık göstermektedirler ve bunun nedeni çatlakların kontrol edilmesinden olmuştur. Bu sonuçlara göre iyi karışımli bir geopolimerler ucuz ve yangına dayanıklı bir malzeme olabilmektedirler (Bernal *et al.* 2012). Yüksek sıcaklıklarda geopolimerlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları aniden değişebilmektedir. Yapılan bir başka çalışmada, numuneler 23°C'den 680°C'ye çıkarıldıktan sonra soğutulmuştur. Geopolimerlerin mukavemeti 290-520°C'de normal oda sıcaklığındaki mukavemete göre yaklaşık 2 kata kadar artmaktadır. *Glass transition*'lara göre 520-575°C'ye yükseltip soğutulandan sonra mukavemet ve elastisite değerlerinde büyük miktarda azalma görünmektedir (Pan *et al.* 2010).

Geopolimer beton üretiminde farklı yöntemler kullanılmakta ve bunların arasında mikro dalga ışınları ile kür etmek yöntemleri çalışmalarında rastlanmaktadır. Uçucu kül ve pirinç kabuğu külü üzerinde yapılan bir makalede mikrodalgaların mukavemet üzerinde olan etkiler incelenmiştir ve etkili bir yöntem olduğuna karar verilmiştir (Kusbianoro *et al.* 2012).

2.6. Puzolan Malzemelerin Tanımı ve Genel Sınıfları

Puzolanlar, "kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özeliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler" olarak tanımlanmaktadır. Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yansıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir. Puzolanlar iki genel gruba ayrılmaktadır:

(1) Doğal puzolanlar,

Doğada bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısı işlem görmüş killer, şeyller ve diatomlu topraklar bu grup içerisindeki puzolanlardır.

(2) Yapay puzolanlar,

Bunlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu ve yapay puzolanlardır (Erdoğan 2003).

2.6.1. Pomza

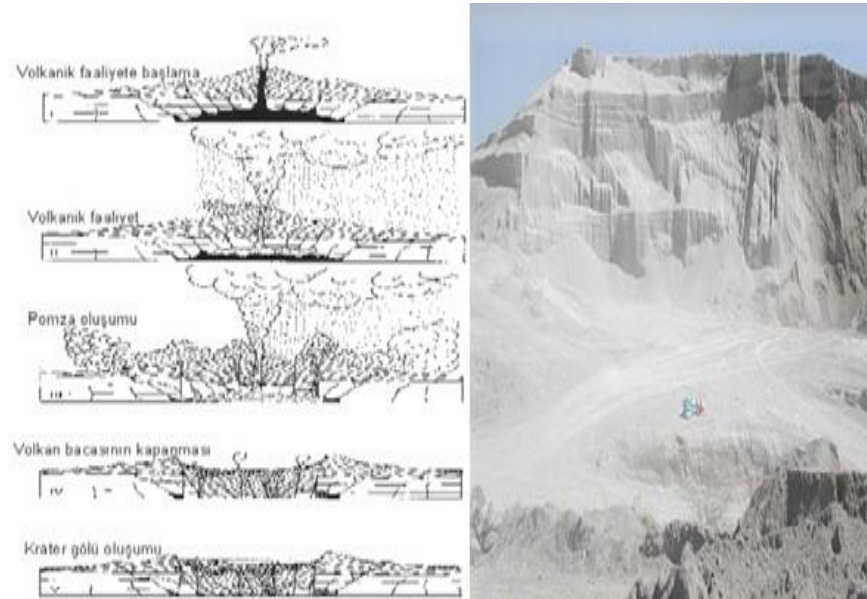
2.6.1.a. Pomzanın tanımı ve oluşumu

Pomza birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görünlü, silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle 1 gr/cm^3 'den küçük, sertliği Mohs Skalası'na göre yaklaşık 6,0 olan ve camsı doku gösteren volkanik doğal hafif bir kayadır (Özkan vd 2001; Gündüz vd 2001; Bayrak 2005; Kotan 2009; Polat 2007). Pomza (ponza) terimi İtalyanca bir sözcüktür. Farklı dillerde değişik adlandırmaları vardır. Örneğin Fransızcada Ponce,

İngilizcede (iri tanelisine) Pumice, (ince tanelisine) Pumicite, Almandada (iri tanelisine) Bims, (ince tanelisine) Bimstein denilmektedir. Türkçede ise süngertaşı, köpüktaşı, nasırtaşı, hışırtaşı, küvek, kisir gibi pek çok adla anılmaktadır (Özkan vd 2001; Kotan 2009).

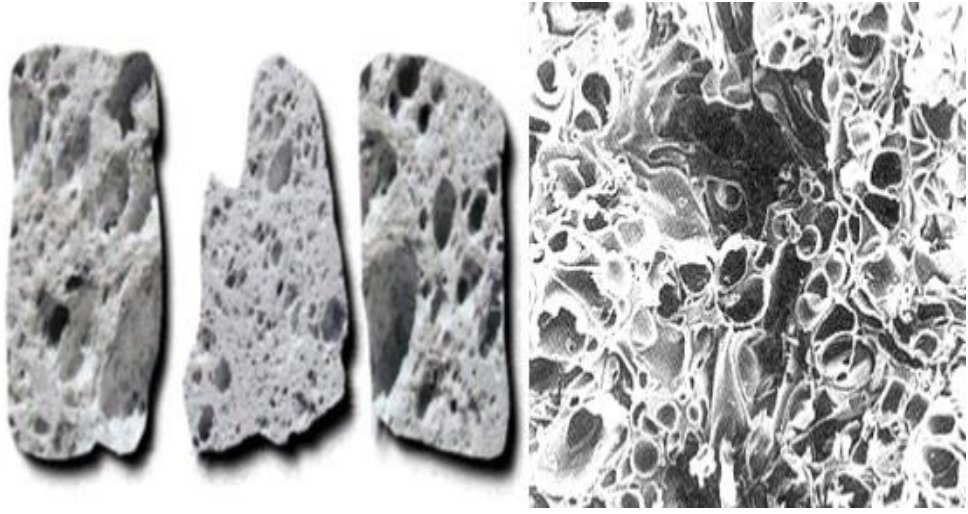
Volkanizma faaliyetleri esnasında, yüksek sıcaklık ve basınç altında eriyik haldeki magma, şiddetli olarak yeryüzünden atmosferin üst katmanlarına doğru püskürür. Likit haldeki kızgın eriyikler atmosferin üst katmanlarında ani olarak soğuk ortamlarla karşılaşır.

Bu soğuma neticesinde piroklastik kayaç bünyesindeki su buharı ve fümeroller akabinde bünyeden uzaklaşarak, kristalleşmeye fırsat bulamayan çok süngerimsi bir kayaç oluşur. Bu süngerimsi kayaç havadan akma mekanizması ile aktif volkan krateri ve civarında mevcut topografya üzerine yığılır (Davraz 2001). Şekil 2.13'de bu durum şematik olarak gösterilmiş ve bir pomza ocağının görünümü verilmiştir.



Şekil 2.13. Pomza agregasının oluşum evreleri (Kotan 2009; Bayrak 2005; Rittmann 1976)

Pomza, oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuması nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Bu gözenekler hacmin yaklaşık %70-80'ini oluşturur. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan, geçirgenliği düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir (Özkan vd 2001; Gündüz vd 2001). Şekil 2.14'de pomzanın gözenekli yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Pomza agregasının gözenekli yapısı (Kotan 2009; Davraz 2001)

Türkiye, birçok endüstriyel hammadde ve yeraltı kaynakları yönünden önemli bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte resmi olarak elde edilen verilere göre, 18 milyar m³ civarında olan dünya pomza rezervlerinin yaklaşık %40'ına (7,4 milyar m³'den fazla) sahip olan ülkemiz açısından, pomza madeni potansiyelimizde çok önemli bir yer tutmaktadır. Bugün ülkemizde işletilen pomza sahaları açısından iç Anadolu Bölgesi başı çekmekle birlikte, Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgelerinde de önemli miktarda üretim faaliyetleri yapılmaktadır.

Çizelge 2.4. Türkiye pomza rezervleri dağılımı (Bayrak 2005)

Yeri	Rezerv Miktarı (m ³)	Rezerv Kategorisi
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404 412 834	A+B
Nevşehir-Derinkuyu	48 660 500	C
Kayseri -Gömeç	13 250 000	A+B
Kayseri-Develi	58 500 000	A+B
Kayseri-Talas-Tomarza	241 000 000	A
Bitlis-Tatvan	284 000 000	B
Van-Erciş-Kocapınar	1 100 000 000	B
Van-Molla Kasım	154 625 000	A+B
Ağrı-Patnos	5 950 000	A+B
Ağrı-Doğubayazıt	27 812 000	A+B
Kars-Iğdır-Kavak Tepe	26 875 000	A+B
Kars-Digor	40 156 250	B
Kars-Sarıkamış	11 718 750	B
Ankara-Güdül-Tekköy	1 875 000	B
Isparta-Gölcük	8 070 000	A+B
Isparta-Gölcük	30 983 250	A+B+C
A:Görünür rezerv B:Mümkün rezerv C:Muhtemel rezerv		

Asidik ve bazik volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşmaktadır. Bunlar asidik pomza ve bazik pomzadır. Bazik pomzaya bazaltik pomza veya *scoria* da denilmektedir (Gündüz vd 1998; Kotan 2009). Bazik pomzaların yoğunluğu genel

olarak $1,0 \text{ gr/cm}^3$ 'den büyüktür. Renkleri kahverenginden kırmızıya, koyu griden siyaha kadar değişir. Bazik karakterli pomzalarda genel olarak, SiO_2 oranı %50'den küçük, Fe_2O_3 oranı %5'den büyüktür. Pomzanın yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanılan türü olan asidik pomza ise bazik pomzaya göre daha hafif olup, genel olarak yoğunluğu $1,0 \text{ gr/cm}^3$ den azdır. Bu yoğunluk değeri $0,35 \text{ gr/cm}^3$ 'ün altına kadar düşebilmektedir. Rengi açık griden beyaza kadar değişebilir. Asidik pomzalarda ise genel olarak, SiO_2 oranı %50'den büyük, Fe_2O_3 oranı %3'den küçüktür (Davraz 2001; Kotan 2009). Asidik ve bazik özellikler taşıyan pomzaların tipik kimyasal bileşimleri aşağıdaki Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Asidik pomza ile bazik pomzanın kimyasal bileşimi (Gündüz vd 1998)

Bileşim	Asidik Pomza (%)	Bazik Pomza (%)
SiO_2	70	45
Al_2O_3	14	21
Fe_2O_3	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	9	8
Kızdırma Kaybı	3	1

2.6.1.b. Pomzanın kullanımı ve genel özellikleri

Pomza kendisine özgü birçok fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı başta inşaat olmak üzere tekstil, kimya, ziraat ve sağlık gibi öncü endüstri dallarında kullanılmaktadır (Gündüz vd 1998). Pomzanın, düşük birim hacim ağırlığı, yüksek ısı ve ses izolasyonu, iklimlendirme özelliği, kolay sıva tutması, mükemmel akustik özelliği, deprem yük ve davranışları karşısındaki elastikiyeti ve alternatiflerine göre daha ekonomik oluşu gibi üstün özelliklerinden dolayı inşaat ve yapı endüstrisinde geniş

bir kullanım alanı bulmaktadır. İnşaat ve yapı endüstrisindeki kullanım alanlarını bu şekilde kategorize etmek mümkündür (Sezgin vd 2005; Kotan 2009).

2.6.1.c. Pomzanın diğer endüstriyel alanlardaki uygulamaları

Yukarıda ifade edilen endüstriyel alanların dışında pomzanın agrega veya toz halinde kullanıldığı endüstriyel alanlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Çimento üretiminde puzolanik malzeme olarak (10 mikron altı),
- İzolatif duvar boyası, pürüzlü kaplama, motifli boya, astar macunu ve vernik dolgusu, aşınmayan trafik boya ve kaplamalarında,
- Plastik sanayi ve kayıt sanayinde dolgu ajanı olarak,
- Seramik endüstrisinde seramiklerin ısı yalıtım değerlerini artırmada, pürüzlü seramik ve absorpsiyonlu seramik tanelerin (boncuk) imalinde,
- Gübre imalinde topaklanmayı önleyici katkı olarak,
- Asfalt kaplamalarda bitüm kusmalarını absorban olarak,
- Ağır ve kirli ortamlarda yağ vs. akışkanları absorban yer yaygısı olarak,
- Tavuk çiftliklerinde taban yaygısı olarak,
- Kaymaz tip lastik yapımında,
- Piyano tuşu, bilardo topu, fildişi süs eşyalarının pürüzlülüğünün giderilmesi ve cilasında,
- Tarım ilaçlarının toz halde atılmasında taşıyıcı eleman olarak, gibi daha pek çok alanda kullanım imkânı bulunmaktadır.

Farklı endüstriyel alanlarda kullanılan ülkemizdeki pomza agregalarının genel fiziksel ve kimyasal özellikleri, özetle Çizelge 2.6'da verilmiştir (Kotan 2009) .

Çizelge 2.6. Türkiye'deki pomza agregalarının genel olarak fiziksel ve kimyasal özellikleri (Özkan vd 2001; Gündüz vd 2001; Kotan 2009)

Kimyasal özellikler	
PH	7-7,3
Radyoaktivite	Yok
Suda Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça%)	$\leq 0,15$
Asitte Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça%)	$\leq 2,9$
Uçucu Madde Miktarı (Ağırlıkça%)	Yok
Asitle Etkileşim (*)	İnert
Alevlenme Derecesi (°C)	Yok
Ergime Derecesi (°C)	900
(*)pomza sadece hidrofilik asit ile etkileşerek toksik silikon tetraflorit gaz çıkarır.	
Kimyasal Bileşenler	
Silisyumdioksit (SiO ₂)	52-75
Alüminyumoksit (Al ₂ O ₃)	11-17
Demiroksit (Fe ₂ O ₃)	0,5-5,0
Kalsiyumoksit (CaO)	1-8
Magnezyumoksit (MgO)	0,5-3
Sodyum oksit+Potasyum oksit (Na ₂ O+K ₂ O)	3-9
Titanyum oksit (Ti ₂ O)	<1
Sülfür trioksit (SO ₃)	<1
Kızdırma kaybı	1-3

2.6.2. Uçucu kül

Elektrik enerjisi üretimi için, termik santrallerin çoğunda yakıt olarak *pülverize* kömür kullanılmaktadır. Kömür, %80'inin 75µm elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak tarzda öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir. Pülverize kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince

olan, bir miktarı da nispeten biraz daha iri boyutlara sahip kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince tanelere sahip olan küller, yakıt gazlarıyla beraber "uçarak" bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Nispeten ağır olan iri kül tanecikleri taban külü olarak ocağın tabanına düşmektedirler. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75-%80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere "uçucu kül" denilmektedir.

Gazlarla birlikte çok büyük miktarda külün dışarı çıkması durumunda, termik santralin çevresi kısa sürede küllerle kaplanacağından, bacadan dışarıya çıkacak küller birtakım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara kanalize edilmektedir. Daha sonra da, silolardan, konveyör bantlarla veya başka yöntemlerle, termik santrallerin uzağındaki bir yere atık olarak depolanmaktadır. Uçucu küllerde çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'dür. Bunların yanı sıra, bir miktar CaO , MgO , C (çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) ve Na_2O 'da bulunabilmektedir. Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (%60-%90'i) amorf durumdadır (Lane 1982; Roy *et al.* 1984). Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık %5'i (hacminin %20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır. Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1-150 μm arasında değişiklik göstermektedir.

Normal olarak, 2,1–2,7 (ortalama 2,4) g/cm^3 yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadırlar. Bu nedenle, hem Portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadır. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15 - %50'si civarında değişebilmektedir (Erdoğan 2003).

Çizelge 2.7. Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları

Kimyasal	F Sınıfı Kül	C Sınıfı Kül
İçerik	(CaO<%10)	(CaO > %10)
SiO ₂	43,6 – 64,4	23,1 – 50,5
Al ₂ O ₃	19,6-30,1	13,3-21,3
Fe ₂ O ₃	3,8 – 23,9	3,7 – 22,5
CaO	0,7- 6,7	11,5 - 29,0
MgO	0,9- 1,7	1,5- 7,5
Na ₂ O	0 - 2,8	0,4- 1,9
C (kızdırma kaybı)	0,4- 7,2	0,3- 1,9

2.6.3. Yüksek Fırın cürufu

Cüruf, tamamen saf olmayan metaller eritildiği zaman yoğunluk farkı nedeniyle yüzeyde biriken daha hafif metallere verilen isimdir. Hafif metalin havaya temas edip oksitlenmesiyle oluşur. Bu nedenle metal küfü olarak da bilinir. Günümüzde çimento, seramik yapımında ve yapay kordon yapımında kullanılır. Hematit (Fe₂O₃), magnetit (Fe₃O₄) gibi demir cevherleri, doğada, demir oksit olarak bulunmaktadır. Demir cevherlerinde çok az miktarda silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi bazı yabancı maddeler de yer almaktadır. Demir elde edebilmek için, demir cevherlerinin, "yüksek fırın" olarak adlandırılan fırınlarda çok yüksek sıcaklıklara kadar (yaklaşık 1600 °C sıcaklığa kadar) ısıtılmaları, böylece oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Kok kömürünün (karbonun) yakıt olarak kullanıldığı bu fırınlarda, ayrıca, arıtma işlemine yardımcı olabilmesi için kalker taşı da cevherle birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle, kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşturarak fırını terk etmektedir. Geride, eriyik durumda demir ve eriyik durumda olan CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler topluluğu kalmaktadır. Demirin yoğunluğu,

yabancı maddeler topluluğunun yoğunluğundan daha yüksek olduğu için, eriyik durumdaki demir, fırının en alt bölümünde ve eriyik durumdaki diğer malzemeler ise, demirin hemen üzerinde yer almaktadır. Demir ve diğer malzeme topluluğu ayrı ayrı çıkışlardan dışarı çıkartılmaktadır. Elde edilen yabancı maddeler topluluğu "yüksek fırın cürufu" olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan 2003).

2.7. Uçucu Kül Esaslı Çimentolar ve Betonlar

Uçucu kül, kömürle çalışan santrallerde kömür yanmasından oluşan bir yan üründür. İnşaat alanında bu malzeme dünya çapında en çok bulunabilecek katkı malzemesidir ve beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Mevcut uçucu külün çoğu düşük kalsiyumlüdür (ASTM F sınıfı), ve bitümlü ve *antrasit* kömür yakılmasından elde edilir. Hâlbuki yüksek kalsiyumlu uçucu kül (ASTM C sınıfı) ise linyit ve subbituminous kömür yakılmasından elde edilir (Manz 1998). Uçucu kül esaslı geopolimerizasyon geçmiş 10 yıllarda yoğun çalışılmıştır ve farklı kimyasal katkıları, kür koşulları, nem, zaman ve sıcaklığın etkisi basınç mukavemeti üzerinde incelenmiştir (Duxson 2007a).

Uçucu kül esaslı geopolimerlerde kür süresi ve sıcaklığının basınç mukavemetindeki etkileri Palomo *et al.* (1999), Swanepoel *et al.* (2002) ve Van Jaarsveld *et al.* (2002) taraflarından incelenmiştir. Kür sıcaklığı ve kuruma süresinin basınç mukavemetinde olan etkisi tespit edilmiştir ve 5 saat 85°C ısıda kür edildiğinde basınç mukavemeti, 60MPa kadar ulaşılır. Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat çözümleri (Na₂O.SiO₂) matris için yüksek mukavemet sağlamakta olduğu belirtilmiştir (Palomo 1999).

Swanepoel *et al.* (2002) raporlarına göre kür sıcaklığı 60°C olursa, 48 saat kür edilme şartıyla basınç mukavemeti olumlu halde etkilenmektedir. Van Jaarsveld *et al.* (2002) raporuna göre uçucu kül esaslı geopolimer malzemeler için yüksek bir sıcaklıkta kür önemini vurgulamıştır ve uzun bir süre için yüksek bir sıcaklıkta bekletmek matris

mikro yapısını zayıflatır ve kül esaslı geopolimer malzemelerde basınç mukavemetini azalttığını belirtmiştir.

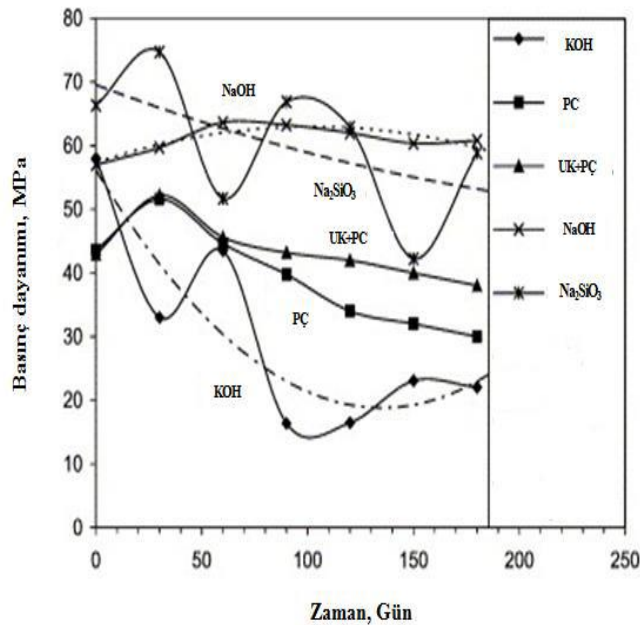
Bakharev (2005a), sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisini alkali aktivatör olarak ASTM F sınıfı uçucu kül üzerinde kullanmış ve yüksek sıcaklığın faz kompozisyonunda, mikro yapı ve dayanım gelişmesinde olan etkisini incelemiştir. Kür edilmeden önce numunelerin oda sıcaklığında bekletilmesi yüksek dayanım elde etmek için yararlı olduğunu açıklamış ve yüksek mukavemet elde etmek için ısı işlem süresini kısaltmanın yararlı olacağını belirtmiştir. Sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen numuneler 6 saat etüvde kür edilmiş 24 saat ısı işlem yapıldıktan sonra daha çok mukavemet kazandığını belirtmiştir. Kür sıcaklığında her hangi bir artış alüminosilikat jelinde Si/Al oranının azalmasına neden olacaktır. Ama oda sıcaklığında uzun süre kür etmek Si/Al oranının daha az değişmesine sebep olacaktır.

Van Jaarsveld *et al.* (2003) uçucu kül esaslı geopolimerlerin fiziksel özelliklerini etkileyen parametreleri incelemiştir. Uçucu kül parçacıkları ve kalsiyum bileşenlerinin zeta potansiyel faktörünün geopolimerlerin priz zamanında ve nihai mukavemet kazanmasında büyük etkisi vardır. Kalsiyum içeren bileşikler örneğin kalsiyum silikatlar, kalsiyum alümina hidratlar, kalsiyum siliko-alüminat gibi bileşenlerin uçucu kül ile beraber kullanılmasını önermişlerdir. Çalışmaya göre bu işlemler işlenebilirlik ve dayanım gelişim hızını olumlu yönde etkilemektedir. Kristallik derecesi, uçucu külün CaO içeriği ve su/uçucu kül oranı geopolimerlerin basınç mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerdendir.

Kum ve doğal mineralli agregalarla uçucu kül esaslı geopolimerlerin arasındaki ilişki Lee *et al.* (2004) tarafından incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre ilk aktivasyon sıvısında çözünen silikatların varlığı ara yüzey bağlarını çok etkiler. Çözünür silikat dozajını artırıldığında daha yoğun bağlayıcı elde edilebilir ve agrega/agrega ara yüzeyi bağlayıcılık oranını artırmaktadır.

Fernandez *et al.* (2004) alkali aktive edilmiş uçucu küllü bağlayıcıların mikro yapısına bir model oluşturmak için mikroskobik araçları kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elektron mikroskop izlemesini, bağlayıcının mikro yapısal gelişiminin incelemesi için en yararlı araç kabul etmişlerdir. Aktivasyon reaksiyon hızı, sıvı kimyasal bileşenlerinin yanı sıra parçacıkların boyut dağılımı, mineral bileşimi, uçucu külün tipi ve uçucu kül konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Uçucu kül esaslı geopolimerlerin sülfata dayanıklılığı Bakharev (2005b, 2005c) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalarda geopolimer %5 sülfürik ve asetik asit çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Yüksek performanslı geopolimer malzemelerde, amorf polimer matrisinde çatlak oluşur ve beton bunun sonucunda bozulur ama düşük performanslı geopolimerlerde zeolitlerin kristalizasyon nedeniyle kırılğan taneler oluşur ve geopolimer gevrekleşir ve böylece bozulur (Şekil 2.15). Bunlara ek olarak, aktivatör tipi ve katyon konsantrasyonu malzemelerin istikrarını etkileyebilecek faktörlerdendir. Sodyum hidroksit ile hazırlanan ve ısıl işlem görmüş numuneler sülfat çözümlerinde çok iyi bir performans göstermektedirler ve bu numunelerin basınç mukavemetleri %4 ile %12 oranında artış göstermektedir.



Şekil 2.15. Geopolimerlerin sülfata karşı etkilenmesi (Bakharev 2005b)

Mekanik aktivasyon yöntemlerinin uçucu külün üzerinde ve geopolimerizasyon hamurunda olan etkisi Kumar *et al.* (2005) tarafından incelenmiştir. Mekanik aktivasyon, düşük sıcaklıklarda ve daha az zaman da geopolimeizasyon reaksiyonları gerçekleşmesine neden olur ve daha kompakt bir mikro yapı elde edilir. Uçucu kül esaslı geopolimer harçların basınç mukavemeti mekanik cihaz aktivasyonu ve alkali katkılardan dolayı geniş bir yelpazede olabilir (Kumar *et al.* 2007).

Sindhunata *et al.* (2006) tarafından yürütülen çalışmalar ve gözlemlerden elde edilen sonuçlara göre uçucu kül esaslı geopolimerin nano boyut gözenek özelliklerinin olduğu ve amorf bir materyal olduğu vurgulanmıştır. Kül esaslı geopolimer *mesoporous* bir yapısı vardır (3,6-50 nm) ve bu yapı, kür sıcaklığı ve silikat oranına tepki gösterir ve gelişir.

García-Lodeiro *et al.* (2007) düşük kalsiyum uçucu kül esaslı geopolimer hamurlarının performansını alkali-agrega reaksiyonu ortamlarından değerlendirmişlerdir. Uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcı, Portland çimento bağlayıcıların tam tersine alkali silika reaksiyonu ile genişlemelerin daha az olduğunu tespit etmişlerdir ve kalsiyum esaslı bileşenlerin genişlemede önemli bir rol aldığını açıklamışlardır.

Andini *et al.* (2008) geopolimer sentezi için hammadde olarak kullanılan uçucu kül, geopolimerizasyondan sonra ki oranalar; poly sialate siloxo (Si/Al oranı 2/1) ve polysialate disiloxo (Si/Al oranı 3/1) şeklinde oluşmuştur. Zaman ve sıcaklık etkilerini geopolimerizasyonda incelemişlerdir. Geopolimer ürünlerin fiziko-mekanik ve yapısal karakterizasyonu, basınç mukavemeti, elastisite modülü, gözeneklilik, özgül yüzey alanı ve mikroskobik gözlemler dâhil olmak üzere birçok özellikleri incelenmiştir. Hafif uçucu kül esaslı geopolimer yapı malzemeleri oda sıcaklığında imal edilebilir ve özellikleri başlangıç karışımının bileşimine ve alkali metal silikat *polycondensation* koşullarına (sıcaklık ve süre) bağlıdır.

2.8. Düşük Kalsiyumlu ve Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Beton

Uçucu kül esaslı geopolimer için düşük kalsiyumlu uçucu kül, bir kaynak malzemesi olarak tercih edilmektedir. Yüksek miktarda kalsiyum varlığı betonun mikro yapı ve polimerizasyon süreci ve sonucunu etkileyebilir (Gourley 2003; Gourley *et al.* 2005). Düşük kalsiyumlu uçucu kül başarıyla geopolimer beton üretimi için kaynak materyal olarak kullanılmıştır (Gourley 2003; Gourley *et al.* 2005; Hardjito *et al.* 2005; Wallah *et al.* 2006; Sumajouw *et al.* 2006; Fernández-Jiménez *et al.* 2006) .

2.9. Geopolimer Beton Bileşenleri

Hardjito *et al.* (2005), düşük kalsiyumlu uçucu kül kullanılarak geopolimer beton üretimi ve karışım hesaplarını incelemiştir. Geliştirilen karışım oranlarının detayları başka çalışmalarda gösterilmektedir (Hardjito *et al.* 2005; Wallah *et al.* 2006; Sumajouw *et al.* 2006) . Geopolimer beton karışımlarının tasarımı da Rangan tarafından belirtilmiştir (Rangan 2008).

2.10. Geopolimer Beton Üretiminde Karışım, Döküm ve Kür

Geopolimer beton üretiminin imalatı Portland çimentosundan üretilen beton teknikleri gibi yapılabilir. Bu çalışma için önceden, uçucu kül, ince ve kaba agrega yaklaşık üç dakika için laboratuvarında kuru halde karıştırılır. Bu karışımın sonunda alkali sıvı ile birlikte süper akışkanlaştırıcı ve ekstra su, kuru karışıma eklenir, karışıma yine dört dakika devam edilir. Taze beton yapışkandır ve işlenebilirlik çökme deneyi ile ölçülür. Taze geopolimer beton kolaylıkla herhangi bir priz yapmadan ve basınç mukavemetinde herhangi bir bozulma oluşturmadan 120 dakika içerisinde kullanabilir. Taze geopolimer betonun döküm ve sıkıştırma yöntemleri aynen Portland çimentosunda olan gibi kullanılır (Hardjito *et al.* 2005; Wallah *et al.* 2006; Sumajouw *et al.* 2006)

2.11 Cüruf ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Aaron *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada iki tanesi diyatumlu şeklinde amorf silika içeren, dört tane kireçtaşı bazlı alkali aktive edilmiş cürufllu ince agregalı betonlar, farklı aktivasyon solüsyonları (NaOH/Na₂SiO₃) kullanılarak üretilmiştir. Oda sıcaklığında kür edilmesine rağmen bu ince agregalı betonlar yüksek basınç mukavemeti (45 MPa) göstermiştir. Ayrıca NaOH ile aktive edilmiş betonların çekme mukavemetleri 2,6 MPa'den (1 günlük) 4 MPa'a (28 günlük) kadar yükseldiği belirtilmiştir. Na₂CO₃ ile aktive edilmiş numunelerin 1 günlük çekme mukavemetlerinde gözle görülebilir bir artış gözlemlenmiştir. 28 günlük mukavemetlerinde ise 2,5 MPa kadar bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Smith *et al.* (1977) yaptıkları çalışmada uçucu kül kombinasyonu veya öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile sodyum hidroksitin aktive edilmesi durumunda, çimento üretilme potansiyeli olduğunu ifade etmişlerdir. Bu süre zarfında, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün normal portland çimentosunun alternatifini olarak kullanılmasının normal portland çimentosunun CO₂ salınımı bakımından çok faydalı olduğu görülmüştür (Abora *et al.* 2009).

Malolepszy (1986), tarafından yapılan çalışmada, Na₂CO₃'ün bol miktarda C₂MS (M:alkali metal) içeren cürufları aktive etmek için uygun olduğunu ifade etmiştir. NaOH'ın ise bol miktarda C₂AS içeren cüruflar için iyi bir aktivatör olduğu belirtilmiştir. Farklı sistemlerin, NaOH, Na₂CO₃ ve Na₂OSiO₂ ile aktivasyonu Krivenko (1992) tarafından incelenmiş olup, Na₂OSiO₂ alkali aktivatörün CaO-SiO₂, CaO-Al₂O₃, CaO-Al₂O₃-SiO₂ ve CaO-Mg-SiO₂ için en etkili aktivatör olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Na₂CO₃'ün, CaO-Al₂O₃ için en uygun aktivatör olduğu ifade edilmiştir. Na₂SiO₃'ün (sodyum silikat veya cam suyu) çok etkili bir aktivatör olduğu belirtilmiştir (Türkmen vd 2011).

Na_2SiO_3 ile portland cüruf çimentolarını aktive etmek için Na_2CO_3 , NaOH ve Na_2SO_4 . NaSiO_3 en etkili aktivatör olduğu, NaSO_4 'ün ise en etkisiz aktivatör olduğu ifade edilmiştir. Roy (1999) ise yaptığı çalışmada %50 oranında yüksek fırın cürufu içeren çimentoya %4 Na_2SO_4 eklemenin çimentonun dayanımını önemli ölçüde arttıracığını ifade etmiştir (Türkmen vd 2011).

Shi *et al.* (2006) yaptıkları çalışmada %4 Na_2SO_4 ve %4 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ içeren kireç cüruf hamurunun geniş aktivasyon özelliği gösterdiğini tespit etmişlerdir. Beton yaşı 90 güne kadar CaCl_2 , Na_2SO_4 'den daha fazla aktivasyon özelliği gösterdiği belirtilmiştir .

Jiang (1997) alkali aktive edilmiş çimentolu malzemeler üzerine kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Farklı aktivatörlerin cüruf çimento harçlarının basınç mukavemetine etkisini incelemiştir. 2M konsantrasyonlu sodyum silikat için kıyaslamalı dayanım diyagramı verilmiştir. En etkili aktivatörün 2M sodyum silikat olduğu tespit edilmiştir. Wang *et al.* (1995) yaptıkları çalışmada çözünür sodyum ve potasyum silikat solüsyonunun en yüksek dayanımı verdiğini belirtmişlerdir.

Wang *et al.* (1995) yaptıkları çalışmada 95-100°C'ye kadar ısıl işlemin alkali aktive edilmiş cürufun basınç mukavemetine etkisi incelenmiştir. 2M aktivatör olması durumu için optimum oran 8-10 saat ısıl işlem olarak tespit edilmiştir.

Hrazdira (1992) yaptığı çalışmada alçı taşsız portland çimentosunda cürufun aktivasyonunu incelemiştir. %1'den %3'e kadar Na_2CO_3 eklenmesi ile zemin cürufu ve portland çimento klinkeri eklenmiş cürufun basınç mukavemetinde artış olduğu belirlenmiştir (Türkmen vd 2011).

Bakherev *et al.* (1999) tarafından yapılan çalışmada sodyum silikat solüsyonu, sodyum hidroksiti ve sodyum karbonatı Avusturya cürufu çimentoları üzerine aktivatör olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada en iyi dayanım sodyum silikat solüsyonu ile elde edilmiş olmasına rağmen, harçların büzülme özellikleri düşünülerek sodyum karbonat

tavsiye edilmiştir. Isıl işlemin dayanım gelişimini hızlandırdığı vurgulanmıştır, fakat sonraki aşamalarda basınç mukavemetinin oda sıcaklığında kür edilmiş betonlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalara göre, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 0,6-1,5 arasında Na_2SiO_3 içeren alkali cüruf çimentolarına göre daha yüksek dayanım gösterdiği belirtilmiştir (Sağlık 2009; Türkmen vd 2011).

Brough and Atkinson (2002) tarafından yapılmış aktivasyon çalışmasında, cüruf 1,5 M (Na_2O).(SiO₂) solüsyonu ile aktive edildiğinde dayanımın hızlı bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. 80°C’de 12 saatlik ısıl kür yapılmasının yüksek dayanıma neden olduğu belirlenmiştir (Sağlık 2009; Türkmen vd 2011).

İsveç’in batısındaki Vargön alaşımları, Avrupadaki ferrokrom cürufu üreticileri arasında en büyük olanlardan birisidir. Ferrokrom cürufu, demir-krom üretiminin bir yan ürünü olan, paslanmaz çeliğin önemli bir bileşenidir. Ferrokrom cürufunun fiziksel özellikleri örneğin; kırılgenlığı, özgül ağırlığı, Los Angeles değeri, kılcal özellikleri test edilmiş ve yol malzemesi olarak çok uygun olduğu tespit edilmiştir. Ferrokrom cürufunun kimyasal bileşimi üç ana unsur içerir bunlar; silisyum (Si), magnezyum (Mg) ve alüminyum (Al)’dur. Oksit içerikleri ile birlikte bileşenlerinin %83’ü cüruftur. Ağır metaller arasında krom içeriği %3’ten fazla ve bölge toprakları içerisinde yaklaşık 1000 katı kadar yoğunluğa sahiptir. Co, Ni, Sn ve W’in yoğunluğu doğal topraktaki yoğunluğundan yaklaşık 100 kat daha fazladır (Lind *et al.* 2001).

2.12. Pomza Esash Çimentolar

Doğal puzolanlar bazik (alkali) ortamda sodyum silikat ile yoğunlaşmış olabilir ve sentezlenme ile düşük çevresel sorunlar oluşturan etkiye sahip yüksek performanslı yapı malzemesi olan bir çimento oluşturur. Mineral bileşim, kimyasal bileşim ve kristal yapı grupları geopolimer jel fazların oluşumu etkilemektedir. Bu çalışmada, beş doğal

puzolan maddenin puzolanik aktiviteleri incelenmiştir. XRD ve XRF deneylerinden elde edilen sonuçlara göre zeolit kil mineralleri hammadde olarak her 5 tip pomzada görülmektedir ve yüksek sıcaklıkta büyük bir kayıp görülmektedir. Bu nedenle, kullanmadan önce, numuneler, sırasıyla 700, 800 ve 900°C kalsine edilmiştir. Puzolanik özelliklerini iyileştirme için alkali çözüntülü bir ortamda kalsinasyon ve / veya artmış kür sıcaklığı, ısıt işlemlerden sonra basınç mukavemeti testleri yapıp sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlar göstermektedirki sodyum zeolit *klinoptilolit* içeren puzolanlarda ısıt işlem yardımı ile orta ve yüksek dayanımlı bağlayıcı üretebilmektedir ve kalsinasyon edilmiş *hornblend* içeren ve hiç amorf fazı olmayan puzolanlarda, orta dayanımlı bir bağlayıcı hazırlamayı önlemektedir (Bondar *et al.* 2011a).

Doğal puzolanlar jeolojik tortularından meydana gelen hammaddedir ki bir sıra kimyasal bileşim içermektedir ve uygun alkali aktivatörleri ile kombine edildiğinde geopolimer çimento üretilmektedir ve bu çimento beton üretimi için bir uygun malzemedir. Bu çalışmada, geopolimer çimento özelliklerini geliştirmek için mineral katkı maddeleri eklenerek bu katkıların etkisi incelenmektedir. İran, Taftan dağından elde edilen doğal puzolan bir andezit malzemedir, bu çalışmada bu malzemenin özelliklerin etkileyen kalsine puzolanlar, kaolinit, kireç ve diğer mineral katkıların etkisini normal ve otoklav kür altında araştırılmıştır ve üretilen geopolimer çimentosunun basınç mukavemeti üzerinde olan etkide incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) / enerji ayırmalı X-ışını (EDX) jel faz kompozisyonunun mineral katkıları ile ve mineral katkıları olmadan Taftan andezitinin alkali aktivasyonunun incelemek için kullanılmıştır. Bu çalışma göstermiştir doğal puzolanların içinde Al_2O_3 ve CaO , SiO_2 eksiklikleri, gelişmiş özellikler yaratmak için, mineral katkı ekleyerek telafi edilebilir (Bondar *et al.* 2011b).

Doğal puzolanlardan alkali aktive ve sentezleme yöntemiyle çevre dostu bir yapı malzemesi ve yeni bir çimento üretmek mümkündür. Alkali ortamın etkisi, doğal puzolanlardan geopolimerizasyon yöntemiyle üretilen çimentoların özelliklerinde incelenmiştir. Bu makalede kullanılan alkali aktivatörün türü, dozajı ve camsuyu çözelti kullanıldığında SiO_2/Na_2O oranı (silis modülü, SM) ve farklı kür koşullarının etkisi

pomza aktivasyonunda araştırılmıştır. Doğal ve kalsine Taftan andeziti ve Shahindej *dasiti* kullanılmakla geopolimer bağlayıcı üretimi teyit edildi. Basınç mukavemeti üzerinde farklı etkiler oluşturmak ve için her faktör için en uygun aralığı tavsiye edilmiştir. Silisyum, alüminyum ve kalsiyum çözelti konsantrasyonun miktarı bir alkali çözeltisinde, jel faz Oluşumu ve bunu etkileyen faktörler liç testleri (*leaching tests*), ICP-AES ve FTIR testler ile ölçülmüştür (Bondar *et al.* 2011c).

Allahverdi *et al.* (2008) çalışmalarında Taftan dağında pomza tipi doğal puzolan ve aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃'ün kombinasyonlarını kullanarak geopolimer çimento dizayn etmiş ve hazırlamışlardır. Priz süresi, işlenebilirlik ve 28 günlük basınç mukavemeti parametreleri çalışılmıştır. Çalışma sonucunda; NaOH ve Na₂SiO₃'ün uygun oranlarda kullanılmasıyla Taftan puzolanın aktive edilebileceğini; uygun işlenebilme ve 28 günlük basınç mukavemeti olarak 63 MPa'ı sağlayan geopolimer çimento formasyonuna dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir. Doğal puzolanların aktive edilebileceğini ve alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksitin belli oranlarda karışımının kullanılmasıyla geopolimer çimento üretilebileceği açıklanmıştır. Doğal puzolan temelli geopolimer çimentonun kalitesinin alkali aktivatörün bileşimine, su/bağlayıcı oranına ve doğal puzolanın kalitesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

2.13. Yapay Sinir Ağları

2.13.1.Yapay sinir ağları tanımı

Yapay sinir ağları ya da kısaca YSA; insan beyninin çalışma sisteminin yapay olarak benzetimi çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. En genel anlamda bir YSA insan beynindeki birçok nöronun (sinir hücresinin), ya da yapay olarak basit işlemcilerin Birbirlerine değişik etki seviyeleri ile bağlanması sonucu oluşan karmaşık bir sistem olarak düşünülebilir. Önceleri temel tıp birimlerinde insan beynindeki nöronların matematiksel modelleme çabaları ile başlayan çalışmalar, geçtiğimiz on sene içerisinde, disiplinli bir şekil almıştır. YSA bugün fizik, matematik, elektrik ve

bilgisayar mühendisliği gibi çok farklı bilim dallarında araştırma konusu haline gelmiştir. YSA'nın pratik kullanımı genelde, çok farklı yapıda ve formlarda bulunabilen *informasyon* verilerini hızlı bir şekilde tanımlama ve algılama üzerinedir. Aslında mühendislik uygulamalarında YSA'nın geniş çaplı kullanımının en önemli nedeni, klasik tekniklerle çözümü zor problemler için etkin bir alternatif oluşturmasıdır. Çünkü bilgisayarlar insanın beyinsel yeteneğinin en zayıf olduğu çarpma, bölme gibi matematiksel ve algoritmik hesaplama işlemlerinde hız ve doğruluk açısından yüzlerce kat başarılı olmalarına rağmen insan beyninin öğrenme ve tanıma gibi işlevlerini hala yeteri kadar gerçekleştirememektedir. Çizelge 2.8'de bilgisayar ile insan beyni arasındaki çalışma sistem yapısı karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

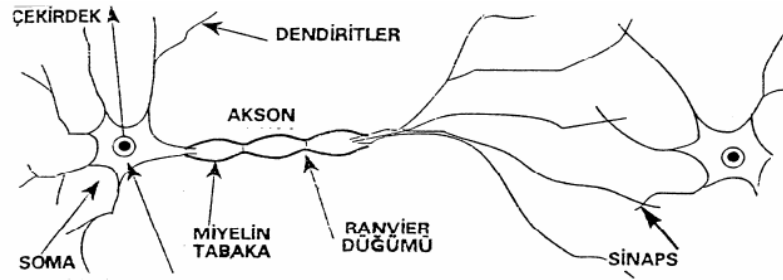
Çizelge 2.8. Bilgisayar ile insan beyni arasındaki çalışma sistem yapısının karşılaştırılması

Bilgisayar	İnsan Beyni
Sayısal	Analog
Seri	Paralel
Komut Kümeli	Bilgiye Adapte Olma
Yanlış Hesaplamalar Sonucu Etkiler	Birimlerin Ana işlemlere Etkisi Azdır
Giriş Verilerindeki Hatalar Sonucu Etkiler	Giriş Verilerindeki Hatalara Her Zaman Duyarlı Değil

YSA paralel dağılmış bir bilgi işleme sistemidir. Yani, YSA'nın temelinde, zeka gerektiren işlemlerden oluşan bilgi işleme işlevi vardır. Bu sistem tek yönlü işaret kanalları (bağlantılar) ile birbirine bağlanan işlem elemanlarından oluşur. Çıkış işareti bir tane olup isteğe göre çoğaltılabilir. YSA yaklaşımının temel düşüncesiyle, insan beyninin fonksiyonları arasında benzerlik vardır. Bu yüzden YSA sistemine insan beyninin modeli denilebilir. YSA çevre şartlarına göre davranışlarını şekillenebilir. Girişler ve istenen çıkışların sisteme verilmesi ile kendisini farklı cevaplar verebilecek şekilde ayarlayabilir. Ancak son derece karmaşık bir içyapısı vardır. Onun için bugüne kadar gerçekleştirilen YSA; biyolojik fonksiyonların temel nöronlarını örnek alarak yerine getiren kompoze elemanlar olmuştur.

2.13.2. Nöronun biyolojik yapısı ve nöron modeli

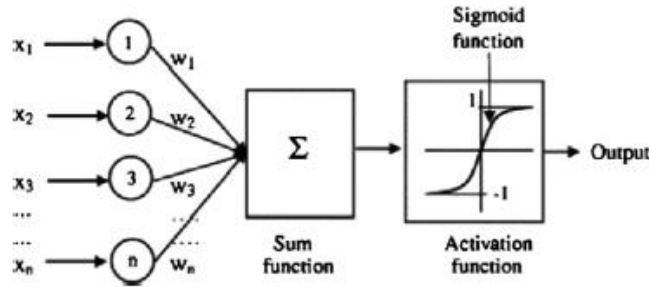
İnsanın bilgi işleme olayı beyinde gerçekleşir. Gerçektende en karmaşık sinir ağı *Cerebral Cortex* denilen “beyin” dir. Sinir sisteminin en basit yapısı nöronlardır. Beyinde yaklaşık olarak 10^{10} sinir hücresi vardır. Yine hücre başına bağlantı sayısı ise 10^4 mertebesindedir. Beyin için çalışma frekansı 100Hz’dir. Fiziksel boyutları ise 1,3kg ve $0,15m^2$ kesitlidir. Vücudun değişik yerleri ile bilgi alışverişi yapan nöron hücresidir. Şekil 2.16’de basit bir nöron hücresi görülmektedir.



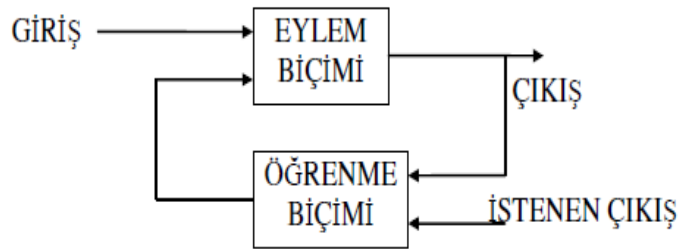
Şekil 2.16. Basit bir nöron yapısı

Nöron, soma adı verilen hücre gövdesi *dentrit* denilen kıvrımlı uzantılar ve somanın dalları sayesinde nöronu dallarına bağlayan tek sinir fiberli aksondan oluşur. *Dentrit'ler* hücreye gelen girişleri toplarlar. *Dentrit* tarafından alınan işaretler hücrede birleştirilerek bir çıkış darbesi üretilip üretilmeyeceğine karar verilir. Eğer bir iş yapılacaksa üretilen çıkış darbesi aksonlar tarafından taşınarak diğer nöronlarla olan bağlantılara veya terminal organlara iletilir. Beyindeki korteksde her nöronun bir karşılığı vardır. Bir nöronun çıkışı ona bağlı olan bütün nöronlara iletilir. Fakat korteks, işin yapılabilmesi için hangi nöron harekete geçirilecekse, sadece ona komut gönderir. Somanın içinde ve çevresinde sodyum, kalsiyum, potasyum ve klor iyonları vardır. Potasyum yoğunluğu nöronun içinde, sodyum yoğunluğu dışındadır. Somanın zarı elektriksel olarak uyarılınca (söz konusu uyarı genellikle bir gerilim düşmesidir) zar, Na ve Ca gibi diğer iyonların içeri geçmesine izin verir ve somanın iç durumunu

değiştirir. Nöronlar arasındaki bağlantılar hücre gövdesinde veya "sinaps" adı verilen dendritlerdeki geçişlerde olur. Yardımcı bir benzetme aksonlarla, dendritleri elektrik sinyallerini nörona ileten değişik *empedansdaki* yalıtılmış iletken olmasıdır. Sinir sistemi milyarlarca nöron ile tek bir nörondan çıkan aksonun 10000 kadar diğer nöronu bağlayan bir ağdır. Sinapslarla düzeltilen işaretleri taşıyan aksonlar ve dendritlerle içiçe geçmiş nöronlar bir sinir ağı oluştururlar. Şekil 2.17'de en basit formda gösterilen nöron modeli, bir eşik birimi olarak algılanabilir. Şekil 2.18'de ise YSA'nın genel blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Basit nöron modeli



Şekil 2.18. YSA'nın genel blok şeması

Eşik birimi, çıkışları toplayan ve sadece girişin toplamı iç eşik değerini aştığında bir çıkış üreten işlem elemanıdır. Bir eşik birimi olarak nöron sinapslarındaki işaretleri alır ve hepsini toplar. Eğer toplanan işaret gücü eşiği geçecek kadar güçlü ise diğer nöronları ve dendritleri uyaran akson boyunca bir işaret gönderilir. Kesişen dendritlerden gelen sinapslarla kapılanan bütün işaretleri soma toplar. Toplam işaret daha sonra

nöronun iç eşik değeri ile karşılaştırılır ve eşik değerini ağımsa aksona bir işaret yayar. YSA, bu basit nöronların (düğümünün ya da ünitelerin) bağlanarak bir ağ'a dönüştürülmesiyle meydana getirilir.

2.13.3. Yapay sinir ağlar yöntemiyle sorunların tahmini

Yapay sinir ağları (YSA) bazı zor problemlerde ve geleneksel teknikler istenen hızlı, doğru ve verimli çözümler için alternatif bir yöntem olarak ileri sürülmüştür. Yapay zekâ tekniği olarak kabul edilen bu yöntem beton teknolojisinde birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır. Bunlardan ön gerilimli beton sorunlarının çözümünde (Yeh *et al.* 1993) asfalt betonu geçirgenliği modellemesinde Tarefdar (2005) ve betonun basınç mukavemetinin tahmininde Duan *et al.* (2012) çalışmaların söylenebilir.

2.13.4. Sinir ağı tasarımı

Sinir ağı modeli tasarımında en önemli adım sorunun doğasını tanımlanmasıdır. Bu adım uygun ağ topolojisi seçimini belirleyecektir. Sinir ağı modeli öğrenme paradigması ve öğrenme topolojisi ve kendi topoloji ile tanımlanır. Her çalışma için yalnızca belirli bir şebeke alanı ve belirli bir topoloji sorunun çözümünde gerekli işlevi gerçekleştirebilmek için uygun olacaktır. Bir sonraki adım, giriş veri tiplerini tespit etmektir. Yani veriler tüm ikili (0/1) , ya iki kutuplu (-1/+ 1) ya da veriler gerçek değer girişi içerir ya yoku tespit etmektir. Bu veri türleri bazı belirli öğrenme algoritması fonksiyonları kullanılan ağ mimarilerinde diskalifiye neden olabilir. Son adım giriş ve çıkış nöronların sayısı ve en iyi performansı veren gizli katman sayısını belirlemektir.

Bu çalışma çeşitli faktörlere bağlı olan geopolimerin içinde kullanılan karışım ve malzemelerin sınıflandırması için yapılmıştır. Dolayısıyla tasarlanmış ağ sınıflandırma sorunu çözmek için yeterli olmalıdır ve Ağ girişlerin eşlemek ve istenen çıkış sonuçları üretebilmelidir. Bu nedenle şebeke denetimli bir eğitim yaklaşımı kullanmalıyız. Hazırlanan veri -1 ve 1 arasındaki gerçek değerleri içerdiğinden, en uygun aktivasyon

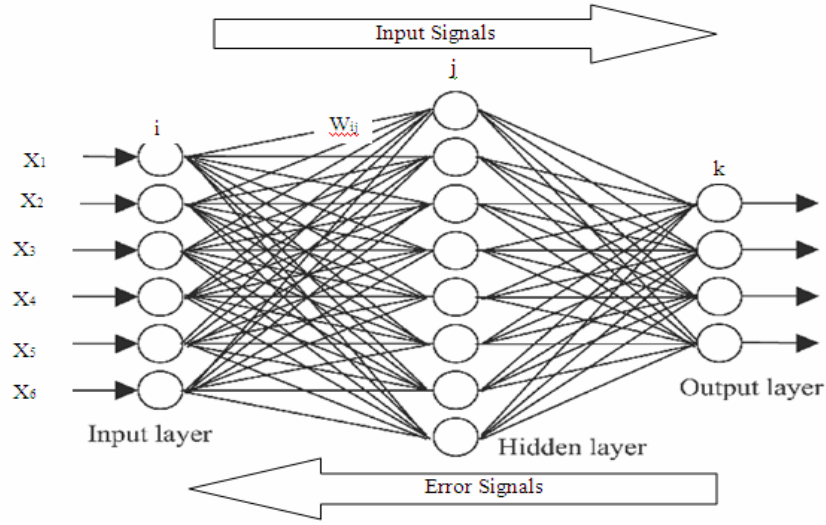
fonksiyonu tansig fonksiyonudur. Bu seçilen işlev geri yayılım öğrenme algoritması (*back propagation learning algorithm*) için uygundur.

2.13.5. Sinir ağ simülatörü model mimarisi

Geopolimer tasarımların optimizasyonun gerçekleştirmek ve sonuçları tahmin etmek için birçok istatistiksel yaklaşımlar ve bilgisayar programları gibi yöntem vardır. Bunlardan biri yapay sinir ağıdır bu yöntem yoğun paralel mimarili yöntemler ailesindedir. Bu yöntemde yapay nöronların birbiriyle bağlantısından ve basit işlem elemanların işbirliği yoluyla zor sorunları çözebiliriz. Bir YSA işleme elemanları katman halinde düzenlenen çok basit hesaplama elemanlardan oluşur ve onun performansı beyindeki nöronlara benzer. Yapay sinir ağları geleneksel tekniklere göre birçok avantaj var ve bunlardan en önemlisi örnekleri öğrenmek yeteneğidir.

En popüler tip YSA, çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağıdır (MFNN) Şekil 2.19'da gösterildiği gibi bir veya daha fazla katmanlı olabilir. Giriş ve çıkış tabakalar arasında geri yayılma eğitim algoritması ile kurulur. Katmanlar gizli katman olarak adlandırılır ve öğrenme ya da eğitim süreci sistematik olarak sinir ağı ağırlıkları ve *bias* seviyelerin değiştirilerek kabul edilebilir ağ çıkış yanıtına oluşana kadar devam edilir.

Geri yayılma eğitim algoritması (*back-propagation training algorithm*) gerçek ve istenen çıktıları arasındaki ortalama karesel hatayı (*mean square error*) en aza indirmek için tasarlanmıştır. İlk olarak, bir eğitim giriş veri seti ağ giriş katmanına sunulacaktır. İstenilen sonuca varıncaya kadar giriş verileri bir katmandan başka katmanlara yayılır ve bu sonuçla istenilen sonuç arasında fark olursa bir hata hesabi yapılır ve çıkış Katmanından giriş katmanına doğru yayılır ve bu aşamada yani hata geriye yayılan aşamada ağırlıklar değiştirilir.



Şekil 2.19. Geriye yayılma (*back propagation*) eğitim algoritması ile çok katmanlı ileri beslemeli (*feed-forward*) yapay sinir ağı (MFNN)

2.13.6. Yapay sinir ağlar yönteminde veri hazırlama süreci

Veri hazırlama YSA yaklaşımı kullanımında sorunu çözmek için gerekli bir ön koşuldur. Bu prosedür YSA yaklaşımının uygulanmasında başarısı için çok önemlidir. Bir sinir ağının performansı büyük ölçüde eğitilmiş veri kümesine bağlıdır özellikle geri yayılım (*back propagation*) ağı kullanırken.

Çünkü YSA modeli giriş ve çıkış verilerinden eğitim algoritmasının öğrenecektir. Genel olarak, daha iyi bir eğitim veri setlerinin seçilmesi, sinir ağı için daha iyi performans kazandıracaktır. Yalnız YSA' i iyi bilen birisi ve veri setlerin anlayan birisi sinir ağı yetiştirilmek üzere ayarlanmış doğru veri setleri seçebilir. YSA için yanlış veri seti seçilirse doğru çıkış vermek mümkün olmayabilir.

Veri hazırlama süreci aşağıdaki işlemi içerir:

- i. veri set hazırlanması
- ii. veri setinin temizlemesi
- iii. Veri seçimi

iv. Veri seti üzerinde önişleme

v. Veri gösterimi

Veri hazırlanmasının en önemli kısmı düzgün değişkenleri ve düzgün verileri seçme sürecidir. Önerilen giriş değerler geopolimerleri etkileyen en önemli faktörler olarak kabul edilir ve diğer bölümlerde bu konu daha çok incelenecektir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Programının Tanıtımı

Bu bölüm, Materyal ve Yöntem kısımlarından oluşmaktadır. Materyal kısmında çalışmanın amacı doğrultusunda pomza, karma suyu, aktivatör maddesi ve kullanılan diğer malzemeler ile çalışmalarda kullanılan aletler hakkında bilgi verilmektedir. Yöntem kısmında ise aktivasyon için kullanılan yöntemler, karışım hesaplarının belirlenmesi, üretilen çimentonun işlenebilirliği, basınç mukavemeti, ultra ses geçiş hızı, birim ağırlığı tayini, priz süresi tayini, hacimsel genişleme oranının tayini ve sertleşmiş geopolimer çimentosunun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Geopolimer üzerinde yapılan deneyler Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında yapılmıştır.

3.2. Materyal

3.2.1 Deneylerde kullanılan malzemeler

Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler; Hasankale ilçesinde bulunan Demirdöven pomzasının öğütülmüş hali, Atatürk Üniversitesi içme suyu, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve agregadan oluşmaktadır. Kullanılan malzemelerin özellikleri ile ilgili bilgiler alt bölümler halinde aşağıda verilmektedir. Pomza özellikleri ile ilgili deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.2. Karma suyu

Beton üretiminde kullanılacak suyun temiz olması ve hamur ve betona olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. Çalışmada karma suyu olarak Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

3.2.3. Geopolimer üretiminde kullanılan sodyum hidroksit

Pomzayı aktive etmek için kullanılan alkalilerden NaOH, %99 saflıktadır ve Merck şirketinden satın alınmıştır. Kostik olarak NaOH kolayca ve istenilen miktarlarda bulunabilmektedir. Fiyatı yaklaşık 0,25 \$/kg'dır, beyazdır ve akkor derecedeyken uçucudur ve özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Formülü	NaOH x H ₂ O
NaOH	%32-33
H ₂ O (Su)	%67-68
Görünüm	jel
Özgül Ağırlık (20°C)	1,35

3.2.4. Geopolimer üretiminde kullanılan sodyum silikat

Pomzayı aktive etmek için cam suyu olarak da bilinen Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Başta seramik sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Kolayca bulunabilir. Fiyatı yaklaşık 0,3\$/kg dir. Özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Formülü	Na ₂ O x SiO ₂
SiO ₂	%22-24
Na ₂ O	%11-12
H ₂ O	%64-67
Görünüm	Jel (Renksiz)
Özgül Ağırlık (20°C)	1,380-1,397

3.2.5. Geopolimer üretiminde kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak GLENIUM C303 adlı ürün kullanılmıştır. Bu ürün karışımın karma suyunu yüksek oranda azaltarak erken ve son mukavemetini artıran veya aynı miktarda su ile karışıma yüksek oranda akışkanlık özelliği kazandıran süper akışkanlaştırıcı katkı maddesidir. Özellikleri Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. GLENIUM C303 akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³) 20°C	1,023~1,063
Chlorine % (En 480-10)	<0,1
Renk	Yeşil
Homojenlik durumu	Homojen
Kimyasal içeriği	Sentetik polimer esaslı

EN 934-2, bu akışkanlaştırıcıyı çok büyük miktarda su azaltıcı akışkanlaştırıcılar ve sertleşmeyi hızlandıran akışkanlaştırıcılar arasında sınıflandırmaktadır.

3.2.6. Agregası

Deneşlerde agrega olarak Erzurum ili sınırları içerisindeki Aşkale mevkiinden temin edilen doğal, kırılmamış agrega kullanılmıştır. Agregası dere malzemesi olup kullanımdan önce yıkanmış halde temin edilmiştir. Bu agregadan alınan numuneler üzerinde yapılan deneşlerle malzemenin tane büyüklüğü dağılımı, tane şekli, çok ince malzeme muhtevası ve kalitesi, tane yoğunluğu ve su emme özellikleri tespit edilmiş ve beton üretimi için kullanıma uygun olduğu belirlendikten sonra karışımlarda kullanılmıştır. Agregası deneşlerine ait sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde belirtilmiştir. Çalışmada ayarlanmış granülometri kullanılmış ve bu sebeple agrega, beton üretimine başlamadan önce elenerek 0-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm olmak üzere dört farklı tane sınıfına ayrılmıştır. Agregası deneşleri her tane sınıfı

için ayrı ayrı yapılmıştır. Elenerek tane sınıflarına ayrılmış olan agregalar Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Elenerek tane sınıflarına ayrılmış olan agregalar

3.3. Deneylerde Kullanılan Aletler

3.3.1. Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı

Pomza agregalı beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları sıcak tel metoduna göre ölçüm yapabilen, 1/10000 hassasiyetli, QTM 500© ısı iletkenlik cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 3.2’de gösterilen cihaz, KEM Co. Ltd. tarafından üretilmiş olup, çok amaçlı ısı iletkenlik katsayısı ölçümü yapabilmekte ve bilgisayara bağlanabilmektedir. Ölçüm aralığı 0,0116–6 W/mK olan cihaz, –100 ile 1000°C sıcaklık aralıklarında $\pm\%5$ hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir.



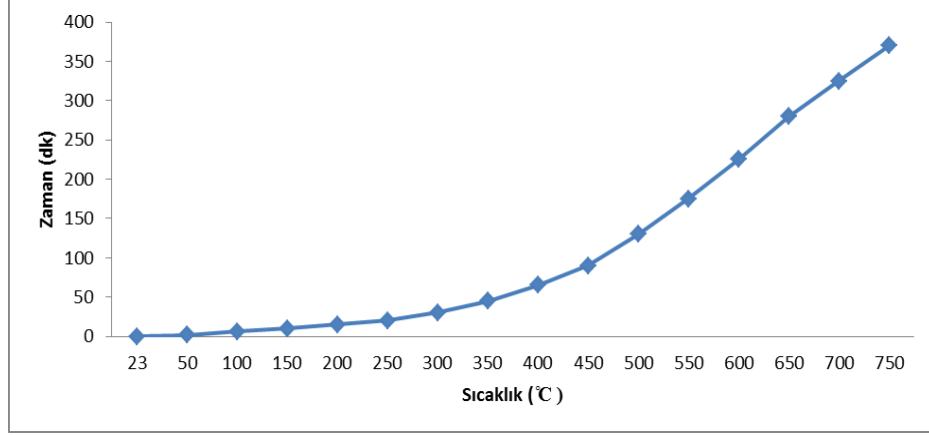
Şekil 3.2. Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı

3.3.2. Yüksek sıcaklık fırını

Numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığı fırın Tahya Makine tarafından üretilmiştir. Fırın kapasite olarak 1000°C sıcaklığa çıkabilmektedir (Şekil 3.3) .Fırına ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.3. Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 3.4. Fırına ait sıcaklık–zaman grafiği

3.3.3. Sarsma tablası (*flow*) deneyi

Bu deney akıcı karışımların işlenebilme özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Deneyin ilk aşamasında ölçüleri belirli tepesi kesik koni ($h=50\text{mm}$, $\Phi=70\text{mm}$ [üst] , $\Phi=100$ [alt] mm) şeklindeki bir kalıp içine iki eşit tabaka halinde ve her tabakası 15 kez özel bir çubukla şişlenerek standart olarak taze hamur doldurulur. Alet, 16 kg ağırlığında ve BS 1881-105'e uygun olmalıdır. Kap kaldırıldıktan sonra bir kenarı menteşeli diğer kenarı ancak belirli bir yüksekliğe kalkmasına izin verilen tabla 15 kez düşürülür. Bu şekilde yayılan karışımın çapı ölçülür. Laboratuvarında kullandığımız sarsma tablası deney aleti Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Sarsma tablası deney aleti

3.3.4. FRITSCH mill öğütme cihazı

Pomzayı öğütmek için FRITSCH Mill öğütme cihazı kullanılmıştır. Cihaz Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



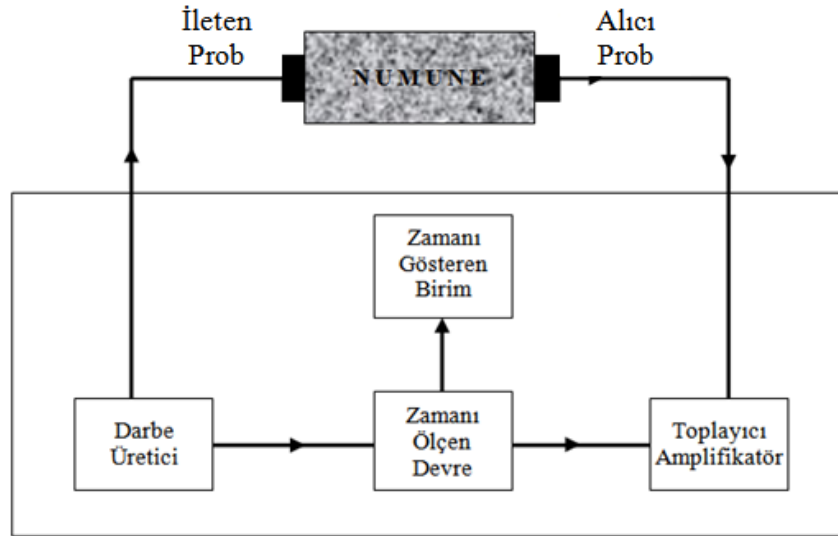
Şekil 3.6. Pomzayı öğütmek için kullanılan FRITSCH Mill öğütme cihazı

3.3.5. Ultra ses hızı ölçüm cihazı

Ultra ses hızı ölçüm cihazı, ultrasonik dalgalar üreterek bu dalgaların belirli boyuttaki numunenin bir yüzeyinden gönderilip diğer bir yüzeyinden alınmasına kadar geçen zamanı elektronik olarak ölçmektedir. Algılayıcılar arasındaki uzaklık hareket zamanına bölündüğünde dalga ilerlemesinin ortalama hızı elde edilir. Ölçülen bu hız, betonun mukavemeti, homojenliği, elastisite modülü, döküm özellikleri ve çatlakların varlığının belirlenmesi gibi betonun birçok özelliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Çalışma kapsamındaki ultrasonik hız ölçümleri, (Qust-120+) marka dijital ultrasonik hız ölçme cihazı ile yapılmıştır. Deneylerde kullanılan ultrases hızı ölçüm cihazı Şekil 3.7'de, bu tekniğin basit olarak blok şeması ise Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Ultra ses hızı ölçüm cihazı



Şekil 3.8. Ultrases hızı ölçüm cihazı blok şeması (Kotan 2009)

3.3.6. Kalıplar

Deneysel çalışmalar kapsamındaki, hamur numunelerin üretiminde, çelikten imal edilmiş $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ve geopolimer betonlar için sertleşmiş plastikten imal edilmiş

D=100 mm ve h=200 mm boyutlu silindirik hazır kalıplar kullanılmıştır. Kullanılan kalıplar Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Beton ve hamur numunelerinde kullanılan kalıplar



Şekil 3.10. Beton deneylerinde 100 x 200 mm boyutlarında plastik malzemeden yapılmış portatif silindir beton kalıpları

3.3.7. Pres cihazı

Bu çalışmada sertleşmiş geopolimer çimento ve geopolimer beton deneylerinde numunelerin basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde ELE marka *AUTOTEST* 3000 tipinde 300 ton kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Beton pres aleti

3.3.8. Kür fırını

Deneysel çalışmada üretilen geopolimer numunelerinin bir kısmı etüvde geopolimerizasyonu hızlandırmak için 45°C-85°C ısı işlemine tabii tutulmaktadır. Isıl işlem için kullanılan kür fırını Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Kür ve kurutma fırını

3.3.9. Hidrometre

Hidrometre cihazı 0,075 mm'den küçük tanelerinin oranlarını bulmakta ve tane dağılımı tespit edilmesinde kullanılmaktadır. İnce taneler hidrometre tarafından yuvarlak kabul edilirler. *Stock* yasasına göre ince taneler su içerisinde savrulurak dibe çökmektedirler. İnce taneler yapılarından dolayı mutlak kohezyona sahiptirler ve yapılarındaki (+) değerliklerin fazla oluşu kohezyonu artırıcı etkendir. Hidrometre cihazı Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Hidrometre cihazı

3.3.10. Hamur ve beton karıştırıcısı

Çalışma kapsamında Şekil 3.14'de gösterilen 10 litre kapasiteli, 240 devir/dakika karıştırma hızlarına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi karıştırıcı kullanılarak geopolimer üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.14. Geopolimer üretiminde kullanılan laboratuvar tipi karıştırıcı

3.3.11. Vikat aleti

Düz bir tablanın eksenine gelecek şekilde ayarlanmış silindir mili tutan deveboynundan ibarettir. Deveboynuna bağlı sabit bir taksimatlı gösterge mevcuttur. Ayrıca deveboynundaki yatağa vida ile sıkıştırılabilen silindir mili vardır. Mili, istenilen noktada göstergeye sıfırlayabilen aparat mile vida ile sıkıştırılmıştır. Milin alt ucuna vikat sondası ve iğnesi monte edilir. Deneyde milin etken ağırlığı 300 gr'dır. Bu ağırlığı ayarlamak için milin üst kısmında bulunan ağırlık tablasına gereken ağırlık konulur. Laboratuvarda kullandığımız Vikat aleti Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Vikat aletleri

3.3.12. Çimento inceliğinin belirlenmesinde kullanılan Blaine aleti

Geopolimer çimento tanelerinin kimyasal çözeltiyle reaksiyona girebilmesi için belirli bir incelik değerinde olması gerekmektedir. Öğütülen Portland çimento taneleri 1-200 µm arası boyutlarda olmaktadır. İncelik sözcüğü çimento tanelerinin ortalama boyutların ifade etmektedir. Deneye başlamadan önce topraklanmaların dağılması için deneye tabi tutulacak çimento numunesi kapaklı bir kavanozda 2 dakika sallanır ve daha sonra 2 dakika beklenir. Portland çimentolarının Blaine incelikleri 2800-4000 cm²/gr aralığında değişmektedir. İncelik belirlenmesinde en çok Blaine yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem TS EN 196-6 ve ASTM C 204 standardında anlatılmaktadır. Bu yöntemde prensip olarak çimentonun inceliği, belirlenmiş boyutlarda ve prizdeki sıkıştırılmış bir çimento yatağından sabit hava miktarının geçtiği sürenin gözlenmesiyle özgül yüzey olarak ölçülür. Geopolimer çimentoda aynı Portland çimentosu gibi ve çimento standartlarına uygun Blaine deneyinin yapılması gerekmektedir. Laboratuvarda kullandığımız klasik Blaine cihazı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



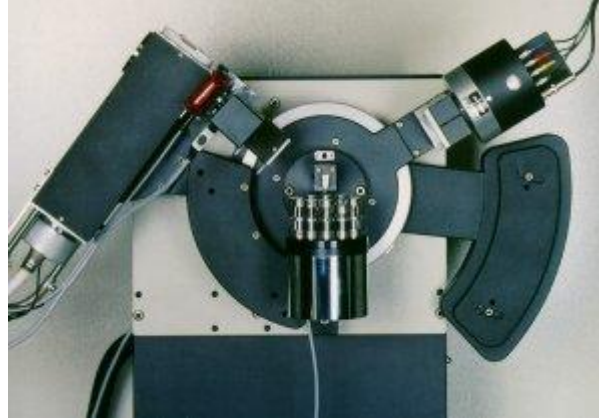
Şekil 3.16. Klasik Blaine cihazı

3.3.13. X-Işını difraksiyon spektroskopisi cihazı

Spektroskopisi olarak bilinen X-Işını Difraksiyon spektroskopisi isminden anlaşılacağı üzere X-ışını adı verilen ultraviyole ışıdan daha kuvvetli fakat Gamma ışınından daha zayıf enerjili ışın kullanılarak yapılan analizi temel alır.

X-Ray Diffractometer denilen aletler ile yapılan bu karakterizasyonda örnek türüne göre değişik uygulamalar görülmektedir. Ayrıca detektör ve ışın doğası da önemli etkenlerdir.

Çalışma prensibi olarak örneğe X-Işını göndererek kırılma ve dağılma verileri toplaması söylenebilir. Kristal yapısına göre ışını farklı açılarda ve şiddette kıran örnekler çok hassas biçimde analiz edilebilmektedir.



Şekil 3.17. Örnek olarak bir XRD cihazı

Şekil 3.17 tipik bir XRD cihazında görüldüğü gibi ışını üreten sol üst başlık ile detektör (sağ üst) birbirine V şeklinde bir açıyla bağlanmıştır. Bu açı değişebilmekte olup orta hazne örnek yüklemesi için kullanılmaktadır. Fourier Transform devriminden sonra XRD makineleri de önemli ölçüde geliştirilmiş, önceleri her açığı ayrı ayrı analiz ederek toplu değer sunan makineler şimdi geniş açıları ile çok dar zamanda ve uygun çıktı ile

verebilmektedir. XRD'yi çok kullanışlı yapan şey kristal yapılarında parmak izi hassaslığında veri toplayabilmesi ve güvenilir olmasında yatmaktadır.

3.3.14. Fourier transform infrared (kızılötesi) spektroskopisi (FTIR)

Kızılötesi (IR) absorpsiyon spektroskopisi bir tür titreşim spektroskopisidir; IR ışınları molekülün titreşim hareketleri tarafından soğurulmaktadır. Matematiksel Fourier dönüşümü spektroskopisinde ışın şiddeti, zamanın bir fonksiyonu olarak alınır. Her dalga boyunu ayrı ayrı tarama gerekmesizin hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilebilir.

a- FTIR Spektroskopisinin avantajları

FTIR, her dalga boyunu tek tek taramak gerekmediği için spektrum birkaç saniyede kaydedilir ve yarık veya prizma kullanılmadığı için duyarlık değişmeden yüksek ayırmalı spektrum elde edilir. Ayrıca alınan spektrumda S/N (Signal/Noise-Sinyal/Gürültü) oranı diğer spektroskopi yöntemlerine göre çok yüksek olduğundan bantlar net ve şiddetli bir şekilde gözlenebilir.

b- Spektrum alma ve yorumlama

Background alındıktan sonra numunenin spektrumu bilgisayar programı yardımıyla alınır. Spektrumda çeşitli bağ titreşimleri için gözlenen IR bantları yaklaşık olarak teorik olarak hesaplanan frekans değerlerinde gözlenir ve bu bantlar aynı grubu içeren çok farklı moleküllerde de birbirine yakın değerlerdedir. Bundan yararlanarak bir molekülde hangi kimyasal bağların bulunduğu IR spektrumunun incelenmesiyle anlaşılabilir. Hangi kimyasal bağların hangi dalga sayısı değerlerinde gözleneceği çeşitli tablolarla düzenlenmiştir. Bu tablolara korelasyon tabloları denir.

IR spektroskopisi yöntemiyle, bir maddenin yapısının incelenmesi için, incelenecek madde saflaştırıldıktan sonra spektrumu kaydedilir. Spektrumdaki piklerin dalga sayısı değerleri belirlenir ve bu dalga sayısı değerleri korelasyon tabloları ile karşılaştırılarak o molekülde hangi kimyasal bağların bulunduğu belirlenir. Spektrumdan elde edilen bilgiler o molekülün element analizi fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi bilgilerle birleştirilerek molekülün yapısı belirlenir. En son olarak da elde edilen spektrum, bilinen bileşiklerin aynı koşullarda çekilmiş bilinen madde spektrumlarıyla karşılaştırılır ve maddenin hangi madde olduğuna karar verilir.

4000 cm^{-1} - 1300 cm^{-1} (belirgin fonksiyonel grup bölgesi)

IR spektrumlarında 4000 cm^{-1} - 1300 cm^{-1} arasında izlenen pikler molekülde bulunan çeşitli fonksiyonel gruplara ait piklerdir. Spektorumun bu bölgesinin değerlendirilmesiyle o molekülde hangi fonksiyonel grupların olup olmadığı anlaşılabilir. Bu nedenle bu bölgeye belirgin fonksiyonel grup bölgesi denir. Bu bölgede gözlenen piklerin şiddetleri yüksektir ve kolaylıkla her bir pikin hangi fonksiyonel gruba ait olduğu belirlenebilir.

1300 cm^{-1} - 400 cm^{-1} (Parmak izi bölgesi)

1300 cm^{-1} - 400 cm^{-1} arasında gözlenen pikler ise molekülün yapısından çok etkilenir. Bu bölgede gözlenen piklerin tümü, incelenen moleküle özgüdür. Yani spektrumun bu bölgesi incelenen molekülün parmak izi gibidir. Bu nedenle spektrumun bu bölgesine parmak izi bölgesi denir ve bu bölgede gözlenen piklerin her birinin hangi titreşime ait olduğu kolaylıkla belirlenemeyebilir. Laboratuvarında kullandığımız FTIR cihazı aleti Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. FTIR cihazı

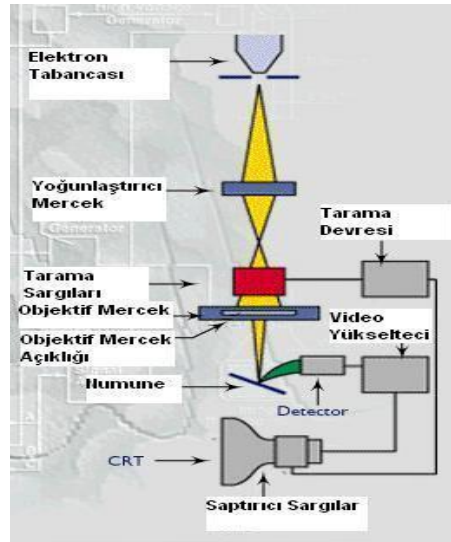
3.3.15. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları göre bilme olanağı sınırlıdır. Bu nedenle görüntü iletimini sağlayan ışık yollarının merceklerle değiştirilerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Ancak bu cihazlar, gerek büyütme miktarlarının sınırlı oluşu gerekse elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma imkânının olmayışı nedeniyle araştırmacıları bu temel üzerinde yeni sistemler geliştirmeye itmiştir. Elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanımı ile yüksek büyütme üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir. Elektro-optik prensipler çerçevesinde tasarlanmış taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscop - SEM) , bu amaca hizmet eden cihazlardan birisidir. Taramalı Elektron Mikroskobu, birçok dalda araştırma-geliştirme çalışmalarında kullanımı yanında, mikro elektronikte yonga üretiminde, sanayinin değişik kollarında hata analizlerinde, biyolojik bilimlerde, tıp ve kriminal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk ticari taramalı elektron mikroskobu 1965’de kullanılmaya başlanmış, bundan sonra teknik gelişmeler birbirini izlemiştir. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir. Gerek ayırım gücü (resolution), gerek odak

derinliği (depth of focus) gerekse görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir.

a- Çalışma prensibi

Taramalı Elektron Mikroskobu Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.19). Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demetiyle numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınmaları toplayan detektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.



Şekil 3.19. Şematik olarak SEM cihazının çalışması

3.3.16. Hassas terazi

Hacimsel rötre deneylerinin gerçekleştirilmesi için kullanılacak hassas terazi Şekil 3.20’de verilmektedir. Deneylerde Arşimet prensibine göre latex kılıf içerisindeki hamur numunenin hacmindeki değişimi ağırlık prensibi metoduyla tespit edilmektedir. Ayrıca hassas terazinin bilgisayara bağlantısı ve programı temin edilmiş olup, 24 saatlik zamanda her 15 dakika aralıklarla ağırlık ölçümü yapılmaktadır.



Şekil 3.20. Hassas terazi ve hacimsel rötre deney düzeneği

3.4. Yöntem

3.4.1. Testler için yapılan hazırlıklar

1. Ierisindeki oksit ve bileşenleri belirlemek için öğütülmüş pomza ve üretilen geopolimerler üzerinde XRD analizi yapılmıştır. Pomza üzerinde yapılan deneyin

sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde Şekil 4.1 ve Çizelge 4.3’de açıklanmıştır.

2. Pomzanın fiziksel (yoğunluk, özgül yüzey alan tayini ve elek kalıntıları) ve kimyasal özelliklerini (alüminyum oksit, demir oksit, silisyum dioksit, kalsiyum oksit, magnezyum oksit, kızdırma kaybı, çözünmeyen kalıntı miktarı ve PH deneyleri) belirlemek için TS EN 196-2 ve TS 6166 yöntemleri kullanılmıştır. Öğütülmüş pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Öğütülen pomza tanelerinin granülometrisi hidrometre yöntemi kullanılarak elde edilmiştir ve sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde açıklanmıştır.

- **Hidrometre deneyinin yapılışı**

200 nolu elekten geçirilmiş 50 gr öğütülmüş pomza uygun bir kap içerisinde 2,4 gr sodyum poli-fosfat içeren 125 gr çözelti ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışım tanelerinin birbirinden ayrışması için 16 saat bekletilmiştir. Daha sonra karışım pipetten su akıtılarak karıştırma kabının içerisine konulur. Limit çizgisine kadar su ile doldurularak elektrikli karıştırıcı yerleştirilir ve 10 dakika kadar bekletilir. Bu arada süspansiyon hazırlığı yapılır. 2,4gr sodyum polifosfat ile 125 gr su karıştırılır. Karışım mezür içerisine boşaltılır ve mezür içinde 1000 ml su olması sağlanır. Karıştırma kabında hazır olan numunede mezür içine boşaltılır. Kapta numune kalmaması için pipetle su akıtılarak tanelerin akması sağlanır.

Mezür 1000 ml suya tamamlanır. İnce jelatinle mezür üzeri kapatılır ve kaçırma olmaması için elle ovularak hava boşluklarının olmadığına dikkat etmek gereklidir. Mezür iki tarafından tutularak alt tarafında numune kalmayacak şekilde çalkalanır. Numune ve su homojen bir karışım haline geldikten sonra film çıkartılır ve hidrometre karışımın içerisine daldırılır. Hidrometre su içerisindeyken su yüzeyindeki gidip

gelmeler hafif dokunuşlarla azaltılıp durdurmalıdır. Sıfır hareketsizliğe kadar geçen zaman 15 saniyeden az olmalıdır.

Ardından 15 ve 30 saniye, 1 ve 2 dakika kadar okumalar alınarak kaydedilir sonra karışım para filmle kapatılarak karıştırma işlemi tekrarlanır. Hidrometre daldırılıp 15 ve 30 saniye, 1 ve 2 dakika zaman okumaları alınarak öncekiyle kıyaslanır. Eğer aynı sonuçlar elde edilirse daha sonraki 5, 10, 15 ve 30 dakika ve 1, 2, 3, 4, 5, 24, 48 saat okumalara geçilir. Süspansiyon okuması alınır. Her okumada sıcaklık ölçümü yapılır.

Ölçüm ve okumalarda hidrometrenin süspansiyona konulması gerekmektedir. Okuma zamanı geldiğinde çıkarılmalı ve işlem bittikten sonra süspansiyona konulma sırasında hidrometre döndürülerek üzerindeki parçacıklar temizlenmelidir (TS1900-2006).

3. FTIR spektroskopisi yöntemiyle, pomza yapısının incelenmesi için pomza üzerinde FTIR deneyleri yapılmıştır ve sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

- FTIR deneyinde katı örneklerin ölçümleri

Bu deney çok ince toz haline getirilmiş bir örneğin Potassium Bromide (KBr) ile karıştırıldıktan sonra basınç altında oluşturulmuş tabletleri ile yapılır. 120 mg ağırlığındaki pomza 80 mg kuru KBr ile iyice karıştırılır ve pres cihazında basınç uygulanarak 0,5 mm kalınlığında ve 1 cm çapında bir tablet haline getirilmiştir.

KBr'in kızılötesi bölgesinde absorpsiyonu olmadığı için kullanılması uygundur. Kullanılan KBr nem içermemelidir. Çünkü içerdiği nem *IR (Infra Red)* spektrumunda hatalı bantların gözlenmesine neden olur.

4- İstenilen molaritedeki sodyum hidroksit çözeltisi, sıvı sodyum hidroksit içinde sodyum hidroksit peletlerinin çözünmesi ile hazırlanmıştır. Pelet saflık derecesi %98'dir.

3.4.2. Geopolimer hamuru üretilmesi ve çözünme iyon prosedürü

- Silika modülü (SM) değiştirilerek (0,52-0,60 ve 0,68), farklı oranlarda su/bağlayıcı için örnekler hazırlanmıştır (9 karışım). Karışımlar Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

- Pomzadan silika, alümina ve kalsiyum çözünmesi için uygulanan yöntem aşağıdaki gibidir: Sodyum silikat çözeltisi ve sodyum hidroksit çözeltisi karıştırıcı içine yerleştirilmiş ve 3 dakika karıştırılmıştır. Sonra pomza, su ve süper akışkanlaştırıcı ilave edilip 240 devir/dakika hızında 3 dakika karıştırılmıştır.

- Üretilen geopolimer hamurlar kalıplara 3 aşamada yerleştirilip sonra 1 dakika titreşim masasının üzerinde bekletilmiştir. Geopolimer hamurları için kullanılan küp kalıplarının boyutları 50x50x50mm³'dür. Beton deneyleri için 10x20cm'lik sert plastikten üretilen kalıplar kullanılmıştır.

- Suyun buharlaşmasını önlemek için numunelerin kalıpları ince plastik filmlerle sarılıp ısıtıl işlem uygulaması amacıyla kür fırınına bırakılmışlardır.

3.4.3. Geopolimerler de en uygun alkali çözeltinin belirlenmesi deneyleri

Pomzaya ağırlığının %4, %7 ve %10 Na₂O içeren ve 0,36-0,40 ve 0,44 oranlarında su/bağlayıcı oranlarına sahip 9 farklı alkali çözelti karıştırılarak üretilen geopolimerler fırında küre tabi tutulmuşlardır. Alkali çözeltilerde pomzaya göre ağırlıkça kullanılan Na₂O ve SiO₂ miktarları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Üretilen seriler ve kullanılan alkali çözeltiler

Karışım	SM	Na ₂ O	Su/bağlayıcı
1	0,52	4	0,36
2	0,52	7	0,40
3	0,52	10	0,44
4	0,6	7	0,36
5	0,6	10	0,40
6	0,6	4	0,44
7	0,68	10	0,36
8	0,68	4	0,40
9	0,68	7	0,44

3.4.4. Geopolimerler de en uygun malzeme ve kürün belirlenmesi deneyleri

Belirlenen en uygun alkali çözeltisi kullanılarak üretilen geopolimer hamurlarda, farklı kür sıcaklıkları (25°C, 45°C, 65°C ve 85°C), etüvde farklı kür süresi (0, 12, 24, 48 ve 96 saat) ve farklı ön bekleme süresi (65°C’de kür edilen numuneler için; 0, 6, 12 ve 24 saat) uygulanmıştır. Ayrıca ASTM C109-90 göre 3, 7, 28 ve 90 günlük yaşlarında geopolimerlerle hazırlanan 9 karışım için 28 günlük basınç mukavemeti deneyi yapılmıştır. En iyi karışım için numunelerin yüksek sıcaklıktan sonraki mukavemetleri incelenmiştir. En yüksek mukavemetli geopolimer çimentodan 100 mm çapında ve 200 mm boyunda silindirik beton numuneler üretilip numunelerin 28 günlük basınç mukavemetleri, UPV deneyleri (ASTM C 597-83), ısı iletkenliği ve yoğunlukları incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç mukavemetleri, sıcaklık iletkenliği, UPV değerleri ve yoğunluklarında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Üretilen betonun numune sayısı 27’dir. Çalışmada her karışımdan 3 adet numune üretilmiştir ve 3 adet numune ortalaması üzerinden sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde açıklanmıştır.

3.4.5. Geopolimer özelliklerinin belirlenmesinde priz süresi tayini deneyleri

Yapı malzemelerinin karıştırma, taşıma ve şekil verme işlemlerinin uygun şekilde yapılabilmesi yeterli priz süresine sahip olması gereklidir. Deneyde kullanılan 40 mm yüksekliğindeki Vicat halkası içine geopolimer pastası doldurulur. Vicat iğnesinin geopolimerde 32-35 mm çökme yaptığı zaman priz başlangıcı, 1-2 mm çökme yaptığı zaman ise priz sonu olarak kaydedilmektedir. Bu bölümde geopolimerlerin priz süreleri Na_2O içeriği ve su/bağlayıcı oranına göre değişimleri belirlenmiştir.

a- Priz başlama süresinin tayini

Öncelikle Vicat cihazının iğnesi tabandaki cam plakaya değene kadar indirilir ve gösterge sıfırlanır. Dolu Vicat kabı deney odasındaki cam taban plakasının üstünde veya standartlara uygun rutubetli kabinde saklanır ve uygun bir süre sonra Vicat cihazının iğnesinin altına konur. İğne hamurun üst yüzeyine değene kadar dikkatlice indirilir. İğne, sondada ani darbe ve çarpma etkisi olmaması için (1-2) saniye bu konumda tutulur. Ardından sonda hızla serbest bırakılır. İğnenin hamura düşey şekilde saplanması durduğunda veya en geç 30 saniye sonra ölçüm okunur. İğne ile cam plaka arasındaki mesafe ve hamurun hazırlanışından bu ana kadar geçen süre kaydedilir. Aynı numune üzerinde, birbirinden ve kenardan en az 10 mm mesafe kalacak şekilde ve uygun sürelerle (örneğin 10 dakika) iğne batırma işlemleri tekrarlanır. Numune, batırma deneyleri arasındaki sürede, standartlara uygun koşullara sahip odada veya rutubetli kabinde saklanmalıdır.

Priz süresini otomatik tespit eden cihazın kullanılması hâlinde karakteristik eğri çizilerek priz başlangıcı tespit edilebilir. Karışımın tamamlanmasından itibaren plakanın üst yüzü ile iğnenin ucu arasındaki mesafenin 4 mm olduğu ana kadar geçen süre hamurun priz başlangıcıdır. Elle ve otomatik yöntemlere göre batırma süre aralıkları, ölçülen priz başlangıç süresini %5 hata ile bulabilecek şekilde tespit edilmelidir. Gerçek priz başlangıç süresi, sonuçların enterpolasyonu ile belirlenebilir.

b- Priz bitiş süresinin tayini

Dolu olan ve priz başlama süresi tayininde kullanılan Vicat kalıbı, priz süresi deneyinin cam plaka tarafındaki alt bölümünde devam ettirilebilmesi için, kalıp üstüne kapatılan diğer bir cam plaka üzerine ters çevrilir. Karışımın tamamlanmasından itibaren iğne ucunun en çok 2,5 mm battığı ana kadar geçen süre hamurun priz sona erme süresidir. Batma derinliği, priz başlama süresinin tayininde tarif edildiği gibi belirlenir. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde açıklanmıştır.

3.4.6. Kür süresinin geopolimerlerin mukavemetine etkisi

ASTM C 192-82'e göre kür süresinin etkisini belirlemek için 25°C, 45°C, 65°C ve 85°C sıcaklıklarda kür edilen 9 karışımdan üretilen geopolimerlerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç mukavemetleri tespit edilmiştir.

3.4.7. Isıl işlem den önce bekleme süresinin geopolimerlerin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Isıl işlem yapılmadan bekleme süresinin geopolimerlerin basınç mukavemetine etkisinin incelenmesi için 65°C kür edilen numuneler sırası ile 0, 6, 12 ve 24 saat oda sıcaklığında bekletilip sonra ısıl işleme maruz kalmıştır. 48 saatlik kürden sonra numunelerin kalıpları açılmıştır ve 3 günlük basınç mukavemetleri tespit edilmiştir. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde açıklanmıştır.

3.4.8. Hacimsel büzülme

Yapı malzemelerinin çatlamaması için yüksek hacim sabitliklerinin olması gereklidir. Hassas terazi ve su geçirmez lateks kılıflar kullanılarak 3 adet geopolimer numune üretilmiştir ve büzülme ve genişleme miktarları 24 saat boyunca her 15 dakika

aralıklarla kaydedilmiştir. Bu bölümde geopolimerlerin hacim sabitliklerinin Na_2O ve SM miktarı ile değişimi belirlenmiştir.

Rötrenin önemli kısmı ilk 24 saat süresinde gelişir ve bu süre sonunda büyük kısmı sonuçlanır. Bu yüzden ölçümlerin bağlayıcı daha tam katılaşmadan, priz başlangıcı civarında ve çimento hamuru kalıptan çıkarılmadan başlaması gerekir. Hacimsel ölçüm sistemi Arşimet prensibine dayanır. Burada dış ortamdan tamamen izole edilmiş (hava ve su izolasyonu) lateks elastik kılıf içerisine doldurulan çimento hamuru sabit sıcaklıkta su içinde tartılır. Arşimet prensibine göre suyun kaldırma kuvveti su içindeki cismin hacmiyle doğru orantılıdır. Elastik kılıf içindeki numunenin hacmi azalırken, numunenin su içindeki ağırlığı buna bağlı olarak artar. Hacimsel yöntemde numunenin su içindeki ağırlık değişimi izlenerek hacim değişimi elde edilir. Bu yöntemde çimento hamurunun hacim değişimi, karışım anından itibaren belirlenebildiğinden özellikle çimento hamuru için yaygın olarak kullanılır. Çalışmada, sabit sıcaklıkta ($23^\circ\text{C}\pm 1$), 0,001 g hassasiyetinde terazi ile priz başlangıcından itibaren alınan 24 saatlik veriler kaydedilmiştir ve sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde açıklanmıştır.

3.4.9. Geopolimerlerde mikro yapı analizleri ve karakterizasyonu

En yüksek mukavemetli karışım hamurları yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmadan öncesi ve sonrası mikro yapıların araştırmak, porozite ve çatlak oluşumunu incelemek için yaklaşık 1 cm^3 hacmindeki parçalar üzerinde SEM-EDX ile mikro yapı fotoğrafları çekilerek geopolimerlerin mikro yapısı incelenmiştir. Mikro yapı analizleri 90 günlük basınç mukavemeti deneyine tabi tutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Geopolimer karışımlarda yeni kimyasal bağların meydana gelip gelmediğini belirlemek için numunelerden FTIR analizleri alınmıştır. Amorf yapıda olan pomza da, kristal ve yarı kristal malzemelerin oluşup oluşmadığı SEM deneyleri ile incelenmiştir. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde gösterilmiştir.

3.4.10. Basınç mukavemeti deneyi

Basınç mukavemeti deneyleri pomza esaslı geopolimerlerin ve geopolimer betonların mukavemetini araştırmak için yapılmıştır. Basınç mukavemeti deneyleri 25°C, 45°C, 65°C ve 85°C sıcaklıklarda 3, 7, 28 ve 90 günlük zamanlarda yapılmıştır. Na₂O miktarının geopolimer basınç mukavemetindeki olan etkisi incelenmiştir. Geopolimer betonda ise 28 günlük basınç mukavemet deneyi yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve sonra yapılmıştır. Bu deneyler *ELE* marka *AUTOTEST* 3000 tipinde basınç mukavemeti lme test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın (presin) yükleme hızı 2 kgf/cm²/sn'dir (şekil 3.14). Deney rneklerinin şekli geopolimerlerin özelliklerini nasıl etkilediğini incelemek için küp ve silindirik olarak seçilmiştir. Ama geopolimer betonlar için kullanılan kalıplar, 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindir şeklinde-dir. Deneyler hamur ve betonlar için ASTM C109-90 ve ASTM C39-86'a göre yapılmıştır. Her lm 3 numuneni ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

3.4.11. Geopolimer beton için yapılan deney yöntemleri

ASTM C 138-81 ve ASTM C39-86'ye göre üretilen geopolimer betonlar üzerinde yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve sonra UPV, ısı iletkenliği (TC), yoğunluk ve basınç mukavemeti deneyi yapılmıştır.

3.4.11.a. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Deneylerde kullanılacak olan agrega; daha iyi tane dağılımı elde edebilmek için elenerek, 0-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm olmak üzere dört farklı tane sınıfına ayrılmıştır. Böylelikle üretilecek olan betonlarda ideal granlometrinin ve maksimum doluluğun sağlanması amaçlanmıştır. Farklı gruplara ayrılan agregalar üzerinde yeterlilik deneyleri yapılarak malzemenin kullanılabilirliği ve özellikleri belirlenmiştir.

Deneyleerde kullanılmak üzere laboratuvara getirilen normal agrega için agrega deneyleri yapmak üzere numune alınmasında TS707’de belirtilen esaslar dikkate alınmıştır. Bu standartta her bir agrega deneyi için alınması gereken miktarlar çizelge halinde belirtilmiştir. Bu miktarları elde etmek için çeyrekleme yöntemi uygulanmıştır. Çeyrekleme yöntemini uygulamak için numune temiz ve sert bir yüzeye yayılmıştır. İyice karıştırılan yığın, taban çapı yüksekliğinin yaklaşık dört katı olan kesik koni şeklinde biçimlendirilmiştir. Daire şeklindeki alan, malanın kenarı ile dört eşit kısma bölünmüştür. Bunlardan üçü deney numunesi oluşturulmasında kullanılmış, diğeri ise gerektiğinde yararlanılmak üzere saklanmıştır. Deney numunesi elde edilmesinde kullanılacak kısımlardan birisi yeniden yere serilerek, mala ile dörde bölünmüştür. Bölme işleminden sonra iki grup deney numunesi oluşturulmak üzere uygun yerlere alınmış ve tekrar çeyrekleme işlemi yapılmıştır. Bu işlem, en son kümeler yaklaşık 500 gram kalıncaya kadar sürdürülmüştür. Her bir deney için, çeyrekleme işlemi yapılarak elde edilen numuneler üzerinde üçer defa agrega deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır.

3.4.11.b. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)

Beton agregaları ile ilgili özelliklerin tarif edildiği TS 706 EN 12620’ye göre agregaların tane büyüklüğü dağılımı TS 3530 EN 933-1’e uygun olarak belirlenmelidir. Bu standarda göre yapılan deneyde yıkanmış ve kurutulmuş malzeme elek takımına dökülmüştür. Elek takımı, yukarıdan aşağıya elek göz açıklıkları düzenli bir biçimde azalacak şekilde birbirine geçirilmiş ve düzenlenmiş elekler, tava ve kapaktan ibarettir. Tecrübeler sonucunda, tüm ince tanelerin yıkama ile uzaklaştırılmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle 63 µm göz açıklıklı deney eleği de elek takımına ilave edilmelidir. Tava ve kapak kullanılarak malzeme kaybına meydan vermeden elek takımı makine ile sarsılmıştır. Daha sonra sırayla büyük göz açıklıklı elekten başlamak üzere altına tava ve üzerine kapak konularak her bir elek takımından ayrılarak, elle tek tek eleme işlemine devam edilmiştir. Her eleği geçen malzeme elek setinde bulunan bir sonraki elek üzerine

konularak işleme devam edilmiştir. Standarda göre eleme işlemi esnasında, bir dakika süre içerisinde elek üstü malzemede kütlece %1'den daha fazla değişiklik olmuyorsa eleme işleminin tamamlandığı kabul edilebilir.

3.4.11.c. Çok ince malzemenin muhtevası

Çok ince malzeme miktarı TS 706 EN 12620 ve TS 3530 EN 933-1'e uygun olarak yapılmıştır. TS 706 EN 12620'de çok ince malzeme muhtevası 0,063 mm göz açıklıklı elekten geçen agrega tane sınıfı olarak tanımlanmaktadır. EN 933-1'e uygun olarak tayin edilmiş olan çok ince malzemenin muhtevası, Çizelge 3.5'te belirtilen ilgili kategoriye uygun olarak beyan edilmelidir. Her bir agrega tane sınıfı için deney numunelerine hesaplanan ince malzeme yüzdeleri ve malzeme kategorileri Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. TS706 EN12620'de belirtilen çok ince malzeme muhtevasının en yüksek değerlerine göre belirlenmiş sınıflar

Agrega	0,063 mm göz açıklıklı elekten geçen kütlece yüzde	Sınıf f
İnce agregalar	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	f_{beyan}
	Serbest	f_{NR}
	≤ 3	f_3
İnce agregalar	$\leq 1,5$	$f_{1,5}$
	≤ 4	f_4
	> 4	f_{beyan}
	Serbest	f_{NR}

3.4.11.d. Çok ince malzemenin kalitesi

Çok ince malzemenin kalitesi TS 706 EN 12620 EK-D'ye göre belirlenmiştir. Bu standarda göre çok ince malzeme, aşağıda belirtilen dört durumdan birinin söz konusu olması halinde zararsız olarak kabul edilmelidir:

- a) İnce agreganın toplam çok ince malzeme muhtevasının, %3'ten veya agreganın kullanıldığı yerde geçerli olan mevzuata göre belirtilmiş olan başka bir değerden daha az olması.
- b) EN 933-8'e uygun olarak deneye tabi tutulduğunda, kum eş değerinin (SE), belirtilen alt sınırı aşması.
- c) EN 933-9'a uygun olarak deneye tabi tutulduğunda, metilen mavisi deneyinin (MB), belirtilen alt sınır değerinden daha küçük bir değer vermesi.
- d) Bilinen bir performans yeterliliğine sahip agreganın kine eşit performansın elde edilmesi veya herhangi bir problemle karşılaşılmadan kullanım performans yeterliliğinin kanıtlanması.

3.4.11.e. Tane yoğunluğu ve su emme

Her bir agrega tane sınıfı için TS EN1097-6'ya uygun olarak tane yoğunluğu ve su emme deneyleri yapılmış olup deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir. Bu standart gereğince ince ve iri agregaların tane yoğunlukları ve su emmeleri farklı yöntemlerle belirlenir. Bu yöntemler aşağıda kısaca özetlenmiştir:

a) İnce agrega için tane yoğunluğu ve su emme miktarlarının belirlenmesi

Hazırlanan deney numunesi kısmı, piknometrede bulunan, (22±3)°C sıcaklıktaki suya

daldırılır ve hapsedilmiş hava, piknometre eğik konumda hafifçe yuvarlanmak ve sallanmak suretiyle uzaklaştırılır. Piknometre, su banyosu içerisinde düşey hale getirilir ve deney numunesi kısmı, $(22\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 'de, $(24\pm 0,5)$ saat süreyle tutulur. Islatma süresinin sonunda, piknometre su banyosundan çıkarılır ve varsa geriye kalan hapsedilmiş hava, piknometre hafifçe yuvarlanmak ve sallanmak suretiyle uzaklaştırılır. Piknometre, su ilâve edilerek taşacak şekilde doldurulur ve kap içerisinde hiç bir hava hapsedilmeden tepe kısmına bir kapak yerleştirilir. Daha sonra, piknometrenin dış kısmı kurutulur ve tartılır (M_2). Deney numunesi kısmını kaplayan suyun büyük bir kısmı süzülür ve piknometre bir tepsiye boşaltılır. Piknometre, tekrar su ile doldurulur ve kapak daha önce belirtildiği şekilde yerleştirilir. Daha sonra, piknometrenin dış kısmı kurutulur ve tartılır (M_3). Islak deney numunesi kısmı, tepsinin tabanına üniform bir tabaka hâlinde yayılır. Yüzey rutubetini buharlaştırmak amacıyla, agrega taneleri, hafif bir sıcak hava akımına maruz bırakılır. Agregataneleri, üniform bir kurumanın elde edilmesi amacıyla, hiçbir yüzey nemi görülmeinceye ve taneler artık birbirlerine yapışmayıncaya kadar, sık aralıklarla karıştırılır. Karıştırma devam ederken numune, oda sıcaklığına kadar soğutulur. Yüzey kuruluşunun sağlanıp sağlanmadığının tespit edilmesi için, metal koni kalıbı, en büyük çapa sahip kısım, tepsinin tabanına gelecek şekilde yerleştirilir. Koni kalıbı, bir miktar kuru deney numunesi kısmıyla gevşek olarak doldurulur ve kalıbın üst kısmındaki delikten geçirilen bir sıkıştırıcı kullanmak suretiyle agrega yüzeyi 25 defa hafifçe vurularak sıkıştırılır. Sıkıştırma işleminden sonra, kalıp tekrar doldurulmaz. Kalıp, üzerinde hiçbir agregatanesi olmayacak şekilde, dikkatlice kaldırılır. Elde edilen agregat konisi çökmezse, kalıp kaldırıldığında çökme olayı meydana gelene kadar kurutmaya devam edilir ve koni deneyi tekrarlanır. Doygun ve yüzeyi kurutulmuş deney numunesi kısmı tartılır (M_1). Agregataneleri, hava dolaşımli etüvde, $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 'de sabit kütleyle (M_4) kadar kurutulur. Bütün kütle değerleri, deney numunesi kısmının kütlelerinin (M_4) %0,1'i veya daha iyi olan bir doğrulukla kaydedilir.

Tane yoğunlukları (ρ_a , ρ_{rd} ve ρ_{ssd}), aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır:

$$\text{Görünür tane yoğunluğu: } \rho_a = M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$$

Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{rd} = M_4 / M_1 - (M_2 - M_3)$

Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{ssd} = M_1 / M_1 - (M_2 - M_3)$

Su emme oranı: $WA_{24} = 100 * (M_1 - M_4) / M_4$

Burada; M_1 : Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g),

M_2 : Doygun agrega numunesini ihtiva eden piknometrenin kütlesi (g),

M_3 : Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi (g),

M_4 : Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi (g)'dir.

b) İri agrega için tane yoğunluğu ve su emme miktarlarının belirlenmesi

Hazırlanan deney numunesi kısmı, tel sepete yerleştirilir ve tel sepet, suyun seviyesi, sepetin üst kısmından en az 50 mm yukarıda olacak şekilde $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ sıcaklıkta su ihtiva eden tanka daldırılır. Daldırmadan hemen sonra sepet, tankın tabanından yaklaşık 25 mm yukarıya kaldırılarak ve saniyede bir kez olmak üzere 25 defa bu yükseklikten düşürülerek, hapsolmuş hava deney numunesi kısmından uzaklaştırılır. Sepet ve agrega, $(24 \pm 0,5)$ saat süreyle $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suya tamamen daldırılmış halde bekletilir. Sepet ve deney numunesi kısmı sallanır ve $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda tartılır (M_2). Sepet ve agrega, sudan çıkarılır ve suyun uzaklaşması için birkaç dakika beklenir. Agrega, sepetten, kuru bezlerden birinin üzerine dikkatlice boşaltılır. Boş sepet, tekrar suya daldırılır, 25 defa sallanır ve suda tartılır (M_3). Agrega tanelerinin yüzeyi dikkatlice kurutulur ve bez rutubet ememeyecek hâle geldiğinde, taneler, ikinci bir kuru, yumuşak emici bez üzerine aktarılır. Agrega taneleri, kalınlık bir agrega tanesinden daha fazla olmayacak şekilde bu ikinci bez üzerine yayılır ve görülebilir bütün su filmleri uzaklaştırılana kadar direk güneş ışığından veya herhangi bir ısı kaynağından korunarak atmosfere maruz bırakılır. Ancak bu durumda agrega taneleri, hala rutubetli bir görünüm arz eder. Agrega taneleri tartılır (M_1).

Agrega taneleri, bir tepsiye aktarılır ve etüvde, $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, sabit kütleyle (M_4) kadar kurutulur. Bütün tartımlar, deney numunesi kısmının kütesinin (M_4) %0,1'i veya daha iyi olan bir doğrulukla yapılır ve kaydedilir. Tane yoğunlukları (ρ_a , ρ_{rd} ve ρ_{ssd}), aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır:

Görünür tane yoğunluğu: $\rho_a = M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$

Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{rd} = M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{ssd} = M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3))$ Su emme oranı: $WA_{24} = 100 * (M_1 - M_4) / M_4$

Burada; M_1 : Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütesi (g),

M_2 : Doygun agrega numunesini ihtiva eden sepetin sudaki görünür kütesi (g), M_3 : Boş sepetin sudaki görünür kütesi (g),

M_4 : Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütesi (g)'dir.

3.4.12. Geopolimer beton deneysel çalışmasının parametrelerinin oluşturulması

Deney programı oluşturulurken bu çalışmanın içeriğine en uygun parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu parametreler beton sınıfı, yüksek sıcaklıklar ve soğutma şekli olarak kararlaştırılmıştır. Çalışmada C25 beton sınıfı kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmanın asıl amacı olan yüksek sıcaklıkların etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için beton numunelerinin 800°C 'ye kadar 100°C aralıklarla artan sıcaklıklarda denenmesi, böylelikle 8 sıcaklık değerinin incelenmesi tasarlanmıştır. Numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalma süreleri sabit tutulmuş ve bu süre 3 saat olarak belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık ve yangın çalışmalarında önemli bir parametre de soğutma şekilleridir. Bahsedilen gerekçeler sonucunda bu çalışmadaki parametreler aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- Beton sınıfı: C25
- Sıcaklıklar: 65°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C.
- Soğutma şekli: Havada.
- Sıcaklıkta bekletilme süresi: Sabit, 3 saat

Etüvde kurutulmuş en yüksek dayanımlı geopolimer çimentodan üretilen beton bu çalışmada kullanılmıştır. Sonra geopolimer betonların kontrol geopolimer betona göre ağırlık ve basınç mukavemetlerindeki değişimler belirlenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve sonra UPV deneyleri ASTM C 597-83'e göre yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinin incelendiği deneyler için toplam 27 silindirik beton numune üretilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmada kullanılan pomzanın özellikleri, agrega üzerinde yapılan yeterlilik deneylerinin sonuçları ile üretilen geopolimer çimento ve beton deneylerinin sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ve teknik literatür bilgileri yardımıyla yorumlanmıştır.

4.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Öğütülmüş Pomza

Öğütülmüş pomza agregasının fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Öğütülmüş pomza agregasının fiziksel analiz sonuçları

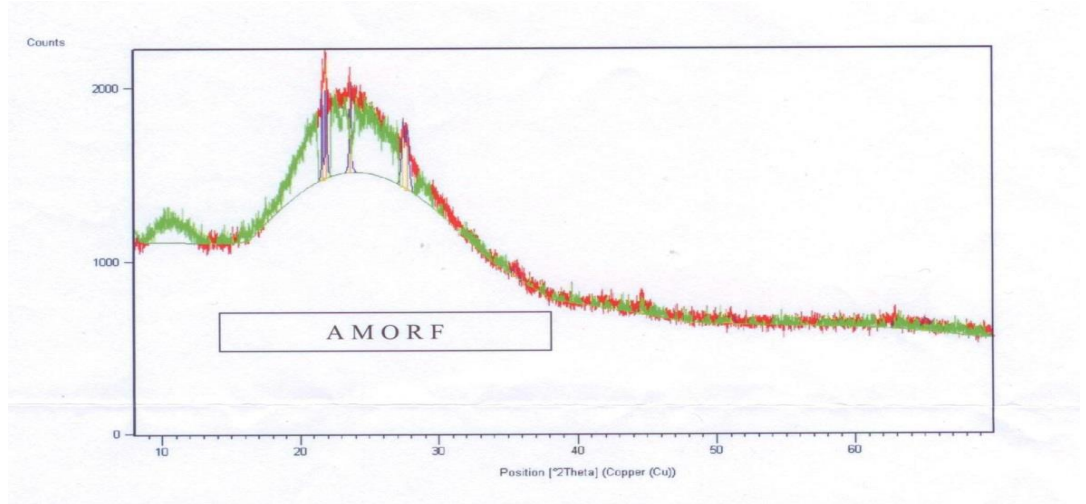
Özellik	Deney Sonuçları
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,38
Özgül yüzey (cm ² /g) Blaine Aletiyle	2980
Elek kalıntısı (90 µm elekte kalan)(%)	6,2
Elek kalıntısı (200 µm elekte kalan)(%)	0,0
Kullanılan metot: TS 25 ve TS EN 196-6	

Çizelge 4.2. Öğütülmüş pomza agregasının kimyasal analiz sonuçları

Deney Adı	Deney Standardı	Ölçülen Değer	Birim
Alüminyum oksit tayini	TS EN 196-2	14,06	%
Demir oksit tayini	TS EN 196-2	1,91	%
Silisyum dioksit	TS EN 196-2	67,08	%
Kalsiyum oksit tayini	TS EN 196-2	0,87	%
Magnezyum oksit tayini	TS EN 196-2	0,25	%
Kızdırma kaybı tayini	TS EN 196-2	3,94	%
Çözünmeyen kalıntı tayini	TS EN 196-2	93,46	%
Sodyum oksit ve potasyum oksit toplam tayini	TS EN 196-2	0,11	%
PH tayini	TS 6166	8,06	
Alkali reaktivitenin kimyasal yolla tayini	TS 2517	Rc:400, Sc:933,78	mmol/gr

4.2. Öğütülmüş Pomzanın XRD Değerlendirmesi

Hasankale pomzasından elde edilen malzemenin, genellikle amorf bileşenlerin olmasından dolayı net bir XRD spektrumu elde edilmemiştir. Şekil 4.1’de spektrumda amorf kısmı gösterilmiştir. Tanımlanabilen bileşenler Çizelge 4.3’de belirtilmiştir.



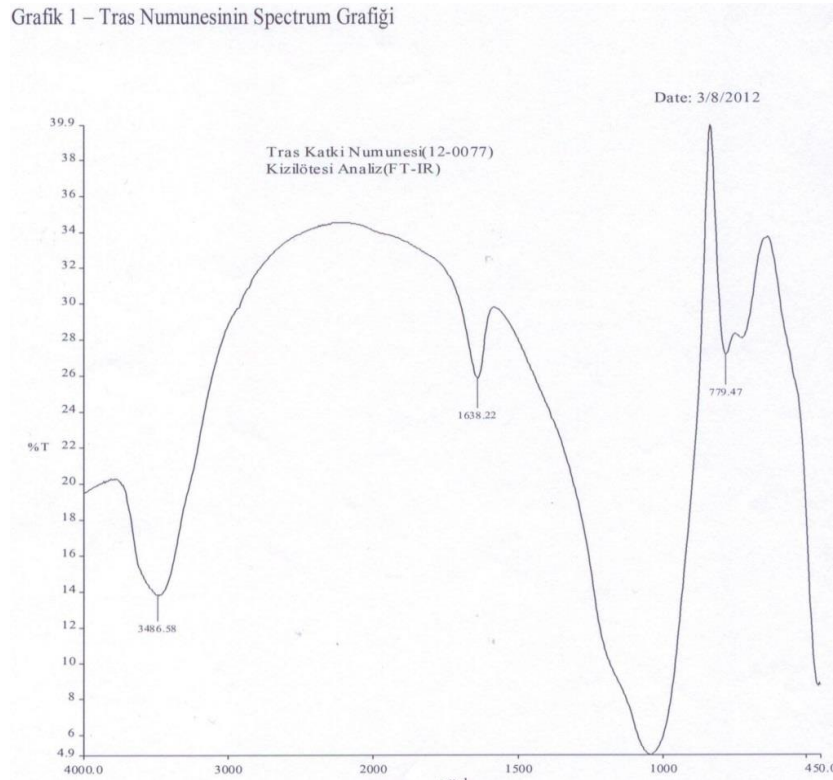
Şekil 4.1. Hasankale pomzasının X-ışını difraksiyon spektroskopisi sonucu

Çizelge 4.3. Öğütülmüş pomza agregasının XRD sonuçları

Bileşen Adı	Kimyasal Formülü
Kristobalit, Yüksek	SiO ₂
Silisyum dioksit	SiO ₂
Labrodorit	(Na _{0,4} Ca _{0,6})Al _{1,6} Si _{2,408}
Kristobalit, Düşük	SiO ₂
Albit, Yüksek, Sodyum-Tekto silikat	Na(AlSi ₃ O ₈)

4.3. Öğütülmüş Pomzanın FTIR Değerlendirmesi

Hasankale pomzasından elde edilen malzemenin FTIR deneyine maruz bırakılıp sonucu Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

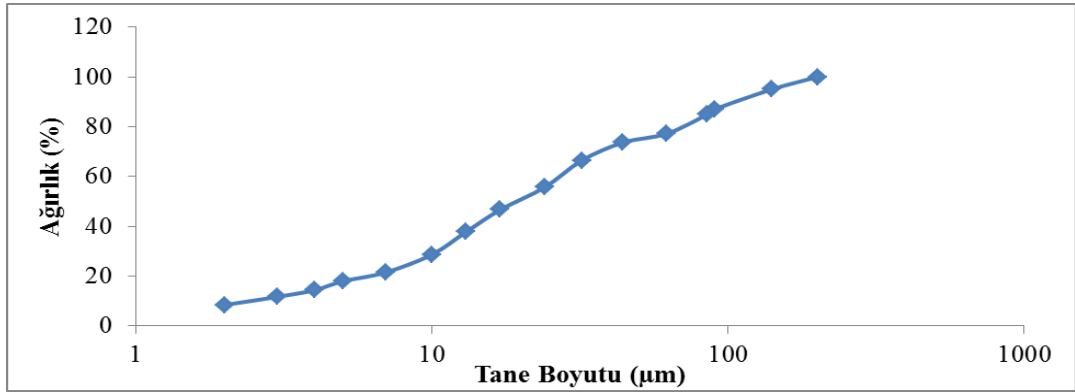


Şekil 4.2. Pomza numunesinin FTIR spektrum grafiği

FTIR analizinin sonuçlarına göre pomzada esas bağlar Si-O bağları ($1080-1090\text{ cm}^{-1}$), Al-O bağları (yaklaşık $779, 47\text{ cm}^{-1}$ civarındaki titreşimlerden dolayı), Si-OH bağları (3600 cm^{-1} olan titreşimlere) ve emilmiş su bağlarından ($1620-1660\text{ cm}^{-1}$ civarında olan titreşimlerden dolayı) oluşmuştur (Pimiraksa *et al* 2011; Skvara *et al* 2006).

4.4. Öğütülmüş Pomzanın Granülometri Eğrisi

Hidrometre cihazı 0,075 mm'den küçük tanelerin oranlarını bulmakta ve tane dağılımı hesaplamasında kullanılmaktadır. Geopolimerlerde tanelerin hangi aralıklarda olduğunu öğrenmek için bu deney yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.3'te açıklanmıştır.



Şekil 4.3. Deneylede kullanılan öğütülmüş pomzanın granülometri eğrisi

Bu eğrinin açıklanmasına Çizelge 4.4'yardımcı olabilir. Görüldüğü gibi tanelerin boyutları 200 mikronun altındadır ve tanelerin %87'si 90 mikronun altındadır.

Çizelge 4.4. Deneylede kullanılan öğütülmüş pomzanın granülometri değerleri

Tane büyüklüğü (µm)	Geçen ağırlık yüzdesi (%)	Tane büyüklüğü (µm)	Geçen ağırlık yüzdesi (%)
200	100	17	46,7
140	95,00	13	37,72
90	87,03	10	28,73
85	85,00	7	21,55
62	77,23	5	17,96
44	73,64	4	14,36
32	66,46	3	11,67
24	55,68	2	8,44

4.5. Pomza Esaslı Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri

Bu bölümde geopolimer üzerindeki çalışmalarımız ve sonuçları alt bölümler olarak incelenmiştir. Üretilen geopolimerlerin görünümü genelde doğal taşlara benzemektedir. Bu çalışmada üretilen geopolimerlerin görünümü Şekil 4.4'teki gibidir.



Şekil 4.4. Pomza esaslı geopolimerlerin genel görünümü

4.5.1. Sodyum hidroksit ile aktive edilen geopolimerlerde silika modülünün, Na_2O miktarının ve kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi ve sonuçları

Yapılan bu çalışmada kür sıcaklığı sabit ve 65°C 'dir. Kür süresi 48 saattir ve numuneler hazırlandıktan sonra hiç beklemeden hemen fırına bırakılmışlardır. Bu deneylerde kullanılan kalıpların boyutları $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$ 'tür ve numuneler 48 saat kür edildikten sonra propilen filmlerden sıyrılıp kalıpları sökülmüş ve daha sonra 25°C sıcaklıkta bekletilmişlerdir. Bu numunelerin 28 günlük UPV değerleri ve basınç mukavemetleri ASTM C 597-83 , ASTM C109-90 standartlarına göre incelenmiştir. Çizelge 4.5'te kullanılan karışım hesapları gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Hasankale pomzasından üretilen geopolimerlerin karışım hesapları

Karışım	Pomza (gr)	NaOH Çözeltisi (gr)	Na ₂ SiO ₃ Çözeltisi (gr)	Su (gr)	Süper akışkanlaştırıcı (gr)	SM ^{*2}	Na ₂ O (%)	Na ₂ O molaritesi	S/b	Taze geopolimerin yoğunluğu (gr/cm ³)	
										Teorik	Deneysel
1	1214,08	142,678	109,59	258,38	48,56	0,52	4	1,5584	0,36	1,7732	1,77
2	1152,81	237,08	182,11	164,19	46,11	0,52	7	2,4597	0,40	1,7823	1,779
3	1096,27	322,08	247,40	80,02	43,85	0,52	10	3,1941	0,44	1,8166	1,80
4	1205,65	234,74	220,42	137,80	48,22	0,6	7	2,5647	0,36	1,8468	1,837
5	1144,11	317,93	298,52	24,25	45,76	0,6	10	3,4669	0,40	1,8305	1,82
6	1302,08	107,20	136,20	197,29	52,08	0,6	4	1,5700	0,44	1,7945	1,79
7*	1186,83	260,94	352,63	14,24	47,47	0,68	10	3,6000	0,36	1,8621	1,857
8	1173,49	122,93	138,91	270,46	46,94	0,68	4	1,4500	0,40	1,7527	1,74
9	1127,00	206,61	233,47	161,53	45,07	0,68	7	2,3500	0,44	1,7736	1,761

Bu karışım hesapları 1000 cm³ geopolimer çimento hamuru içindir.

** Bu karışımında kullanılan NaOH çözeltisinin yoğunluğu farklıdır ve 386,3 gr NaOH in 1 kg çözeltide mevcuttur.*

**²SM=SiO₂/Na₂O*

Çizelge 4.5'te verilen karışım hesaplarından hazırlanan geopolimerlerin priz süreleri, UPV değerleri ve 28 günlük basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.6, Şekil 4.5 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Geopolimerlerin priz süreleri, UPV değerleri, sarsma tablası sonuçları ve 28 günlük basınç değerleri

Karışım	28 günlük basınç mukavemetleri (MPa)	Priz başlanış süresi (dakika)	Priz sona erme zamanı (dakika)	Sarsma tablası sonuçları (mm)	UPV hızı (m/s)
1	8,68	10	32	112	1376
2	14,32	10.5	32	126	2600
3	24,08	11	28,5	125	3100
4	18,78	9	31	117	3081
5	29,16	9.6	28	124	3450
6	10,6	12	36	126	1750
7	40,28	8.5	25	118	4300
8	9,55	11.6	33	116	1670
9	17,98	10.8	34	125	3041

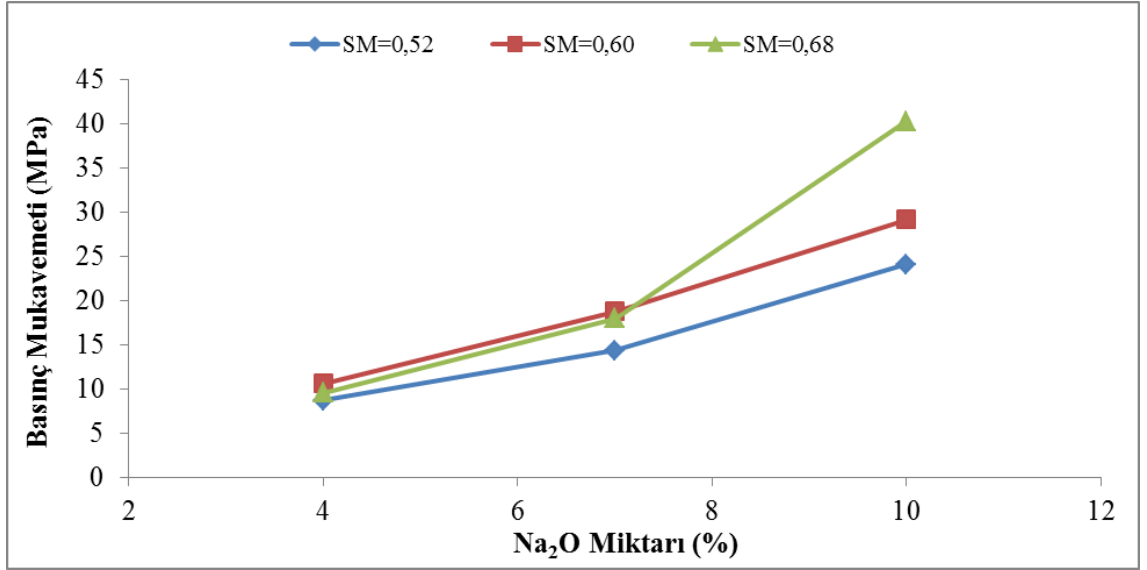
Na₂O miktarının, basınç mukavemetine olan etkisi Çizelge 4.6 ve Şekil 4.4'te verilmiştir. Verilen grafikte sabit silika ve değişen silika modülünde Na₂O miktarının basınç mukavemetine olan etkisi incelenmiştir. Grafiklere göre sabit silika modülü miktarlarında Na₂O miktarının artması ile basınç mukavemeti de artış göstermiştir. Sabit Na₂O miktarlarında silika modülün artması ile basınç mukavemeti de artmıştır. Sabit silika modülünde SM=0,52, %4, %7 ve %10 Na₂O miktarları için, basınç mukavemetleri sırası ile 8,68, 14,32, 24,08 MPa olmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda aktivatör miktarının artması basınç mukavemetinin artmasına neden olmuştur. Anuar *et al.* (2011) çalışmalarında alkali sıvı olarak, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) karıştırılarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, geopolimer beton numuneler iki farklı molarlarda (8 M'lık ve 14 M'lık sodyum hidroksit - NaOH) kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç mukavemetleri test edilmiştir. 14 M NaOH kullanıldığında basınç mukavemetinin

maksimum olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, atık kâğıt külü ve molaritesi artırılan geopolimer betonun mukavemetinin arttığı gözlenmiştir.

Granizo *et al.* (2007) yaptıkları çalışmada iki farklı metakaolini, hidrotermal koşulları altında, cam suyu ve NaOH'ten oluşan çözelti ile aktive etmişlerdir. Metakaolinin alkali aktivasyonun 100°C ısı altında güçlü ve dayanıklı çimento esaslı malzemeler verdiği belirtilmiştir. Metakaolinin alkali aktivasyonu ile elde edilen reaksiyon ürününün bileşimi, yapısı ve özellikleri, bileşendeki kaolin miktarı, özgül yüzeyi, kullanılan alkali aktivatör tipi, konsantrasyon ve bağıl miktarı vb. faktörler tarafından etkilenmektedir.

Bondar *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada, alkali aktivatör olarak cam suyu çözeltisi kullanılmıştır. En iyi aktivatörler sodyum silikat ve potasyum hidroksitin kullanımıyla oluşturulan çözelti olmuştur. KOH çözeltisinin 5 ve 7,5 M arasında maksimum basınç mukavemeti gösterdiği tespit edilmiştir.

Aynı şekilde SM=0,60 olduğunda Na₂O miktarı %4, %7 ve 10% değerlerinde kullanıldığında basınç mukavemeti sırasıyla 10,6-18,78 ve 29,16 MPa'dır. Silika modülü SM=0,68 ve Na₂O miktarı %4, %7 ve %10 olduğunda basınç mukavemetinin 9,55 - 17,98 - 40,28 MPa olduğu tespit edilmiştir. Na₂O miktarı %4 ve silika modülü 0,52-0,60 ve 0,68 olduğunda basınç mukavemeti 8,68-10,6-9,55 MPa olmaktadır. Na₂O miktarı %7 ve silika modülü 0,52-0,60-0,68 olduğunda ise basınç mukavemeti de sırası ile 14,32-18,78-17,98 MPa olmaktadır. Aynı şekilde Na₂O miktarı %10 ve silika modülün 0,52-0,60-0,68 olduğunda basınç mukavemeti 24,08-29,16-40,28 MPa olmaktadır. Na₂O miktarının ve silika modülünün her ikisinde de artış geopolimerin mukavemetinde artışa neden olmuştur. Allahverdi (2008) yaptığı çalışmada hem silika modülünün ve hem Na₂O miktarının artmasıyla basınç mukavemetinin arttığını rapor etmektedir. Aynı şekilde Toprak (2011)'de uçucu kül üzerinde yaptığı çalışmasında yaklaşık buna benzer bir artış rapor etmiştir. Bunun muhtemel nedenleri Na₂O miktarının artışıyla kimyasal reaksiyonların sıcaklığının artması ve dolgu oranının artması olabilir.

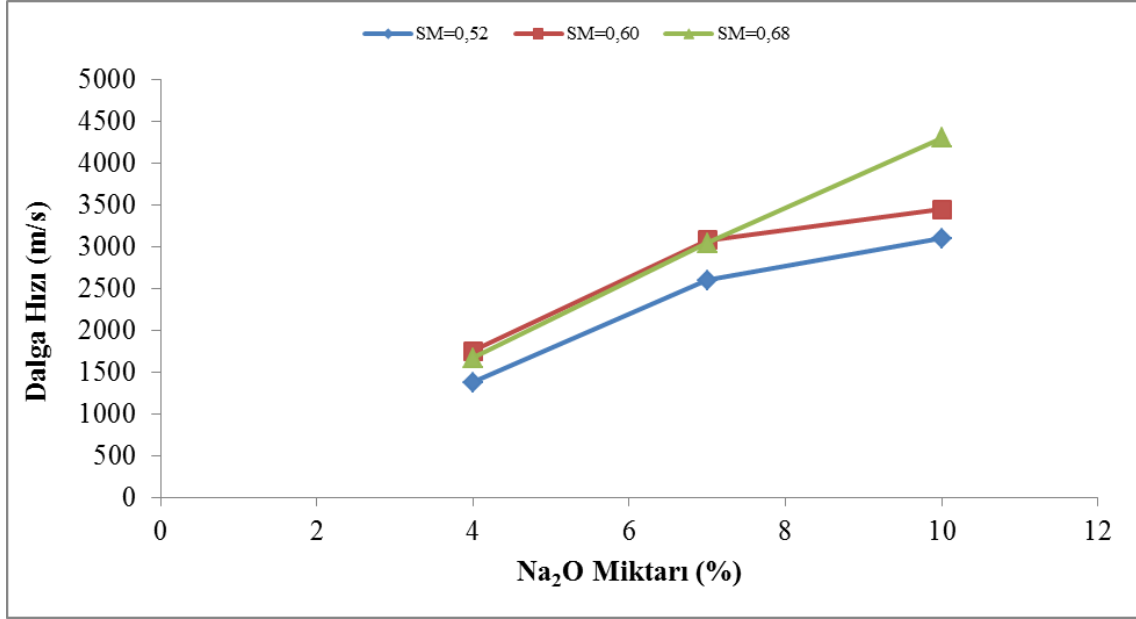


Şekil 4.5. Na₂O miktarının 28 günlük basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Çizelge 4.6'ye göre Na₂O miktarlarının değişimi ile ultra ses geçiş hızı (UPV) arasındaki ilişki Şekil 4.6'da verilmiştir. Sabit silika modülü değerlerinde Na₂O miktarının artması ile UPV değerleri de artmıştır ve bu yoğunluğun artmasından kaynaklanabilmektedir. Sabit Na₂O miktarında silika modülünün artması ile UPV hızı da artmıştır. Bu durumun muhtemel nedeni ise çözeltilerde alkalinitenin daha yüksek olması ve amorf yapıda olan bağların daha kolay çözülmesi yani amorf yapıda olan Al ve Si'lerin çözünmesidir. Ayrıca kimyasal reaksiyonlardaki sıcaklık artışı muhtemel sebeplerdendir. Çözülen bağlar poly (sialate-siloxo) bağları oluşturmaya başlar ve daha mukavemetli ve daha dolgulu bir bağ meydana gelir (Davidovits 2011; Skvara vd 2006; Lee *et al.* 2003; Bondar *et al.* 2011). Literatüre göre mukavemet ve birim ağırlıktaki artış UPV değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Demirboğa (2003) uçucu kül ve yüksek fırın cürufu üzerinde yapmış olduğu çalışmada mukavemetin artmasıyla UPV değerlerinin arttığını ifade etmiştir. Shariq (2013) yüksek fırın cürufu üzerinde yaptığı çalışmada aynı şekilde mukavemetin artmasıyla UPV değerlerinin arttığını ifade etmiştir.

Sabit silika SM=0,52 modülünde Na₂O miktarı %4, %7 ve %10 olduğunda UPV değerleri sıra ile 1376, 2600 ve 3100 m/s hızına ulaşmıştır. Eğer SM=0,60 olursa Na₂O

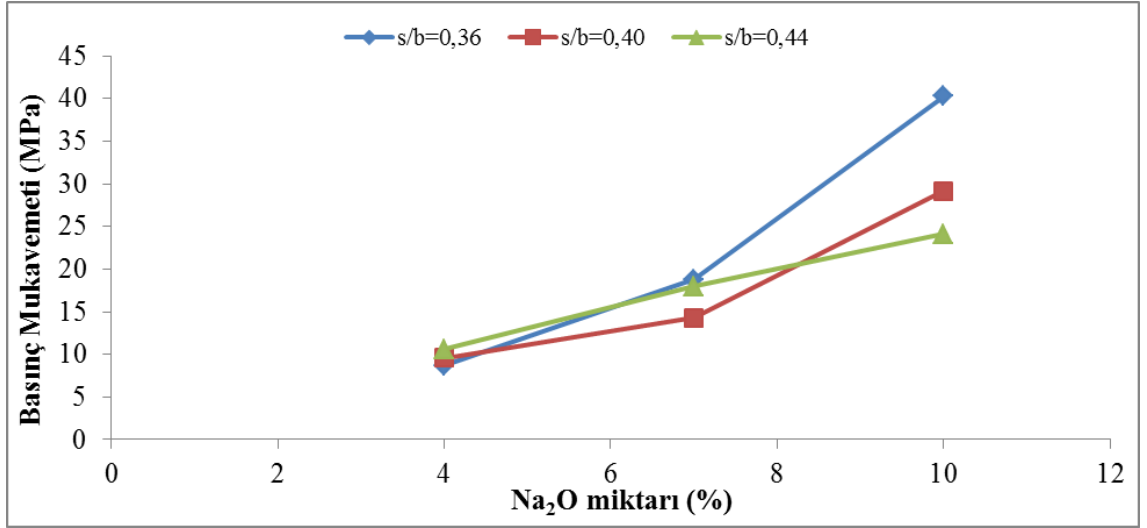
miktarı %4, %7 ve %10'a değişmesi ile UPV değerleri 1750, 3081 ve 2916 m/s olarak değişmiştir. Buna benzer durumda SM=0,68 değeri için Na₂O miktarı %4, %7 ve %10 olduğu zaman UPV değerleri sırasıyla 1670, 3041 ve 4300 m/s olarak değişmektedir.



Şekil 4.6. Na₂O miktarının 28 günlük UPV değerleri üzerindeki etkisi

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'dan yararlanarak geopolimerlerde sabit ve değişen su/bağlayıcı miktarlarında Na₂O miktarının basınç mukavemetine olan etkisini incelemek için Şekil 4.7 çizilmiştir.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi eğer su/bağlayıcı miktarı sabit olursa (yani 0,36-0,40 ve 0,44) Na₂O miktarının artması ile (%4, %7 ve %10) bütün basınç mukavemeti artış göstermiştir.

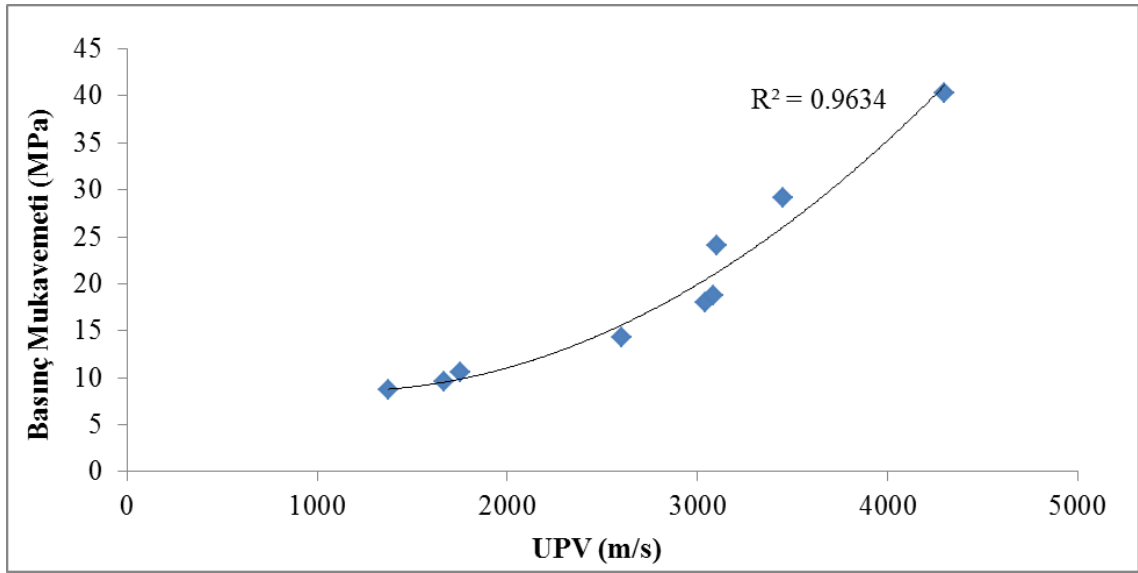


Şekil 4.7. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na₂O miktarının basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Su/bağlayıcı oranı sabit iken (0,36), %4, %7 ve %10 oranlarında Na₂O miktarları için basınç mukavemeti sırası ile 8,68- 18,78 ve 40,28 MPa olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,40 olduğu zaman %4, %7 ve %10 oranlarında Na₂O miktarları için basınç mukavemeti sırası ile 9,55- 14,32 ve 29,16 MPa olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,44 olduğunda %4, %7 ve %10 oranlarında Na₂O miktarları için basınç mukavemeti sırası ile 10,6- 17,98 ve 24,08 MPa olmuştur. Na₂O oranı %10 olduğu zaman su/bağlayıcı oranının artması ile basınç mukavemeti hızlı şekilde azalmaktadır. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi ve Na₂O= %4 oranı iken su/bağlayıcı oranı 0,36-0,40 ve 0,44 olduğunda basınç mukavemeti 8,68-9,55 ve 10,68 MPa olmuştur. Bunun nedeni çözünen iyonların miktarının çok olup Al ve Si iyonlarının daha kolay çözünebilmesidir (Bondar *et al.* 2011c). Na₂O miktarı %7 ise su/bağlayıcı oranı 0,36- 0,40 ve 0,44 olduğunda basınç mukavemetinde ki değişim sırası ile 18,78- 14,32 ve 17,98 MPa olmuştur. Na₂O miktarının %10 olması durumunda su/bağlayıcı oranı 0,36- 0,40 ve 0,44 olduğu zaman basınç mukavemetleri 40,28-29,16 ve 24,08 MPa olarak gözlenmiştir.

4.5.2. Geopolimer hamurlarda basınç mukavemeti ile UPV değerleri arasındaki ilişkinin incelenmesi

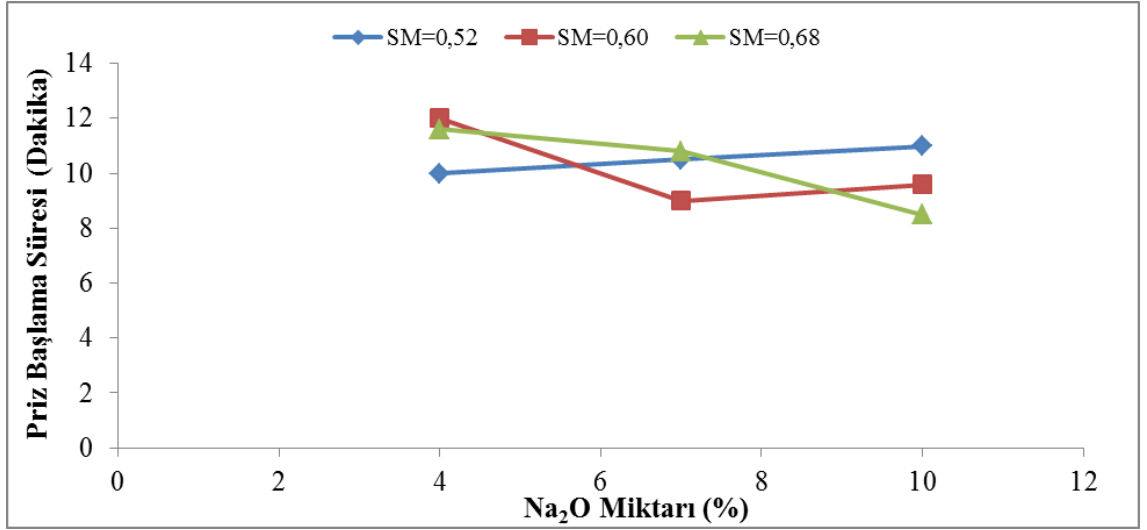
Şekil 4.8’de 9 farklı karışımdan üretilen geopolimerlerin UPV ve basınç mukavemeti değerlerinin arasında R^2 değeri 0,96 olan doğrusal olmayan ikinci dereceden olan üssel bir ilişki görünmektedir. Bu UPV değerlerinden geopolimerlerin basınç mukavemetlerinin tahmin edilebileceğini göstermektedir.



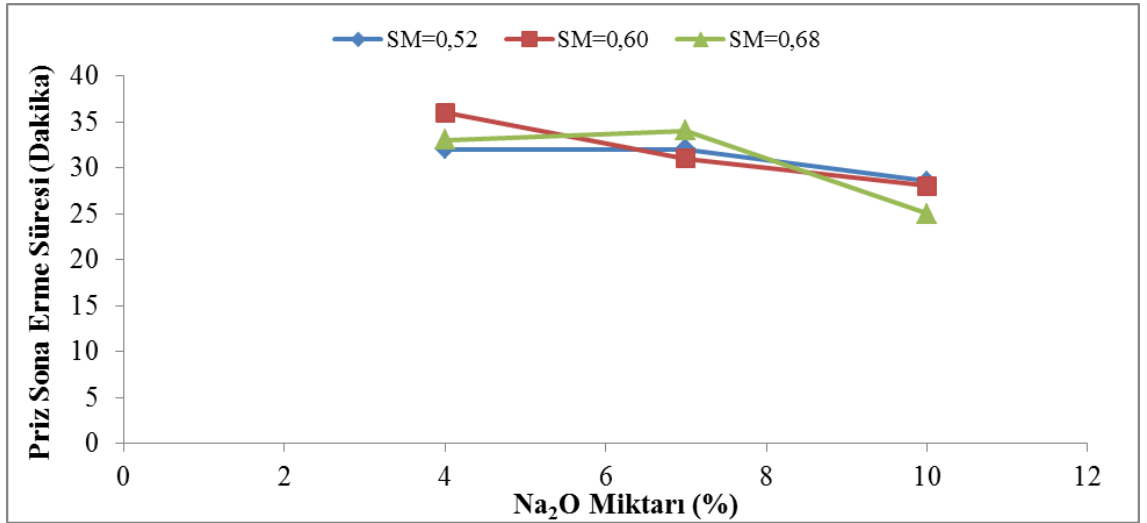
Şekil 4.8. Farklı modellerde UPV ve basınç mukavemetleri arasında olan ilişki

4.5.3. Sabit silika oranlarında Na_2O miktarının priz süresine etkisi

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’den aktivasyonun ana malzemesi olan Na_2O miktarının priz başlangıç ve bitiş sürelerine olan etkisini incelemek için sabit ve değişen silika modülü (SM) oranlarında Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 çizilmiştir.



Şekil 4.9. Sabit silika oranlarda Na₂O miktarının priz başlama süresine etkisi

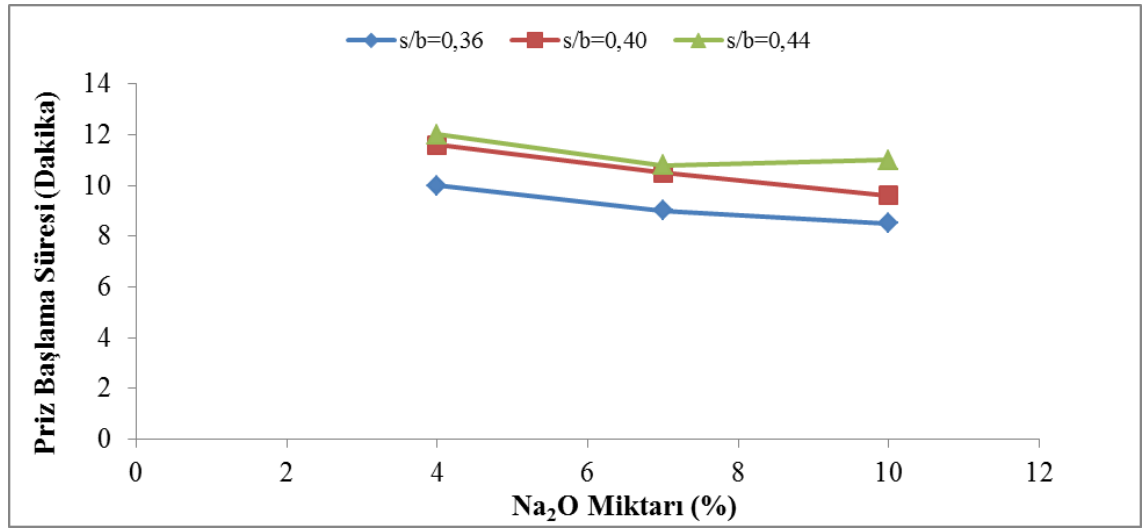


Şekil 4.10. Sabit silika oranlarda Na₂O miktarının priz sona erme süresine etkisi

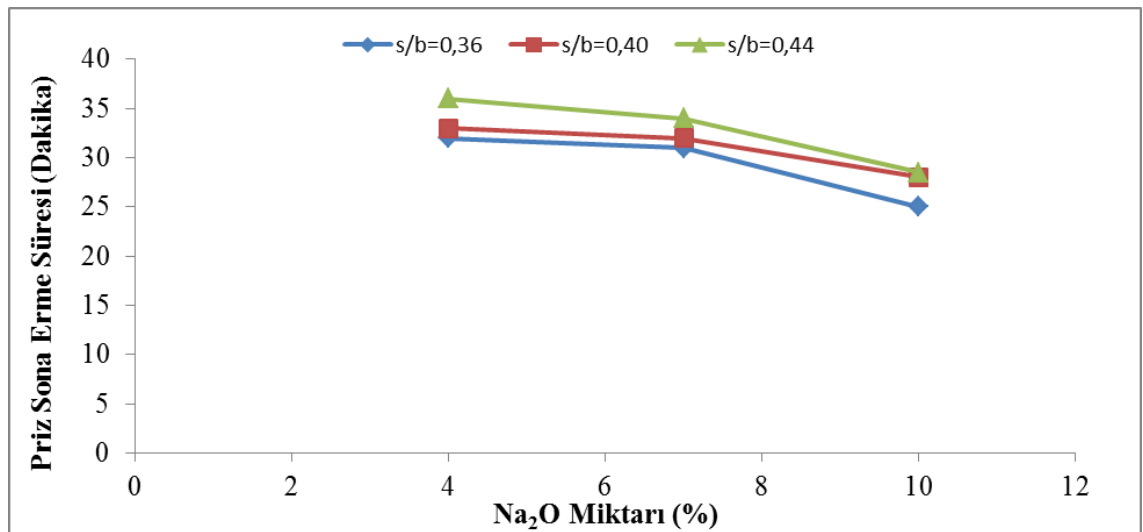
Gözlenen sonuçlara sabit göre silika modülü oranlarında Na₂O miktarı ile priz başlangıç ve bitiş süreleri arasında mantıksal bir ilişki gözükmemektedir. Matematiksel bir ifade ile bu ilişkiyi göstermemiz imkânsızdır. Bu yüzden aşağıdaki alt bölümde sabit silika modülünde Na₂O etkisini incelemek yerine su/bağlayıcı oranına göre Na₂O miktarının etkisi incelenmiştir.

4.5.4. Sabit ve değişen su/bağlayıcı oranlarında Na₂O miktarının priz süresine olan etkisi

Şekil 4.11 ve 4.12’de sabit ve değişen su/bağlayıcı oranlarında Na₂O miktarının priz başlangıç ve bitiş süresine olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.11. Sabit Su/bağlayıcı oranlarında Na₂O miktarının priz başlama süresine etkisi



Şekil 4.12. Sabit Su/bağlayıcı oranlarında Na₂O miktarının prizin sona erme süresine etkisi

Su/bağlayıcı oranı sabit olduğunda yaklaşık olarak numunelerin hepsinde Na_2O miktarı arttıkça priz başlangıç süresi azalmaktadır Su/bağlayıcı 0,36 ve Na_2O miktarı %4, %7 ve %10 olduğunda priz başlangıç süreleri sırasıyla 10-9 ve 8,5 dakika ve priz sona erme süreleri 32-31,25 dakika olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,40 ve Na_2O miktarı %4, %7 ve %10 olduğunda priz başlangıç süresi sırası ile 11,6-10,5 ve 9,6 dakika ve priz sona erme süreleri 33-32 ve 28 dakika olmuştur. Aynı şekilde su/bağlayıcı oranı 0,44 iken Na_2O miktarı %4, %7 ve %10 olduğunda sırasıyla priz başlama süresi 12-10,8 ve 11 dakika ve priz sona erme süreleri 36-34 ve 28,5 dakika olmuştur.

Na_2O miktarı sabit olduğunda su/bağlayıcı oranı arttıkça priz başlama ve sona erme zamanı uzamaktadır. Na_2O %4 ve su/bağlayıcı oranı 0,36-0,40-0,44 olduğunda priz başlama süreleri sırasıyla 10-11,6 ve 12 dakika ve priz sona erme süresi 32- 33 ve 36 dakika olmuştur. Na_2O oranı %7 iken priz başlama süreleri sırasıyla 9-10,5-10,8 dakika ve priz sona erme zamanı 31-32 ve 34 dakika olmuştur.

Na_2O oranı %10 iken priz başlangıç süreleri 8,5-9,6 ve 11 dakika ve priz sona erme süreleri 25-28 ve 28,5 dakika olmuştur. Bu durumun muhtemel nedeni çözeltilerde alkalinitenin daha yüksek olması ve amorf yapıda olan bağların daha kolay çözülmesi yani amorf yapıda olan amorf Al ve Si'lerin çözünmesidir. Ayrıca kimyasal reaksiyonlardaki sıcaklık artışı muhtemel sebeplerdendir.

Hızlı bir şekilde çözülen bağlar poli (sialate-silokso) bağları oluşturmaya başlar ve daha hızlı bir priz süresine neden olur (Lee *et al.* 2003; Skvara *et al.* 2006; Bondar *et al.* 2011; Davidovits 2011).

4.5.5. Kür süresinin geopolimer hamurlarının basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Öğütülmüş pomzadan üretilen geopolimerlerde kür süresinin geopolimerlerin basınç mukavemeti üzerinde olan etkisi (65°C kür işlemi ve beklentisiz olarak kürün başlayıp 48 saat ısıtılıştan sonra) Çizelge 4.7 ve Şekil 4.13'te açıklanmıştır.

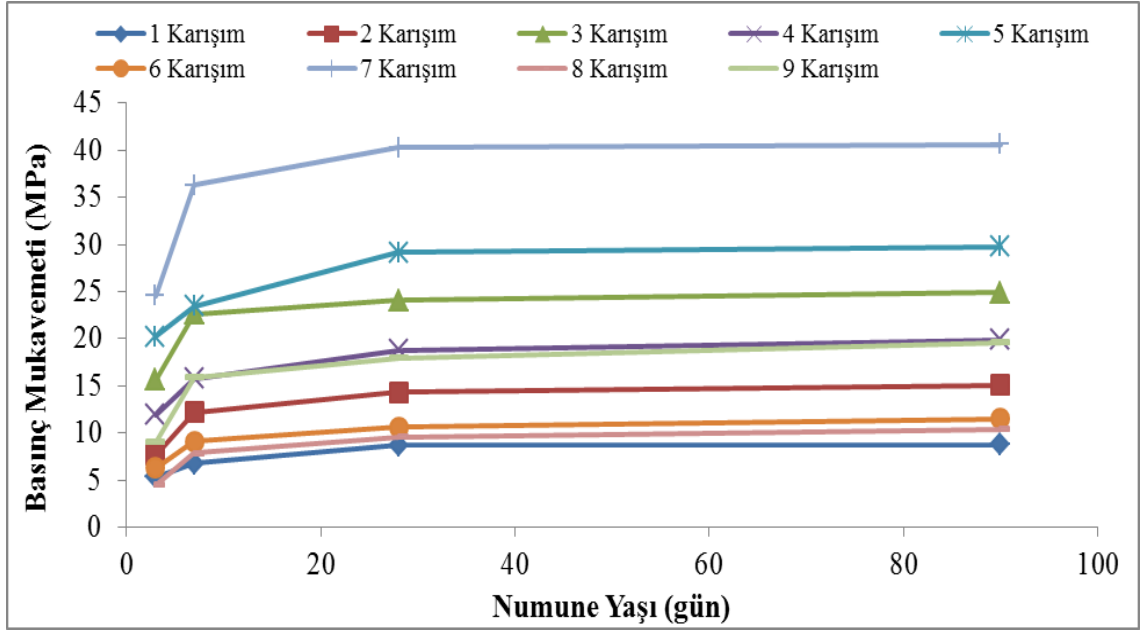
Çizelge 4.7. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (65° C kür için)

Karışım	3 günlük basınç mukavemeti (MPa)	7 günlük basınç mukavemeti (MPa)	28 günlük basınç mukavemeti (MPa)	90 günlük basınç mukavemeti (MPa)
1	5,29	6,77	8,68	8,76
2	7,63	12,17	14,32	15,07
3	15,65	22,63	24,08	24,93
4	11,92	15,77	18,78	19,90
5	20,20	23,47	29,16	29,75
6	6,25	9,11	10,60	11,49
7	24,57	36,33	40,28	40,64
8	4,48	7,83	9,55	10,41
9	9,00	15,91	17,98	19,60

Kür süresinin ısı işlem görmüş ve NaOH ile aktifleşmiş pomzadan üretilen geopolimerlerin basınç mukavemetine olan etkisi Portland çimentosundan üretilen hamurların kür süresinin etkisine benzemektedir. Bunun muhtemel nedeni zaman içerisinde alkali iyonların etkisinde silis ve alüminyumların geopolimerizasyonlarıdır.

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi pomzadan üretilen geopolimerlerin reaksiyon hızı 3 günden 28 güne kadar çok hızlıdır ama 28 günden sonra mukavemet kazanma hızı çok azalmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitten üretilen yüksek alkalinitesi olan çözelti zaten birbiriyle reaksiyona girecekler ve 36 saat bu çözelti kendi başına kalırsa yarı katı bir malzemeye dönüşecektir (Anuradha 2013).

Yüksek alkalinitesi olan çözeltiler öğütülmüş pomzadan Si ve Al iyonlarını çözmeye başlar ve çözünen iyonlar ve çözelti reaksiyona girer. Davidovits (2011)'in ifadesine göre ara bileşen malzeme, hidroksil ve oksijen yardımıyla oluşmaya başlar.



Şekil 4.13. Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (65°C kür için)

Bu reaksiyon erken yaşlarda olur ve hızlıdır. Daha sonra kullanılmayan çözelti ve pomzanın reaksiyona girmeyen kısmı reaksiyona devam eder ve tüm iyonların kullanımına kadar sertleşme devam eder.

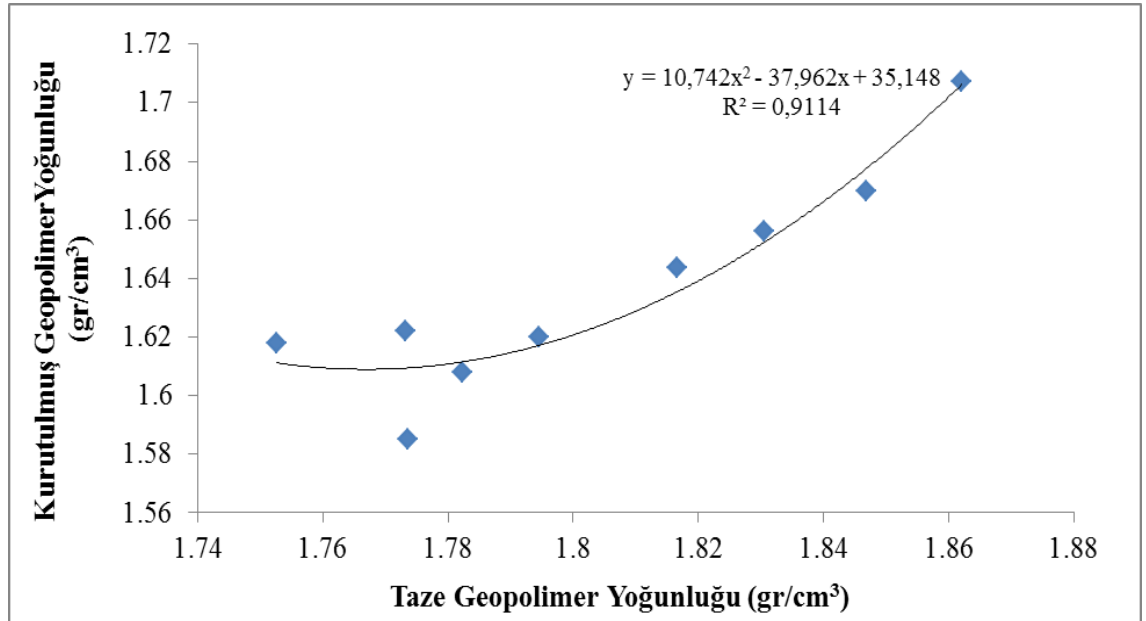
4.5.6. Sertleşmiş ve taze geopolimerlerin numunelerde yoğunluklarının karşılaştırılması

9 farklı karışımda üretilen pomza esaslı geopolimerler 65°C sıcaklıkta kür edildikten 27 gün sonra 50°C'de bir gün kurutulmuştur ve yoğunlukları hesaplanmış ve taze geopolimerlerin yoğunluğu ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar Çizelge 4.8 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'e göre kurutulmuş ve taze geopolimerlerin arasında çok iyi bir korelasyon görülmektedir ve $R^2=0,9114$ olmuştur.

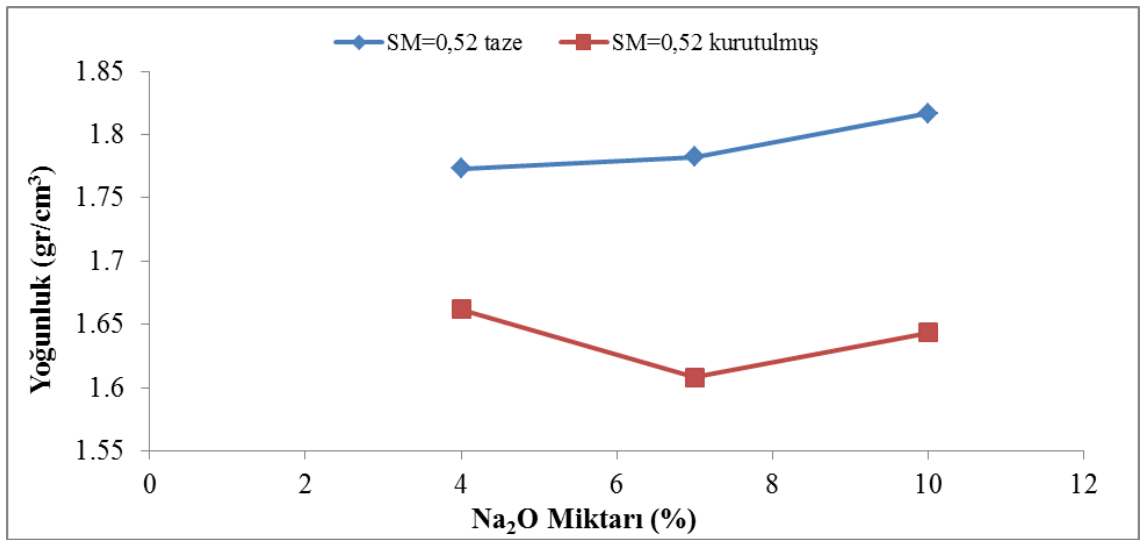
Çizelge 4.8. Kurutulmuş ve taze geopolimerlerin yoğunluklarının karşılaştırılması

Karışım	Taze geopolimerlerin yoğunlukları (gr/cm ³)	Kurutulmuş geopolimerlerin yoğunlukları (gr/cm ³)
1	1,7732	1,622
2	1,7823	1,608
3	1,8166	1,6437
4	1,8468	1,670
5	1,8305	1,656
6	1,7945	1,620
7	1,8621	1,7073
8	1,7527	1,618
9	1,7736	1,585

Yani taze geopolimerin yoğunluğundan kurutulmuş geopolimerin yoğunluğunu tahmin etmek mümkündür.

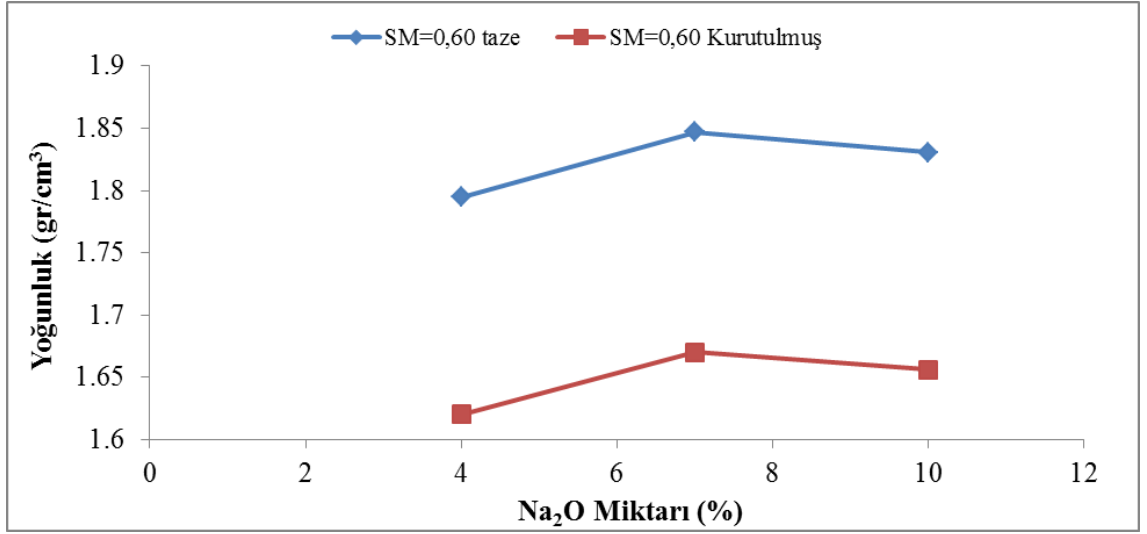
**Şekil 4.14.** Kurutulmuş ve taze geopolimerlerin yoğunluklarının karşılaştırılması

65°C'de kür edilen numunelerin sabit silika modülünde Na₂O miktarı ile yoğunluklarının değişimleri Şekil 4.15- Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Şekil 4.15'e göre silika modülü SM=0,52 ve Na₂O miktarı %4'ten %7'ye arttığı zaman kurutulmuş geopolimerin yoğunluğu azaltılmıştır ve Na₂O miktarı %7'ten %10'a arttığı zaman yeniden artış göstermiştir. Ama Na₂O miktarı %4'ten %10'a artırıldığında numunelerin hepsinde taze geopolimerin yoğunluğu artış göstermiştir.



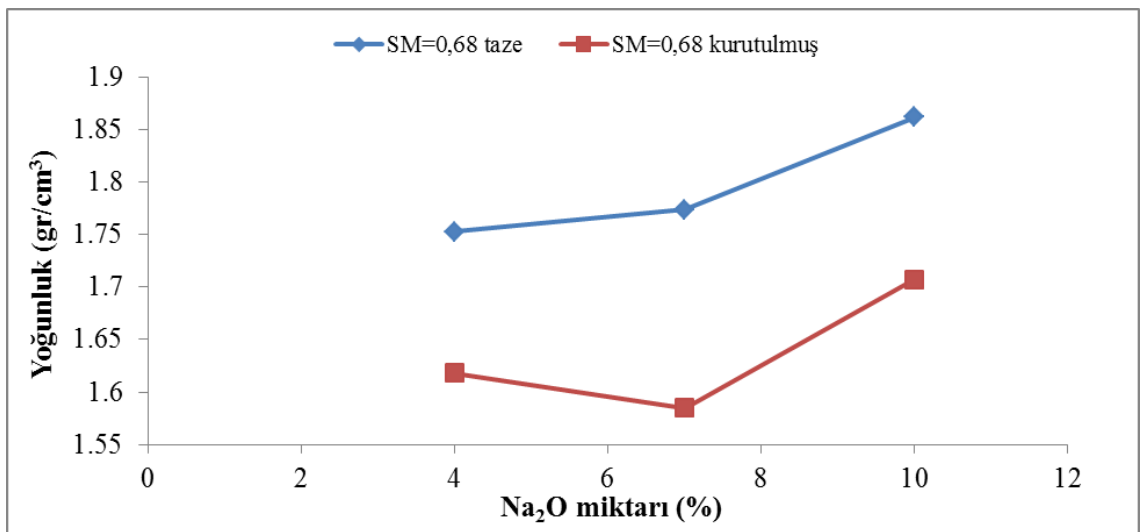
Şekil 4.15. Taze ve kurutulmuş geopolimerlerde Na₂O miktarının etkisi (SM=0,52)

Şekil 4.16'ya göre silika modülü SM=0,60 ve Na₂O miktarı %4'ten %7'ye artırıldığında kurutulmuş ve taze geopolimerlerin yoğunlukları artmıştır. Ama %7'ten %10'a artırıldığında kurutulmuş ve taze geopolimerlerin yoğunlukları azalmıştır.



Şekil 4.16. Taze ve kurutulmuş geopolimerlerde Na₂O miktarının etkisi (SM=0,60)

Şekil 4.17'ye benzer durumda silika modülü SM=0,68 olduğu zaman Na₂O miktarı %4'ten %7'ye arttığında kurutulmuş geopolimerin yoğunluğu azaltılmıştır ve Na₂O miktarı %7'den %10'a arttığı zaman yeniden artış göstermiştir. Ama Na₂O miktarı %4'ten %7'ye ve %10'a arttığı zaman taze geopolimer numunelerin hepsinde yoğunluk artış göstermiştir.



Şekil 4.17. Taze ve kurutulmuş geopolimerlerde Na₂O miktarının etkisi (SM=0,68)

Sonuçta bütün karışımlar için (9 karışım) sıralı bir ilişki, Na₂O miktarı ile taze veya kurutulmuş geopolimerlerin yoğunlukları arasında doğrusal bir ilişki gözükmemektedir.

4.5.7. Kür aşamasında ısıt işlem süresinin ve kürden önce bekletilme süresinin geopolimerlerin 28 günlük mukavemeti üzerindeki etkisi

Geopolimer üretiminde kür koşullarında bilgimizi güncellemek lazımdır. Bu yüzden numuneler hazırlanıp kalıba yerleştirildikten sonra ısıt işlem görmeden bekletilme süresinin geopolimerlerin basınç mukavemetine olan etkisi aşağıda verilen Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 kullanılarak Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da yorumlanmıştır.

a) Isıt işlem süresinin 28 günlük basınç mukavemetine etkisi

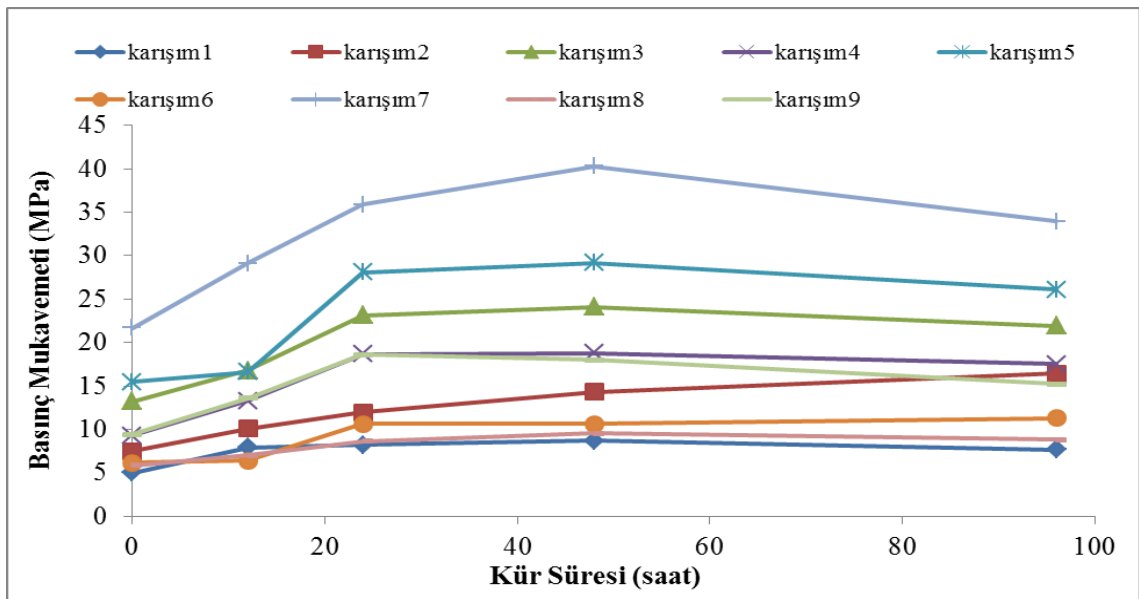
Numuneler dökülür dökülmez 0, 12, 24, 48 ve 96 saat süreyle 65°C'de kür edildikten sonra laboratuvar şartlarında 27 gün bekletilip sonra 1 gün 50°C'de kurutulup 28 günlük basınç mukavemetleri ölçülmüştür.

Çizelge 4.9. Kür aşamasında ısıt işlem süresinin geopolimerin 28 günlük mukavemeti üzerinde etkisi (65°C kür için)

Karışım	0 saat ısıt işlem	12 saat ısıt işlem	24 saat ısıt işlem	48 saat ısıt işlem	96 saat ısıt işlem
1	5,01	7,90	8,20	8,68	7,65
2	7,47	10,06	11,98	14,32	16,4
3	13,2	16,8	23,12	24,08	21,9
4	9,29	13,3	18,65	18,78	17,5
5	15,48	16,61	28,07	29,16	26,11
6	6,14	6,38	10,66	10,60	11,30
7	21,67	29,08	38,59	40,28	33,93
8	5,84	7,01	8,63	9,55	8,80
9	9,45	13,60	18,59	17,98	15,20

Dökülen hamur numunelerin ısıtılma maruz kalma süreleri 0'dan 12 saate çıkarıldığında tüm karışımların basınç mukavemeti yavaş bir eğilimle artış göstermiştir. 12 saatten 24 saate çıkarıldığında basınç mukavemetlerinde artışın hızlı bir şekilde olduğu ve 24 saatten 48 saate çıktığında mukavemetlerde ki artışın devam ettiği görülmektedir. Isıtılma süresi 48 saatten 96 saate çıktığında mukavemette azalma gözlenmiştir. Bu grafikler incelendiğinde en iyi ısıtılma süresinin pomza esaslı geopolimer üretimi için 48 saat olduğu tespit edilmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitten üretilen yüksek alkalinitesi olan çözelti zaten birbiriyle reaksiyona girecekler ve 36 saat bu çözelti kendi başına kalırsa yarı katı bir malzemeye dönüşecektir (Anuradha 2013).

Yüksek alkalinitesi olan çözeltiler öğütülmüş pomzadan Si ve Al iyonların hemen çözmeye başlar ve çözünen iyonlar ve çözelti reaksiyona girer ve Davidovits (2011)'in ifadesine göre hemen ara bileşen malzeme hidroksil ve oksijen yardımıyla oluşmaya başlar ve bu erken yaşlarda olur ve hızlıdır. Ama daha sonra kullanılmayan çözelti ve pomzanın reaksiyona girmeyen kısmı reaksiyona devam eder ve tüm iyonların kullanımına kadar sertleşme devam eder.



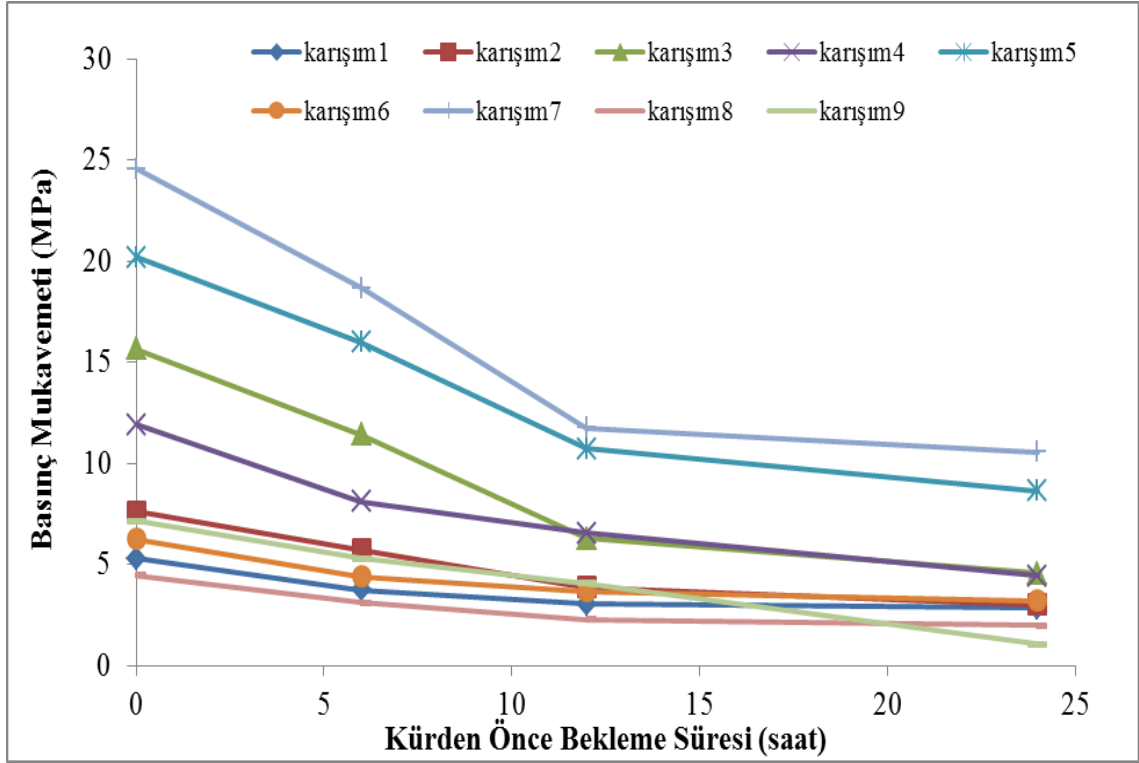
Şekil 4.18. Kür aşamasında ısıtılma süresinin geopolimerin 28 günlük mukavemeti üzerinde etkisi (65°C kür için)

b) Isıl işlem den önce laboratuvar da bekleme süresinin etkisi

Literatür incelendiğinde ısı l işlem den önce bekleme süresinin geopolimerin basınç mukavemetini etkileyebileceği bilinmektedir (Toprak 2011). Bu nedenle pomza esaslı geopolimerlerin 3 günlük basınç mukavemetinde ön bekleme süresinin etkisi 9 karışım için incelenmiştir (Çizelge 4.10). Kürden önce beklenme zamanı sıra ile 0, 6, 12 ve 24 saat olarak seçilmiştir. Tüm karışımlarda ısı l işlem den önce bekletilme süresi arttıkça geopolimer numunelerin basınç mukavemeti büyük ölçüde azalmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde geopolimer hamurlarda bekletilmeden ısı l işlemle kür edilmesi ve kür süresinin de 48 saatten fazla olmaması gerektiği tespit edilmiştir (Şekil 4.19).

Çizelge 4.10. Ön bekleme süresinin 3 günlük basınç mukavemetinde olan etkisi (65°C kür için)

Karışım	0 (saat)	6 (saat)	12 (saat)	24 (saat)
1	5,29	3,73	3,06	2,86
2	7,63	5,73	3,89	3,01
3	15,65	11,42	6,28	4,56
4	11,92	8,10	6,55	4,44
5	20,20	15,98	10,73	8,65
6	6,25	4,41	3,68	3,22
7	24,57	18,67	11,75	10,56
8	4,48	3,13	2,30	2,00
9	9,00	7,15	5,31	4,09



Şekil 4.19. Ön bekleme süresinin 3 günlük basınç mukavemetine olan etkisi (65°C kür için)

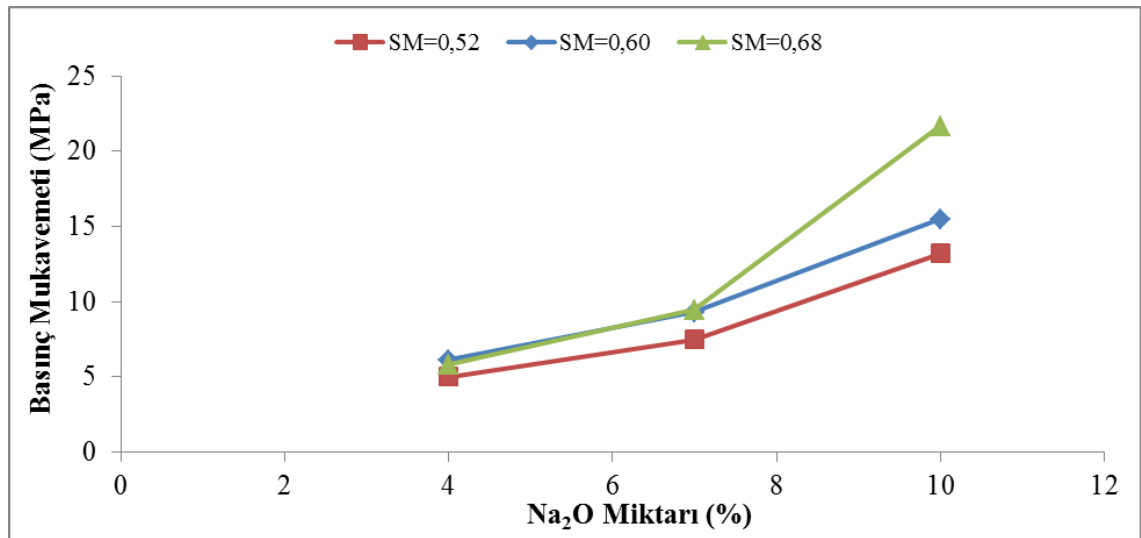
4.5.8. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı geopolimer hamur numunelerde ısıtma sıcaklığının basınç mukavemetine etkisi

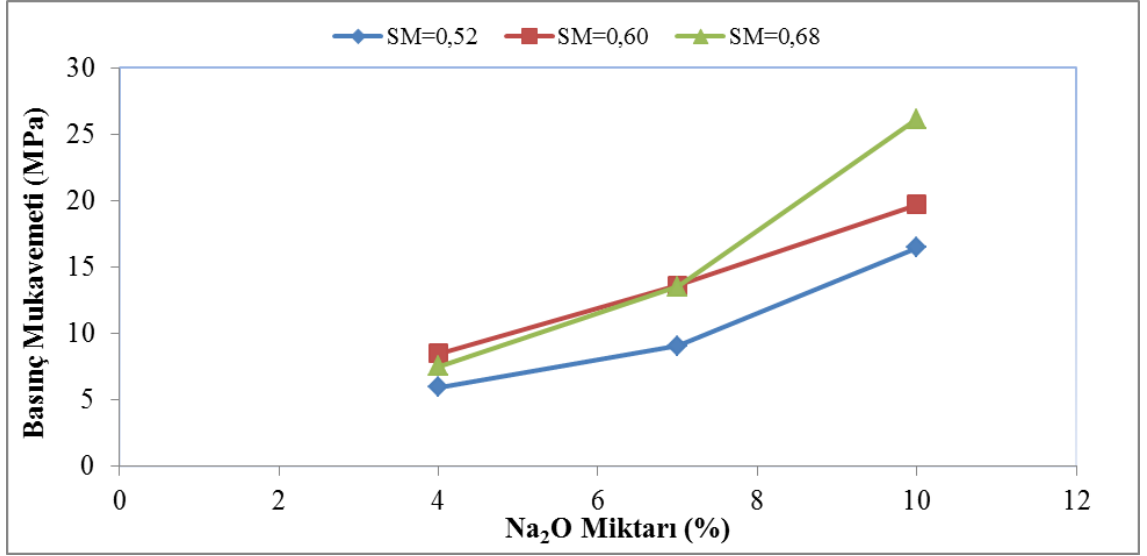
Bu bölümde üretilen numuneler bekletilmeden 25°C, 45°C, 65°C ve 85°C farklı sıcaklıklarda 48 saat bekletildikten sonra laboratuvar ortamında toplam 27 gün bekletilmişlerdir.

Bu bekleme süresinden sonra, 24 saat 50°C sıcaklıkta kurutulmuşlardır. Deneye tabi tutulan numunelerin basınç mukavemetleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Na₂O miktarının farklı sıcaklıklarda basınç mukavemetine etkisi, Çizelge 4.11, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.5 ve Şekil 4.22'te sırasıyla verilmiştir.

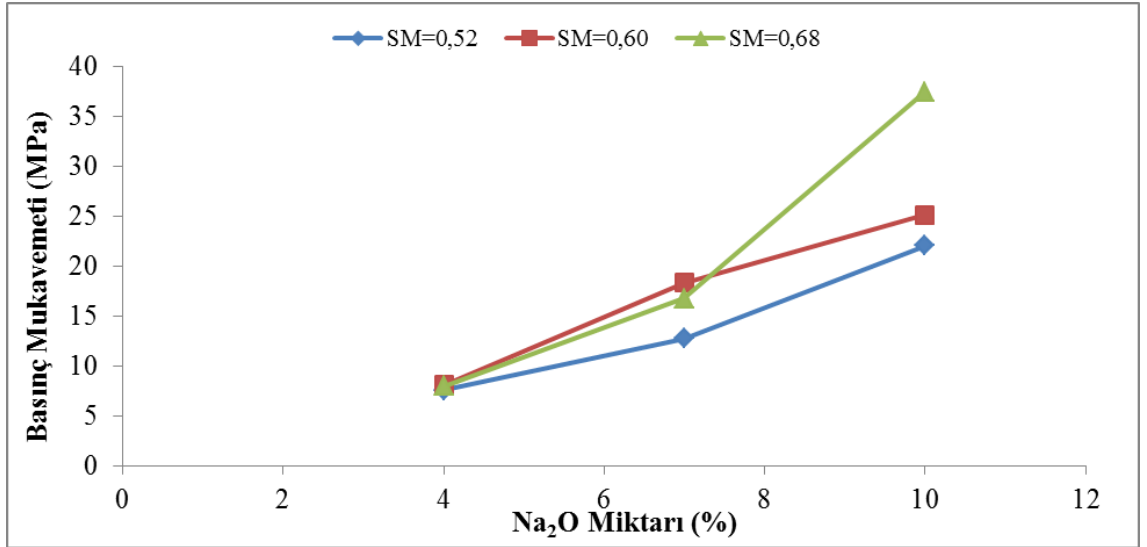
Çizelge 4.11. Farklı sıcaklıklarda ısıl işlemden sonra numunelerin basınç mukavemeti

Karışım	25 °C ısıl işleminden sonra basınç mukavemeti (MPa)	45 °C ısıl işleminden sonra basınç mukavemeti (MPa)	65 °C ısıl işleminden sonra basınç mukavemeti (MPa)	85 °C ısıl işleminden sonra basınç mukavemeti (MPa)
1	5,01	5,97	8,68	8,68
2	7,47	9,08	14,32	14,32
3	13,20	16,47	24,08	24,08
4	9,29	13,60	18,78	18,78
5	15,48	19,70	29,16	29,16
6	6,14	8,50	10,60	10,60
7	21,67	26,15	40,28	40,28
8	5,84	7,52	9,55	9,55
9	9,45	13,54	17,98	17,98

**Şekil 4.20.** 25°C'de ısıl işlemden sonra Na₂O miktarının 28 günlük basınç mukavemetine etkisi



Şekil 4.21. 45°C'de ısıl işlemden sonra Na₂O miktarının 28 günlük basınç mukavemetine etkisi



Şekil 4.22. 85°C'de ısıl işlemden sonra Na₂O miktarının 28 günlük basınç mukavemetine etkisi

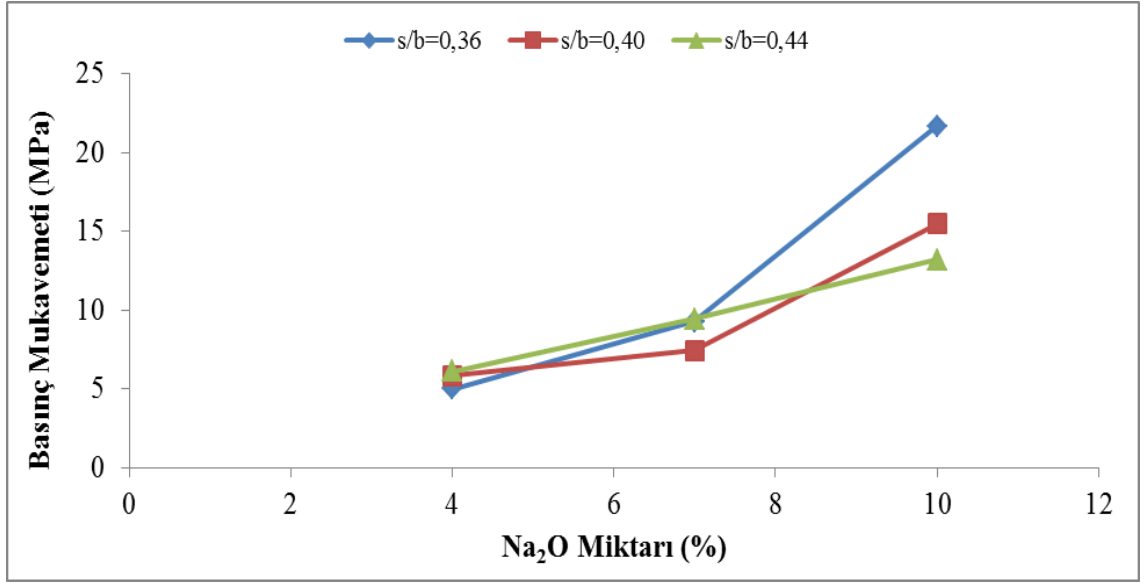
Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'te verilen grafiklerde sabit silika ve değişen silika modülünde Na₂O miktarının basınç mukavemetine olan etkisi farklı sıcaklıklarda incelenmiştir. Grafiklere göre sabit SM miktarlarında Na₂O miktarının artması ile basınç mukavemeti de artış göstermiştir. Sabit Na₂O miktarlarında silika modülünü

artması ile basınç mukavemeti de artmıştır. Farklı sıcaklıktaki grafiklerin eğilimlerinde fark olsa da, yaklaşık numunelerin hepsinde farklı kür şartlarında bu özellik sabit kalmıştır. Yani bu özellik sıcaklıktan bağımsızdır. Şekil 4.5, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 grafiklerine göre 65°C kür sıcaklığı en iyi sonuçları vermiştir. Bu nedenle beton ve harç üretimi için 65°C kür şartı seçilmiştir.

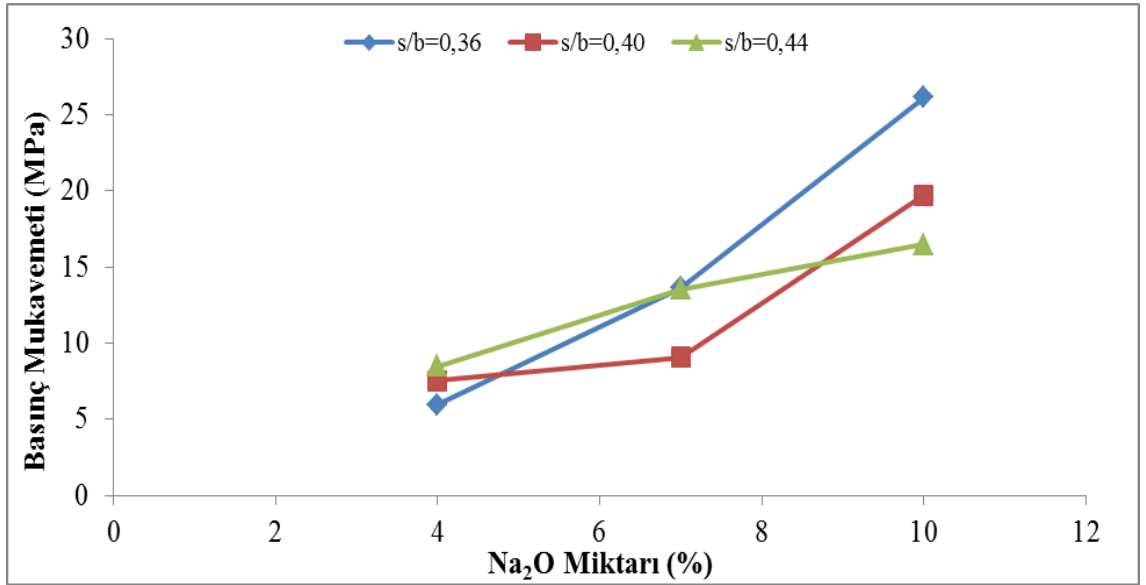
4.5.9. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı geopolimerlerde farklı ısıtma işlem aşamalarında su/bağlayıcı miktarının geopolimerlerin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'dan yararlanarak geopolimerlerde sabit ve değişen su/bağlayıcı miktarlarında Na₂O miktarının basınç mukavemetine olan etkisi Şekil 4.7'de 65°C için incelemiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi eğer su/bağlayıcı miktarı 0,36-0,40 ve 0,44 olduğunda Na₂O miktarının artması ile (yani %4, %7 ve %10) basınç mukavemeti numunelerinin hepsinde artış göstermiştir. Benzer şekilde 25°C, 45°C ve 85°C için benzer grafikler 48 saat ısıtma işlem için çizilmiştir.

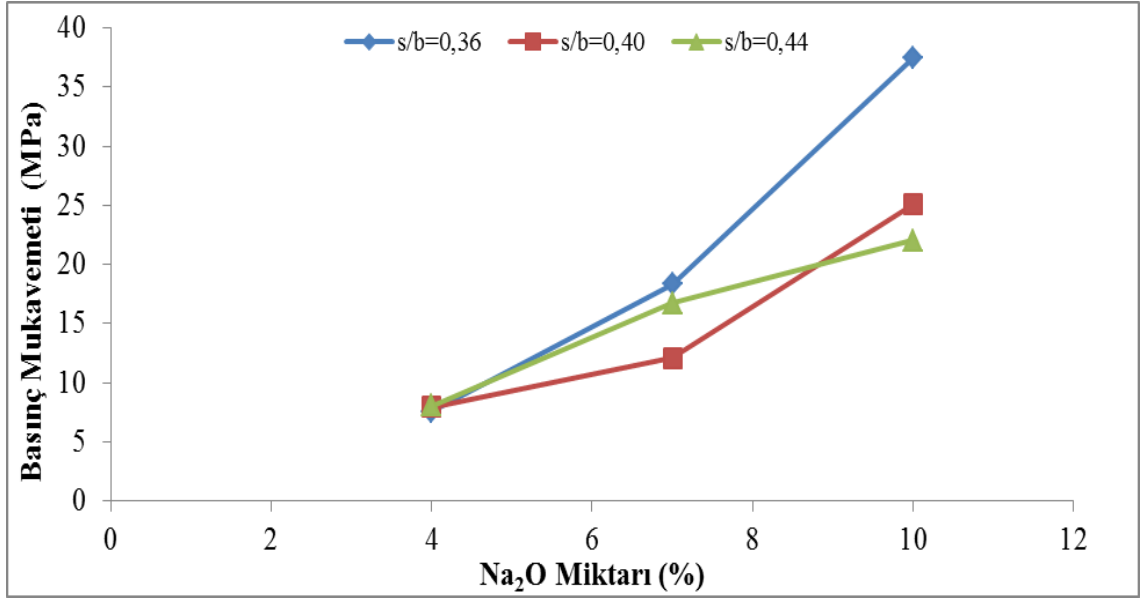
Grafiklerden tüm sıcaklıklarda eğer su/bağlayıcı miktarı sabit olursa yani (0,36-0,40 ve 0,44) Na₂O miktarının artması ile (% 4, %7 ve %10) numunelerin hepsinde basınç mukavemetinin arttığı gözlenmektedir. Sabit Na₂O miktarlarında su/bağlayıcı oranının artması ile geopolimer numunelerin basınç mukavemeti büyük ölçüde azalmıştır. Aynen normal çimento hamuru gibi su/bağlayıcı oranı arttıkça mukavemet azalmıştır. Sonuç olarak toplamda Na₂O miktarının artması daha mukavemetli geopolimer üretimine neden olmaktadır. Sonuçlar sırası ile (25°C, 45°C, 65°C ve 85°C) için Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.6 ve Şekil 4.23'de görülmektedir.



Şekil 4.23. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na_2O miktarının basınç mukavemetine etkisi (25°C ısıtılmasında)



Şekil 4.24. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na_2O miktarının basınç mukavemetine etkisi (45°C ısıtılmasında)



Şekil 4.25. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na₂O miktarının basınç mukavemetine etkisi (85°C ısıtılmasında)

Alınan sonuçlara göre geopolimere yüksek mukavemet kazandırabilmek için en iyi su/bağlayıcı oranı 0,36 olmuştur. Bunun nedeni geopolimer reaksiyonlarından sonra suyun buharlaşması boşlukların artmasına ve basınç mukavemetinin düşmesine neden olacaktır.

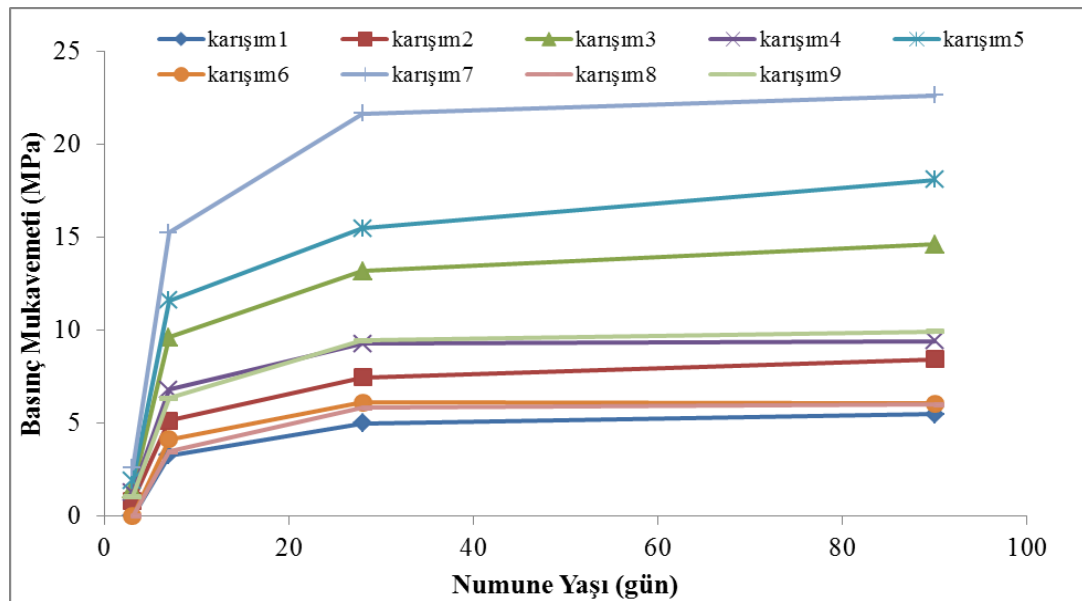
4.5.10. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı geopolimerlerde farklı ısıtılma aşamalarında kür süresinin geopolimerlerin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Bölüm 4.5.5'te görüldüğü gibi 65°C ısıtılma işlemi görmüş ve NaOH ile aktive edilmiş pomzadan üretilen geopolimerlerin basınç mukavemetine olan etkisi Portland çimentosundan üretilen hamurların kür süresinin etkisine çok benzemektedir. Bunun nedeni zaman içerisinde alkali iyonların etkisinde silis ve alüminyumların geopolimerizasyonlarıdır. Farklı sıcaklıklarda kür süresinin aynı sonuçlara neden olup olmadığını incelemek için farklı sıcaklıklarda kür yapılmıştır. Yani 25°C, 45°C, 65°C ve

85°C numunelerin kür sıcaklıkları uygulandıktan sonra basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Deney sonuçları Çizelge 4.7, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Şekil 4.13, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (25°C kür için)

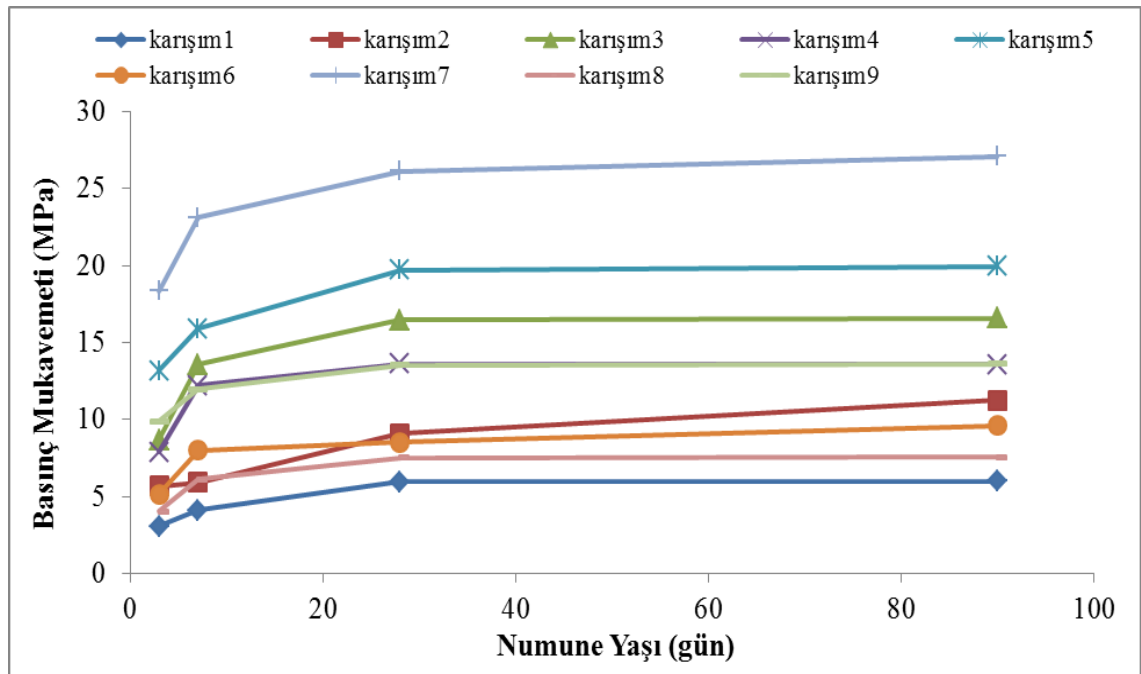
Karışım	3 günlük basınç mukavemeti (MPa)	7 günlük basınç mukavemeti (MPa)	28 günlük basınç mukavemeti (MPa)	90 günlük basınç mukavemeti (MPa)
1	0,00	3,28	5,01	5,48
2	0,85	5,15	7,47	8,44
3	1,47	9,63	13,20	14,62
4	1,30	6,81	9,29	9,42
5	1,90	11,61	15,48	18,11
6	0,00	4,13	6,14	6,06
7	2,60	15,27	21,67	22,65
8	0,00	3,48	5,84	6,01
9	1,06	6,37	9,45	9,96



Şekil 4.26. Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (25°C kür için)

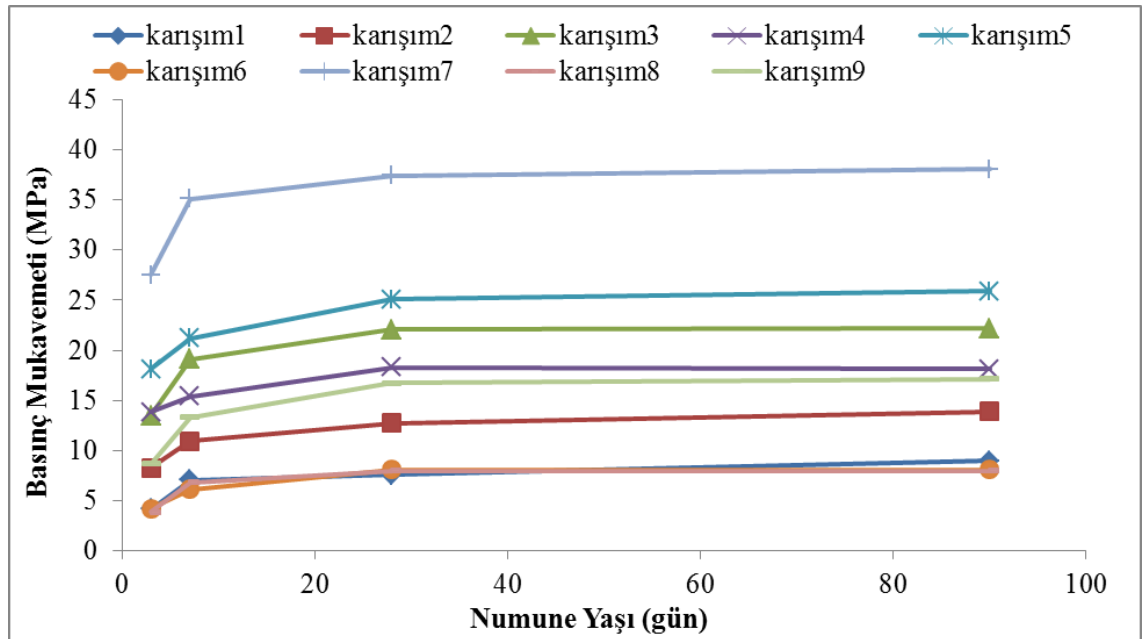
Çizelge 4.13. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (45°C kür için)

Karışım	3 günlük basınç mukavemeti (MPa)	7 günlük basınç mukavemeti (MPa)	28 günlük basınç mukavemeti (MPa)	90 günlük basınç mukavemeti (MPa)
1	3,08	4,10	5,97	6,01
2	5,65	5,90	9,08	11,23
3	8,69	13,56	16,47	16,60
4	7,88	12,2	13,60	13,58
5	13,19	15,9	19,70	19,94
6	5,14	8,01	8,50	9,60
7	18,34	23,12	26,15	27,11
8	4,03	6,11	7,52	7,55
9	9,88	11,96	13,54	13,60

**Şekil 4.27.** Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (45°C kür için)

Çizelge 4.14. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (85°C kür için)

Karışım	3 günlük basınç mukavemeti (MPa)	7 günlük basınç mukavemeti (MPa)	28 günlük basınç mukavemeti (MPa)	90 günlük basınç mukavemeti (MPa)
1	4,11	7,01	7,56	8,91
2	8,25	10,90	12,70	13,90
3	13,44	19,08	22,04	22,18
4	13,82	15,37	18,30	18,09
5	18,09	21,20	25,07	25,91
6	4,16	6,11	8,05	8,06
7	27,52	35,11	37,45	38,11
8	3,80	6,79	7,92	7,96
9	8,66	13,27	16,72	17,11

**Şekil 4.28.** Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (85°C kür için)

65°C sıcaklıkta elde edilen sonuçlara benzer şekilde, Şekil 4.13'te görüldüğü gibi pomzadan üretilen geopolimerlerin reaksiyon hızı tüm kür sıcaklıklarında 3 ile 28 günler arasında çok hızlı artış göstermektedir. Ama 28 günden sonra mukavemet artış hızı çok azalmıştır. Ancak yaklaşık olarak tüm grafikler aynıdır. Sonuç olarak kür süresinin pomza esaslı geopolimerlerin mukavemet kazanmasında olumlu bir etkisi olduğu ve zamanla mukavemetin artmasının sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmektedir.

4.5.11. Sodyum hidroksit ile aktive edilen pomza esaslı 3, 5 ve 7. grup geopolimer karışımlarının hacimsel değişimleri

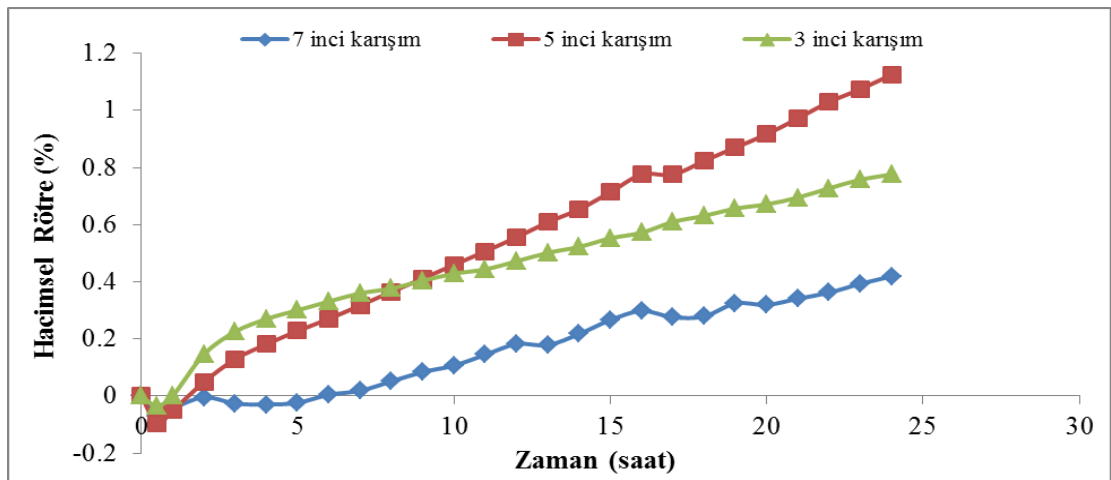
Bu çalışmadaki 9 karışımdan 3, 5 ve 7. karışımların basınç mukavemeti 20 Mpa üzerine çıkmıştır. Bu geopolimerlerin yapıda taşıyıcı malzeme olarak kullanılabilmesinden dolayı bu karışımların genleşme veya büzülme davranışlarını araştırmak yararlı olacaktır. Bu yüzden 3, 5 ve 7. karışımların ilk 24 saatteki hacimsel davranışlarının sonuçları Çizelge 4.15 ve Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Literatüre göre ilk 24 saatteki genleşme göz önüne alınır. Şekil 4.27'de gösterildiği gibi 24 saatin sonunda 7. karışımın büzülmesi %0,42, 5. karışımın %1,13 ve 3. karışımın büzülmesi %0,78 olmuştur. 7. karışımın hacimsel değişiminin az olması bu karışımın mukavemetinin daha yüksek olmasından kaynaklanabilir. Numunelerin hepsinde ilk başta küçük miktarda genleşme var ama sonradan numunelerin hepsi büzülmeindedir.

Çizelge 4.15. Hacimsel rötre sonuçları (%)

Zaman(saatt)	7. karışım (%)	5. karışım (%)	3. karışım (%)
0	0	0	0
0,5	-0,07223	-0,09505	-0,03504
1	-0,04379	-0,05122	0,000494
2	-0,00451	0,048757	0,145599
3	-0,02618	0,129035	0,225062
4	-0,0298	0,18124	0,269482
5	-0,02348	0,228027	0,300576

Çizelge 4.15. (devam)

6	0,004515	0,270382	0,331176
7	0,01851	0,31717	0,359803
8	0,051467	0,364942	0,376584
9	0,083973	0,411237	0,403729
10	0,106546	0,459502	0,428407
11	0,144469	0,506289	0,443707
12	0,18194	0,555539	0,47184
13	0,178329	0,608729	0,501454
14	0,217155	0,653546	0,522183
15	0,265913	0,713631	0,55229
16	0,297967	0,775686	0,572032
17	0,275845	0,775194	0,609542
18	0,278554	0,823459	0,630765
19	0,324604	0,870246	0,65643
20	0,319186	0,916541	0,671237
21	0,340856	0,972193	0,694928
22	0,362075	1,029816	0,727502
23	0,393226	1,074633	0,757609
24	0,41896	1,125361	0,775871



Şekil 4.29. 3, 5 ve 7 nolu karışımların ilk 24 saatteki hacimsel davranışı

4.6. Yapay Sinir Ağlar Yöntemiyle Pomza Esaslı Geopolimerlerin Basınç Mukavemetinin Tahmin Edilmesi

Geopolimer malzemelerin mukavemeti birçok değişkene bağlı olduğundan geopolimerlerin modellenmesi ve geopolimer malzemelerin basınç mukavemetinin tahmin edilmesi kolay değildir. Geopolimerlerin mukavemetini tahmin etmek için hiç bir sistematik yöntem yoktur. Na_2O miktarı, su/bağlayıcı oranı ve kür süresi geopolimerlerin basınç mukavemetini büyük ölçüde etkilediği için bu bölümde çok katmanlı bir yapay sinir ağı oluşturularak geopolimerlerin basınç mukavemetini tahmin etmek için bir model oluşturulmuştur ve bununla ilgili sonuçlar daha sonraki bölümlerde yorumlanmıştır.

Çizelge 4.5'te karışım hesapları verilen 9 farklı geopolimer karışımı hazırlanmıştır. Beş farklı ısı işlem süresi geopolimerlerin kuru ve üretimi için seçilmiştir. Bunlar sırası ile 0-12-24-48 ve 96 saattir. Bu yüzden 9x5 sonucumuz vardır. Her sonuç için 3 numunenin ortalamaları alındığı için, 135 numune bu üretilmiştir. Kür sıcaklığı 65°C olmuştur. Aynı önceki karışımları için kullanıldığı gibi Almanya da ELE firmasında üretilmiş *bench-mounting* karıştırıcı kullanılmıştır. Karışım süresi 3 dakikadır ve kullanılan kalıplar 50x50x50 mm³ küp kalıplardır.

Daha sonra 2 dakika süresinde titreşim masası üzerinde titreşim görmüş numuneler propilen filmlerle sarılıp kür fırınına bırakılmıştır. 48 saat sonra filmler sökülerek kalıplar açılmıştır. Geopolimerlerin üretiminden toplam 28 gün sonra numuneler üzerinde UPV ve basınç deneyi testleri yapılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken bir noktada çözelti hazırlanırken sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışıktan sonra büyük miktarda ısı meydana gelmektedir. Bu yüzden çözeltinin hazırlanıp 24 saat bekletilmesi önerilmiştir (Anuradha *et al.* 2013).

4.6.1. Geopolimerlerin basınç mukavemetlerinin modellenmesinde kullanılan sinir ağının özellikleri

Geopolimer karışımlarında görüldüğü gibi numunelerin basınç mukavemeti bir kaç değişken tarafından etkilenmektedir. Bunlardan en önemlileri SM oranı, Na₂O miktarı, su/bağlayıcı oranı ve ısıtma işlem süresidir. Sertleşmiş geopolimer numunelerin UPV değerleri giriş verileri olarak yapay sinir ağına atanmıştır. Yani toplamda 5 giriş datası mevcuttur. Sonuç olarak yalnız geopolimerlerin 28 günlük basınç mukavemeti tanımlanmıştır. Aynı cihazların ve cihaz düzenlemelerinin kullanılmasından dolayı mesela yükleme hızı ve bu değerler hep sabit olmuştur. YSA'da kullanılan özellikler Çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. Geopolimerlerin basınç mukavemetinin tahmin edilmesinde kullanılan YSA özellikleri

No.	Ayrıntılar	Seçenek
1	<i>Network architecture</i>	<i>Back propagation network</i>
2	<i>Number of input</i>	5
3	<i>Number of output</i>	1
4	<i>Number of hidden layer</i>	4
5	<i>Number of neuron in each hidden layer</i>	100
6	<i>Activation function</i>	<i>Tansig</i>
7	<i>Learning rate</i>	0,3
8	<i>Moment rate</i>	0,6
9	<i>Number of iteration</i>	5000
10	<i>Training algorithm</i>	<i>gradient descent with momentum</i>

Daha sonra ifade edildiği gibi 4 giriş veri seti ve bir çıkış veri seti vardır. Toplamda 45 tane deney sonucu mevcuttur ve bu değerler YSA'da kullanım için normalize edilmiştir. *Back propagation* öğretim algoritması *feed-forward* olarak kullanılmıştır ve 4 gizli katmanımız vardır. Bu 45 veri setinden 30 tanesi öğrenim için ve kalan 15 tanesi YSA'nın doğruluğunu kontrol etmek için kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen basınç mukavemeti ve UPV sonuçları ve karışımda kullanılan SM, Na₂O miktarı ve kür süresi

Çizelge 4.17’de verilmiştir. MATLAB programı YSA üretimi için kullanılmış ve verilerin 0,66’sı öğrenim ve 0,34’ü kontrol için kullanılmıştır.

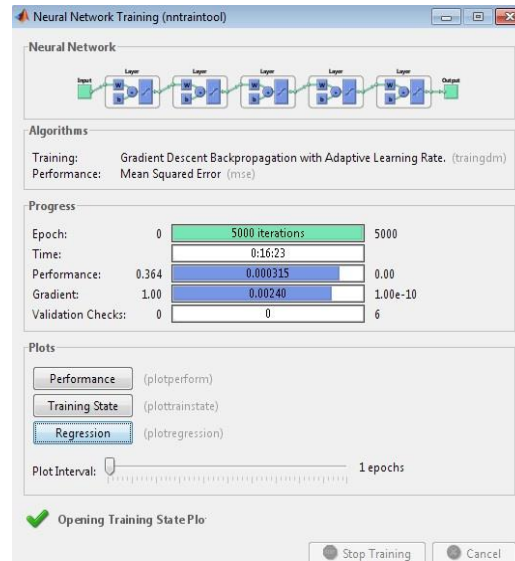
Çizelge 4.17. Deneylerden alınan basınç mukavemeti ve UPV sonuçları ve karışımda kullanılan giriş değerleri

Karışım	SM	Na ₂ O	Su/bağlayıcı oranı	Kür süresi	UPV sonuçları	28 günlük basınç mukavemeti (MPa)
1	0,52	4	0,36	0	528	5,01
2	0,52	7	0,40	0	1239	7,47
3	0,52	10	0,44	0	2254	13,2
4	0,60	7	0,36	0	1628	9,29
5	0,60	10	0,40	0	2537	15,48
6	0,60	4	0,44	0	890	6,14
7	0,68	10	0,36	0	3137	21,67
8	0,68	4	0,40	0	801	5,84
9	0,68	7	0,44	0	1658	9,45
10	0,52	4	0,36	12	1339	7,9
11	0,52	7	0,40	12	1770	10,06
12	0,52	10	0,44	12	2683	16,8
13	0,60	7	0,36	12	2267	13,3
14	0,60	10	0,40	12	2663	16,61
15	0,60	4	0,44	12	958	6,38
16	0,68	10	0,36	12	3661	29,08
17	0,68	4	0,40	12	1126	7,01
18	0,68	7	0,44	12	2307	13,6
19	0,52	4	0,36	24	1411	8,2
20	0,52	7	0,40	24	2081	11,98
21	0,52	10	0,44	24	3252	23,12
22	0,60	7	0,36	24	2869	18,65
23	0,60	10	0,40	24	3598	28,07
24	0,60	4	0,44	24	1873	10,66
25	0,68	10	0,36	24	4165	38,59
26	0,68	4	0,40	24	1496	8,63
27	0,68	7	0,44	24	2864	18,59
28	0,52	4	0,36	48	1376	8,68
29	0,52	7	0,40	48	2600	14,32

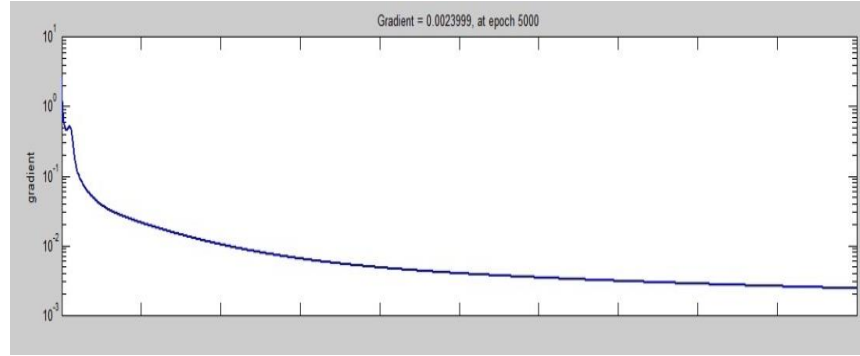
Çizelge 4.17. (devam)

30	0,52	10	0,44	48	3100	24,08
31	0,60	7	0,36	48	3081	18,78
32	0,60	10	0,40	48	3450	29,16
33	0,60	4	0,44	48	1750	10,60
34	0,68	10	0,36	48	4300	40,28
35	0,68	4	0,40	48	1670	9,55
36	0,68	7	0,44	48	3041	17,98
37	0,52	4	0,36	96	1282	7,65
38	0,52	7	0,40	96	2640	16,4
39	0,52	10	0,44	96	3155	21,9
40	0,60	7	0,36	96	2756	17,5
41	0,60	10	0,40	96	3469	26,11
42	0,60	4	0,44	96	1977	11,30
43	0,68	10	0,36	96	3935	33,93
44	0,68	4	0,40	96	1531	8,80
45	0,68	7	0,44	96	2505	15,2

Özellikleri Çizelge 4.16’de açıklanan ağın MATLAB programında görünümü Şekil 4.30’da ve *gradient descent* sonuçları Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Bu ağdan alınan tahmini sonuçlar ve deneylerden alınan sonuçlar Çizelge 4.18 ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.30. MATLAB programında öğrenimden sonra öğrenim kutusundan bir görünüm



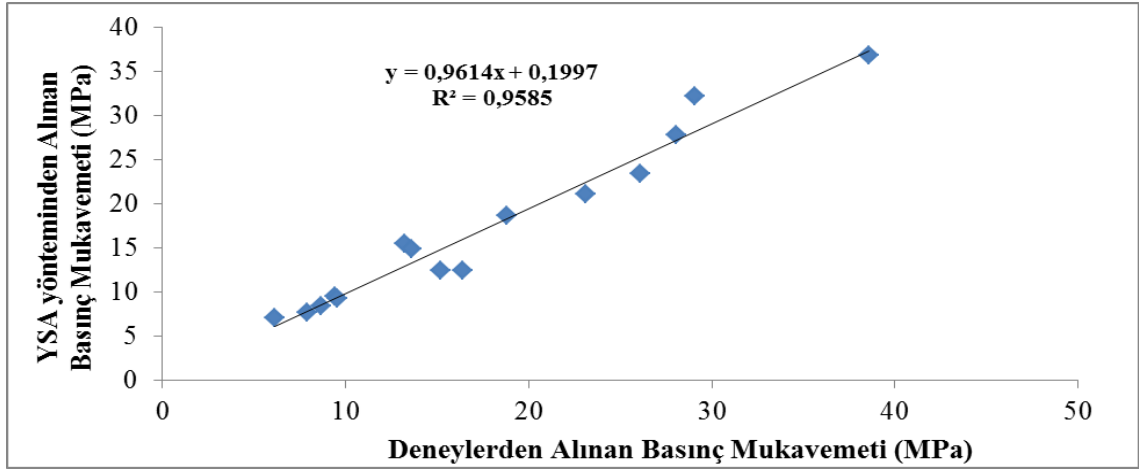
Şekil 4.31. MATLAB programında öğrenimden sonra *gradient descendent* değişmesi

Çizelge 4.18. Geopolimerlerde YSA yönteminden alınan sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

No	Deney sonuçları	YSA yönteminin tahmini sonuçları
1	13,20	15,4659
2	6,14	7,0748
3	9,45	9,4423
4	7,90	7,6301
5	29,08	32,1467
6	13,60	14,9070
7	23,12	21,0362
8	28,07	27,7248
9	38,59	36,7510
10	8,68	8,3691
11	18,78	18,6195
12	9,55	9,2528
13	16,40	12,4398
14	26,11	23,3729
15	15,20	12,4571

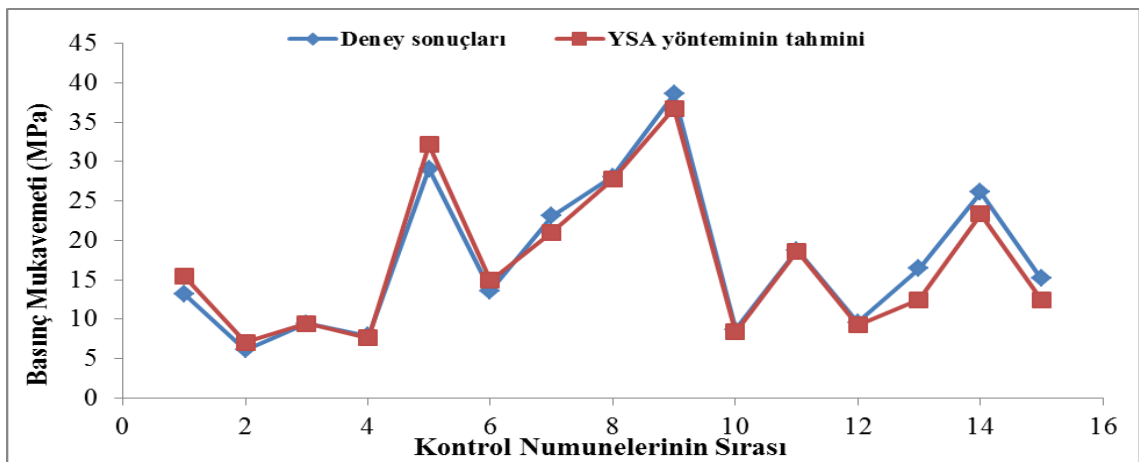
Yapay sinir ağından alınan tahmini sonuçlar ve deneylerden alınan sonuçlar Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te karşılaştırılmıştır. Şekil 4.32'de yatay eksen deneylerden alınan basınç mukavemet sonuçlarını, dikey eksen yapay sinir ağlarından alınan basınç mukavemeti sonuçlarını göstermektedir. En iyi durumda bu iki değer birbiriyle aynı olmalıdır ve bu şekilde olursa hepsi bir doğrunun üzerine düşer. Görüldüğü gibi $R^2=0,9585$ olmuştur ve

bu tahminin iyi olduğuna bir kanıt olabilir. Bu yüzden yapay sinir ağlar yönteminin öğütülmüş pomzadan üretilen ve Na_2O yardımı ile aktive edilen geopolimerlerin mukavemetinin tahmini için kullanılması tavsiye edilebilir.



Şekil 4.32. Geopolimerlerde YSA yönteminden alınan sonuçlar ile deneylerden alınan sonuçların karşılaştırılması

Daha önceden ifade edildiği gibi numunelerden 15 tanesi test için seçilmiştir. Çizelge 4.18'deki sonuçlar kullanılarak Şekil 4.33'te her tahminde bu mukavemetlerdeki hata payı ve aralarındaki fark şematik halde gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Geopolimerlerde YSA yönteminden alınan sonuçlar ile deneylerden alınan sonuçların Çizelge 4.18'e göre karşılaştırılması

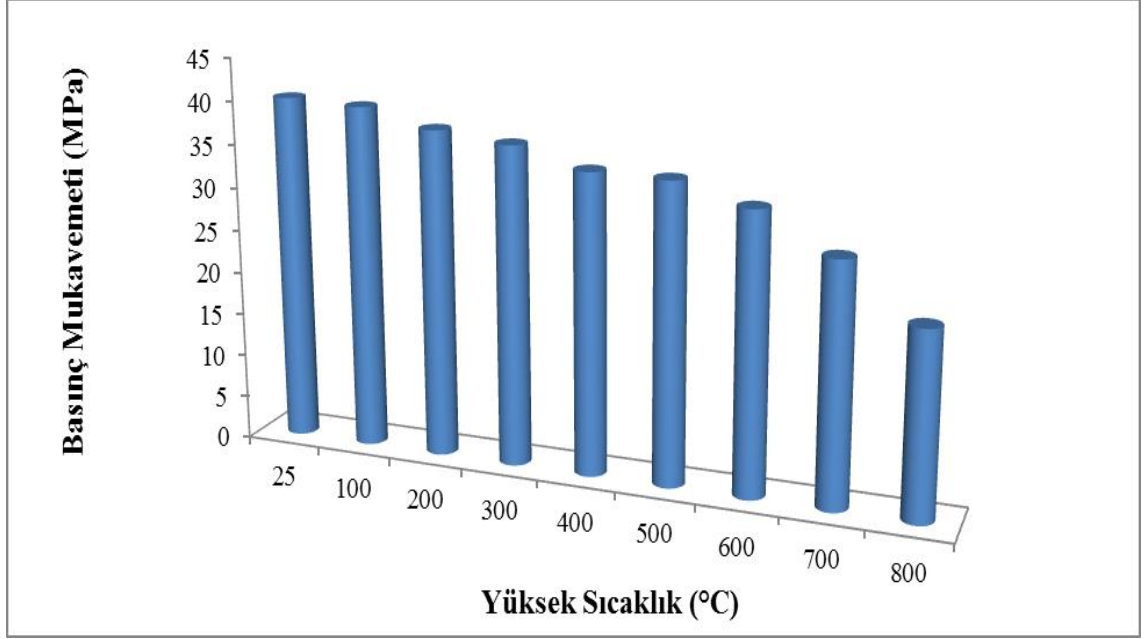
Çizelge 4.18, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'e göre yapay sinir ağlarını güvenli bir şekilde geopolimerlerin basınç mukavemetinin tahmini için kullanabiliriz.

4.7. En Mukavemetli Karışımın Yüksek Sıcaklığa Maruz Kaldıktan Sonra Mekanik Özelliklerindeki Değişim

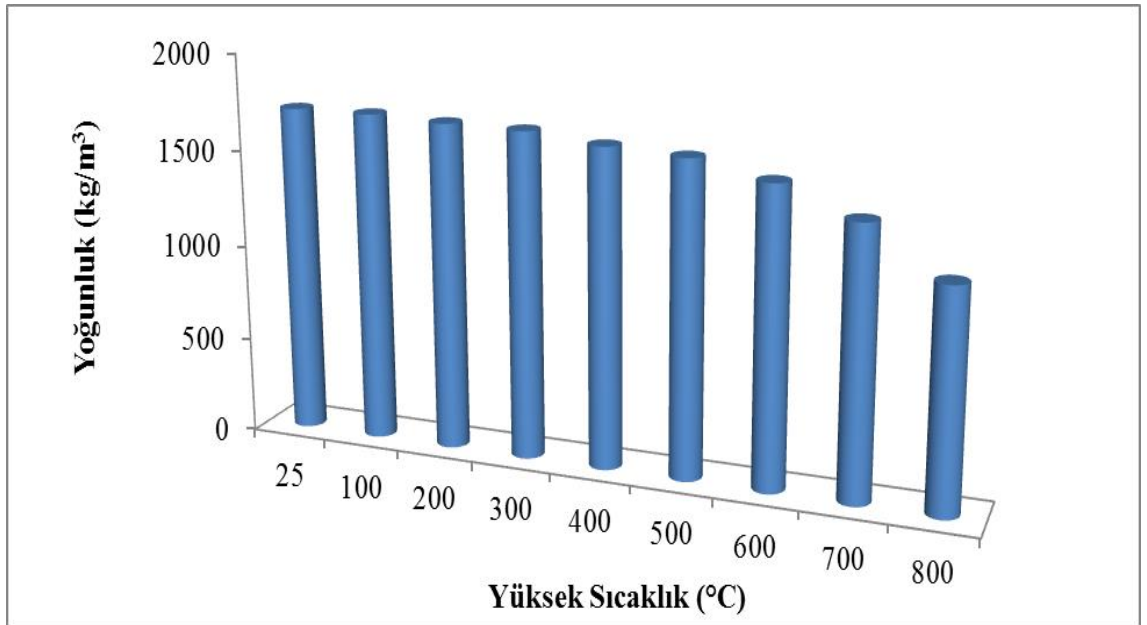
En mukavemetli karışımın yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç mukavemeti ve yoğunlukları sırası ile Çizelge 4.19, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra geopolimerin mikro yapısındaki değişimler mikro yapı analizler bölümünde yani Bölüm 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.19. Yedinci karışımdan üretilen geopolimerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç mukavemeti ve yoğunluklardaki değişimi

Sıcaklık (°C)	Numune adı	Taze hamurun birim ağırlığı (kg/m ³)	Sertleşmiş hamurun birim ağırlığı (kg/m ³)	Basınç mukavemeti (MPa)
25°C	K	1707,30	1707,30	40,28
100°C	H100	1707,30	1707,30	39,84
200°C	H200	1707,30	1690,70	37,89
300°C	H300	1707,30	1684,00	36,90
400°C	H400	1707,30	1640,50	34,68
500°C	H500	1707,30	1617,30	34,52
600°C	H600	1707,30	1533,10	32,24
700°C	H700	1707,30	1385,60	27,79
800°C	H800	1707,30	1134,00	21,42



Şekil 4.34. Yedinci karışımdan üretilen geopolimerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç mukavemetindeki değişim



Şekil 4.35. Yedinci karışımdan üretilen geopolimerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra yoğunluklardaki değişim

4.8. Geopolimerlerin Mikro Yapı Analizlerinin Sonuçları

Bu çalışmada geopolimerlerin mikroyapı analizlerinde, bağlar arasındaki değişiklikler FTIR spektroskopisi ve SEM fotoğraflarıyla incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri iki bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde dokuz karışımın FTIR spektroskopisi ve mikro yapısı, ikinci bölümde ise en yüksek mukavemetli geopolimer karışımının yani yedinci karışımın, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki mikro yapı analizleri incelenmiştir.

4.8.1. Kızılötesi spektroskopisi

Son yıllarda bazı alumino-silikat malzemelerin üzerinde kızılötesi spektroskopisi analizleri yapılmıştır. (Davidovits 2011). Bu çalışmaların sonucunda bazı alumino-silikat malzemelerin içerdiği ve bağların titreşim frekansları yaklaşık olarak bulunmuştur ve Çizelge 4.20'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. Alumino-silikat malzemelerin içerdiği bağların titreşim frekansları

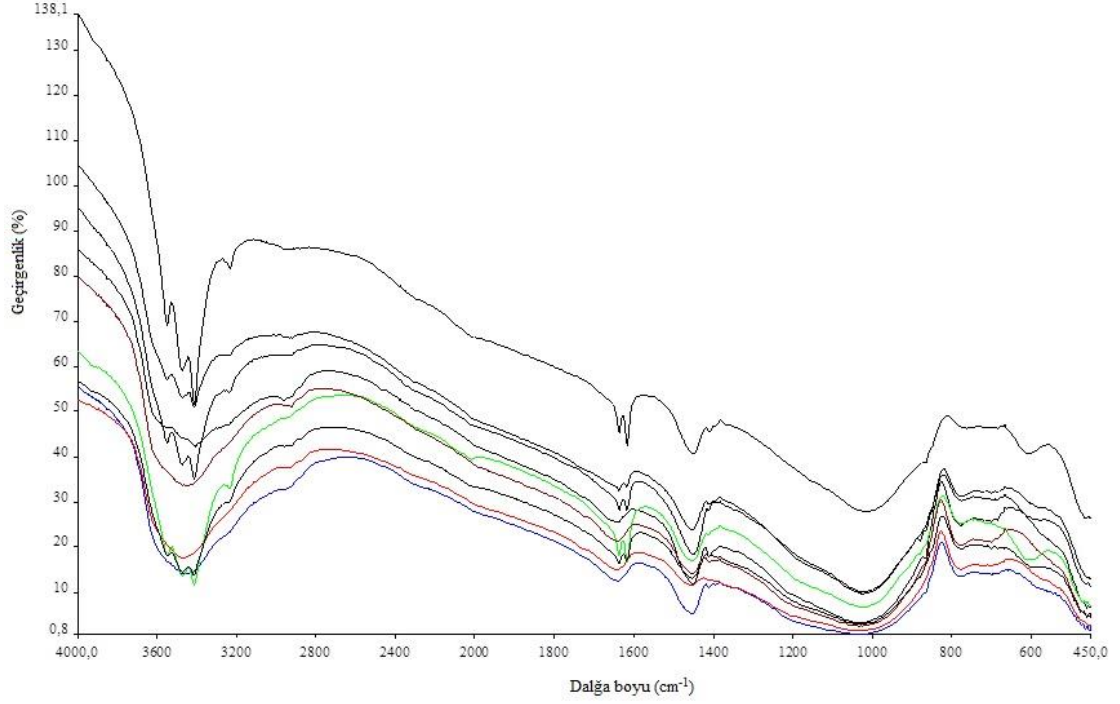
Bağ	Dalga boyu (cm^{-1})
Si-O	1080-1100 cm^{-1} (<i>symmetrical vibration</i>)
Si(Al)-O	1008 cm^{-1} (<i>asymmetrical vibration</i>)
Al-OH	914 cm^{-1} (<i>6 coordinated Al-OH stretching vibration</i>)
Si-OH	840 cm^{-1} (<i>bending vibration</i>)
Al-O	798 cm^{-1} (<i>6 coordinated Al-O stretching vibration</i>)
Si-O	694 cm^{-1} (<i>symmetrical stretching vibration</i>)
Si-O-Al	540 cm^{-1} (<i>bending vibration</i>)
Si-O	469 cm^{-1} (<i>in plane bending vibration</i>)

4.8.1.a. Üretilen dokuz pomza esaslı geopolimer karışımlarının kızılötesi spektroskopisi sonuçları

Üretilen dokuz pomza esaslı geopolimer karışımları 90 günlük iken kızılötesi spektroskopisi deneyler ile incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Bu sonuçların çukur noktaları Çizelge 4.21'de gösterilmiştir. Bu sonuçları Şekil 4.2'deki pomzanın FTIR analiziyle karşılaştırırsak her dokuz karışımda 1450cm^{-1} civarındaki çukur değerinin kayıp olduğu görülmektedir. Ayrıca yan bağların oluşması sırasında emilen ışınların miktarı geçirgenlik (%T) olarak görülebilir ve bu yan bağların ne olduğu tam olarak bilinmese de mukavemetlerin değişmesine neden oldukları belirtilmektedir.

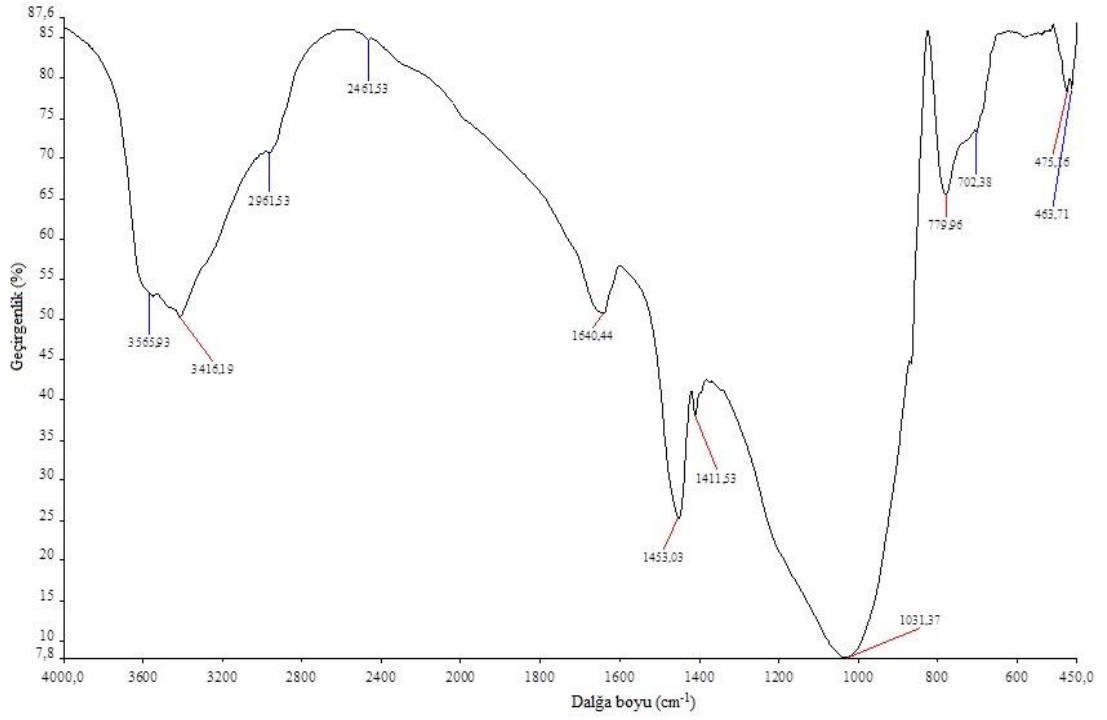
Çizelge 4.21. Hasankale pomzası ve Hasankale pomzasından üretilen geopolimerlerin içerdiği bağların dalga boyutları

Karışım	Birinci çukur (Cm^{-1})	İkinci çukur (Cm^{-1})	Üçüncü çukur (Cm^{-1})	Dördüncü çukur (Cm^{-1})	Beşinci çukur (Cm^{-1})	Altıncı çukur (Cm^{-1})	Basınç mukavemeti (MPa)
1	475,6	779,96	1031,37	1453,03	1640,44	3565,93	8,68
2	467,22	780,50	1024,10	1455,49	1638,45	3554,94	14,32
3	473,92	780,85	1024,26	1452,70	1637,97	3555,96	24,08
4	450,00	776,46	1026,10	1455,16	1638,30	3549,45	18,78
5	478,89	773,02	1023,63	1453,41	1637,67	3551,82	29,16
6	482,56	781,50	1032,38	1454,88	1646,04	3473,08	10,60
7	475,00	784,10	1031,52	1455,80	1638,05	3472,52	40,28
8	484,37	779,76	1031,33	1456,10	1646,03	3471,11	9,55
9	475,00	783,28	1032,83	1456,27	1641,71	3471,50	17,98
Pomza	466,67	779,47	1041,00	-	1638,22	3486,58	-

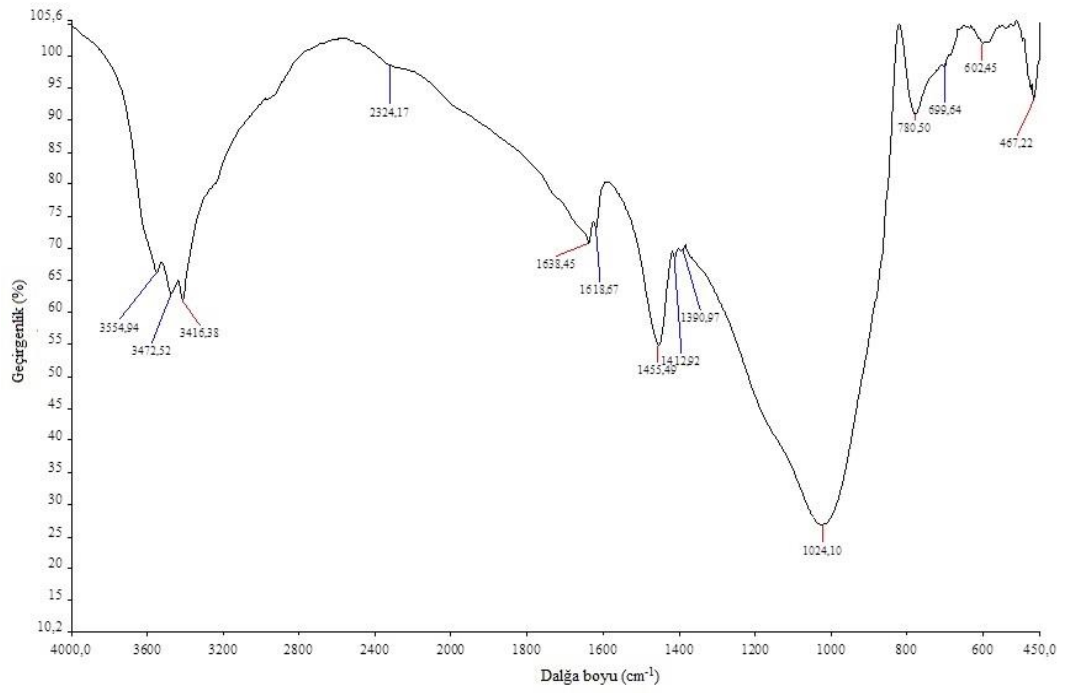


Şekil 4.36. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen dokuz karışımın FTIR sonucularının karşılaştırılması

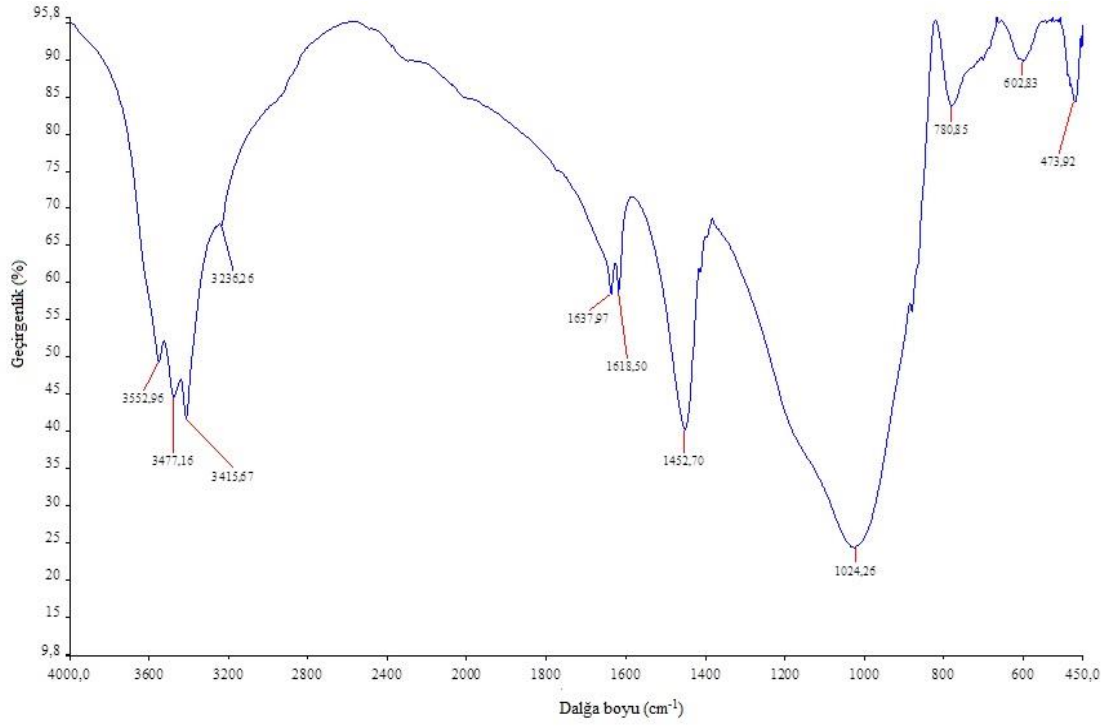
Şekil 4.36'da yukarıdan aşağıya elde edilen sonuçlar sıra ile 5, 4, 3, 1, 6, 7, 4, 9 ve 8 karışımlara aittir. Bu karışımların mukavemetleri 29,16 - 14,32 - 24,08 - 8,68 - 10,6 - 40,2 - 18,78 - 17,98 ve 9,55 MPa olmuştur. Spektrumların hepsi bir arada olduğunda bazı çukur noktalar ve spektrumun incelikleri görülmediği için Şekil 4.37'den Şekil 4.45'e kadar her dokuz karışımın kızılötesi analiz sonuçları tek tek ve 90 günlük yaşlarında gösterilmiştir.



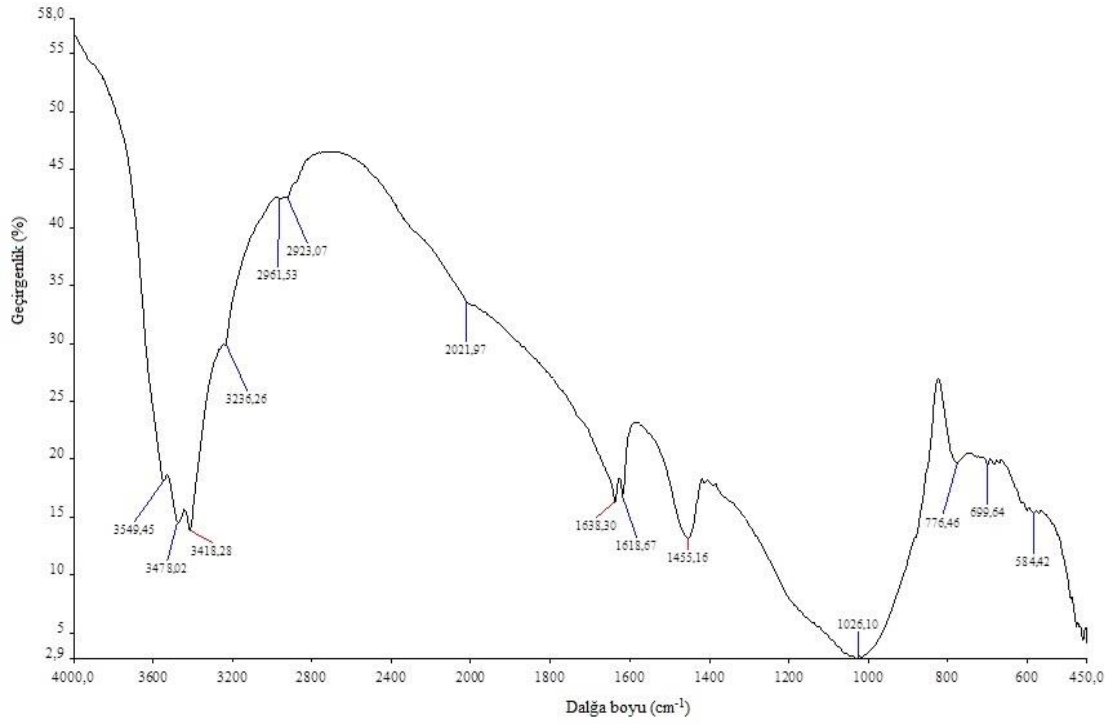
Şekil 4.37. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen birinci karışımın FTIR sonucu



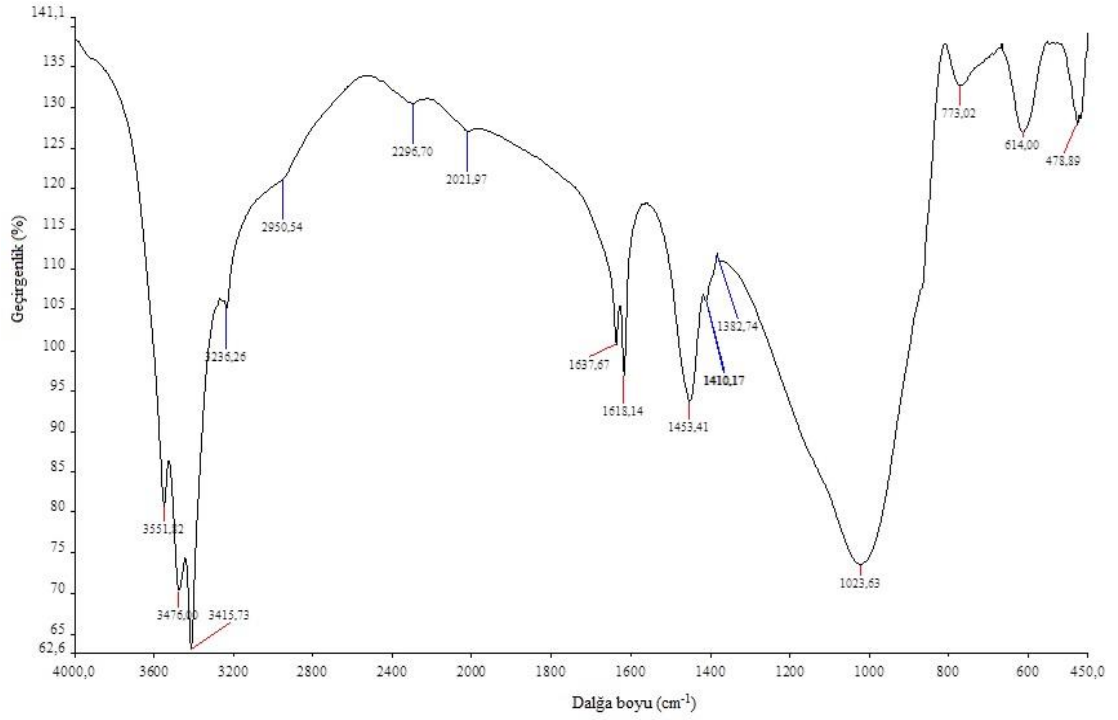
Şekil 4.38. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen ikinci karışımın FTIR sonucu



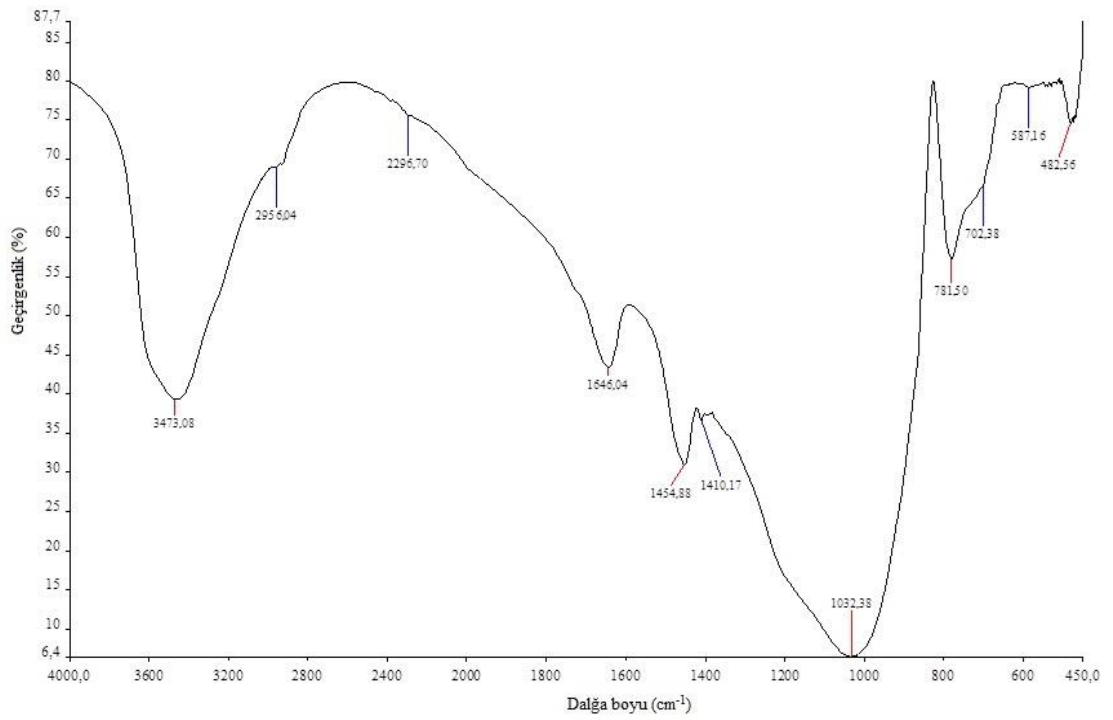
Şekil 4.39. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen üçüncü karışımın FTIR sonucu



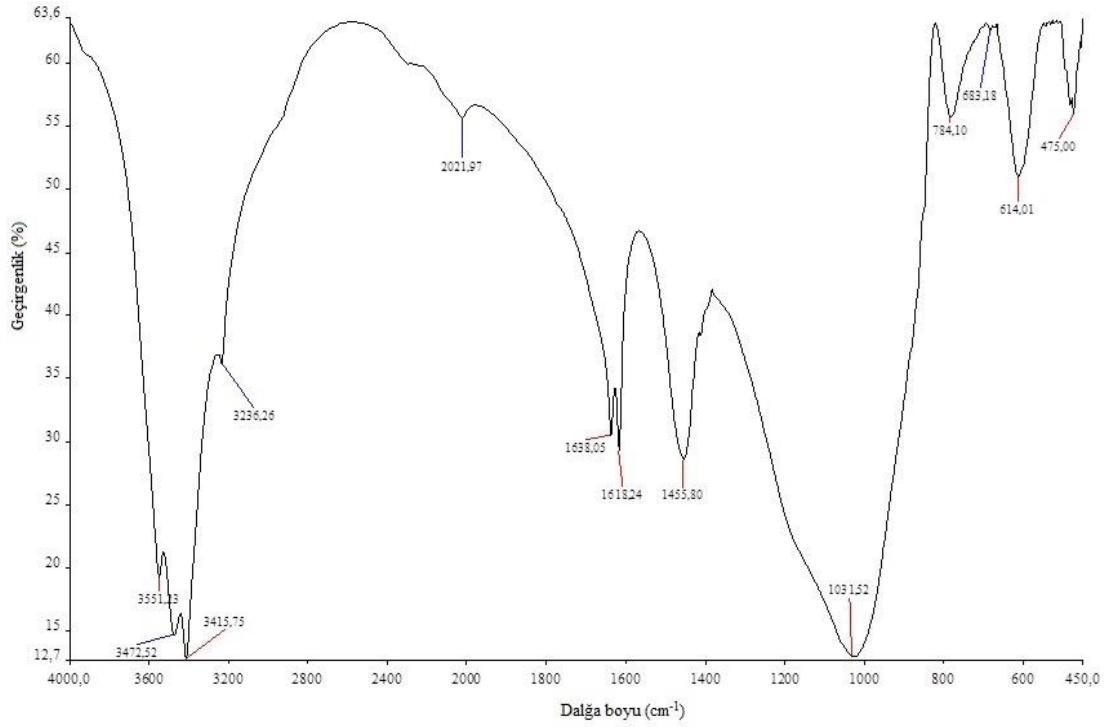
Şekil 4.40. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen dördüncü karışımın FTIR sonucu



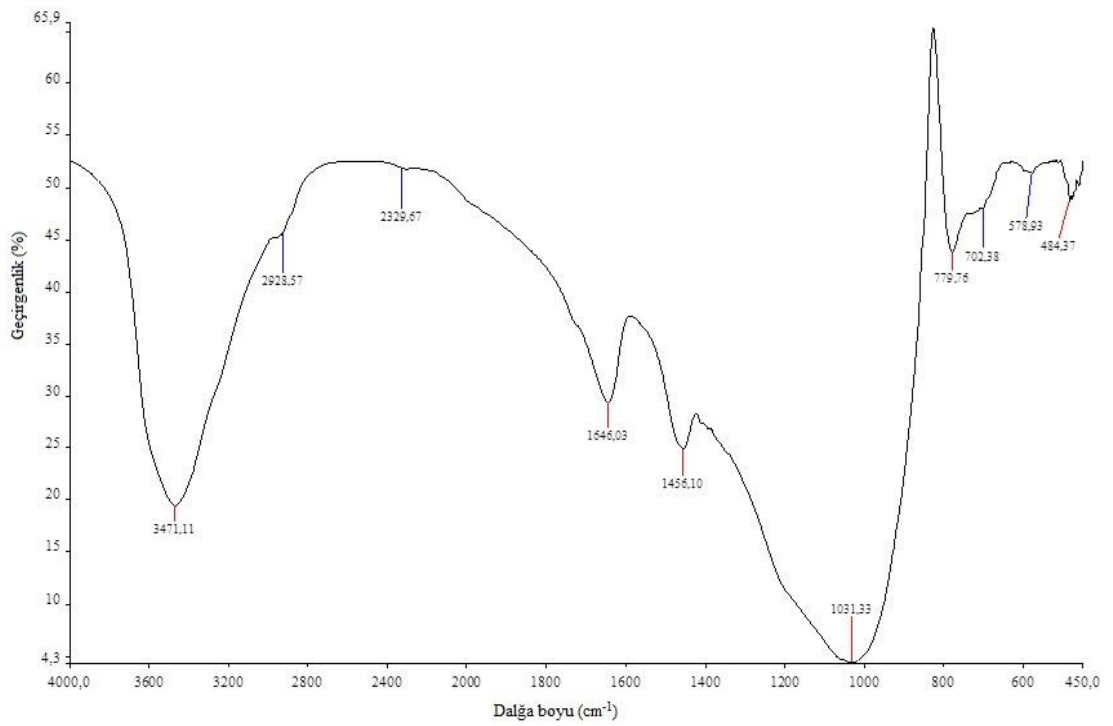
Şekil 4.41. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen beşinci karışımın FTIR sonucu



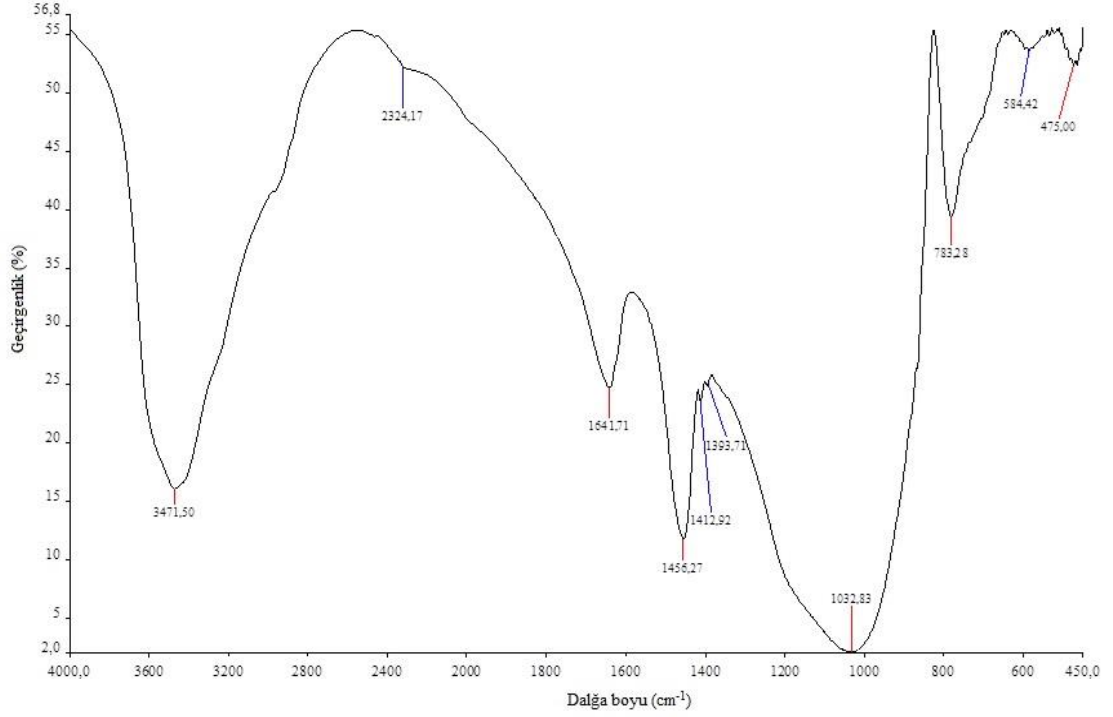
Şekil 4.42. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen altıncı karışımın FTIR sonucu



Şekil 4.43. Öğütölmüş Hasankale pomzısından üretilen yedinci karışımın FTIR sonucu

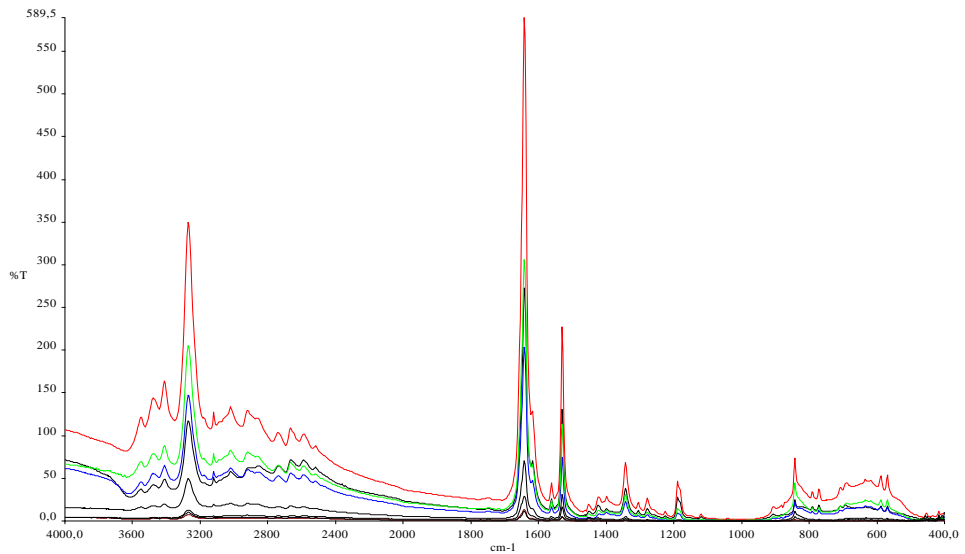


Şekil 4.44. Öğütölmüş Hasankale pomzısından üretilen sekizinci karışımın FTIR sonucu



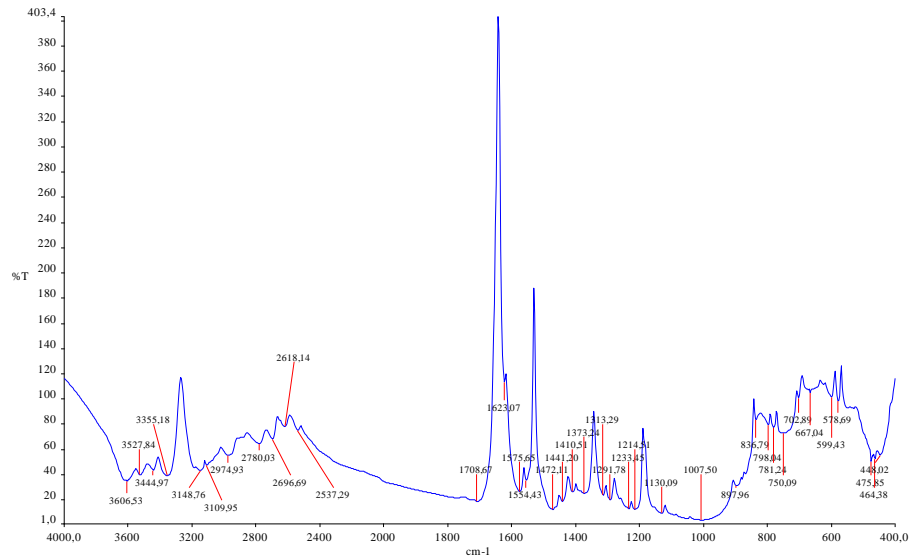
Şekil 4.45. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen dokuzuncu karışımın FTIR sonucu

4.8.1.b. En mukavemetli karışımın yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kızılötesi spektroskopi sonuçları

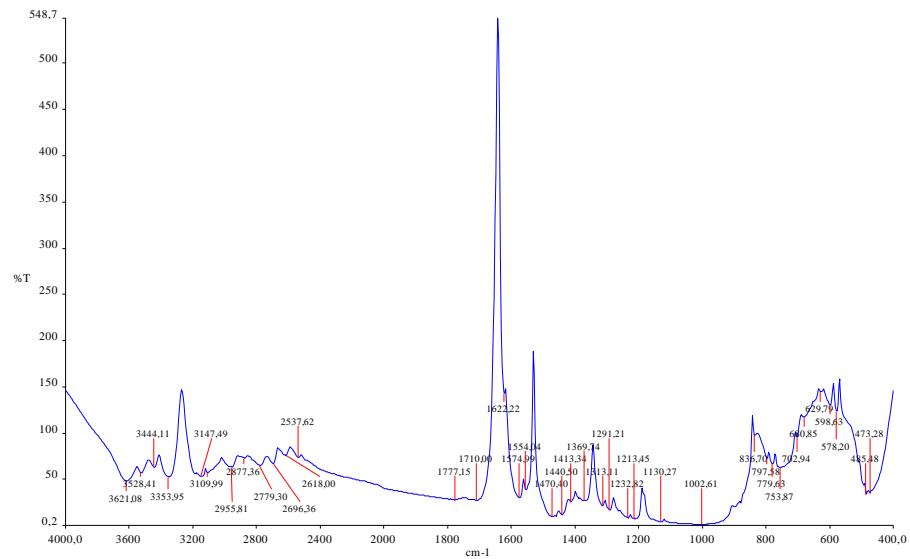


Şekil 4.46. En mukavemetli karışımların yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kızılötesi spektroskopi sonuçları

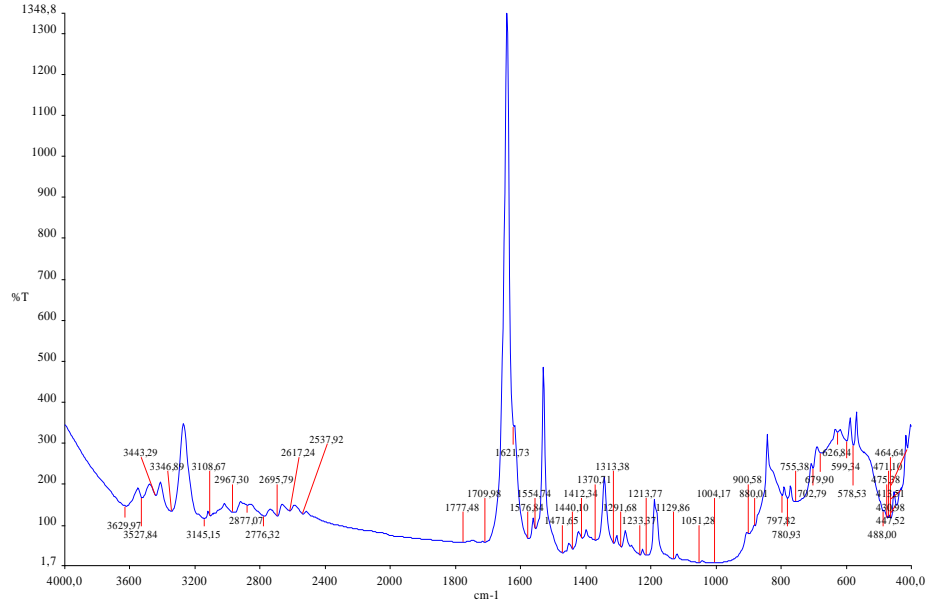
Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, spektrumların hepsi bir arada çizildiğinde bazı çukur noktalar ve spektrumun incelikleri görülmediği için Şekil 4.47'den Şekil 4.54'e kadar 8 farklı sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kızılötesi analiz sonuçları tek tek gösterilmiştir.



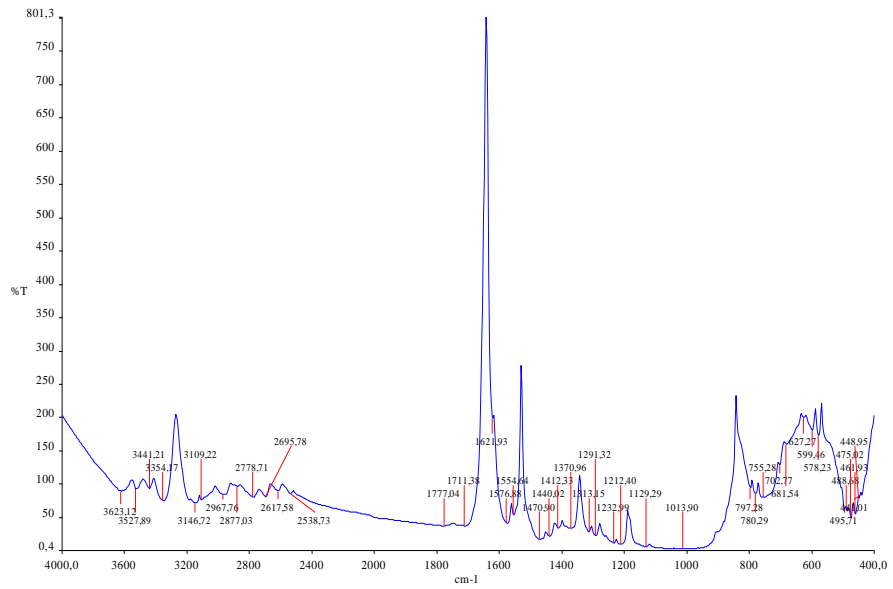
Şekil 4.47. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 100°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu



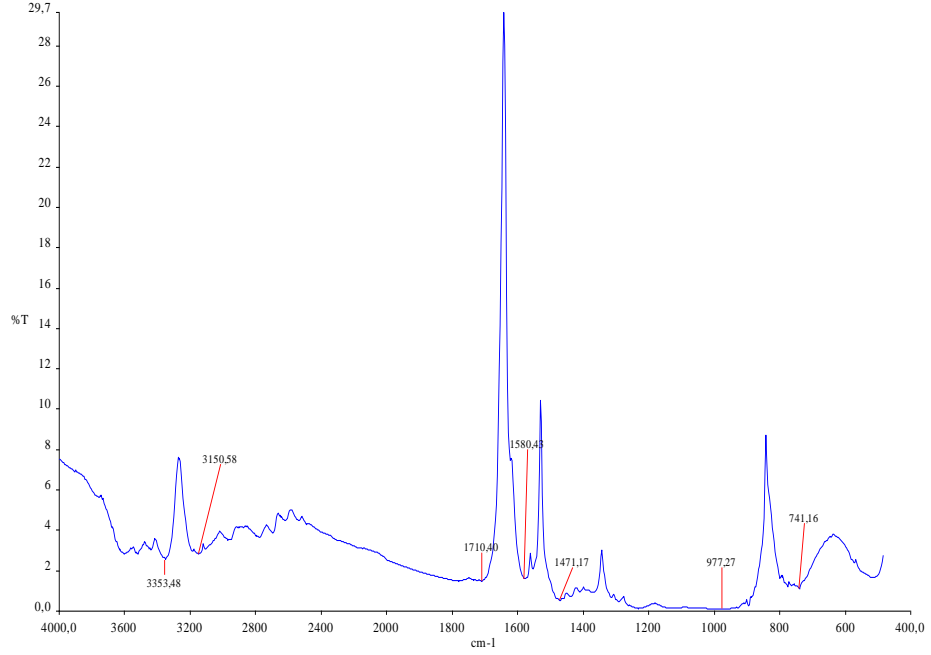
Şekil 4.48. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu



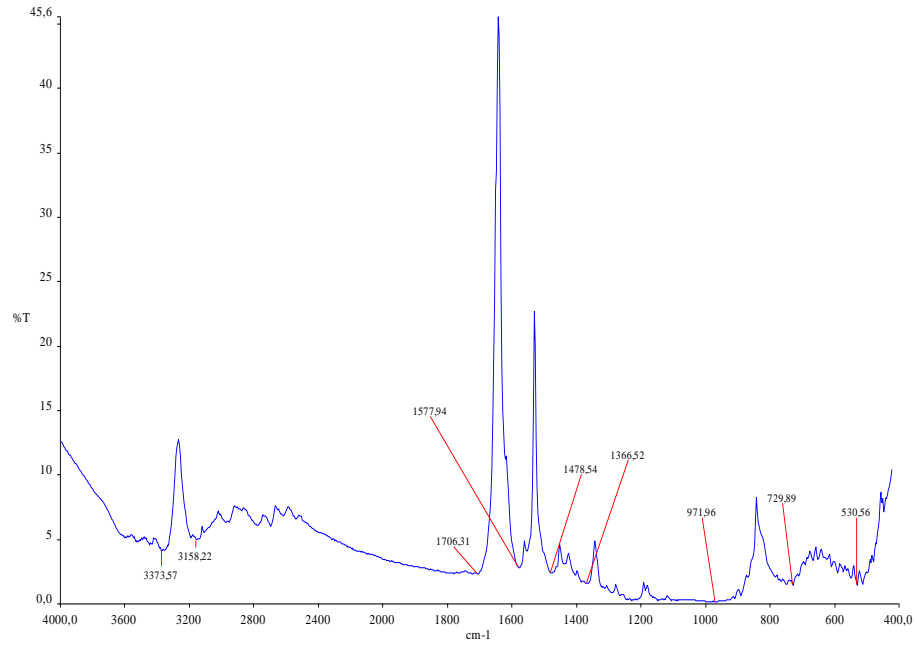
Şekil 4.49. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 300°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu



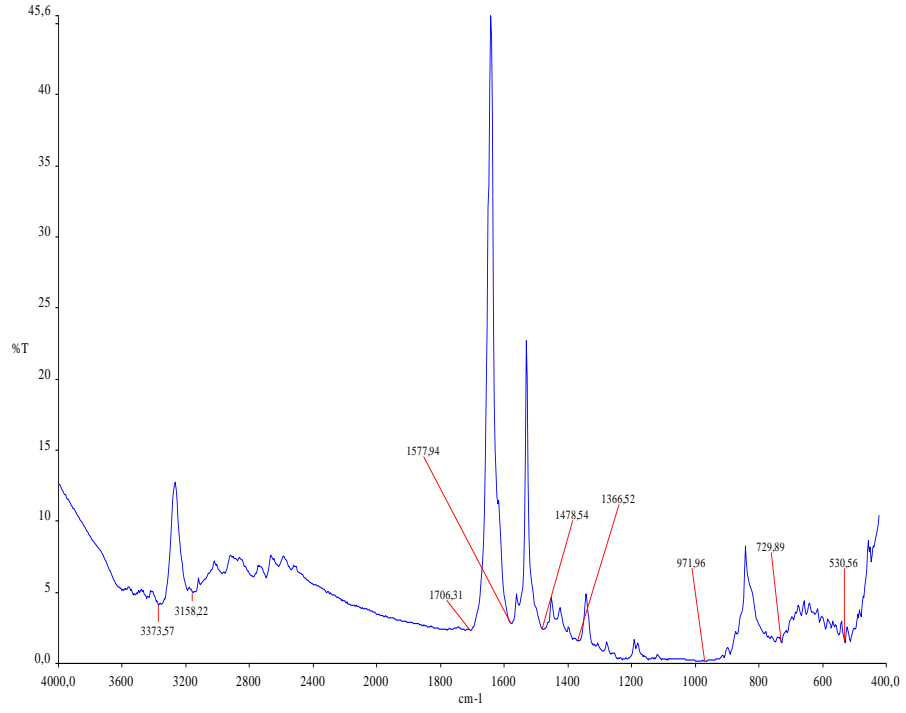
Şekil 4.50. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu



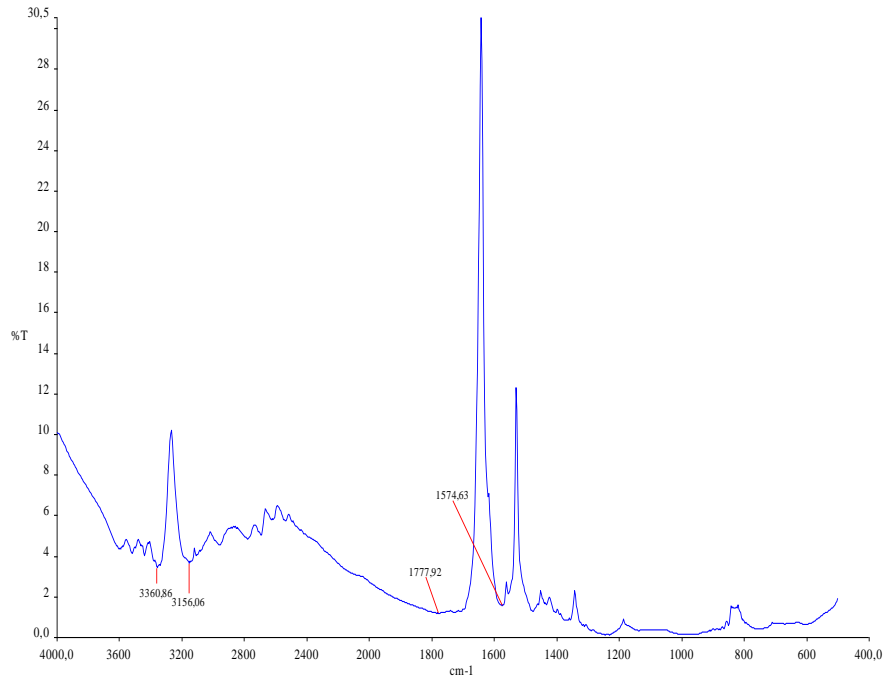
Şekil 4.51. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 500°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu



Şekil 4.52. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu



Şekil 4.53. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 700°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu

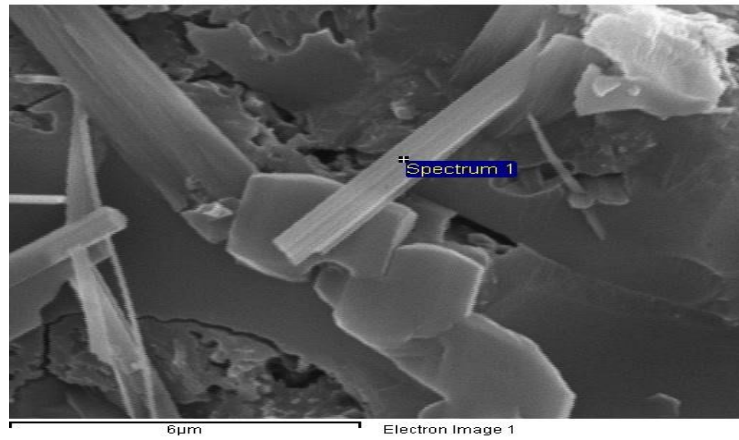


Şekil 4.54. Öğütülmüş Hasankale pomzasından üretilen yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra FTIR sonucu

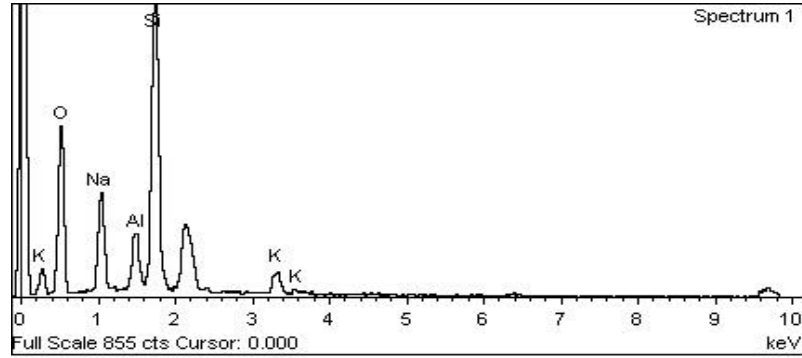
4.8.2. SEM görüntüleri yardımıyla geopolimerlerde mikro yapı analizlerinin değerlendirilmesi

a) Yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce

Bu kısımda SEM ile yapılan mikro yapı analizlerinde en mukavemetli hamur numuneden yani yedinci karışımdan, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan ve 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C yüksek sıcaklıklara 3 saat maruz kaldıktan sonra havada soğutulduktan sonra SEM-EDX görüntüleri alınmıştır. Deneyler 90 günlük numuneler üzerinde yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda geopolimerin yapısında oluşan değişiklikler SEM görüntülerinin yardımıyla aşağıdaki şekillerde incelenmiştir. SEM fotoğrafları üzerinde önemli görüldüğü bölgelerde numara verilerek bu bölgelerden EDX'ler alınmıştır ve bunlara ait bileşimler çizelge halinde aşağıda verilmiştir. Alkali çözeltinin Si/Na veya Si/K atomik oranları çözünen malzemenin polimerleşme derecesini büyük ölçüde etkilemektedir (Swaddle 2001; Komnitas and Zaharaki 2007). Yedinci karışımdan önce Si/Al ve Si/Na atomik oranları birinci spektrumda 5,24 ve 1,81, ikinci spektrumda Si/Al ve Si/Na atomik oranları 6,27 ve 2,85 olarak hesaplanmıştır. Yedinci karışımın yüksek sıcaklığa maruz kalmadan seçilmiş birinci noktada spektrum özellikleri Çizelge 4.22, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'de gösterilmiştir.



Şekil 4.55. Yedinci karışımda yüksek sıcaklıktan önce oluşan geopolimer (N-A-S-H jeli)

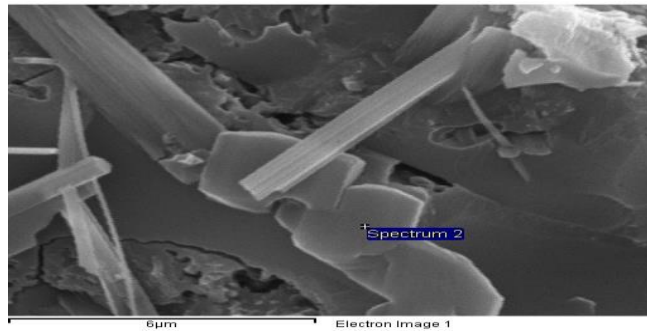


Şekil 4.56. Yedinci karışımda yüksek sıcaklıktan önce birinci spektrumda EDX sonuçları

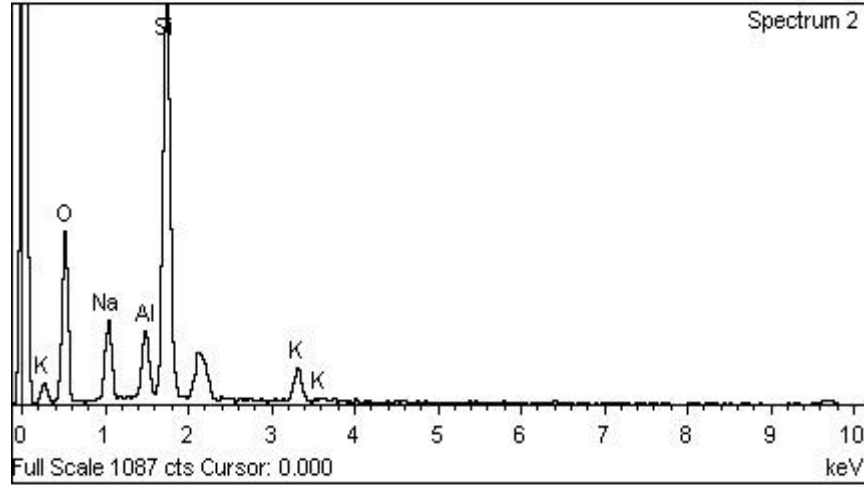
Çizelge 4.22. Yedinci karışımda yüksek sıcaklıktan önce birinci spektrumda EDX sonuçları

Simge	Ağırlık (%)	Atomik (%)
O	50,31	63,03
Na	12,80	11,16
Al	5,20	3,86
Si	28,39	20,26
K	3,29	1,69
Toplam	100,00	

Yedinci karışımın yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce seçilmiş ikinci noktada spektrum özellikleri Çizelge 4.23 ve Şekil 4.57 ve 4.58’da gösterilmiştir.



Şekil 4.57. Yedinci karışımda yüksek sıcaklıktan önce oluşan geopolimer (N-A-S-H jeli)

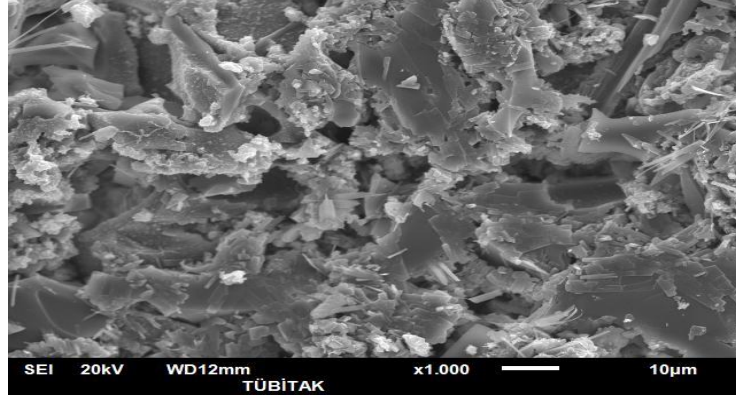


Şekil 4.58. Yedinci karışımdan yüksek sıcaklıktan önce ikinci spektrumda EDX sonuçları

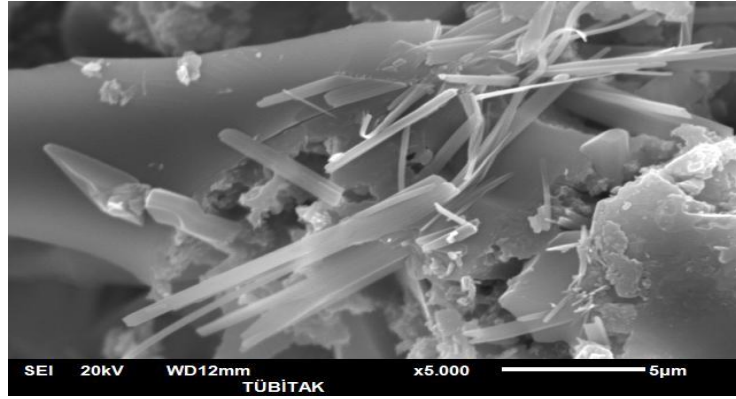
Çizelge 4.23. yedinci karışımda yüksek sıcaklıktan önce ikinci spektrumda EDX sonuçları

Simge	Ağırlık (%)	Atomik (%)
O	48,38	61,65
Na	9,51	8,43
Al	5,08	3,83
Si	33,13	24,05
K	3,90	2,03
Toplam	100,00	

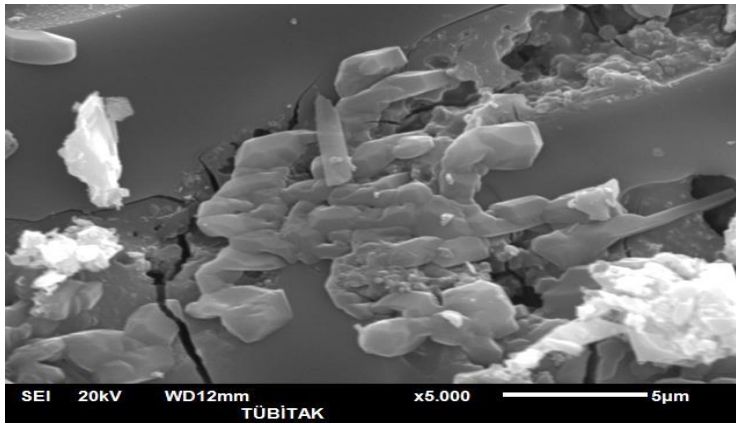
Şekil 4.59’da yedinci karışıma ait olan 1000 kat büyütülmüş görüntü gösterilmiştir. Bu alan 5000 kat büyütüldüğünde Şekil 4.60’de görüldüğü gibi tüketilmemiş kalın ve ince sodyum kristallerin, üretilmiş ara ürün ve N-A-S-H jeli görmek mümkündür. Bunun muhtemel nedeni NaOH çözeltisinin fazla kullanılması, numunenin tam karışmamış olması ve bu noktada reaksiyonlardan dolayı hızlı su kaybı olabilir.



Şekil 4.59. Yedinci karışımın 1000 kat büyütülmüş mikroyapısı

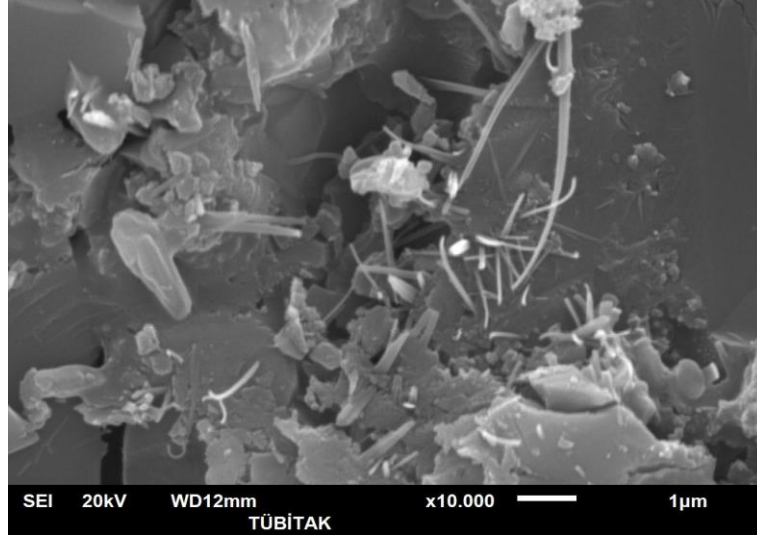


Şekil 4.60. Kalın ve ince sodyum kristalleri ve kısmen geopolimerleşmiş pomza

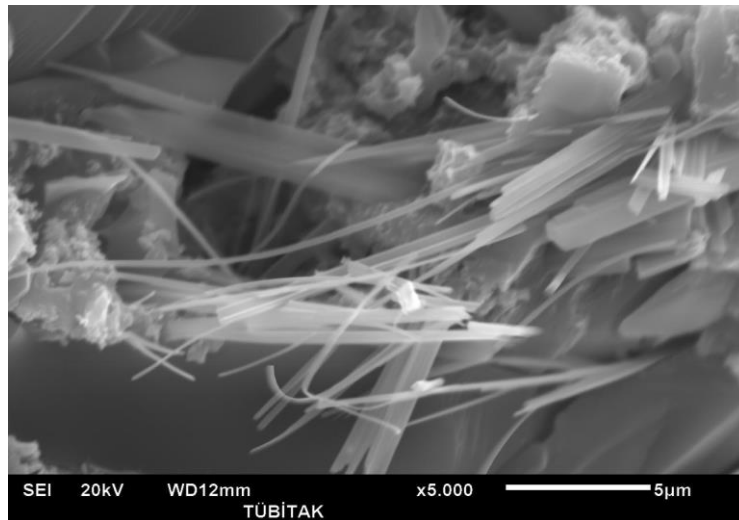


Şekil 4.61. Geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün, N-A-S-H jeli ve kenarındaki oluşan çatlaklar

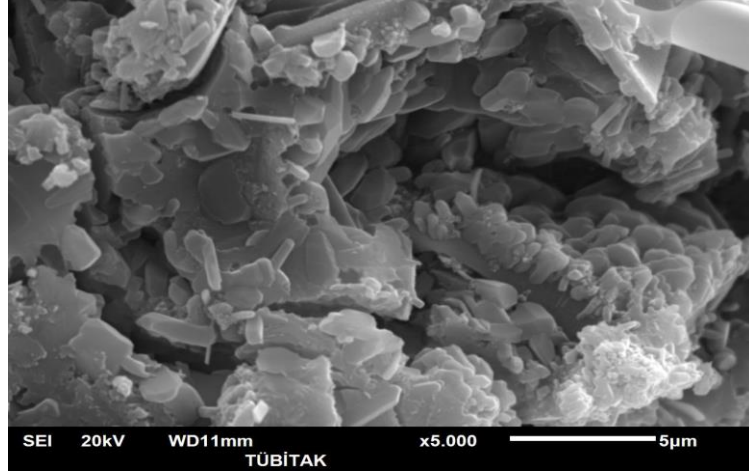
Şekil 4.61’de numunede oluşan çatlaklar ve geopolimerleşmede üretilen ara ürün ve NA-S-H jeli görülmektedir. Bu noktada çekilmiş SEM görüntüsünde kullanılmamış sodyum kristalleri yoktur.



Şekil 4.62. Kısmen geopolimerleşen pomza ve reaksiyona girmeyen sodyum kristalleri



Şekil 4.63. Kalın ve ince sodyum kristalleri



Şekil 4.64. Geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün

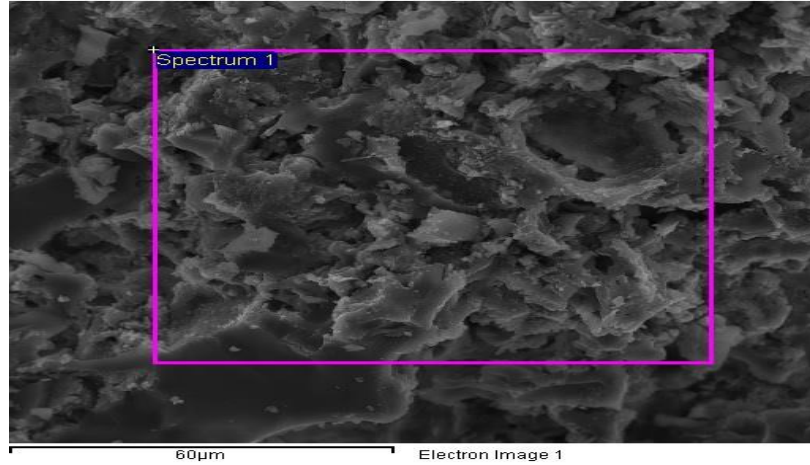
Şekil 4.62 ve Şekil 4.63’de kısmen reaksiyona girmiş pomza üzerinde bir miktar sodyum kristalleri görülmektedir. Literatüre göre bu mikro yapının nedeni sodyum kristallerinin yetersiz çözünmesi ve geopolimerleşme reaksiyonlarının ilerlemesi için yeterli amorf silika olmamasıdır (Xie and Xi 2001; Toprak 2011). Şekil 4.64’de oluşan geopolimer jel yapısı ve birbirine bağlanmış geopolimerleşmiş pomza taneleri Şekil 4.62’de oldukça farklı bir mikro yapı göstermektedir ve sodyum kristallerinin yaklaşık hepsi geopolimerleşme reaksiyonlarında tüketilmiştir.

Literatürde Si/Na atomik oranı 2’ye ulaştığında geopolimerleşme reaksiyonu geopolimerlerin anayapısı olan N-A-S-H jeli oluşmadan tamamlandığı, bundan dolayı geopolimerleşme reaksiyonlarının orta seviyede kaldığı belirtilmektedir (Provis and Van Deventer 2007). Şekil 4.64’de gösterilen bölgede sodyum kristallerinin tamamen kullanıldığı görülmektedir. Bizim numunede alınan spektrumlar 1 ve 2. noktalarda Si/Na oranları 1,81 ve 2,85 olmuştur. Bu şekillerde boşluklu yapı göze çarpmıyor ve bu suyun yeterli miktarda olmasından kaynaklanmaktadır ve hatta reaksiyon zamanı suyun buharlaşmamasına bir nedendir. Zaten numuneler üretildikten sonra 48 saat etüvde izole kalmıştır. Normalde geopolimerleşme reaksiyonlarında amorf silis miktarının yeterli olmamasından veya sıcaklıkta kür uygulamalarının geopolimer içindeki suyun erken buharlaşmasından dolayı sodyum kristallerinin tüketilmemesine neden olabilmektedir.

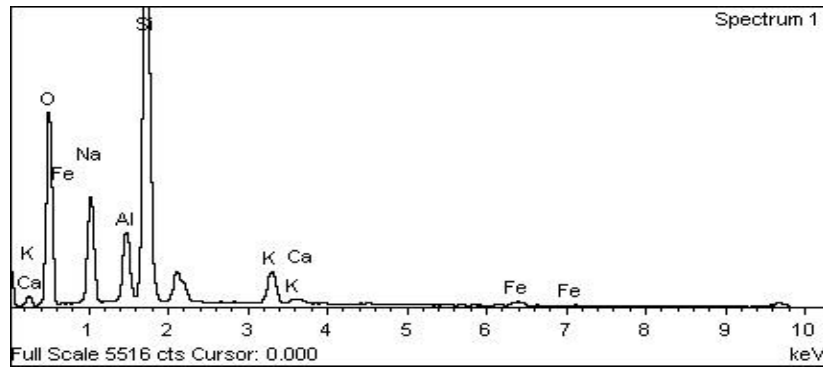
Bu durumda geopolimerlerin dayanımı azalmaktadır (Toprak 2011). Yedinci karışımımızda bu sıkıntılar görülmemektedir.

b) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra

Yedinci karışımından üretilen numunelerin yüksek sıcaklıktaki davranışlarının açıklanması için numuneler 4 farklı sıcaklıkta (200°C, 400°C, 600°C ve 800°C) 3 saat bekletildikten sonra SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.65’de numunelerin 3 saat 200°C sıcaklıkta kaldıktan sonraki SEM ve EDX sonuçları gösterilmiştir. Bu şekilde ara ürünlerin üretilmesini görmek mümkündür.



Şekil 4.65. Yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı



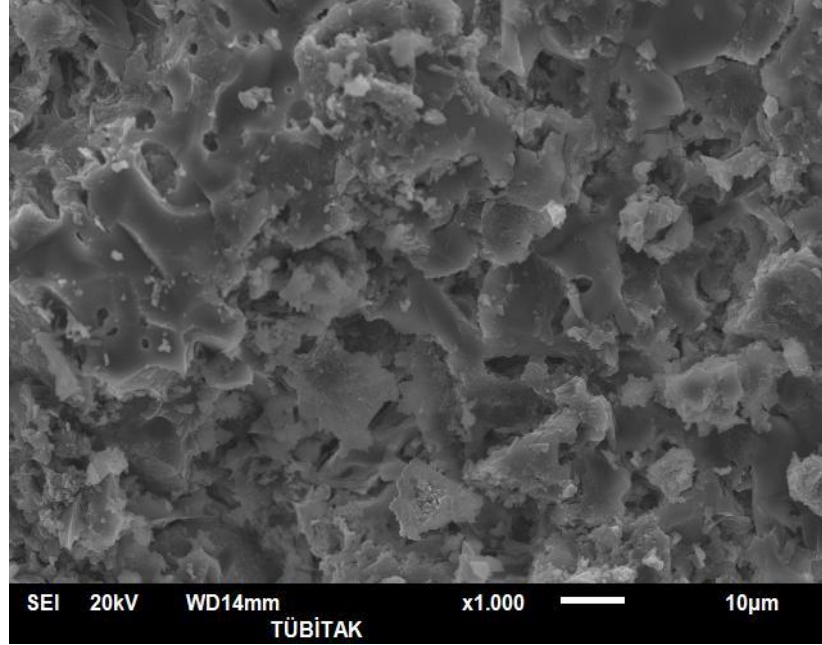
Şekil 4.66. Yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

Çizelge 4.24 Yedinci karışımın 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

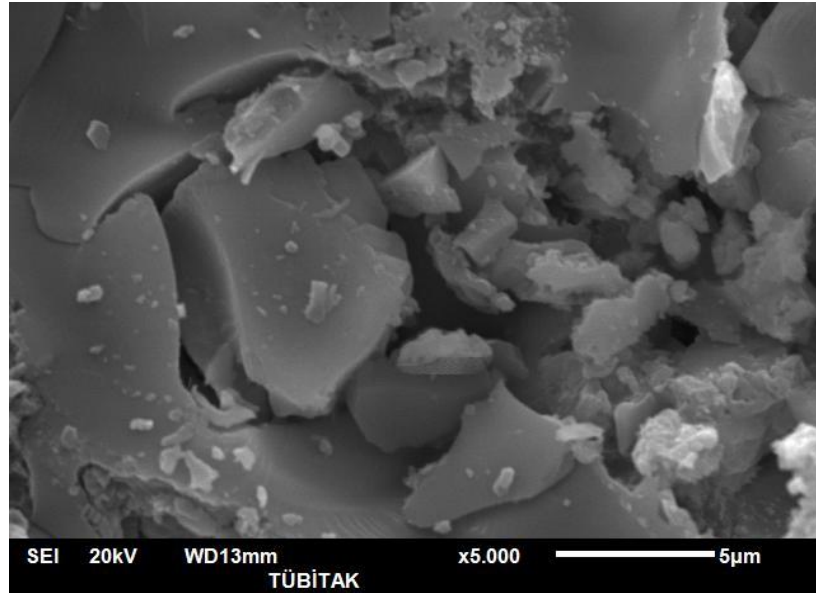
Simge	Ağırlık (%)	Atomik (%)
O	48,40	61,78
Na	11,92	10,59
Al	5,03	3,81
Si	28,98	21,07
K	3,80	1,99
Ca	0,51	0,26
Fe	1,35	0,49
Toplam	100	

Şekil 4.65’de gösterilen spektrum alanından EDX testi alınmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.24 ve Şekil 4.66’da gösterilmiştir. Bu noktada çekilmiş EDX sonuçlarına göre Si/Na oranı bu üretilen numunede 1,99 ve Si/Al=5,53 olmuştur. Literatüre göre bu oranın 2 olması tam geopolimer jeli yani N-A-S-H jelinin oluşmasına engel olur ve reaksiyonların ara ürün üretilmesinde tamamlanmasına neden olur (Provis and Van Deventer 2007).

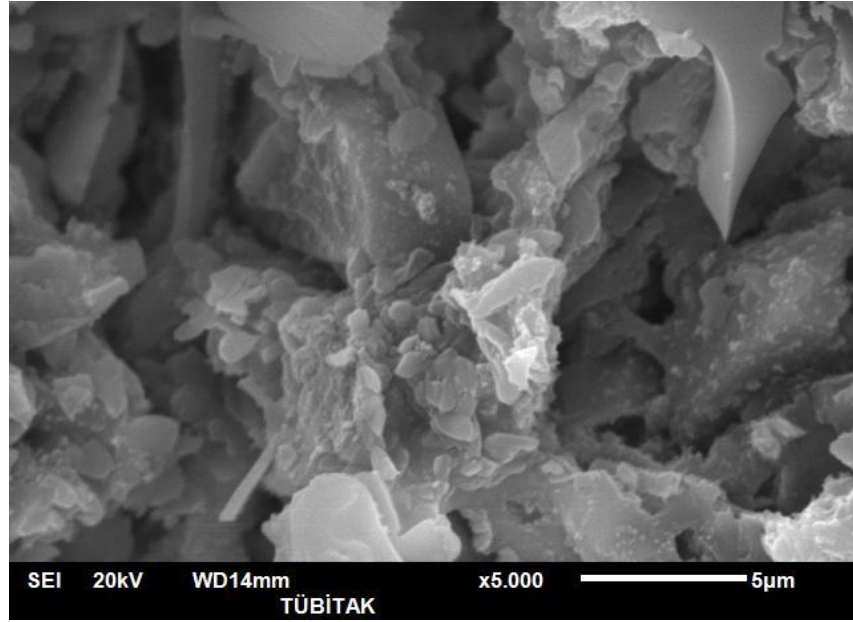
Bu noktada çekilmiş EDX ve SEM görüntüleri bu noktada ara ürün malzemenin üretilmesini doğrulamıştır. Şekil 4.65 ve Şekil 4.71’de numuneler 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra farklı noktalarından SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.67’de 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü, Şekil 4.68’de ara ürün ve N-A-S-H jeli ve kenarlarındaki çatlaklar, Şekil 4.69’de sodyum kristallerin tamamıyla kullanılmasından üretilen ara ürün, Şekil 4.70 ve Şekil 4.71’de ara ürün ve N-A-S-H jelin görmek mümkündür. Si/Al oranının 5,53 olmasından dolayı daha yüksek mukavemete ulaşmak mümkün olmamıştır.



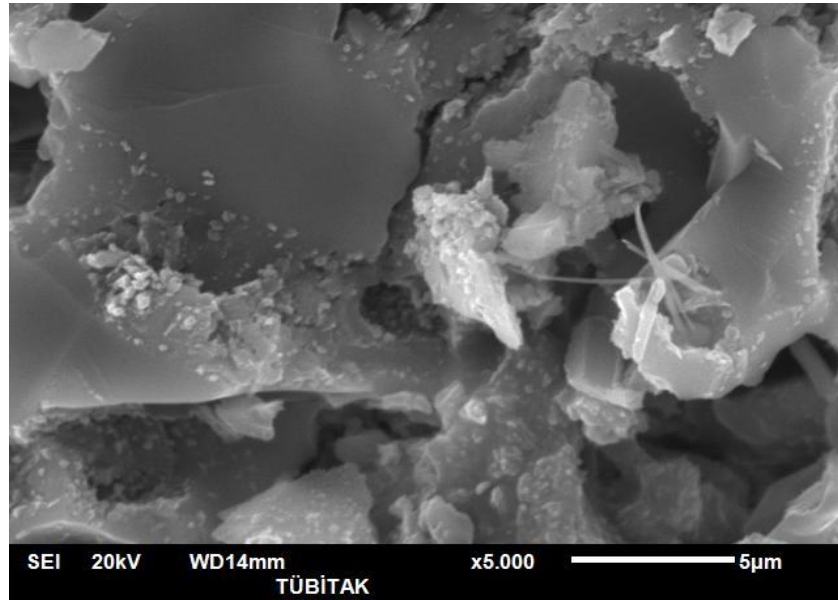
Şekil 4.67. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunenin mikro yapısı



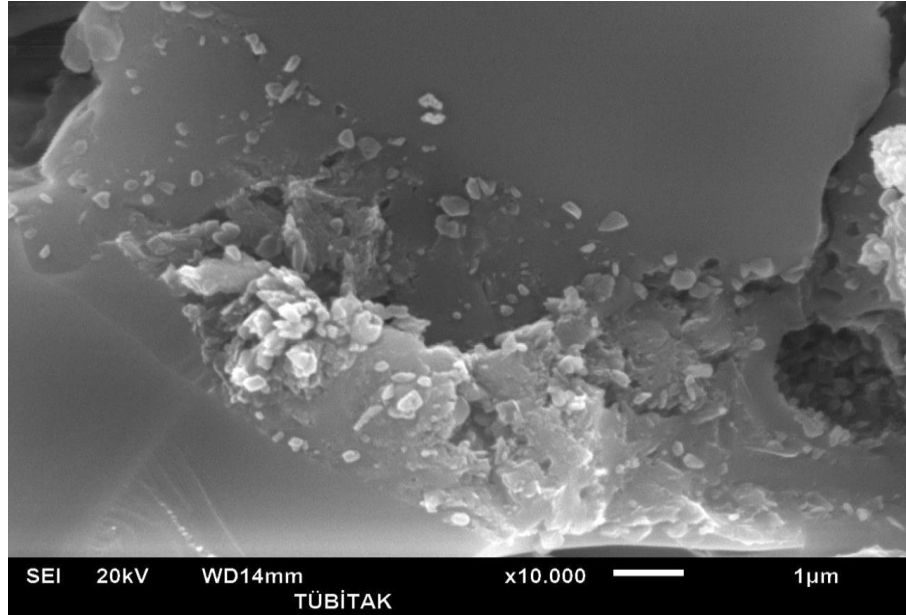
Şekil 4.68. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede ara ürün, Na-A-S-H jeli ve kenarındaki çatlaklar



Şekil 4.69. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün



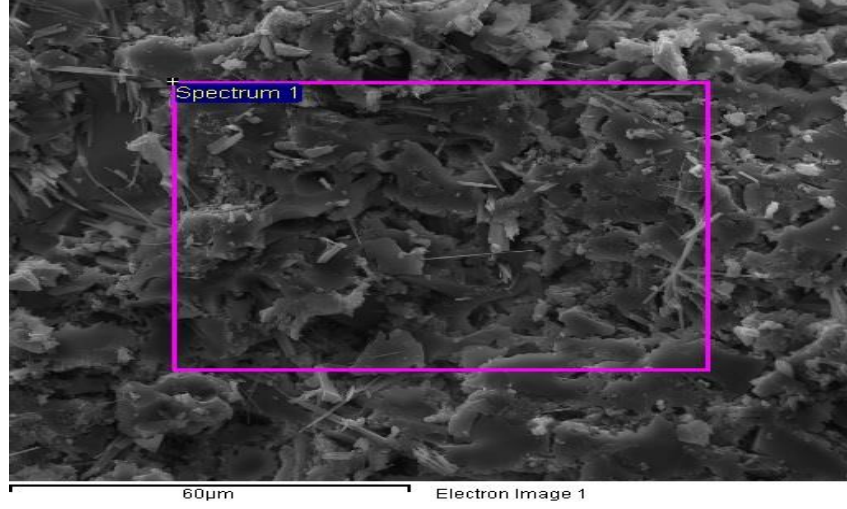
Şekil 4.70. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede geopolimerleşme



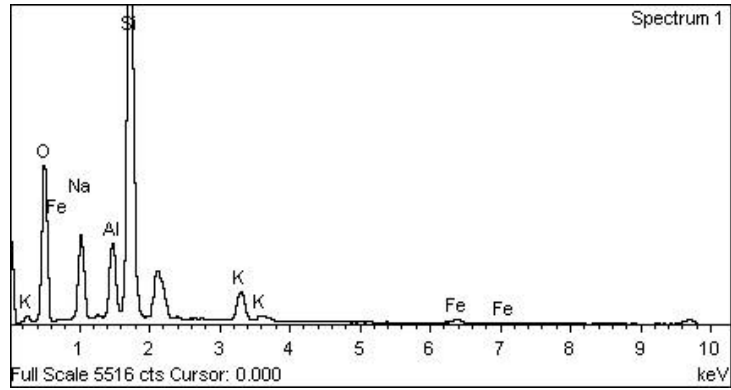
Şekil 4.71. 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunede geopolimerleşme reaksiyonlarını tamamlayan ara ürün ve Na-A-S-H jeli

Bu aşamada Şekil 4.72’de numunelerin 3 saat 400°C sıcaklıkta bekletildikten sonra SEM ve EDX sonuçları gösterilmiştir. Bu şekilden ara ürünlerin oluşumunu görmek mümkündür. Şekil 4.72 ve Şekil 4.74’de gösterilen spektrum alanlarından EDX testi alınmıştır ve sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.25, Şekil 4.73, Çizelge 4.26 ve Şekil 4.75’de gösterilmiştir. Birinci noktada çekilmiş EDX sonuçlarına göre Si/Na oranı bu üretilen numunede 2,69 ve Si/Al=5,61 ve ikinci spektrumda Si/Na oranı bu üretilen numunede 2,25 ve Si/Al=3,66 olmuştur.

Literatüre göre bu oranın 2 ve 2’den fazla olması tam geopolimer jeli yani N-A-S-H jelinin oluşmasına engel olur ve reaksiyonların ara ürün üretilmesinde tamamlanmasına neden olur (Provis and Van Deventer 2007). Aynen 200°C deki sonuçlara göre bu noktalarda çekilmiş EDX ve SEM görüntüleri ara ürün malzemenin üretilmesini doğrulanmıştır. Şekil 4.72, Şekil 4.73 ve Şekil 4.74’de numuneler 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra ara ürün oluşumu görülmektedir.



Şekil 4.72. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı

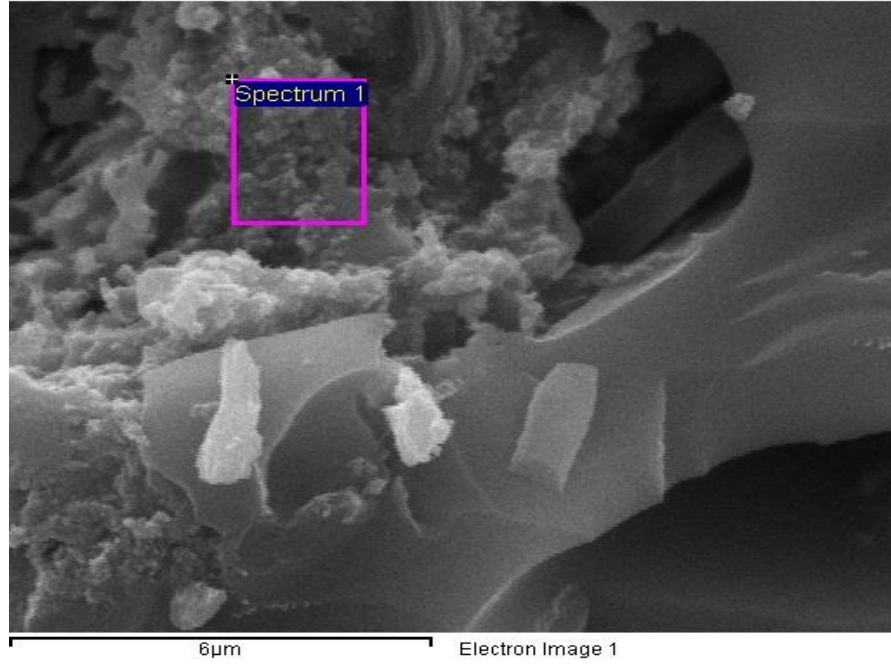


Şekil 4.73. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

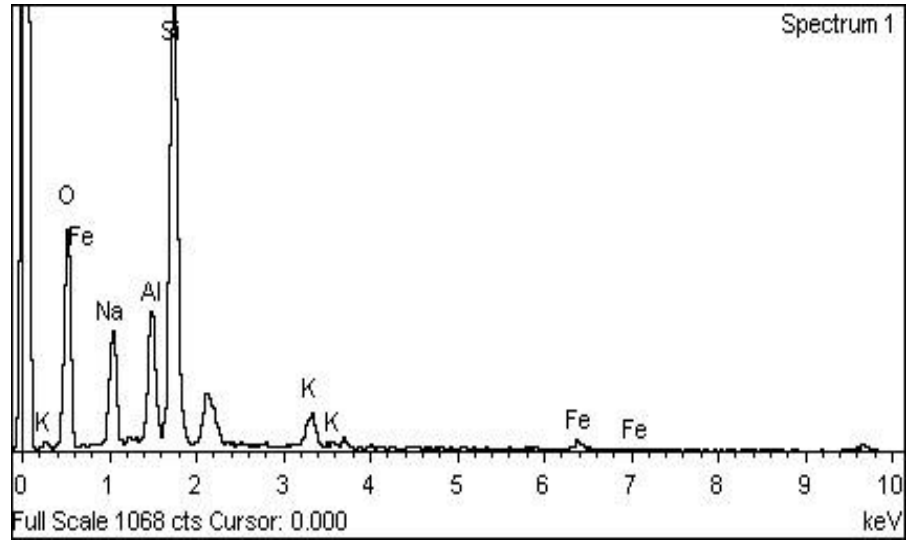
Çizelge 4.25. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

Simge	Ağırlık (%)	Atomik (%)
O	46,47	60,01
Na	10,03	9,01
Al	5,65	4,32
Si	32,99	24,27
K	3,72	1,96
Fe	1,15	0,42
Toplam	100	

Sonuçlara göre Si/Na miktarı bu üründe 2,69 ve Si/Al=5,61 olmuştur.



Şekil 4.74. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (ara ürün bölgesinden)

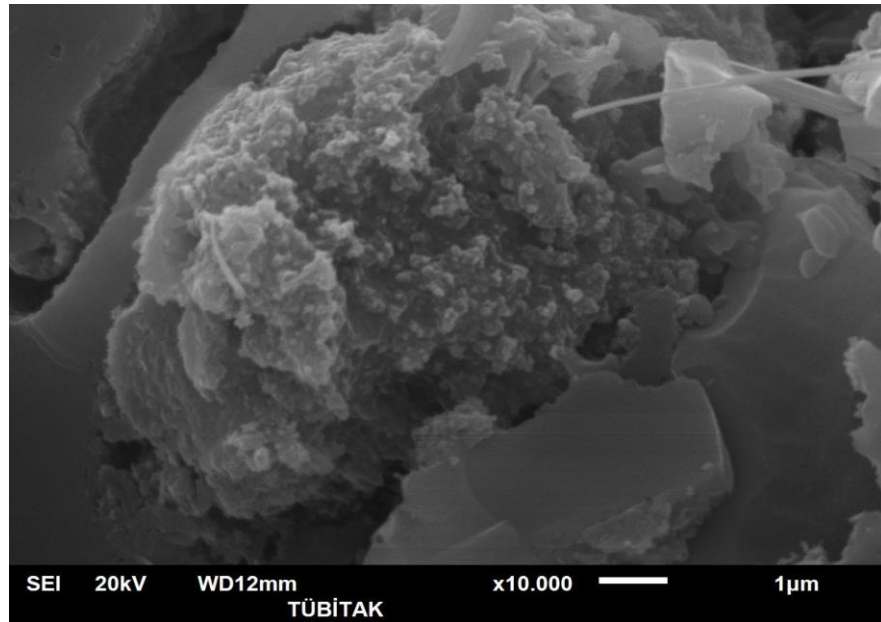


Şekil 4.75. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları (ara ürün bölgesinden)

Çizelge 4.26. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları (ara ürün bölgesinden)

Simge	Ağırlık (%)	Atomik (%)
O	46,73	60,24
Na	10,76	9,66
Al	7,80	5,96
Si	29,71	21,82
K	3,02	1,59
Fe	1,98	0,73
Toplam	100	

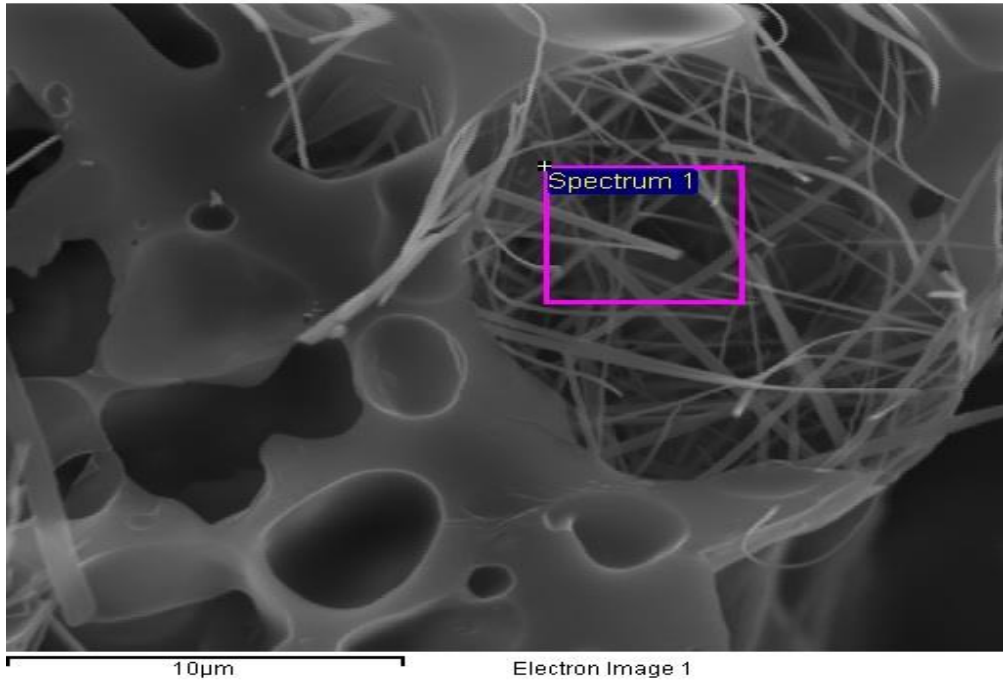
Sonuçlara göre Si/Na miktarı bu üründe 2,25 ve Si/Al=3,66 olmuştur.



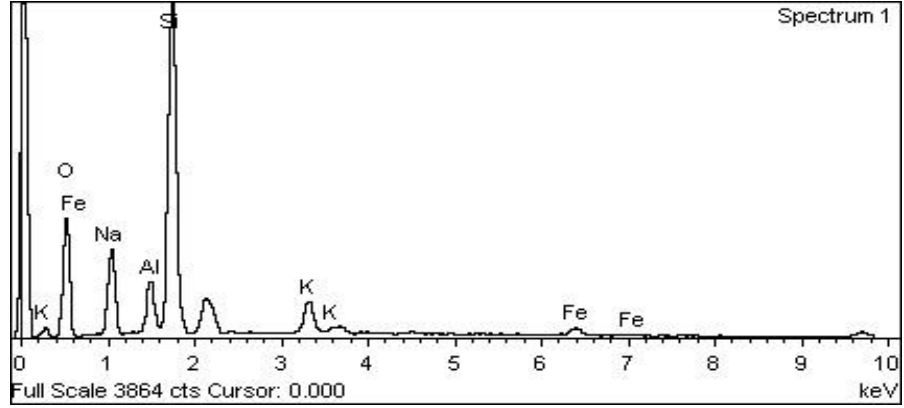
Şekil 4.76. Yedinci karışımın 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (ara ürün bölgesinden)

Şekil 4.77’de gösterilen spektrum alanından EDX testi alınmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.27 ve Şekil 4.78’de gösterilmiştir. Bu noktada çekilmiş EDX sonuçlarına göre Si/Na oranı bu üretilen numunede 2,25 ve Si/Al=6,78 olmuştur.

Literatüre göre bu oranın 2’den fazla olması tam geopolimer jeli yani N-A-S-H jelinin oluşmasına engel olur ve reaksiyonların ara ürün üretilmesinde tamamlanmasına neden olur (Provis and Van Deventer 2007). Bu noktada çekilmiş EDX ve SEM görüntüleri bu noktada ara ürün malzemenin üretilmesini doğrulanmıştır ama Şekil 4.79, Şekil 4.80 ve Şekil 4.82’de görüldüğü gibi sinterleşmeden dolayı viskoz bir sıvı gibi sertleşmiş amorf N-A-S-H jeli oluşmuştur. Bunun yanısıra gaz çıkışından dolayı Şekil 4.81’de görüldüğü gibi etrafında çatlaklar oluşmadan gözeneklerin sayısı ve hacimleri artmıştır ve geopolimerlerin hafifleşmesini sağlamıştır. Önceki bölümde görüldüğü gibi bu durum geopolimerlerin basınç mukavemetini azaltsada daha dayanıklı ve seramik gibi malzeme oluşturmasına neden olmuştur.



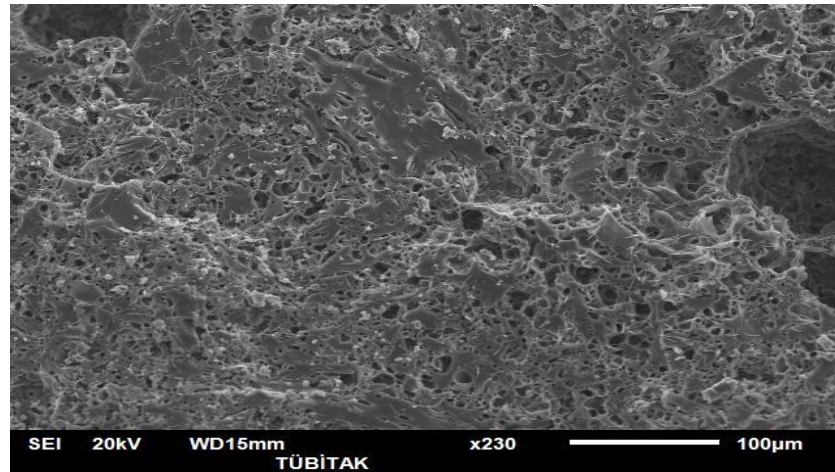
Şekil 4.77. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı



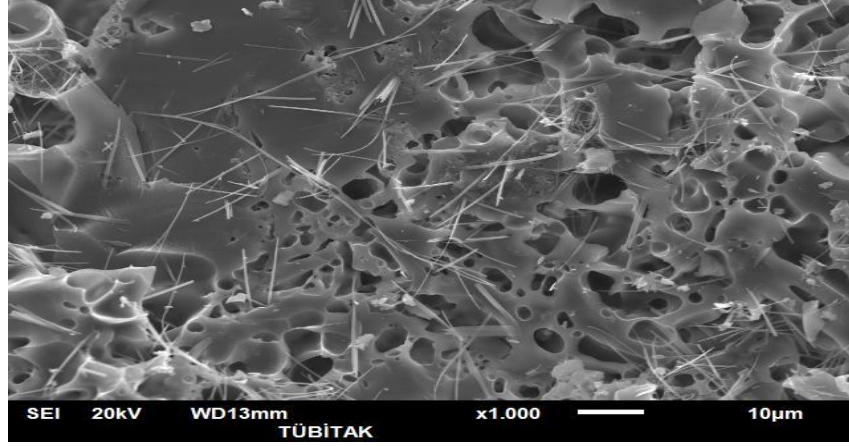
Şekil 4.78. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

Çizelge 4.27. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

Simge	Ağırlık (%)	Atomik (%)
O	42,81	56,65
Na	12,08	11,12
Al	4,72	3,70
Si	33,29	25,09
K	4,55	2,46
Fe	2,55	0,97
Toplam	100	

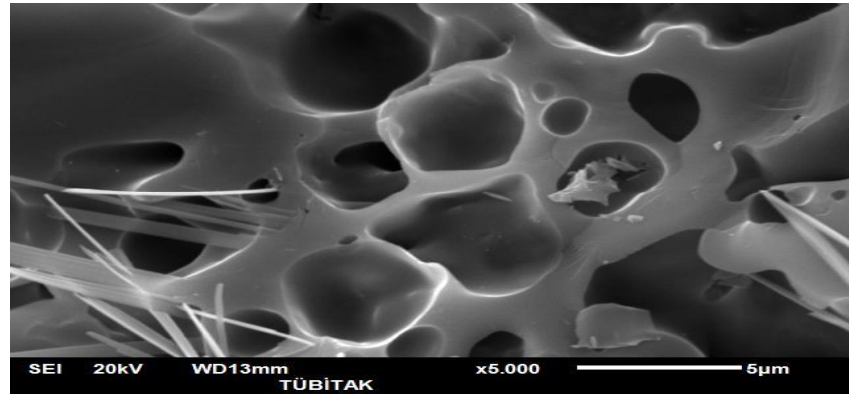


Şekil 4.79. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı



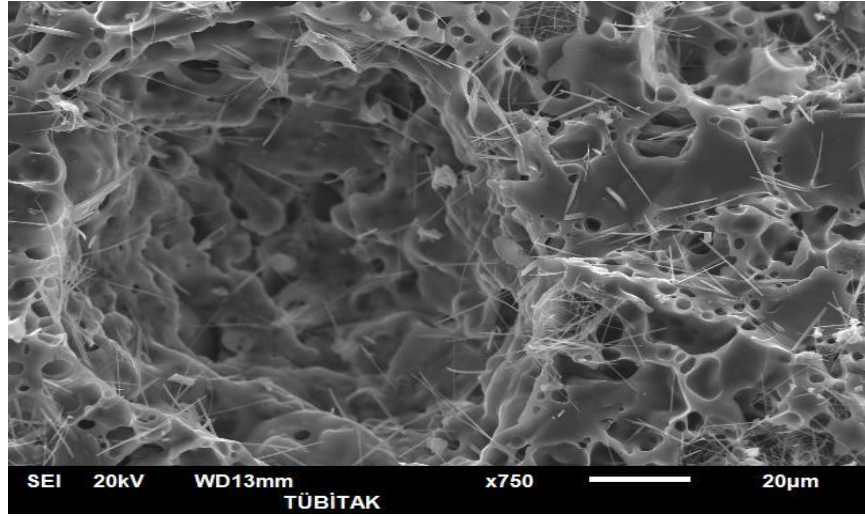
Şekil 4.80. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı

Şekil 4.80’de görüldüğü gibi SEM görüntüsü çekilen bölgede sinterleşme etkisiyle kısmen amorf ve yoğun yapı oluşması, boşlukları ve ince sodyum kristalleri görülmektedirler.



Şekil 4.81. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı

Şekil 4.81’de SEM görüntüsü çekilen bölgede kısmen sinterleşme etkisiyle oluşan yapı, gaz çıkışından dolayı boşluklar ve ince sodyum kristalleri görülmektedirler.

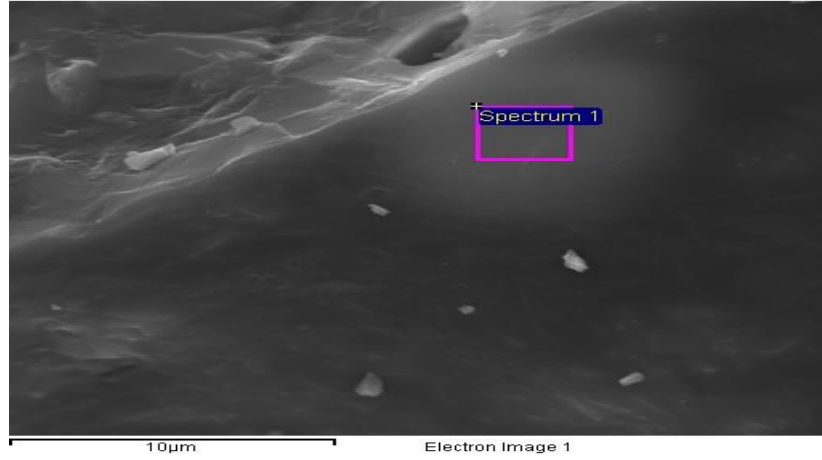


Şekil 4.82. Yedinci karışımın 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı

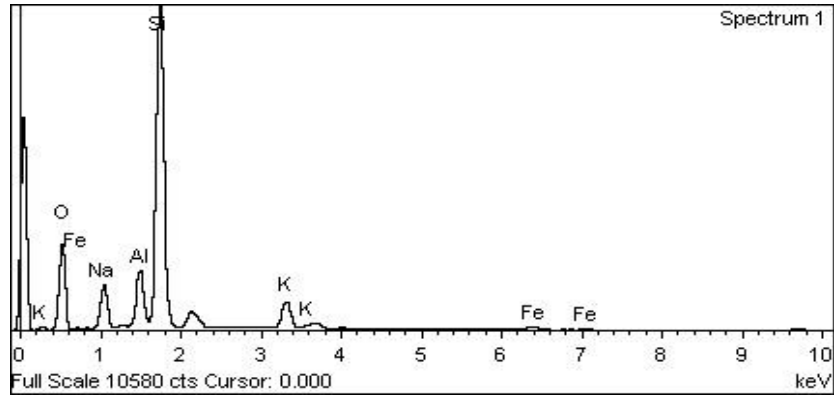
Şekil 4.82’de aynı Şekil 4.81’de SEM görüntüsü çekilen bölgede kısmen sinterleşme etkisiyle oluşan yapı, gaz çıkışından dolayı boşluklar ve ince sodyum kristalleri görülmektedirler.

Şekil 4.83’de gösterilen spektrum alanından EDX testi alınmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.28 ve Şekil 4.84’de gösterilmiştir. Bu noktada çekilmiş EDX sonuçlarına göre Si/Na oranı üretilen ürende 4,23 ve Si/Al=6,17 olmuştur. Şekil 4.83 ve Şekil 4.86’da görüldüğü gibi sinterleşmeden dolayı çok yoğun viskoz bir sıvı gibi sertleşmiş amorf N-A-S-H jeli oluşmuştur.

Gaz ve buhar çıkışından dolayı Şekil 4.85’de görüldüğü gibi etrafında çatlaklar oluşmadan dolayı gözeneklerin sayısı artmıştır. 600°C sıcaklıktaki genleşmelerle kıyas edilirse boşluk hacimleri daha çok artmıştır ve geopolimerlerin hafifleşmesini daha çok sağlamıştır. Önceki bölümde görüldüğü gibi bu durum geopolimerlerin basınç mukavemetin azaltırsa da daha dayanıklı ve seramik gibi malzeme oluşturmuştur.



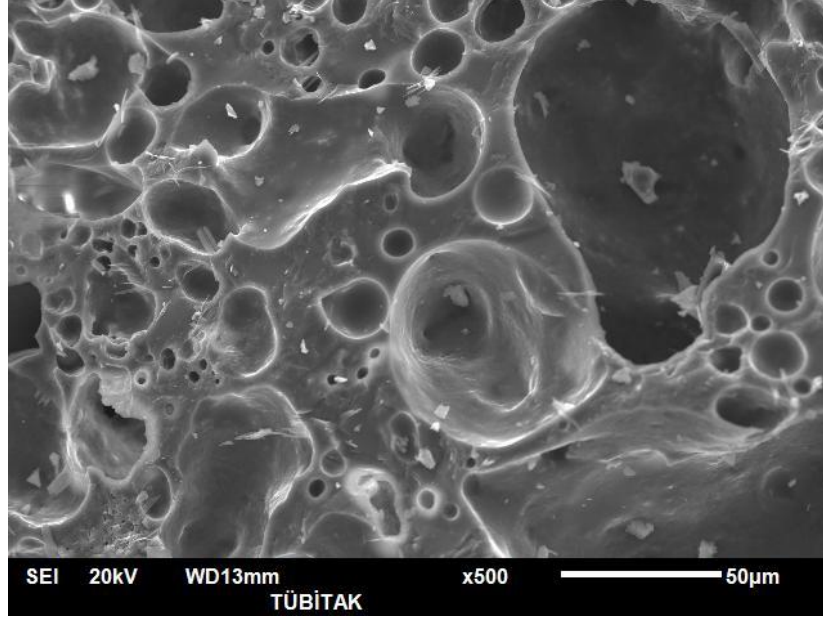
Şekil 4.83. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı



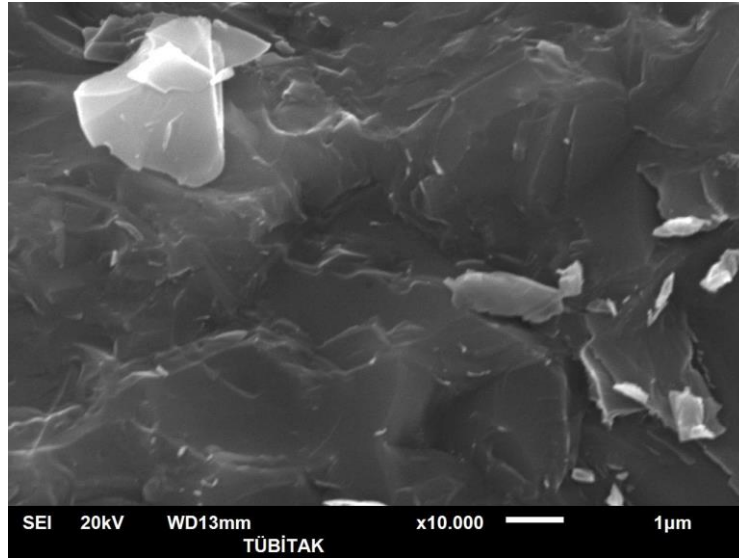
Şekil 4.84. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

Çizelge 4.28. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra EDX sonuçları

Simge	Ağırlık (%)	Atomik (%)
O	41,68	55,73
Na	7,46	6,94
Al	6,00	4,76
Si	38,56	29,37
K	4,78	2,62
Fe	1,51	0,58
Toplam	100	



Şekil 4.85. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (gözenekli yapı)



Şekil 4.86. Yedinci karışımın 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mikroyapısı (amorf ve sıkı yapıya sahip Na-A-S-H jeli)

Çizelge 4.28 ve Şekil 4.83'e göre yüksek sıcaklık etkisiyle geopolimerlerde sinterleşme sonucu oluşan Si/Na atomik oranı artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda N-A-S-H jellerin oluşmasından daha amorf ve sıkı bir görünüm kazanıldığı görülmektedir.

Pomza esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklığa maruz kaldığında oluşan buharın geçişini sağlayan çok miktarda küçük boşluklara sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde bu sonuçlar uçucu kül esaslı geopolimerlerde de görülmektedirler (Kong *et al.* 2007; Topcu and Toprak 2011). Yani boşluklu geopolimer yapısının yüksek sıcaklıklarda çatlayarak bozulmadan içerisinde oluşan buharı dışarı attığı ve bu şekilde basınç dayanımı büyük ölçüde azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca N-A-S-H jellerinin yapısında su bulunmaması yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık açısından geopolimere büyük olumlu etkiler sağlamaktadır. C-S-H jellerinin yapısında su bulunduğu için çimento ile üretilen yapı malzemeleri yüksek sıcaklık etkilerine dayanıksız olmaktadır.

Xu *et al.* (2010) yaptığı çalışmalarda aynı şekilde geopolimerlerin yüksek sıcaklıklarda normal çimentodan daha dayanıklı olduğu belirtmiştir. Hatta 1050°C derecede azalma miktarı yaklaşık %6 olmuştur. Bu iyi performansın nedeni yüksek sıcaklıklarda geopolimerlerde viskoz sinterleşmenin oluşmasıdır. Bu olayı SEM görüntülerinden yorumlamıştır ve bu viskoz sinterleşmeye pomza esaslı geopolimer üretiminde de kendi çalışmamıza rastlanmaktadır.

4.9. Standart Geopolimer Harç Üretimi ve Numune Yaşının Basınç Mukavemetine Olan Etkisinin İncelenmesi

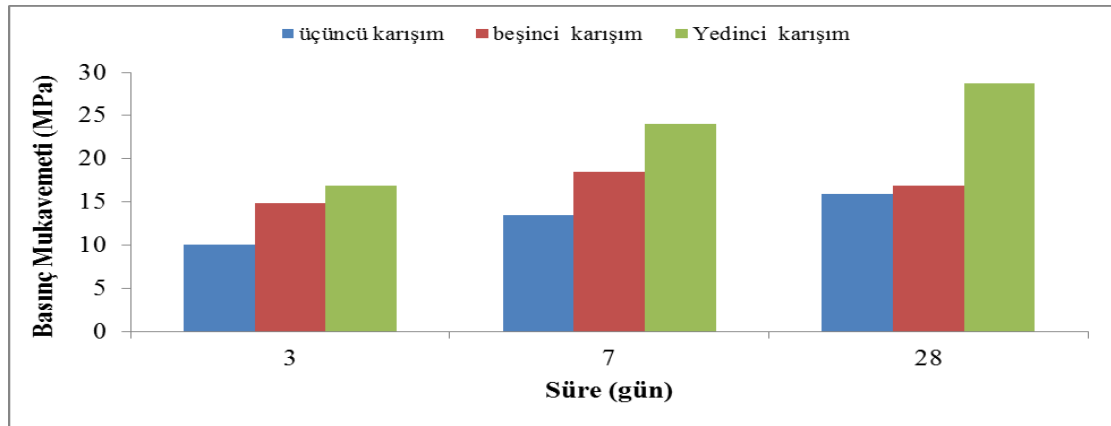
Hamur numuneler üretildikten sonra yalnız üretilen karışımlarımızın 3 tanesinde yani 3, 5 ve 7. karışımlarda mukavemet 20 MPa üzerinde olmuştur. Bu yüzden bu üç karışımın yapıda kullanılabilirliğin incelemek için standart harç numuneleri üretilmiştir ve onların 3, 7 ve 28 günlük basınç mukavemetleri incelenmiştir.

Numune boyutlarımız 50x50x50mm olmuştur. Numunelerin hepsinde Na₂O yüzdesi 10'dır. Çizelge 4.30'da görüldüğü gibi her 3 karışımda mukavemet artmıştır. Yedinci karışımda 3, 7 ve 28 günlük mukavemetleri sırasıyla 16,93 ve 24,01 ve 28,70 olmuştur ve 7 günlük ve 28 günlük basınç mukavemeti 3 günlük basınç mukavemetine göre %41

ve %69 oranında artış göstermiştir. Toprak (2011)'in uçucu kül üzerinde yaptığı çalışmasında numunelerin yaşı arttıkça basınç mukavemetide artmıştır.

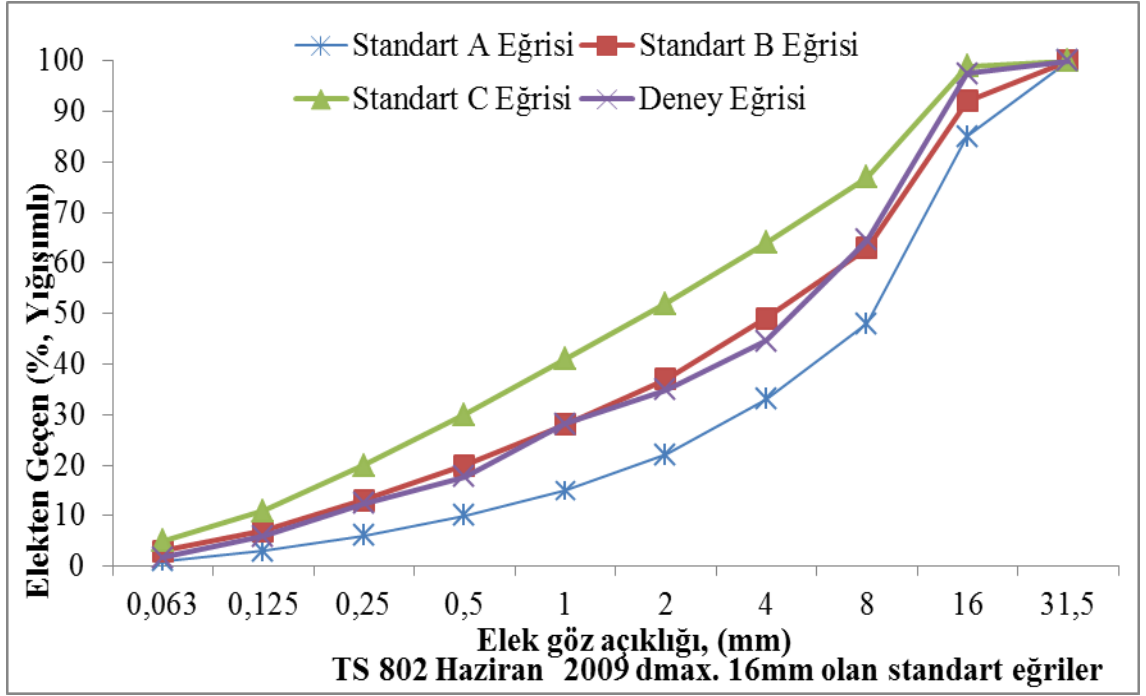
Çizelge 4.29. Standart geopolimer harçlarda numune yaşının basınç mukavemetine etkisi

Karışım	Silika modülü	3 günlük basınç mukavemeti	7 günlük basınç mukavemeti	28 günlük basınç mukavemeti
3	0,52	10,07	13,50	15,90
5	0,60	14,82	18,46	21,34
7	0,68	16,93	24,01	28,70



Şekil 4.87. Standart geopolimer harçlarda numune yaşının basınç mukavemetine etkisi

Rattanasak and Chindapasirt (2009) çalışmalarında 5M NaOH ile hazırlanan ve NaOH/Na₂SiO₃ oranı kütlece 0,5 ve 1,0 olan geopolimer harçların basınç dayanımlarını 12,0 ve 21,0 MPa, 10M ve 15M NaOH ile hazırlanan geopolimer harçların basınç dayanımlarını ise 50-60 MPa bulmuşlardır. Düşük NaOH konsantrasyonları (5M NaOH) ve yüksek NaOH/Na₂SiO₃ oranlarına (1,5 ve 2,0) sahip geopolimer harçların basınç dayanımlarının 50,0 MPa'a yaklaştığını, yüksek NaOH konsantrasyonları (10M ve 15M) ve yüksek NaOH/Na₂SiO₃ oranlarında (1,5 ve 2,0) basınç dayanımlarının (55-65 MPa) olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.88. Beton bileşiminde kullanılan agrega granülometri eğrisi

Çizelge 4.31. Beton bileşiminde kullanılan agrega granülometri özellikleri

Elek Çapı (mm)	Standart A Eğrisi	Standart B Eğrisi	Standart C Eğrisi	Deney Eğrisi
0,063	1	3	5	2
0,125	3	7	11	6
0,250	6	13	20	12
0,500	10	20	30	18
1,000	15	28	41	28
2,000	22	37	52	35
4,000	33	49	64	44
8,000	48	63	77	65
16,000	85	92	99	98
31,500	100	100	100	100

4.10.3. Tane yoğunluğu ve su emme

Agregaların tane yoğunluğu ve su emme sonuçları Çizelge 4.32’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.32. Tane yoğunluğu ve su emmesi

Özellik	Agrega sınıfı			
	0-2mm	2-4mm	4-8mm	8-16mm
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (γ_d)	2,56	2,60	2,61	2,62
Su emme oranı (%)	2,02	1,92	1,62	1,82
Tabii nem (%)	1,01	1,11	0,91	0,96

4.10.4. Çok ince malzemenin muhtevası

Çizelge 4.33. Çok ince malzemenin muhtevası

Ag. Sınıfı	İnce Malz. Oranı (%)
1(0-2 mm)	0,20%
2(2-4 mm)	0,02%
3(4-8 mm)	0,001%
4(8-16 mm)	0,001%

4.10.5. Çok ince malzemenin kalitesi

Yöntem bölümünde belirtilen şekilde yapılan deneyler neticesinde ince malzeme muhtevasının 0–2 mm tane sınıfı için %0,2 ve 2–4 mm tane sınıfı için ise %0,2 olduğu tespit edilmiştir. Her iki değer de %3’den küçük olması sebebiyle agregadaki ince malzemenin zararsız kabul edilebileceği belirlenmiştir.

4.10.6. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Bu bölümde, deneyler için üretilen geopolimer beton türlerinin tespitinde izlenen yol açıklanmıştır. Granülometrinin beton özellikleri üzerindeki etkisi göz önüne alındığında çalışmada tüvenan agrega granülometrisine bağlı kalınmamış, ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır. Bu nedenle agrega dört tane sınıfına ayrılmış ve ideal granülometri eğrisi sınırları içerisinde kalacak şekilde agrega oranları belirlenmiştir.

Çalışmalarda her geopolimer beton grubu için toplam 27 numune üretilmiştir. Bu numuneler normal kür şartı için 25°C ve 100°C-800°C arasında çeşitli yüksek sıcaklığa 3 saat maruz bırakıldıktan sonra havada soğutulularak, geopolimerlerin üzerinde olan sıcaklık etkileri yani geopolimer betonların basınç mukavemetlerinde, ısı iletkenliği, UPV ve yoğunlukları üzerinde olan etkileri açıklanmıştır.

4.10.7. Karışım oranlarının belirlenmesi

Karışım hesapları yapılırken, pomza esaslı geopolimer betonlar için bir standart yöntem olmadığı için, karışım oranları belirlenerek deneme karışımları üretilmiş, istenen mukavemetler elde edildikten sonra numunelerin üretimine başlanmıştır. Özgül ağırlık ve nem yüzdeleri iri ve ince tane sınıfları için ayrı ayrı bulunmuştur. Agrega tane sınıflarının oranları belirlenirken ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır. Buna göre 0–2 tane sınıfı ince agregadan %30, 2–4 tane sınıfı ince agregadan %15, 4–8 tane sınıfı iri agregadan %20 ve 8–16 tane sınıfı iri agregadan %35 oranlarında malzeme karışıma ilave edilmiştir. Karışımdaki malzeme miktarları, karışıma ağırlık olarak konularak deney numuneleri üretilmiştir. Bu işlem sırasında malzeme kayıpları göz önünde bulundurularak gerekli miktarlar %10 oranında artırılmıştır. Deney numunelerinin üretimi sırasında çökme değerleri ölçülmüş ve işlenebilirliğin yeterli olduğu belirlenmiştir. Aşağıda C25 betonu için örnek karışım hesabı gösterilmiş ve çalışmada kullanılan karışım oranları Çizelge 4.34’de topluca belirtilmiştir. Bu karışım

hesabında betonun içerisinde %2 hava olması düşünülmüştür. 7. karışımın hesapları bağlayıcı olarak betonda kullanılmıştır. Betonda kullanılan malzemelerin yoğunlukları Çizelge 4.35’de verilmiştir.

Çizelge 4.34. 1000 dm³ geopolimer beton için karışım hesabı

Pomza (kg)	Agrega (kg)				NaOH Çözeltilisi (kg)	Na ₂ SiO ₃ Çözeltilisi (kg)	Su (kg)	Süper Ak. (kg)
	0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm				
393,93	519,97	259,99	346,65	608,96	86,61	117,044	4,72	15,75

Çizelge 4.35. Betonda kullanılan malzemelerin yoğunlukları

Pomza (gr/cm ³)	Agrega (gr/cm ³)				NaOH Çözeltilisi (gr/cm ³)	Na ₂ SiO ₃ Çözeltilisi (gr/cm ³)	Su (gr/cm ³)	Süper Ak. (gr/cm ³)
	0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm				
2,38	2,64	2,69	2,68	2,70	1,3965	1,385	1	1

4.10.8. Üretilen pomza esaslı geopolimer betonun hacim kontrolü

Üretilen pomza esaslı geopolimer betonun hacim kontrolü aşağıdaki gibidir.

$$V_{\text{toplamlam}} = W_p/S_p + W_{a1}/S_{a1} + W_{a2}/S_{a2} + W_{a3}/S_{a3} + W_{a4}/S_{a4} + W_{NaOH}/S_{NaOH} + W_{Na_2SiO_3}/S_{Na_2SiO_3} + V_w + V_{AK} + V_A = 393,93/2,38 + 519,97/2,64 + 259,99/2,69 + 346,65/2,68 + 608,96/2,7 + 86,61/1,3965 + 117,044/1,385 + 4,72 + 15,75 + 20 = 1000 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{toplamlam}} = \text{taze betonun hacmi}$$

4.10.9. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı

Karışım oranları belirlenen malzemeler 1 gr hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra mikserle sırasıyla iri agrega ve ince agrega konulmuştur. Karışım çözeltisinin yaklaşık 1/3'ü eklenerek agregalar 1 dakika süreyle karıştırılmış, daha sonra pomza ve geriye kalan karma çözeltisi konulup yaklaşık 2 dakika daha karıştırılarak betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlar 10x20 cm boyutlu silindirik kalıplara yerleştirilmiştir. Numunenin kalıplardan kolaylıkla çıkarılabilmesi için, kalıpların içi kalıp yağı ile yağlanmıştır. Her 1/3 yükseklikte 25 defa şişlemeden sonra 1 dakika titreşim masasında bırakılıp sonra kalıpların yüzeyleri çelik mala ile düzeltilmiştir. Geopolimer beton numunelerinin nem kaybını önlemek amacı ile naylon örtü ile yüzeyleri kapatılmış ve 48 saat 65°C etüvde bekletilmiştir (Şekil 4.89). 48 saat bekletilen numuneler kalıpları söküldükten sonra bir kür işlemi yapılmadan 25±20°C laboratuvar şartlarında 28 günlük olup deneylere hazır olana kadar bekletilmiştir. Sonra yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılan beton numuneler havada soğutulmuş basınç mukavemetleri, UPV değerleri, ısı iletkenlik katsayıları ve yoğunlukları belirlenmiştir. Üretilen beton numuneleri Şekil 4.90'da gösterilmiştir.



Şekil 4.89. Geopolimer betonların 48 saat fırında kür edilmesi



Şekil 4.90. Üretilen beton numunelerinin görünüşü

4.10.10. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler

4.10.10. a. Çökme deneyi

Taze geopolimer betonlar üzerinde çökme deneyi ve taze betonun birim ağırlığı deneyleri yapılmıştır. Üretilen betonlardan TS EN12350-1’de belirtilen numune alma metotları uygulanarak taze beton deneyleri yapılmıştır. Taze beton deneylerine kıvam deneyi ile başlanmıştır. Bu deneyin yapılmasında TS EN12350–2 belirtilen yöntemler ve standart çökme konisi kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce çökme konisinin iç kısmı ıslak bir bezle silinmiş ve düz, nemli ve su emmez bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Taze beton koniye üç tabaka halinde ve her tabaka koninin yaklaşık üçte birini dolduracak şekilde yerleştirilmiştir.

Her tabaka 12 mm çapında ve 60 cm uzunluęundaki ŐiŐleme ubuęu ile 25'er defa kenarlardan ortaya doęru dairesel olarak dűŐey bir Őekilde ŐiŐlenmiŐtir. Daha sonra koni yavaŐa dűŐey olarak yukarı doęru çekilerek yıęının yanına konulmuŐtur. En sonunda koninin uest yűzeyi ile taze betonun uest yűzeyi arasındakiki yűkseklik farkı okunarak betonun okme deęeri bulunmuŐtur. okme deęerleri C25 geopolimer betonu için 3-4 cm arasında lűlműŐtir.

4.10.10. b. Taze betonda birim ağırlık

“Birim ağırlık” kelime anlamından da anlaŐılacaęı gibi, bir birim hacim içerisinde yer alan betonun ağırlığını belirtmektedir. Betonun birim ağırlığının dűŐuk veya yűksek olması betonu oluŐturan malzemelerin özelliklerine ve beton içerisinde yer alan boŐluk miktarına bağlı olmaktadır.

Taze betonda birim ağırlık deneyi TS EN12350-6'ya göre yapılır. Taze betonun birim ağırlığını bulabilmek için beton, hacmi bilinen bir kap içerisine ű Őit kademede doldurulmuŐtur. Her kademedeki beton 12 mm çaplı bir elik çubuk ile 25'er kez ŐiŐlenmiŐtir. Hacmi bilinen bir kap içerisine yerleŐtirilen ve sıkıŐtırma iŐlemi yapılan betonun yűzeyi dűzeltildikten sonra, kap içerisindeki betonun net ağırlığı bulunmuŐtur. Beton net ağırlığının kabın i hacmine blűnmesi yolu ile birim ağırlık değeri hesaplanmıŐtır.

4.10.11. Sertleşmiş beton deneyleri

Bu alıŐmada C25 betonları űretilmiŐtir. Her grupta űcer adet numune bulunmaktadır. űretilen C25 beton sınıfındaki numuneler 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklara kadar ısıtılmıŐ ve bu sıcaklıklarda 3 saat sűreyle bekletilmiŐtir. ısıtılan numuneler havada soęutulmuŐtur. Havada soğutulan numuneler, fırından çıkarılıp laboratuvar ortamında kendiliğinden yavaŐ yavaŐ soğumaya bırakılmıŐtır. SertleŐmiŐ beton deneyleri, ısıtılıp havada soğutulan numuneler űzerinde

yapılmıştır. Ayrıca kontrol numuneleri hiçbir sıcaklık etkisine maruz bırakılmadan laboratuvar ortamında saklanmıştır.

4.10.11.a. Sertleşmiş geopolimer betonda birim ağırlık

TS EN 12390-7'ye uygun olarak yapılan sertleşmiş geopolimer betonun birim ağırlığı, numunenin durumuna göre hesaplanır. Eğer numune doğal durumda ise bu hali ile tartılır. Numunenin hacmi boyutları ölçülerek belirlenir. Numune ağırlığı hacme bölünerek birim ağırlık tespit edilir. Ayrıca hedef sıcaklıklara kadar ısıtılan numunelerin birim ağırlıklarında belirlenerek, her bir sıcaklık değerinde ısıtılan numunelerin birim ağırlıkları tespit edilmiştir. Böylelikle her bir sıcaklık değerinde betonun birim hacim ağırlığındaki azalmalar belirlenmiştir. Numunelerin ısıtılmadan önceki ve ısıtıldıktan sonraki birim hacim ağırlık değerleri açıklanmıştır. Geopolimer betonların birim ağırlık değerleri Çizelge 4.36, Şekil 4.95 ve Şekil 4.96'da grafik üzerinde gösterilmiştir. Ölçümler neticesinde yüksek sıcaklıkların etkisiyle geopolimer beton bünyesindeki suyun buharlaşması neticesinde beklenildiği şekilde birim ağırlıklarda azalmalar tespit edilmiştir. Numunelerde birim ağırlık kaybının gerekçesi serbest suyun buharlaşması olarak gösterilebilir. Normal betonlarda Arıöz (2007)'de yaptığı çalışmada betonların birim ağırlıklarında, 200°C'de yaklaşık %5 ve 700°C'de ise yaklaşık %10 kayıp olduğunu belirtmiştir. Janotka and Nürnbergerova (2005) ise 200°C'de yaklaşık %4,5 kayıp tespit etmiştir.

4.10.11.b. Sertleşmiş geopolimer betonda basınç mukavemeti tayini

Basınç mukavemeti tayininde kullanılmak üzere numune boyutları 1 mm hassasiyetle ölçülerek yükün etki edeceği alan hesaplanmıştır. Bu işlemde sonra numune yüzeylerinin pres tablasına tam yapışması dolayısıyla da yükün bütün alana üniform olarak yayılması için başlıklanmıştır. Başlıklama işleminde kükürt kullanılmıştır. Başlıklama işlemi bittikten sonra numuneler en az iki saat sertleşmeye bırakılarak basınç mukavemeti tayini deneyi yapılmıştır. Numunelerin basınç mukavemetlerinin

hesaplanmasında TS EN12390-3'deki yöntemler göz önünde bulundurulmuştur. Beton zamana bağlı olarak şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan yükleme hızı betonun basınç mukavemeti üzerinde etkili bir parametredir (Baradan 1991). Bu nedenle tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. Bu çalışmada numuneler 2 kgf/cm²/sn hız ile yüklenmiştir. Yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakıldıktan sonra havada soğutulan numunelerin basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.36, Şekil 4.93 ve Şekil 4.94'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde C25 geopolimer beton sınıfı için sıcaklık artmasıyla basınç mukavemetlerinde azalmalar olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler Şekil 4.91 ve Şekil 4.92'de gösterilmiştir. Beton numunelerimiz üretildikten sonra üç saat boyunca 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C yüksek sıcaklıklara maruz kalmıştır. Numuneler C25 betonlar olmuştur. Yüksek sıcaklıktan sonra numuneler havada soğutulmuştur. Başlıklama işleminden sonra basınç deneyine maruz bırakılmışlardır. 10*20cm'lik silindirik numunelerde basınç mukavemetleri hepsi azalmıştır. Bu azalma miktarları kontrol numunesine göre sırasıyla 0,006-0,075-0,099-0,104-0,108-0,129-0,262 ve 0,328 olmuştur ve bu, normal çimentolarla üretilen betonlara göre iyi performans göstermektedir. Grafikler incelendiğinde geopolimer beton için sıcaklığın artmasıyla basınç mukavemetlerinde azalmalar olduğu görülmektedir. Numunelerde C25 betonunda mukavemet artışı görülmemekle beraber 300°C sıcaklığa kadar mukavemet kayıplarının %10'un altında olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber 300°C'den itibaren geopolimer beton sınıfında da mukavemet kayıpları daha belirgin hale gelmiştir.

Yüksek sıcaklık etkilerinde kalan betonların mukavemetlerinin azalması; agregaların genleşmesi, çimentonun büzülmesi, beton boşluklarındaki ve çimento bileşimindeki suyun uzaklaşması gibi bir takım fiziksel ve kimyasal olaylarla açıklanabilir. Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz 500°C'nin üzerinde alfa kuvarzdan beta kuvarza dönüşür. Bu dönüşümden kaynaklanan hacim genleşmesi betonda hasara sebep olur (Akman 1990). 570°C'de alfa kuvarzdan beta kuvarza dönüşüm gerçekleşir ve yaklaşık %5'lik hacim artışı olur (Vydra *et al.* 2001). 600°C ve 700°C sıcaklıklarda

betonların mukavemetlerinin çok önemli bir kısmını kaybederek taşıyıcılık özelliklerinin ortadan kalktığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.36. Üretilen geopolimerin betonun fiziko-mekanik özellikleri

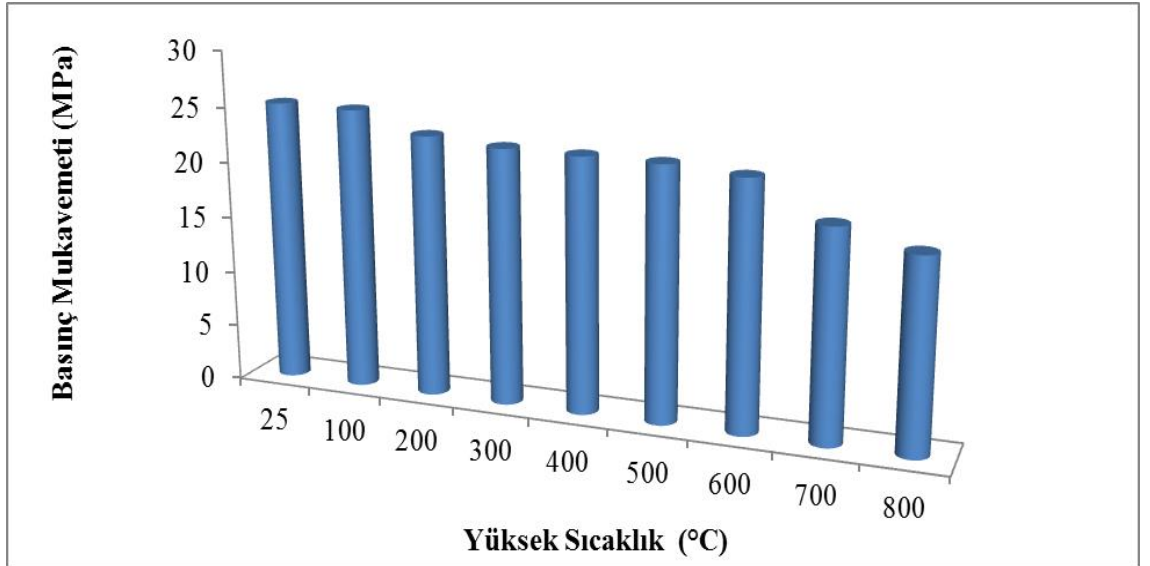
Sıcaklık °C	Numune adı	Teorik beton birim ağırlığı (kg/m ³)	Sertleşmiş betonun birim ağırlığı (kg/m ³)	TC değeri (W/Mk)	UPV değeri (m/s)	Basınç mukavemeti (Mpa)
25°C	K	2360	2176	2,10	2886	25,22
100°C	C100	2360	2170	2,06	2700	25,07
200°C	C200	2360	2169	1,96	2710	23,29
300°C	C300	2360	2151	1,93	2749	22,73
400°C	C400	2360	2132	1,68	2620	22,61
500°C	C500	2360	2110	1,63	2611	22,51
600°C	C600	2360	2033	1,49	2100	21,98
700°C	C700	2360	1915	1,07	1750	18,62
800°C	C800	2360	1801	0,86	1700	16,97



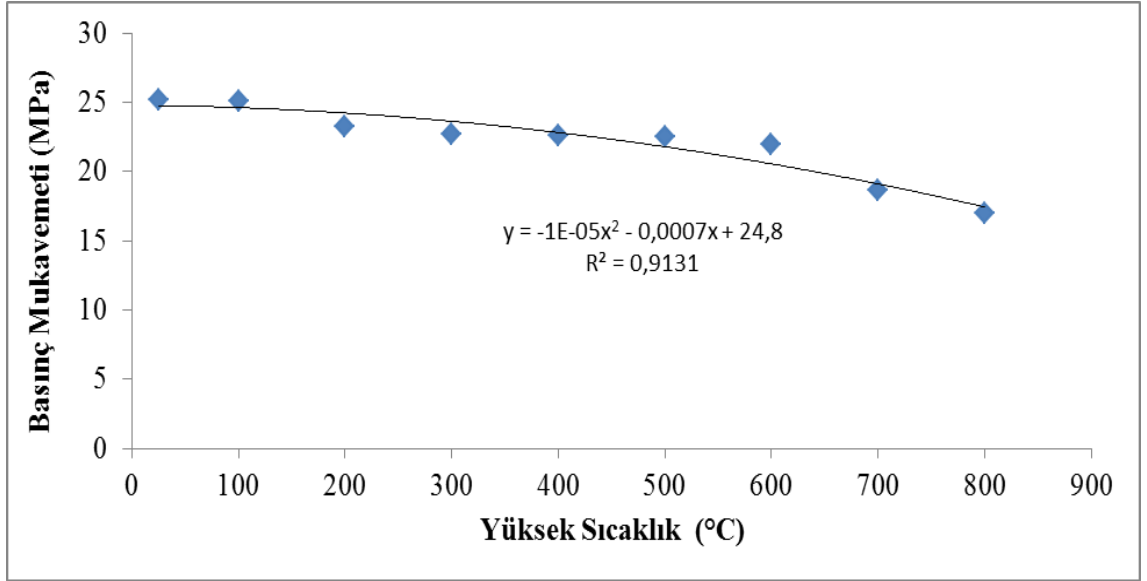
Şekil 4.91. Üretilen beton numunelerinin ve hamurların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra yan görünüşü



Şekil 4.92. Üretilen beton numunelerinin ve hamurların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra üstten görünüşü



Şekil 4.93. Geopolimer betonlarda YS-basınç mukavemeti ilişkisi



Şekil 4.94. Geopolimer betonlarda YS-basınç mukavemeti ilişkisi

Normal çimentolardan üretilen betonların ve hamurların yüksek sıcaklıkta geopolimerlerle farklı olmasından dolayı bu kısımda bu mekanizmalar özet olarak literatür ışığında açıklanmıştır.

-Normal çimentolu betonlarda termal davranış

Mendes (2008, 2009, 2012) çalışmalarında CaO rehidratasyonun yüksek sıcaklıklardaki betonun mukavemetinin azalmasının en önemli nedeni olduğunu belirtmiştir. Rehidratasyon olayında Ca(OH)_2 suyu *dehidrate* veya *dehydroxyle* olup CaO meydana gelmektedir. *Sorptivity* yöntemini kullanarak yüksek sıcaklıkta basınç mukavemetinin azalmasıyla dehidratasyon derecesinin arasındaki bir ilişkinin olduğunu açıklamıştır (Mendes *et al.* 2012).

Çimento ürünleri yani beton, harç ve hamur yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra fiziksel ve kimyasal bağlarında değişimler meydana gelmektedir. Bu yüzden Khoury (2012) yüksek sıcaklıklarda bu ürünleri ayrı ayrı incelenmesini önermiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan bir başka çalışmada, Dias (1990) ilginç bir sonuca rastlamıştır ve

buda betonun 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan ve havada soğutulmasından bir kaç gün sonra çatlakların oluşmasıdır. Bu olayın nedeni Petzold (1970)'in çalışmalarında bulunmaktadır. Çünkü 400°C sıcaklıkta normal çimentolardan üretilen betonlar bazen %44 hacim değişikliğine maruz kalmaktadırlar. Burada yüksek sıcaklık etkisinde normal çimento ve cürüflü çimentolar üzerinde yapılan çalışmalardan yaklaşık 500°C derecede basınç mukavemeti sıfıra inmiştir ama %50 cürüflü çimentolar daha iyi bir davranış göstermiştir ve mukavemet %50 den fazla azalmıştır. Betonlarda fiziksel bozulmaların asıl nedenlerinden biriside yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktır. Betonların yüksek sıcaklıklardaki davranışları bir kaç nedene bağlıdır bunlardan agregaların özellikleri, hamur ve agrega arasındaki kenetleme ve hamur ile agregaların sıcaklık genleşme katsayılarının birbirine uyum sağlaması söylenebilir (Arioz 2007; Aydın 2008a,b; Bingöl ve Gül 2009).

Betonlar yüksek sıcaklığa maruz kaldığında Ca(OH)_2 'in dehidratasyonundan dolayı iç gerilmeler meydana gelir ve bundan dolayı yavaş yavaş çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Yaklaşık 530°C'de bu çatlaklar büzülmeden dolayı meydana gelmektedir ve betonların mukavemetinide daha çok düşürmektedir (Zoldners 1973; Chan 2000a; Chan 2000b; Xiao 2006; Zega 2006; Aydın 2008a,b; Sleem 2011; Li *et al.* 2012).

Yüksek sıcaklıklarda betonun basınç mukavemetinin azalmasına kanıt olan bir başka çalışmada POFA üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada bağlayıcının %20'si olarak POFA kullanılmıştır. Üretilen beton sırasıyla 100°C, 300°C, 500°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır ve sonuç olarak betonun basınç mukavemetinde sıcaklığın artmasıyla sürekli azalmalar gözlenmiştir. Bu azalmalar 300°C, 500°C ve 800°C için sırasıyla %22,5 , %33 ve %78 olmuştur (İsmail *et al.* 2011).

Poon (2011)'un çalışmalarına göre yüksek sıcaklığın artmasıyla, basınç mukavemeti, ısı iletkenlik katsayısı ve ultra ses geçiş hızı azalmaktadır ve bunların nedenlerin normal çimentolu betonlarda aşağıdaki gibi özetlemiştir:

a) Faz değişim prosedürü

100°C sıcaklığa kadar fiziksel bağlarda olan su tam buharlaşıyor, 450°C sıcaklığında Ca(OH)₂'deki suyun kaybı ile CaO oluşur ve 573°C'de α kuvarz β kuvarza dönüşür.

b) Boşluklu yapının gelişmesi ve büyümesi

Betonlarda 500°C dereceye kadar boşlukların alanları ve hacmi artmaktadır ama 500°C'den sonra bu genişleme büzölmeye dönüşür. Kimyasal reaksiyonlardan dolayı bu aşamada gözenekli yapı artmakta ve su emme kabiliyeti yükselmektedir.

- Geopolimerlerde dehydroxylasyon aşamasında termal davranış ve büzölme

Sertleşmiş geopolimerlerde 3 farklı halde su bulunmaktadır:

- Fiziksel bağlar olarak
- Kimyasal bağlar olarak
- Hydroxyl bağlar olarak (-OH)

Bu sular her biri farklı sıcaklıklarda geopolimerlerden ayrışmaktadır.

Suyun bir kısmında geopolimerlerin içyapısında olan üç boyutlu moleküler yapıya girmiş ve bu suya zeolitik su ismi verilmektedir. *Hydroxyl* gruplarda normalde geopolimerlerin yüzeylerinde ve kenarlarında bulunmaktadır. Farklı tür geopolimerlerde 100°C sıcaklığında %1 ile %5 arasında ağırlık kaybı olur ve bu büzölmeden dolayı çatlaklar oluşmaya başlar.

Difrential termal analizlere göre de endotermik bir ortamda potasyum esaslı poly sialate siloxolar farklı sıcaklıklarda 3 farklı su kaybı göstermektedirler.

- 100°C'ye kadar fiziksel bağ olarak su kaybı,
- 100°C-300°C kimyasal bağların arasındaki olan su kaybı,

-300°C'den yüksek sıcaklıklarda -OH grubunun dehydroxylasyonundan meydana gelen su kaybı.

Davidovits (1988) potasyum esaslı geopolimerlerde üç tip su kaybindan meydana gelen büzülme 100°C, 250°C ve 400°C'de değerlendirmiş ve sonuçlarına göre toplam büzülmenin %2,5 - %15 miktarı 100°C dereceye kadar, %50'si 250°C'ye kadar ve %80'ni 400°C'ye kadar meydana gelmektedir.

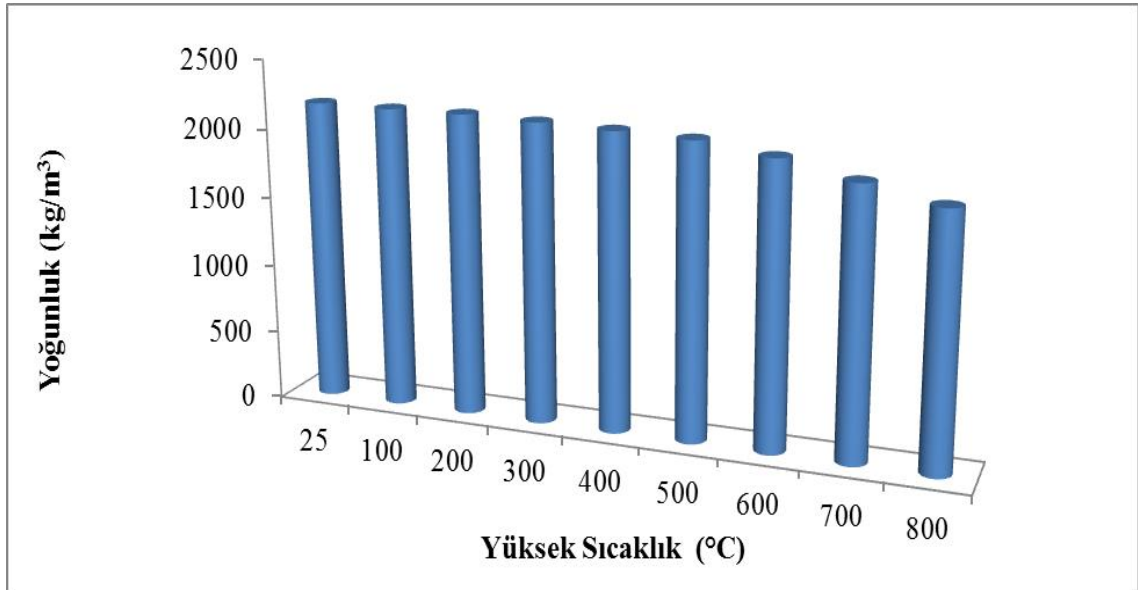
Geopolimerlerde kullanılan suyun %70'ı fiziksel bağlarla ilgilidir ve bu yüzden bu su 100°C'den az sıcaklıklarda buharlaşıp yerinde boşluk bırakır ve poroziteyi daha çok artırır. Bu suyun buharlaşması gerilmeye neden olmaz ve büzülmede çok az etkisi vardır. Kalan su miktarı, (yani %30) büzülmelerin büyük kısmına neden olur ve geopolimer dokusunun arasında olan suyun yani kimyasal bağlarda tutulan suyun hepsi 300°C'de geopolimerden dışarı çıkar.

4.10.11.c. Sertleşmiş geopolimer betonlarda YS-yoğunluk ilişkisi

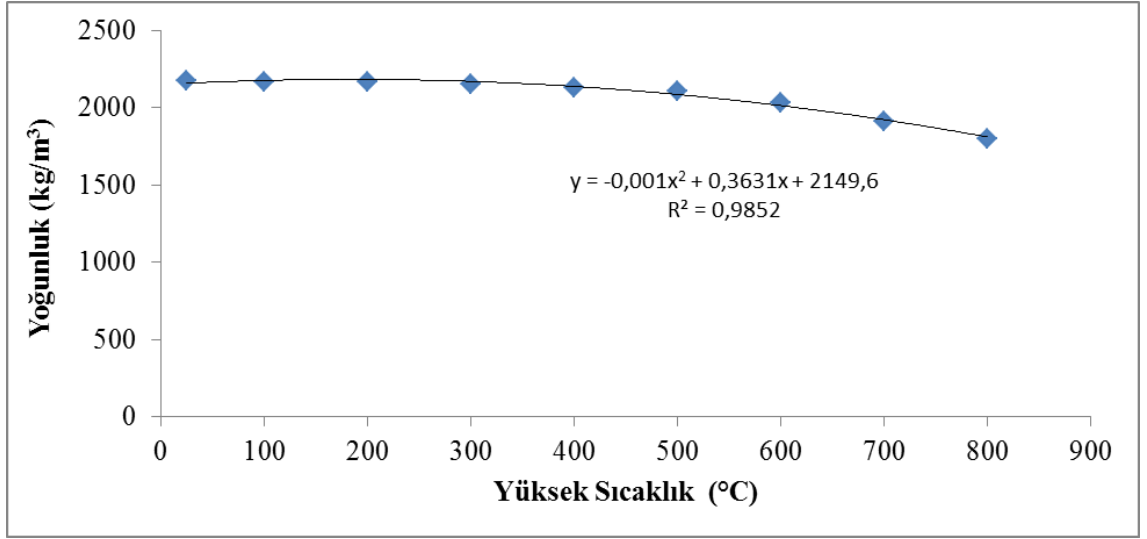
Teknolojik uygulamalarda genellikle üretilmiş numunelerde yoğunlukları ölçmemiz gerekmektedir. Geopolimer özelliklerine göre geopolimerler mikro gözenekli bir yapıya sahiptirler ve bu onların yoğunluklarının daha az olmasına neden olmaktadır. Davidovits (2011)'in çalışmalarına göre Si/Al oranının artmasıyla geopolimerlerdeki yoğunluk da artmaktadır ve daha dolgun bir malzeme oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta erimeden önce geopolimerler bir kaç *dehidratation*, *dehydroxylation* ve kristalleşme aşamasından geçiyor. Belirli bir sıcaklıklarda geopolimer yapılarında yumuşama ve yeniden kristalleşme (seramikleşme) meydana gelir. Yüksek sıcaklık uygulamalarda yumuşama sıcaklığının büyük bir etkisi vardır. Ama bu konuda dikkat edilmesi gereken, yumuşama sıcaklığı erime sıcaklığından farklıdır ve yumuşama sıcaklığı erime sıcaklığından daha düşüktür (Davidovits 2011) .

Bu çalışmada aynı basınç deneyi gibi beton numunelerimiz üretildikten sonra üç saat boyunca 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C yüksek sıcaklıklara maruz kalmıştır. Numuneler C25 betonlar olmuştur. Yüksek sıcaklıktan sonra numuneler havada soğutulmuş yoğunlukları ölçülmüştür. 10*20cm'lik silindirik numunelerin hepsinde yüksek sıcaklığın artmasıyla yoğunluk azalmıştır.

Bu azalma miktarları sırasıyla 0,003-0,004-0,012-0,021-0,031-0,066-0,120 ve 0,180 dir. En çok azalma miktarı 800°C sıcaklık için meydana gelmiştir. Çizelge 4.36, Şekil 4.95 ve Şekil 4.96'da görüldüğü gibi numuneler yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra yoğunlukları azalmıştır ve bu azalma düzenli bir şekilde yüksek sıcaklık değerlerinin hepsinde mevcuttur ve ikinci dereceden olan polinomial bir korelasyon $R^2=0,985$ sağlanmıştır.



Şekil 4.95. Geopolimer betonlarda YS-yoğunluk ilişkisi

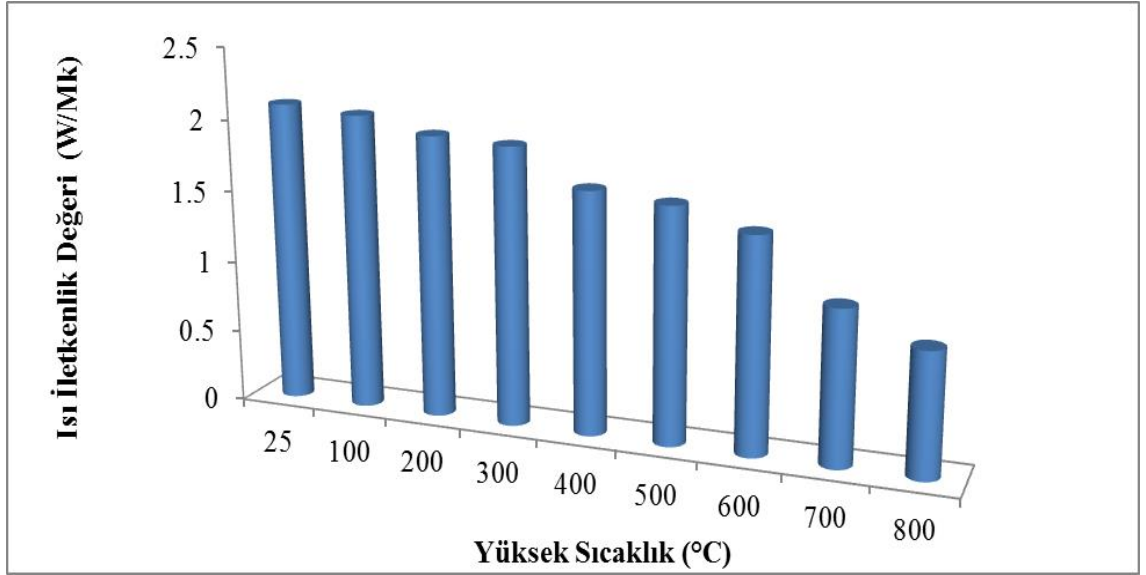


Şekil 4.96. Geopolimer betonlarda YS-yoğunluk ilişkisi

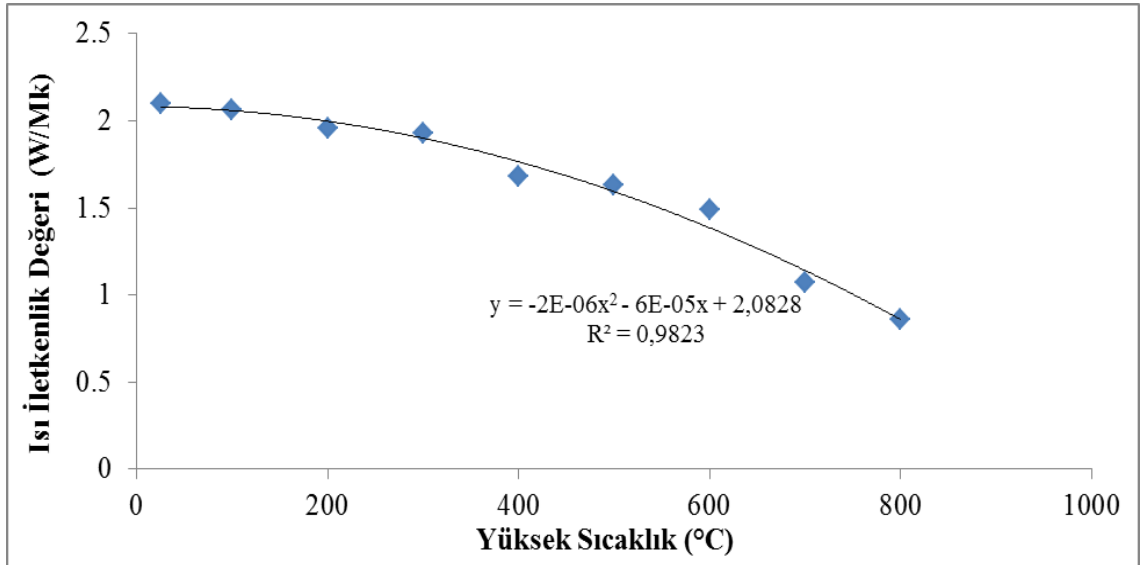
Geopolimerler bir kaç dehidratasyon, dehydroxylation ve kristalleşme aşamasından geçmesi için ve geopolimerin genişlemesinden dolayı (Bölüm 4.8.2) geopolimer betonlarda'da aynen normal betonlar gibi boşlukların artmasıyla yoğunluk azalmaktadır.

4.10.11.d. Sertleşmiş betonda YS-ısı iletkenlik değerleri (W/Mk) ilişkisi tayini

Beton numuneleri üretildikten sonra üç saat boyunca 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C yüksek sıcaklıklara maruz kalmıştır. Numuneler C25 betonlar olmuştur. Yüksek sıcaklıktan sonra numuneler havada soğutulmuş ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. 10*20cm'lik silindirik numunelerin hepsinde yüksek sıcaklığın artmasıyla iletkenlik katsayısı azalmıştır. Bu azalma miktarları sırasıyla 0,020-0,067-0,081-0,200-0,224-0,300-0,500 ve 0,600 dır. En çok azalma miktarı 800°C derece sıcaklık için meydana gelmiştir ve bunun miktarı kontrol numunesine göre %60 olmuştur. Çizelge 4.36, Şekil 4.97 ve Şekil 4.98'de görüldüğü numuneler yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra ısı iletkenlik kat sayıları azalmıştır ve bu azalma düzenli bir şekilde yüksek sıcaklık değerlerin hepsinde mevcuttur ve ikinci derecede olan çok iyi polinomial bir korelasyon $R^2=0,98$ sağlanmıştır.



Şekil 4.97. Geopolimer betonlarda YS-ısı iletkenlik değeri (W/Mk) ilişkisi



Şekil 4.98. Geopolimer betonlarda YS-ısı iletkenlik değeri (W/Mk) ilişkisi

Othuman (2011) hafif betonlar üzerinde ısı iletkenlik deneylerini yapmıştır ve çalışmadaki betonların yoğunlukları $600-1800 \text{ kg/m}^3$ olmuştur. Sonuçlara göre beton yoğunluğu azaldıkça ısı iletkenlik değerleride azalmaktadır (Othuman *et al.* 2011). Demirboga uçucu küllü, cüruf ve silis dumanlı betonlarda ultra ses geçiş hızı ve ısı

iletkenlik değerleri incelenmiştir. Silis dumanlı numunelerin ısı iletkenlik değerleri daha yüksektir ve amaç ısı iletkenlik katsayısını azaltmak olursa uçucu kül esaslı betonlar daha uygun olduğunu belirtmişlerdir (Demirboga *et al.* 2003; Uysal *et al.* 2004; Demirboga 2007; Bessenouci *et al.* 2011).

Chul Shin (2012) alışmalarına göre boşluklar betonun içerisinde su biriktirme ihtimalin artırmaktadır ve su miktarının artışı betonun ısı iletkenlik katsayısını artırmaktadır. Suyun betondan buharlaşması ve betonda gözenekler ve boşlukların artması, betonun yoğunluğu ve ısı iletkenlik kat sayısını azalmaktadır. Chul Shin çalışmasında betonlarda ısı iletkenlik katsayısının değişiminin tahmini için bir denklem ve model önermiştir. Bu denklemde ısı iletkenlik kat sayısı betonlarda su miktarına, yoğunluğa ve agrega yüzdesine bağlıdır. Yoğunluğun değişimine uygun bir halde ısı iletkenlik katsayısı da değişmektedir (Chul Shin *et al.* 2012).

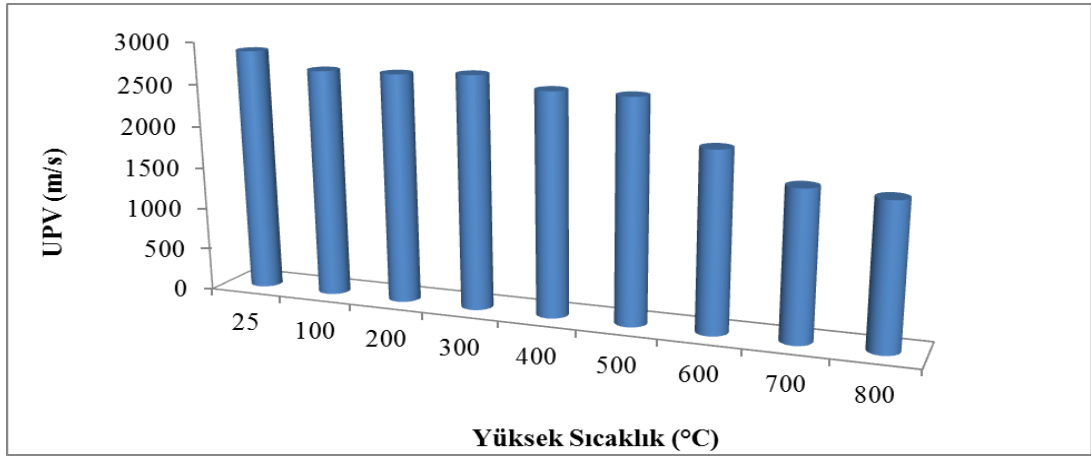
Kim (2003)'in çalışmalarında ısı iletkenlik katsayısı büyük ölçüde agregaların hacmine, nem oranına ve su/bağlayıcı oranına bağlıdır. Betonun kr süresi yalnız betonun erken yaşlarında ısı iletkenlik katsayısında etkisi var ve zaman ilerledikçe zamanın bu değerde etkisi yoktur (Kim *et al.* 2003).

Geopolimerlerin mikroyapısının incelemesinde (4.8.2 bölümünde) görüldüğü gibi pomza esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklığa maruz kaldığında oluşan buharın geçisini sağlayan çok miktarda küçük boşlukların sahip olduğu görülmektedir. Aynı Şekilde bu sonuçlar uçucu kül esaslı geopolimerlerde de görülmektedirler (Kong *et al.* 2007; Topcu and toprak 2011). Geopolimer betonlarda aynen normal betonlar gibi boşlukların artmasıyla ve yoğunluğun azalmasıyla ısı iletkenlik katsayısı azalmaktadır.

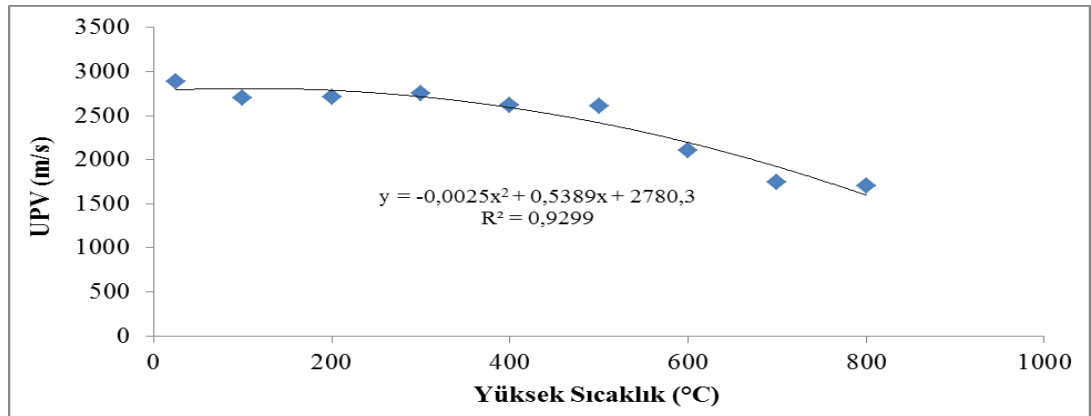
4.10.11.e. Sertleşmiş betonda YS –UPV (m/s) ilişkisi tayini

Aynı basınç deneyi gibi beton numunelerimiz üretilikten sonra üç saat boyunca 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C yüksek sıcaklığlara maruz

kalmıştır. Numuneler C25 betonlar olmuştur. Yüksek sıcaklıktan sonra numuneler havada soğutulmuş ultra ses geçiş hızları (UPV) ölçülmüştür. 10*20cm'lik silindirik numunelerin hepsinde yüksek sıcaklığın artmasıyla iletkenlik katsayısı azalmıştır. Bu azalma miktarları sırasıyla 0,065-0,061-0,048-0,093-0,096-0,273-0,394 ve 0,420 dır. En çok azalma miktarı 800°C derece sıcaklıkta meydana gelmektedir. Çizelge 4.36, Şekil 4.99 ve Şekil 4.100'de görüldüğü gibi numuneler yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra UPV değerleri azalmıştır ve bu azalma düzenli bir şekilde yüksek sıcaklık değerlerinin hepsinde mevcuttur ve ikinci derecede olan çok iyi polinomial bir korelasyon $R^2=0,9299$ sağlanmıştır.



Şekil 4.99. Geopolimer betonlarda YS- UPV (m/s) ilişkisi



Şekil 4.100. Geopolimer betonlarda YS- UPV (m/s) ilişkisi

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

1- Geopolimer için dokuz karışım hazırlanmıştır ve sonuçta en yüksek basınç mukavemeti oluşturan karışım özellikleri açıklanmıştır.

2- Öğütülmüş Hasankale pomzası aktive edilebilmektedir. Sodyum hidroksit ile sabit sıcaklıkta aktive edilen pomza, geopolimer üretiminde kullanılabilir.

3- Farklı su/bağlayıcı, farklı silika modülü, farklı kür süresi ve farklı kür sıcaklığının etkisi Hasankale pomzasından geopolimer üretmek için araştırılarak, 28 günlük basınç mukavemeti 40,28MPa olan geopolimer üretilmiştir. Bu mukavemete sahip geopolimerler harç ve beton üretiminde kullanılabilir ve geopolimerler çimentoya alternatif bağlayıcı olabilir.

4- Tüm kür sıcaklıklarında silika modülü sabit olduğunda ($SM=0,52-0,60$ ve $0,68$), Na_2O miktarının artması ile ($Na_2O = \%4, \%7$ ve $\%10$) basınç mukavemeti artmaktadır.

5- Karışımlardan alınan sonuçlara göre farklı silika modüllerinde, silika modülü arttıkça basınç mukavemeti de artmaktadır.

6- En iyi karışımda (su/bağlayıcı=0,36, $SM=0,68$ ve $Na_2O =10\%$) UPV ve basınç mukavemeti arasında iyi derecede bir korelasyon görülmektedir.

7- Sabit $Na_2O=\%10$ miktarında su/bağlayıcı oranı arttıkça mukavemet önemli derecede azalmaktadır.

8- Tüm kür sıcaklıklarında sabit su/bağlayıcı oranlarında (0,36-0,40 ve 0,44) Na₂O miktarının artması ile (%4, %7 ve %10) numunelerin basınç mukavemeti'nde artmaktadır.

9- Sabit silika modüllerinde (SM=0,52-0,60 ve 0,68), Na₂O miktarı ile priz başlangıç ve bitiş süresi arasında korelasyon gözükmemektedir.

10- Farklı su/bağlayıcı oranlarında (0,36-0,40 ve 0,44) Na₂O miktarı ve priz başlangıç ve bitiş süreleri arasında bir korelasyon gözükmemektedir ve Na₂O miktarının artması ile priz başlangıç ve bitiş süreleri azalmaktadır.

11- Kür süresi geopolimerlerin basınç mukavemeti kazanması üzerinde çok büyük bir etkisi vardır, fakat 28 günden sonra mukavemetin zamanla artma eğilimi azalmaktadır.

12- Dokuz karışımla üretilen geopolimerlerde taze ve sertleşmiş geopolimerlerin yoğunlukları arasında iyi bir korelasyon gözükmemektedir.

13- En iyi kür süresi 48 saat ve en iyi kür sıcaklığı 65°C olarak tespit edilmiştir. Kür aşamasından önce bekleme süresinin geopolimerin basınç mukavemeti üzerinde büyük bir etkisi vardır. En yüksek basınç mukavemeti elde etmek için numuneler üretildikten sonra hemen sıcaklık işleminin yapılması gerekmektedir.

14- Bu çalışmadan alınan sonuçlara göre yapay sinir ağları yöntemi geopolimerlerin basınç mukavemetini tahmin etmek için kullanılabilir. Yapay sinir ağları yönteminde bir kaç katmanlı *feed forward back propagation* modelleme seçeneğinin kullanılması yararlı görülmüştür. Bu çalışmaya göre silika modülü, Na₂O miktarı, su/bağlayıcı oranı, kür süresi ve UPV giriş değerlerinden geopolimerlerin basınç mukavemeti tahmin edilebilmektedir ($R^2=0,9585$).

15- En yüksek basınç mukavemeti oluşturan geopolimer hamurdan C25 geopolimer beton üretilmiştir ve üretilen geopolimer betonların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan önce ve sonra UPV değerleri, ısı iletkenlik değerleri, yoğunlukları ve basınç mukavemetleri incelenmiştir ve sıcaklıklardan dolayı bu değerlerin azalma sonucuna varılmıştır.

16- Geopolimer mikro yapısının yüksek sıcaklıklarda oluşan buharın çıkışını sağlayan çok miktarda küçük boşluklara sahip olduğu görülmüştür.

17- Bağlayıcı yapılarını oluşturan N-A-S-H jellerinin yapısında su olmaması ve mikro yapılarında küçük ve süreksiz boşluklar olması geopolimere yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklılık ve hafiflik sağlamaktadır.

18- Türkiyede pomza esaslı geopolimer üretilmesi ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu doktora tezinde pomza alkali aktivasyonu ile üretilen geopolimerlerin dayanımları, yüksek sıcaklıklarda fiziksel, mekanik ve mikro yapı özellikleri hakkında literatüre önemli bilgiler kazandırılmıştır.

19- İleriki çalışmalarda pomza esaslı geopolimerlerin sülfat etkileri, asit etkileri, donma-çözülme etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aaron, R.S., Anderson, E., Schauer, C., Barsoum, M.W., 2009. Mechanical and Microstructural Characterization of An Alkali-Activated Slag/Limestone Fine Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2951–2957.
- Abora, K., Quillin, K., Paine, K. A., Dunster, A. M., 2009. Effect Of Mix Design on Consistence And Setting Time of Alkali Activated Concrete. *Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies*, Bath, UK,6-9.
- Akman, S., 1990. *Yapı Malzemeleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat FakültesiYayını, İstanbul, (ikinci baskı), 162.
- Allahverdi, A., Mehrpour, K., Kani, E. N., 2008. Taftan Pozzolan-Based Geopolymer Cement.IUST International Journal of Engineering Science, 19, 1-5.
- Allahverdi, A. and Skavara, F., 2001a. Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements, Part1. Mechanism of corrosion at relatively high Concentrations. *Ceramics–Silikaty*, 45 (3), 81 – 88.
- Allahverdi, A. and Skavara, F., 2001b. Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements, Part 1,*Ceramics–Silikaty*, 45 (3), 81 – 88.
- Allahverdi, A. and Skavara, F., 2001c. Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements, Part 2,*Ceramics–Silikaty*, 45 (4), 143-149.
- Allahverdi, A. and Skavara, F., 2006. Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements, Part 2 Corrosion mechanism at mild and relatively low concentrations. *Ceramics–Silikaty*, 50(1), 1–4.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F. and Santoro, L., 2008. Coal Fly Ash as Raw Material for the Manufacture of Geopolymerbased Products, *Waste Management*, 28, 416–423.
- Anuar, K.A, Ridzuan, A.R.M., Ismail, S., 2011.Strength Characteristic of Geopolymer Concrete Containing Recycled Concrete Agregate. *International Journal of Civil Environmental Engineering*, 11, no: 01,81-85.
- Anuradha, R., Sreevidya,V.,Venkatasubramani, r.,Rangan, B.V., 2013.Midified Guidlines for Geopolymer Concrete Mix Design Using for Indian Standards.*Asian Journal of Civil Engineering*, 13, no.3 ,353-364.
- Arioz, O. 2007. Effects of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire Safety J.*42-516–522.
- Atış , C. D., Bilim, C., Çelik, Ö., Karahan, O., 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 23, 548-555.
- Aydın,S., Yazıcı, H.,Baradan, B. 2008a. High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Const. Build. Mater.* 22 (4) 504–512.
- Aydın, S. 2008b. Development of a high temperature-resistant mortar by using slag and pumice, *Fire Safety.* 1 (43) 610–617.

- Bakharev, T., 2005b. Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. *Cement and Concrete Research*, 35 (6), 1224-1232.
- Bakharev, T., 2005a. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement Concrete Research*, 35, 658 – 670.
- Bakharev, T., 2005c. Durability of geopolymer materials in magnesium and sodium sulphate solution. *Cement & Concrete Research*, 35, 1233-1246.
- Bakhareva, T., Sanjayana, J. G., Cheng, Y. B., 2000. Effect of Admixtures On Properties of Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 1367-1374.
- Bakharev, T., Sanjayana, J. G., Cheng, Y. B., 1999. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, 1619–1625.
- Baradan B., 1991. Yapı Malzemesi 2, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayını, İzmir.
- Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D. , Thaumaturgo, C., 2000. Synthesis and Characterization of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers. *International Journal of Inorganic Material*, 2 (4), 309–317.
- Bayrak, N., 2005. Pomza Taslarının X-Isını Toz Kırınım Yöntemi ile Nitel Analizi ve Yapısal Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi.
- Bernal, S.A., Bejarano, J., Garzon, C., Gutierrez, R.M., Delvasto, S., Rodriguez, E.D., 2012. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites. *Composites: Part B*, 43, 1919–1928
- Bessenouci, M.Z., Bibi Triki, N.E., Khell, S., Draoui, B., Abene, A. 2011. The apparent thermal conductivity of pozzolana concrete. *Physics Procedia* (21) 59 – 66.
- Bingol, A.F., Gul, R. 2009. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete, *Fire Mater.* (33) 79–88.
- Bondar, D., Lynsdale, C.J. , Milestone, N. B. , Hassani, N. , Ramezani pour, A.A., 2011c. Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 33, 251-260.
- Bondar, D., Lynsdale, C.I., Milestone, N.B., Ramezani pour, A.A., 2011a. Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 10, pp 4065–4071.
- Bondar, D., Lynsdale, C.I., Milestone, N.B., Ramezani pour, A.A., 2011b. Effect of adding mineral additives to alkali-activated natural pozzolan paste. *Construction and Building Materials*, 25, 2906-2910.
- Brough, A.R., Atkinson, A., 2002. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cem Con Res*, 32 (6), 865-879.
- Capros, P., Kouvaritakis, N., Mantzos, L., 2001. Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change: Top-down Analysis of Greenhouse Gas Emission Possibilities in the E.U., Contribution to a Study for DG Environment. European Commission.

- Chan, S.Y.N. , Luo, X.,Sun,W. 2000a. Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete, *Const. Build. Mater*, 14 -261–266.
- Chan, S.Y.N. , Luo, X.,Sun,W. 2000b. Thecompressivestrengthandporestructureof high performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C, *Cem. Concr.Res*,30-247–251.
- Chul Shin, A.H., Kodide, U. 2012. Thermal conductivity of ternary mixtures for concrete pavements. *Cement & Concrete Composites* (34)575–582.
- Collins, F.G., Sanjayan, J.G. 1999. Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Concrete.*Cement and Concrete Research*, 29, 455–458.
- Criado,M., Palomo, A., Fernandez-Jimenez,A. 2005. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, (84) 2048-2054.
- Damineli, BL., Kemeid, FM., Aguiar, PS., John, M.2010. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement Concrete Comp*, 32: 555-62.
- Davidovits, J. 1982. Mineral polymers and method of making them. United States Patent. 4, 349-386.
- Davidovits, J. 1991. Properties of Geopolymer Cements. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
- Davidovits, J. 1994a. Properties of Geopolymer Cements. First. International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine.
- Davidovits, J. 1994b. Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*, 6(2), 263–278
- Davidovits, J. 1994c. Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *journal of materials education*, 91-137.
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. *Geopolymer International Conference*, France.
- Davidovits, J., 2002. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. *Geopolymer 2002 Conference*, Melbourne, Australia.
- Davidovits, J., 2011. *Geopolymer Chemistry and Applications* (3rd edition) Saint- Quentin : Institut Géopolymère, France.
- Davraz, M., 2001.Pomzanın Endrüstriyel Kullanım Alanları.Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Semineri, Isparta.
- Demirboga, R., Gul, R. 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research* (33) 723–727.
- Demirboga, R. 2007.Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. *Building and Environment* (42) 2467–2471.
- Dias, W., Khoury, A., Sullivan, P. 1990. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C (1292F). *ACI Mater J*;87(2):160–6.
- Duan, Z.H. , Kou, S.C.,Poon, C.S. 2012., Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks. *Construction and Building Materials* Volume 40, 1200–1206.

- Duxson, P., & Provis, J. L. , 2008. Low CO₂ concrete: Are we making any progress? In BEDP environment design guide. Royal Australian Institute of Architects.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., van Deventer, J. S. J. , 2007b. Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Material Science*, 42, 2917–2933.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. , 2007a. The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–1597.
- Emmons, P. H., Sordyl, D. J. , 2006. The state of the concrete repair industry, and a vision for its future. *Concrete Repair Bulletin*, July/August, 7–14.
- Erdoğan, T., 2003., *Beton*. Semih Ofset Matbaacılık Yayıncılık ve Ambalaj San. Tic. L. Ş., 774, Ankara, Türkiye.
- Fernandez, A., Palomo, J., 2005. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder Effect of The Activator. *Cement and Concrete Research*, 35, 1984–1992.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. , López-Hambrados, C., 2006. Engineering Properties of Alkali-Activated Fly Ash Concrete. *ACI Materials Journal*, 103(2), Mar–Apr, 106–112.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M., 2004. Microstructure Development of Alkali-activated Fly Ash Cement: A Descriptive Model. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204–1209.
- García-Lodeiro, I., Palomo, A. and Fernández-Jiménez, A., 2007. Alkali-aggregate Reaction in Activated Fly Ash Systems. *Cement and Concrete Research*, 37, 175–183.
- Gartner, E. , 2004. Industrially interesting approaches to low-CO₂ cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498.
- Glasser, F.P., 1995. Advanced cementitious materials. Insight into speciality inorganic chemicals (Ed, Thomson, D.). The Royal Society of Chemistry, 369-389.
- Glukhovskiy, V.D., 1981. *Slag-Alkali Concretes Produced From Fine-Grained Aggregate*, Kiev: Vishcha Shkolay.
- Gourley, J.T. and Johnson, G.B., 2005. Developments in Geopolymer Precast Concrete. *Proceedings of the Geopolymer 2005 World Congress*, Saint-Quentin, France, 139–143.
- Gourley, J.T., 2003. *Geopolymers: Opportunities for Environmentally Friendly Construction Materials*. Materials 2003 Conference: Adaptive Materials for a Modern Society, Institute of Materials Engineering Australasia, October, Sydney.
- Granizo, M. L., Varela, B., Ramírez, S., Sika, S.A., 2007. Alkali Activation of Metakaolin Parameter Affecting Mechanical, Structural and Microstructural Properties. *Special Edition Advance in Geopolymer Science Technology*, 42, 2934–2943.
- Gündüz, L., Rota, A., Hüseyin, A., 2001. *Türkiye Ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme karakteristiği Analizi*. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye.
- Habert, G., d’Espinose, J.B., Roussel, N., 2011. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1229-1238.

- Hardjito, D. and Rangan, B.V., 2005. Development and Properties of Low- Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. , 2004. Brief review of development of geopolymer concrete. Paper presented at the George Hoff Symposium, American Concrete Institute. U.S.A.
- Hendriks, C. A., Worrell, E., Jager, D. d., Blok, K., & Riemer, P. , 2004. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. 7th international conference on greenhouse gas control Technologies, 5-9 September 2004, Vancouver, Canada.
- Hendriks, C.A., E. Worrell, D. deJager, K. Block, and P. Riemer., 2003. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. IEA Greenhouse gas R&D Programme. Cheltenham, UK.
- Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D., 2009. A life-cycle assessment of portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *J. Clean Prod*, 17, 668-675.
- Ismail, M., Ismail, M.G., Muhammad, B., 2011. Influence of elevated temperatures on physical and compressive strength properties of concrete containing palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials* 25 -2358–2364.
- Janotka, I. and Nurnbergerova, T., 2005. Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. *Nuclear Engineering and Design*, 235, 2019-2032.
- Jiang, W.M., 1997. Alkali activated cementitious materials: mechanism, microstructure and properties. PhD thesis, the Pennsylvania State University, USA.
- Khoury , A., 2012. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog Struct Eng Mater* (2) 429–47.
- Kılıç , O., 2006. Pasinler (Erzurum) Kuzeyindeki Volkanik Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi. Yüksek lisans tezi, fen bilimleri enstitüsü, Konya-Turkey.
- Kim, K.H., Jeon, S.E., Kim, J.K., Yang, S., 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research* (33)363–371.
- Komljenovđc, M., Bašćarević, Z., Bradić, V., 2010. Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181,35-42.
- Komnitas, K., Zaharaki, D., 2007. Geopolymerization: a review and prospects for the minerals industry. *Mineral Engineering*. (20) 1261-1277.
- Komnitsasa, A., 2011. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023 – 1032.
- 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.
- Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G. 2008. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites*, (30), 986-991.
- Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., Crentsil, K.S., 2007. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37-12, 1583-1589.

- Kotan, T., 2009. Pasinler – Demirdöven Pomzası İle Üretilen Hafif Betonların Mekanik Özelliklerine Atmosferik Basınçlı Buhar Kürünün Etkisi. Yüksek Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Kumar, S., Kumar, R., Alex, T.C., Bandopadhyay, A. and Mehrotra, S.P., 2005. Effect of Mechanically Activated Fly Ash on the Properties of Geopolymer Cement. Proceedings of the Geopolymer 2005 World Congress, Saint-Quentin, France.
- Kumar, R., Kumar, S. and Mehrotra, S.P., 2007. Towards Sustainable Solutions for Fly Ash Through Mechanical Activation. Resources, Conservation and Recycling, 52, 157–159.
- Kusbiantoro, A., Nuruddin, M.F., Nasir Shafiq, N., Anwar Qazi, S., 2012. The effect of microwave incinerated rice husk ash on the compressive and bond strength of fly ash based geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 36, 695–703.
- Krivenko, P.V., 1992. Special Slag Alkaline Cements (Kiev: Budivelnik Publisher).
- Lane, R.O. and Best J.F., 1982. Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete, Concrete International, ACI, 81 -92.
- Lawson, S., & Dragusanu, R., 2008. Building the world: Mapping infrastructure demand. New York, NY: Goldman Sachs & Co.
- Lea, F., Stradling, R., 1922. The resistance to fire of concrete and reinforced concrete. Engineering 1922;144:341–4.
- Lee, W.K.W., van Deventer, J.S.J., 2004. The Interface Between Natural Siliceous Aggregates and Geopolymers. Cement and Concrete Research, 34(2), 95–206.
- Li, Q., Li, Z., Yuan, G., 2012. Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material. Construction and Building Materials 35 (2012) 687–692.
- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y., 2004. Development of Sustainable Cementitious Materials. Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 55-76.
- Lind, B.B., Fallman, A.M., Larsson L.B., 2001. Environmental impact of Ferrochrome Slag in Road Construction. Waste Management, 21, 255-264.
- Liu, F., Ross, M., Wang, S., 1995. Energy efficiency of china's cement industry. Energy 20, 669-681.
- Malolepszy, J., 1986. Activation of Synthetic Melitite Slags by Alkalis-8th International Congress on the Chemistry of Cement. Rio de Janeiro, Brazil.
- Manz, O.E., 1998. Coal Fly Ash: A Retrospective and Future Look. Energeia, 9 (2), 1–6.
- McNulty, E., 2009. Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement. Department of Chemistry, The Catholic University of America.
- Mendes A, Sanjayan J, Collins F., 2009. Long-term progressive deterioration following fire exposure of OPC versus slag blended cement pastes. Mater Struct 2009;42:95–101.
- Mendes, A., Sanjayan, J., Collins, F. 2008. Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. Mater Struct; 41(2):345–50.
- Mendes, A., Sanjayan, J., Gates, P., Collins, F., 2012. The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to

- elevated temperatures, as in a fire event. *Cement & Concrete Composites* 34 - 1067–1074.
- Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement Concrete Comp*, 31,601-605.
- Othuman, M.Z., Wang, Y.C., 2011. Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials* (25) 705–716.
- Özkan, Ş.G., Tuncer, G., 2001. Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye.
- 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.
- Pan, Z., Sanjayan, J.G., 2010. Stress–strain behaviour and abrupt loss of stiffness of geopolymer at elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites*, 32, 657–664
- Petzold, A., Rohrs, M., 1970. *Concrete for high temperatures*. Second ed. London: Maclaren and Sons Ltd.
- Phair, J. W. , 2006. Green chemistry for sustainable cement production and use. *Green Chemistry*, 8(9), 763–780.
- Pimraksa, K., Chindaprasirt, P., Rungchet, A., Sagoe-Crentsil, K., Sato, T., 2011. Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various $\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ratios. *Materials Science And Engineering A* 528.6616-6623.
- Polat, R., 2007. Genleştirilmiş Perlit Ve Pomza İle Hava Sürükleyici Katkının Betonda Kılcal Geçirimlilik Ve Don Hasarına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Poon, C., Azhar, M., Anson, M., Wong, Y.L., 2011. Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at temperatures. *Cem Concr Res* (3)1291–300.
- Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J., 2007. Direct measurement of the kinetics of geopolymerisation by in-situ energy dispersive X-ray diffractometry, *Journal of Materials Science*.(42) 2974-2981.
- Qiao, X.C., Cheeseman, C.R., Poon, C.S., 2009. Influences of Chemical Activators on Incinerator Bottom Ash. *Waste Management*, 29, 544-549.
- Rangan, B.V., 2008. *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Malaysia Construction Research Journal, 3 (2), 1–20.
- Rattanasak, U., Chindaprasirt, P., 2009. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*. 22-12, 1073-1078.
- Rittmann, A.L., 1976. *Volcanoes*. Orbis Publishing, London.
- Roy, D.M., Luke, K. and Diamond, S., 1984. Characterization of Fly Ash and Its Reaction in Concrete, *Proceedings, Materials Research Society, Pittsburg*.
- Roy, D.M., 1999. Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29, 2, 249-254.
- Sağlık, A.Ü., 2009. Alkali-Silica Reactivity And Activation of Ground Perlite-Containing Cementitious Mixtures. PhD thesis, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara.
- Sakulich, A.R., 2011. Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and Durability. *Sustainable Cities and Society*, 1, 195– 210.

- Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. , 2008. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 128–136.
- Seleem, H., Rashad, A., Elsokary, T. 2011. Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of blended cement concrete. *Construction and Building Materials* 25 - 1009–1017.
- Sezgin, M., Davraz, M. ve Gündüz, L., 2005. Pomza Endüstrisine Sektörel Bir Bakış. Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi, Isparta.
- Shariq, M., Prasad, J., Masood, A., 2013. Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, (40) 944-950.
- Shi, C., Day, R.L., 2001. Comparison of Different Methods for Enhancing Reactivity of Puzolans. *Cement and Concrete Research*, 31, 813-818.
- Shi, C., Fernandez-Jimenez, A., 2006. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. *Journal of Hazardous Materials*, 137 (3), 1656-1663.
- Sindhunata, van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C. and Xu, H. , 2006. Effect of Curing Temperature and Silicate Concentration on Fly Ash-Based Geopolymerization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47, 2991–2999.
- Skvara, F., Kopecky, L., Nemecek, J., Bittnar, A., 2006. Microstructure of Geopolymer Materials Based on Fly Ash. *ceramics-silikaty* 50(4), 208-215.
- Smith, M.A. and Osborne, G.J. 1977. Slag/fly ash cements. *World Cement Technology*, 8(6) 223-233
- Song, X.J., Marosszeky, M., Brungs, M., Munn, R., 2005. Durability of fly ash based Geopolymer concrete against sulphuric acid attack. 10 DBMC Int. Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France.
- Songpiriyakij, S., Pulngern, Pungpretrakul, T., Jaturapitakkul, C., 2011. Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste. *Materials and Design* (32) 3021–3028
- Sumajouw, M.D.J. and Rangan, B.V., 2006. Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Reinforced Beams and Columns. Research Report GC3, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Western Australia.
- Swaddle, T.W., 2001. Silicate complexes of aluminum (III) in aqueous systems, *Coordination Chemistry Reviews*. 219-221, 665-686.
- Swanepoel, J.C. , Strydom, C.A., 2002. Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material. *Applied Chemistry*, 17 (8), 1143–1148.
- Szabó, L., Hidalgo, I., Ciscar, J.C., Soria, A., 2006. CO₂ emission trading within the European Union and annex B countries: the cement industry case. *Energy Policy*, 34, 72-87.
- Tarefdar, R.A., White, L., Zaman, M., 2005. Neural Network Model for Asphalt concrete Permeability, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19-27.
- Taylor, M., Tam, C., & Gielen, D., 2006. Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry. Energy efficiency and CO₂ emission reduction potentials and policies in the cement industry. IEA, Paris: 4-5 September 2006.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S., 2009b. Resistance of fly ash based geopolymer mortars in sulfuric acid. *J. of Engg and Applied sciences*, 4(1), 65-70.
- Thokchom, S., Ghosh, P., 2009a. Acid resistance of fly ash based geopolymer mortars. *Int. Journal of recent trends in Engg*, 1(6), 36- 40.

- Topçu, İ.B., Toprak, M.U., 2011. Properties of geopolymer from circulating fluidized bed combustion coal bottom ash. *Materials Science and Engineering A*, 528, 1472-1477.
- Toprak, M.U., 2011. Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi. Doktora tezi, Fen Bilimleri, Eskişehir.
- Torgal, F. P., Gomes, J. C., Jalali S., 2008a. Alkali-Activated Binders: A Review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture. *Construction and Building Materials*, 22, 1315-1322.
- Türkmen, I., Karakoç, M.B., Demirboğa, R., 2011. Elazığ Ferrookrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Geopolimer Çimento Üretiminin Araştırılması. İnönü Üniversitesi, Malatya. (Tübitak Araştırma Projesi Gelişme Raporu Ap-Gr-01).
- Uysal, H., Demirboga, R., Sahin, R., Gul, R., 2004. The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Research* (34)845–848.
- Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C., 2002. The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly-ash and Kaolinitebased Geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89 (1–3), 63–73.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. , 2003. The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 57(7), 1272–1280.
- Van Oss, H. G., 2010. Cement. Reston, VA. United States Geological Survey.
- Von Bahr, B., Hanssen, O.J., Vold, M., Pott, G., Stoltenberg-Hansson, E., Stehen, B., 2003. Experiences of environmental performance evaluation in the cement industry. Data quality of environmental performance indicators as a limiting factor for Benchmarking and Rating. *J. Clean Prod*, 11, 713-725.
- Vydra, V., Vodak, F., Kapickova, O. and Hoskova, S., 2001. Effect of temperature on porosity of concrete for nuclear-safety structures. *Cement and Concrete Research*, 31, 1023-1026.
- Wallah, S.E. , Rangan, B.V. 2006., Low-calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete: Long Term Properties, Research Report GC2, Faculty of Engineering , Curtin University of Technology, Western Australia.
- Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L. and Pratt, P. L. 1995. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and products. *Advanced in Cement Research*, 7(27) 93-10,
- Weil, M., Dombrowski, K., Buchwald, A., 2009. Life-cycle analysis of geopolymers. In: Provis JL, van Deventer SJ. Editors. *Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Cambridge, UK. Woodhead Publishing Ltd, 194-210.
- Worrell, E., Martin, N., Price, L., 2000. Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy* 25, 1189-1214.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O, 2001. Carbon dioxide emissions from the cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1), 303–329.
- Xiao, J. , Falkner, H., 2006. On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety J.* 41 -115–121.

- Xie, Z., Xi, Y., 2001. Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research*. 31-9, 1245-1249.
- Xu, H. , van Deventer, J.S.J., 2002. Microstructural Characterisation of Geopolymers Synthesized from Kaolinite/Stilbite Mixtures Using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX and HREM. *Cement and Concrete Research*, 32, 1705–1716.
- Xu, H. and van Deventer, J.S.J., 2000., The Geopolymerisation of Alumino Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247– 266.
- Xu, H., Li, Q., Shen, L., Wang, W., Zhai, J., 2010. synthesis of thermostable geopolymer from circulating fluidized bed combustion bottom ashes. *journal of hazardous materials* (175)198-204.
- Yeh, Y.C., Kuo, Y.H. and Hsu, D.H., 1993. Building KBES for diagnostic PC Pile with ANN. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE 7, pp71-93.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. 2006. Recycled concrete exposed to high temperatures, *Mag. Concr. Res.* 58 (10) 675–682.
- Zoldners, N.G., Wilson, H.S. 1973. Effect of sustained and cyclic temperature exposures on lightweight concrete, *ACI Pub.* 39 (9) 149–178.

ÖZGEÇMİŞ

Mehrzad MOHABBI YADOLLAHI, 1980 yılında Tebriz’de doğdu. 1998 yılında Tebriz Valfajr Lisesi’ni bitirdi. 1999 yılında girdiği Tebriz Azad Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2003 yılında mezun olduktan sonra 2005 yılına kadar İran’da farklı şirketlerde ve farklı pozisyonlarda çalışıp ve inşaat sektöründe yeni tecrübelerine sahip oldu. 2005 yılında girdiği Maraghe Azad Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümün’den 2008 yılında mezun olduktan sonra 2010 yılına kadar Tebriz’in Traktör fabrikasında inşaat mühendislik müşaviri ve yetkilisi olarak çalışmalarına devam etti. 2010 yılında Atatürk Üniversitesinde doktora programına başladı. Uluslararası ve ulusal hakemli dergilerde makaleler ve uluslararası kongre ve sempozyumlarda bildiriler yayımladı. Tamamlanmış olan dört Bilimsel Araştırma Projesinde (BAP) görev yaptı.