

T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFUNDAN ÜRETİLEN GEOPOLİMER ÇİMENTOLU  
BETONLARIN SÜLFAT DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI

MÜSLÜM MURAT MARAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MALATYA  
Temmuz 2013

**Tezin Başlığı:** Elazığ Ferrookrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması

**Tezi Hazırlayan:** Müslüm Murat MARAŞ

**Sınav Tarihi:** 15.07.2013

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

**Sınav Jürisi Üyeleri** (ilk isim tez danışmanı, ikinci isim jüri başkanı)

<b>Tez Danışmanı:</b>	<b>Yrd. Doç.Dr. M. Burhan KARAKOÇ</b>	.....
	İnönü Üniversitesi	
	<b>Doç.Dr. İbrahim TÜRKMEN</b>	.....
	İnönü Üniversitesi	
	<b>Yrd. Doç. Dr. Yaşar AYZ</b>	.....
	İnönü Üniversitesi	

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Mehmet ALPASLAN

Enstitü Müdürü

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum ‘ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFUNDAN ÜRETİLEN GEOPOLİMER ÇİMENTOLU BETONLARIN SÜLFAT DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Müslüm Murat MARAŞ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFUNDAN ÜRETİLEN GEOPOLİMER ÇİMENTOLU BETONLARIN SÜLFAT DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI

Müslüm Murat MARAŞ

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

169 + xv sayfa

2013

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Elazığ ili Maden ilçesinin Alacakaya köyü sınırları içerisinde bulunan ve dünya rezervinin %10'unu oluşturan kromit yatakları, Elazığ Ferrokrom Tesislerinde işlenmektedir. Bu fabrikada ana ürünün dışında birçok yan ürün de oluşmaktadır. Bu yan ürünlerden bir tanesi de Elazığ Ferrokrom cürufu (EFC) dur. Bu çalışmada EFC, çimento inceliğinde öğütülüp, alkali ile aktive edildikten sonra, bağlayıcı özelliğe sahip bir geopolimer malzeme oluşturulması amaçlanmaktadır. Geopolimer hamur numuneleri 3 farklı silis modülü (0.50, 0.60 ve 0.70) ve 4 farklı sodyum oksit içeriğiyle (%4, 7, 10 ve 12) üretilmiştir. Geopolimer hamur numunelerinde priz süresi, hidrasyon ısı ve basınç dayanımı incelenmiştir. Farklı Na<sub>2</sub>O içeriğine bağlı olarak priz süreleri 120 ve 870 dakika arasında değişim göstermiştir. 28 günlük maksimum basınç dayanımı Na<sub>2</sub>O içeriği %7 ve silis modülü 0.70 olan geopolimer hamur numunelerinden elde edilmiştir. Geopolimer bağlayıcı, çimento yerine kullanılarak farklı su/bağlayıcı (w/b) oranlarında (0.30, 0.35 ve 0.40) ve 3 farklı kür

ortamında harç numuneler üretilmiştir. Genel olarak bu geopolimer harç numunelerin w/b oranının artmasıyla basınç dayanımları azalmıştır. Geopolimer harç numunelerin 28 günlük maksimum basınç dayanımı w/b oranı 0.30 olan ve laboratuvar ortamında kür edilen numunelerden elde edilmiştir. Bu bağlayıcı madde ve agregası (dere agregası ve kırma kum) kullanılarak geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (3, 7 ve 28 gün) ve sülfat dirençleri incelenmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri geopolimer beton numuneler için yaklaşık 35 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu numunelerin farklı magnezyum sülfat çözeltileri içerisinde (ağırlıkça %3, %5 ve %7) basınç dayanımı, ağırlık değişimi, boy değişimi, pH değişimi ve görsel görünümü incelenmiştir. Geopolimer beton numunelerin magnezyum sülfata karşı iyi direnç gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca, geopolimer beton numunelerin görsel görünümünde herhangi bir bozulma olmamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer çimento, Elazığ ferrokrom cürufu, alkali-aktivatör, sülfat direnci

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### INVESTIGATION OF GEOPOLYMER CEMENT CONCRETE SAMPLES FROM ELAZIĞ FERROCHROME SLAG OF SULFATE RESISTANCE

Müslüm Murat MARAŞ

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

169 + xv pages

2013

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

The chromite deposits which are 10% of the world reserves located within the boundaries of Maden town-Alacakaya village of Elazığ are processed in Elazığ Ferrochrome Plants. Apart from the main product many by-products are produced in this factory. One of these by-products is Elazığ Ferrochrome slag (EFS). In this study, it is intended to produce a geopolymer material with binding property produced by grinding the EFS as fine as cement. Geopolymer paste samples were produced with 3 different silica modulus (0.50, 0.60 and 0.70) and 4 different Na<sub>2</sub>O concentration of (4, 7, 10 and 12%). The setting time, heat of hydration and compressive strength of geopolymer paste samples were examined. The setting time varies between 120 and 870 min, it shows variability depending on content of Na<sub>2</sub>O. The highest 28 day strength of the geopolymer paste sample was obtained from Na<sub>2</sub>O

concentration of 7% and at silica modulus of 0.70. Geopolymer binding, instead of cement, mortar samples were produced with different water/binder (w/b) ratios (0.30, 0.35 and 0.40) and under 3 different curing conditions. Usually w/b is increased for decreasing the compressive strength of geopolymer mortar samples. The highest 28 day strength of the geopolymer mortar samples were obtained at 0.30 w/b ratio and samples were cured at laboratory conditions. Geopolymer concrete samples were produced by using this binding material aggregates (river sand and crushed sand). Compressive strength (3, 7 and 28 days) and sulfate resistance of geopolymer concrete samples were obtained experimentally. The highest compressive strength for geopolymer concrete samples were determined nearly 35 MPa. The compressive strength, change in weight, length of change, variation of pH solution and visual appearance of these samples were examined with different magnesium sulphate solution (by weight 3%, 5% and 7%). Samples of geopolymer concrete showed great resistance against magnesium sulfate solution. In addition, there were no visual signs of deterioration of the geopolymer concrete specimens.

**Keywords:** Geopolymer cement, Elazığ ferrochrome slag, alkali-activator, sulfate resistance

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının konusunu öneren ve çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek tez çalıőmamı tamamlamamı sağlayan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a;

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyen 111M147 TUBİTAK proje yürütücüsü Sayın Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e;

Çalıőmalarımıza yardımcı olan beraber çalıőtıęım arkadaőım Sayın Arő. Gör. Fatih KANTARCI 'ya

Çalıőmalarımıza 111M147 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK-ARDEB yetkililerine,

Çalıőmalarımıza 2012/10 numaralı proje ile maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi yetkililerine,

Çalıőmalarımıza cüruf temin etmemizi sağlayan Elazığ Ferrokrom fabrikası yetkililerine,

Laboratuar çalıőmalarımıza yardım eden teknisyenimiz Sayın İlhami BAYSAL'a,

Deneysel çalıőmalarımızda yardımcı olan Sayın Arő. Gör. Cihangir BOZTEPE'ye

teşekkür ederim.

Ayrıca, bugüne kadar olduğu gibi, yüksek lisans eğitimim süresince de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür eder, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını dilerim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
2.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu (EFC).....	2
2.1.1. Potansiyel geri-dönüşüm malzemesi olarak ferrokrom cürufu .....	2
2.1.2. Elazığ ferrokrom fabrikası hakkında genel bilgiler .....	3
2.1.3. Ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal bileşimi .....	3
2.1.4. Elazığ Ferrokrom cürufunun kullanım alanları.....	5
2.2. Cüruf Kullanılarak Yapılan Çalışmalar .....	5
2.3. Çimento Üretimi ve Çevreye Etkileri .....	7
2.4. Aktivatörler .....	9
2.5. Geopolimer .....	12
2.5.1. Geopolimer kimyası.....	18
2.5.2. Agreganın geopolimerlere etkisi .....	24
2.5.3. Kür sıcaklığının geopolimerlere etkisi .....	24
2.5.4. Su/bağlayıcı oranının geopolimerlere etkisi.....	28
2.5.5. Mikroyapı özelliklerinin geopolimere etkisi.....	30
2.5.6. Geopolimerde basınç dayanımı.....	31
2.5.7. Geopolimerlerde priz süresi .....	33
2.5.8. Geopolimerlerde aktivatör oranı etkisi .....	34
2.5.9. Geopolimerlerde yangın etkisi .....	40
2.5.10. Geopolimerlerde Si/Al oranının etkisi .....	43
2.5.11. Geopolimerlerde $Na_2O$ içeriği .....	46
2.5.12. Geopolimerlerde alkali aktivatör yoğunluğunun etkisi .....	47
2.5.13. Geopolimerlerde pH etkisi .....	50
2.5.14. Geopolimerlerin uygulama alanları .....	51
2.6. Betonlarda Sülfat Etkisi .....	53

2.6.1. Sülfat saldırılarının oluşumu .....	55
2.6.2. Sülfat saldırılarının kaynağı .....	56
2.6.3. Sülfat saldırılarının mekanizması ve tarihi .....	58
2.6.4. Etrenjit oluşumu ve genleşme .....	59
2.6.5. C-S-H jelinin oluşumuyla sülfatın etkileşimi.....	62
2.6.6. Sülfat saldırılarının önlenmesi .....	63
2.6.7. Sülfat saldırısı ile ilgili standartlar .....	65
2.6.8. Katkı maddeleri içeren beton ve harç numunelerinin sülfata karşı dayanıklılığı.....	65
2.6.9. Geopolimer betonlarda sülfat etkisi .....	68
2.6.10. Normal çimentolu betonlarda sülfat etkisi .....	70
2.7. Sülfat Etki Türleri .....	72
2.7.1. İç kaynaklı sülfat etkisi .....	72
2.7.2. Dış kaynaklı sülfat etkisi.....	78
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	82
3.1. Materyal .....	82
3.1.1. Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) ve özellikleri.....	82
3.1.2. Aktivatörler .....	82
3.1.3. Agregası ve silis kumu .....	83
3.1.4. Çimento.....	84
3.1.5. Magnezyum sülfat.....	84
3.1.6. Karma suyu .....	85
3.2. Yöntem.....	85
3.2.1. Hamur numunelerinde priz süresi ölçümü .....	85
3.2.2. Hamur numunelerinde hidrasyon ısı ölçümü.....	87
3.2.3. Hamur ve harç numunelerinde mikroyapı analizi.....	91
3.2.4. Agregası deneylerinde uygulanan yöntemler .....	96
3.2.5. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi .....	97
3.2.6. Karışım oranlarının belirlenmesi .....	97
3.2.7. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı .....	99
3.2.8. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	99
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	102
4.1. Geopolimer Hamur Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma .....	104
4.1.1. Geopolimer hamur numunelerin priz süreleri .....	104
4.1.2 Geopolimer ve Portland çimentolu hamur numunelerin hidrasyon ısıları .....	107
4.1.3 Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımları.....	111
4.1.4. Geopolimer hamur numunelerin mikroyapı özellikleri.....	114

4.2. Geopolimer Harç Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma.....	120
4.2.1. Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ile ilgili bulgular.....	120
4.2.2. Geopolimer harç numunelerin mikroyapı özellikleri.....	125
4.2.3. Geopolimer harç numunelerinde w/b oranının basınç dayanım değerlerine etkisi .....	127
4.3. Agrega Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma.....	127
4.4. Geopolimer Beton Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma.....	128
4.4.1. Beton numunelerinin basınç dayanımı ile ilgili bulgular .....	129
4.4.2. Beton numunelerinin sülfat etkisinde basınç dayanımı ile ilgili bulgular.....	131
4.4.3. Beton numunelerinin sülfat etkisinde ağırlık değişimi ile ilgili bulgular.....	133
4.4.4. Beton numunelerinde sülfat etkisinde genleşme ile ilgili bulgular .....	135
4.4.5. Beton numunelerde sülfat etkisinde pH değeri ile ilgili bulgular .....	137
4.4.6. Beton numunelerinde sülfat etkisinde görsel görünümü ile ilgili bulgular .....	139
4.4.7. Beton numunelerin sülfat etkisindeki yapılan çalışmaları ve bulguları .....	139
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	152
6. KAYNAKLAR .....	154
ÖZGEÇMİŞ .....	169

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- EFC: Elazığ Ferrokrom cürufu
- $Al_2O_3$ : Aluminyum oksit
- C: C sınıfı uçucu kül
- CaO: Kalsiyum oksit; sönmemiş kireç
- AAS: Alkali aktivasyonlu cüruflar
- GGBS: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
- RSGB: Rezarvuvar çamur partikül tabanlı geopolimerler
- CRS: Kalsine rezarvuvarlı çamur
- F: F sınıfı uçucu kül
- P: Fosfat
- SH: Sodyum hidroksit ( NaOH )
- Si: Silisyum
- $SiO_2$ : Silisyum dioksit
- SS: Sodyum metasilikat ( $Na_2SiO_3$ )
- $SiO_2/Na_2O$ : Silis modülü
- s/b: Su bağlayıcı oranı
- ASR: Alkali silika reaksiyonu
- FBC: Akışkan yataklı küller
- PCC: Pulverize kömür yanmalı uçucu küller
- SAK: Süperakışkanlaştırıcı
- TK: Taban külü

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. FeCr cürufunun kimyasal kompozisyonu .....	4
Şekil 2. Alümino silikat yapıları ile geopolimer türleri .....	19
Şekil 3. Uçucu kül bağlayan amorf (camsı) faz .....	20
Şekil 4. Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkileri .....	25
Şekil 5. Su/geopolimer katı madde oranının basınç dayanımına etkisi .....	30
Şekil 6. Zamanın dayanım üzerindeki etkileri .....	31
Şekil 7. Sodyum Silikat/NaOH (ağırlık) oranı ile dayanım arasındaki ilişki.....	37
Şekil 8. Alkali hidroksit konsantrasyonu ile basınç dayanımı değişimi .....	39
Şekil 9. NaOH veya KOH kullanılması durumunda basınç dayanımının $Na_2SiO_3$ oranına göre değişimi .....	39
Şekil 10. Portland çimentosu ile geopolimer çimentolu numunelerin yangın dayanımları.....	40
Şekil 11. Sülfirik asit çözeltisi içindeki geopolimerin ağırlık kaybına alkali içeriğinin etkisi .....	49
Şekil 12. Sülfirik asit çözeltisi içindeki geopolimerin basınç dayanımına alkali içeriğinin etkisi.....	50
Şekil 13. Etrenjitin kristali yapısı.....	61
Şekil 14. Normal sıcaklıkta $20^{\circ}C$ ve 12 saat $100^{\circ}C$ 'de kür edilen betonlarda hacim artışı.....	76
Şekil 15. Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasına yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nemin etkisiyle etrenjit oluşumunun şematik gösterimi.....	77
Şekil 16. Dere agregası .....	84
Şekil 17. Kırma kum agregası.....	84
Şekil 18. Vicat iğnesi .....	86
Şekil 19. Geopolimer hamur numunelerde priz ölçümü .....	87
Şekil 20. ToniCAL İzotermal Kalorimetre .....	88
Şekil 21. SEM'in şematik görünüşü.....	93
Şekil 22. XRD cihazı.....	95
Şekil 23. 10 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı. 110	

Şekil 24. Normal Portland çimento hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısı	110
Şekil 25. Geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri.....	113
Şekil 26. Geopolimer hamur numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri..	113
Şekil 27. Silis modülü 0.5 ve Na <sub>2</sub> O içeriği %4 olan hamur numunelerin XRD difraktogramları.....	115
Şekil 28. Silis modülü 0.7 ve Na <sub>2</sub> O içeriği %7 olan geopolimer hamur numunelerin XRD difraktogramları .....	115
Şekil 29. Silis modülü 0.5 ve Na <sub>2</sub> O içeriği %4 olan geopolimer hamur numunelerin SEM görüntüleri.....	118
Şekil 30. Na <sub>2</sub> O içeriği %12 olan geopolimer hamur numunelerin SEM görüntüleri .....	118
Şekil 31. Farklı w/b oranına sahip geopolimer harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri.....	121
Şekil 32. w/b oranı 0.30 olan laboratuvar ortamında kür edilen harç numunelerin SEM görüntüleri.....	126
Şekil 33. w/b oranı 0.40 olan 80 °C kürdeki harç numunelerin SEM görüntüleri...	126
Şekil 34. Farklı kür şartlarına sahip geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	127
Şekil 35. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri.....	130
Şekil 36. Beton numunelerin laboratuvar ve farklı magnezyum sülfat çözeltileri içerisinde 90 günlük basınç dayanım değerleri.....	132
Şekil 37. Dere agregalı geopolimer beton numunelerin farklı yoğunlukta MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde zamana bağlı ağırlık değişimleri .....	134
Şekil 38. Kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerin farklı yoğunlukta MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde zamana bağlı ağırlık değişimleri .....	134
Şekil 39. Normal Portland çimentolu beton numunelerin farklı yoğunlukta MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde zamana bağlı ağırlık değişimleri .....	135
Şekil 40. Dere agregalı geopolimer beton numunelerin farklı yoğunlukta MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde genleşmesi .....	136
Şekil 41. Kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerin farklı yoğunlukta MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde genleşmesi .....	137
Şekil 42. Normal Portland çimentolu beton numunelerin farklı yoğunlukta MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde genleşmesi .....	137

Şekil 43. Beton numunelerin $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde farklı kür sürelerinde pH değişimi.....	138
Şekil 44. 90 gün magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan beton numuneler.	139

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Portland çimentolar ile alternatif çimentoların üretiminde oluşan CO <sub>2</sub> miktarları.....	8
Çizelge 2. Alkali aktivasyon ve alkali çimento karışımlarının gelişimi .....	15
Çizelge 3. Elazığ Ferrokrom cürufu kimyasal bileşimi .....	82
Çizelge 4. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri .....	83
Çizelge 5. 1 m <sup>3</sup> beton için karışımlarda kullanılan malzeme miktarları .....	98
Çizelge 6. Geopolimer betonlarda deneme dökümleri.....	103
Çizelge 7. Geopolimer hamurların priz başlangıç ve bitiş süreleri .....	105
Çizelge 8. Hamur numunelerin hidrasyon ısıları .....	108
Çizelge 9. Geopolimer hamur numunelerde basınç dayanımı değerleri .....	112
Çizelge 10. Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerleri .....	121
Çizelge 11. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayin deney sonuçları.....	128
Çizelge 12. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri.....	129
Çizelge 13. Beton numunelerin MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde 90 günlük basınç dayanım değerleri.....	132
Çizelge 14. Beton numunelerin MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde ağırlık değişimleri .....	133
Çizelge 15. Beton numunelerin MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde genişmesi .....	136
Çizelge 16. Beton numunelerin MgSO <sub>4</sub> çözeltisi içerisinde pH değişimi.....	138



## 1.GİRİŞ

Elazığ ili Maden ilçesinin Alacakaya köyü sınırları içerisinde bulunan ve dünya rezervinin %10'unu oluşturan kromit yatakları, Elazığ Ferrokrom Tesislerinde işlenmektedir. Bu fabrikada ana ürünün dışında birçok yan ürün de oluşmaktadır. Bu yan ürünlerden bir tanesi de Elazığ Ferrokrom cürufu (EFC) dur. Araştırmaya konu olan Elazığ Ferrokrom fabrikasında üretim 150.000 ton/yıl ve üretilen her 3 kg ferrokrom başına 1 kg cüruf atıldığından, 1 yılda atılan cüruf miktarı 50.000 ton'dur. Cüruf %3-5 arasında  $Cr_2O_3$  içermektedir (Yazıcı ve Kaya, 2003). Şu ana kadar birikmiş ve gelecekte birikecek cüruf miktarı gözönüne alındığında bu cürufu değerlendirme yollarının ortaya konulmasının önemi açıktır. Bu çalışmada, bu malzemenin beton içerisinde çimento yerine kullanılmasının mümkün olup olmadığı ve mümkünse optimum aktivatör, aktivatörün en uygun silis modülü, aktivatörün kuru bağlayıcıya göre miktarı ve optimum kür şartı araştırılmıştır. İlk olarak, 3 farklı silis modülü (0.50, 0.60, 0.70) ve 4 farklı sodyum oksit içeriğiyle (%4, 7, 10 ve 12) geopolimer hamur numuneleri üretilmiştir. Daha sonra geopolimer bağlayıcı olarak cüruf, çimento yerine kullanılarak farklı su/bağlayıcı (w/b) oranlarında (0.30, 0.35 ve 0.40) ve 3 farklı kür ortamında harç numuneler üretilmiştir. Ayrıca bu bağlayıcı maddeler ile agrega (dere agregası ve kırma kum) kullanılarak geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (3, 7 ve 28 gün) ve sülfat dirençleri incelenmiştir. Bu numunelerin farklı magnezyum sülfat çözeltileri içerisinde (ağırlıkça %3, %5 ve %7) basınç dayanımı, ağırlık değişimi, boy değişimi, pH değişimi ve görsel görünümü incelenmiştir. Sonuç olarak, çimento ihtiyacını azaltmak ve böylece enerji tasarrufu sağlamak, atık durumdaki bu yan ürünü piyasaya kazandırmak, endüstriyel kirlenmeyi ve hava kirliliğinin azaltılması hedeflenmektedir. Çimentoya alternatif olarak öğütülmüş EFC'nin alkali oksitlerle aktive edilerek inşaat sektöründe kullanılabilirliğinin ortaya konulması, yöresel bir atık malzemenin değerlendirilmesi çalışmanın özgün değerini artırmaktadır. Ayrıca elde edilen geopolimer beton numunelerin sülfata dayanıklılığı incelenmiştir.

## **2. LİTERATÜR ÖZETİ**

### **2.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu (EFC)**

Elazığ Ferrokrom fabrikasının ana bileşenleri magnezyum, silikat ve alüminattır. Genel olarak örneklerin ana bileşenleri; silikat, alüminat, kalsiyum, magnezyum ve demiroksittir. Numunede kızdırma kaybı büyük farklılıklar göstermektedir. Fazla çıkan kızdırma kayıplarının kaynağı olarak organik maddelerin yanması, karbonatların bozulması ve killerin dehidrasyonu gösterilebilir. Yüksek sıcaklıkta işlem görmüş cürufta kızdırma kaybı düşüktür. Ferrokrom cürufunun negatif kızdırma kaybı yüksek sıcaklıkta kısmen ağırlık artışı olduğunu ifade eder. Hava ile temas halinde yapılan kızdırma işleminde bazı bileşiklerin yükseltgenerek oksijen bağlamaları (metalik demir, krom ve demiroksit gibi) ve böylece kızdırma kaybını negatif yapmaları mümkündür (Taşdemir, 2006).

#### **2.1.1. Potansiyel geri-dönüşüm malzemesi olarak ferrokrom cürufu**

Cürufların soğutulma şekilleri farklı olduğu için sahip oldukları özelliklerde farklıdır. Havada yavaş soğutuldukları takdirde kristal bir yapıya sahip olurlar. Bu haliyle cüruf yüksek mekanik özellik gösterir ve çoğunlukla agrega olarak kullanılır. Yüksek fırından çıktığında eriyik halinde olan cüruf hızlı soğutulduğu takdirde ise akışkanlığındaki ani azalma kristalleşmeyi engeller ve camsı yapıda bir katı madde elde edilmesini sağlar. Bu yarı-kararlı camsı malzeme, bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Bu tür cüruf daha çok çimentolu sistemlerde, çimento ve beton üretiminde kullanılır ( Yılmaz ve Süttaş, 2008).

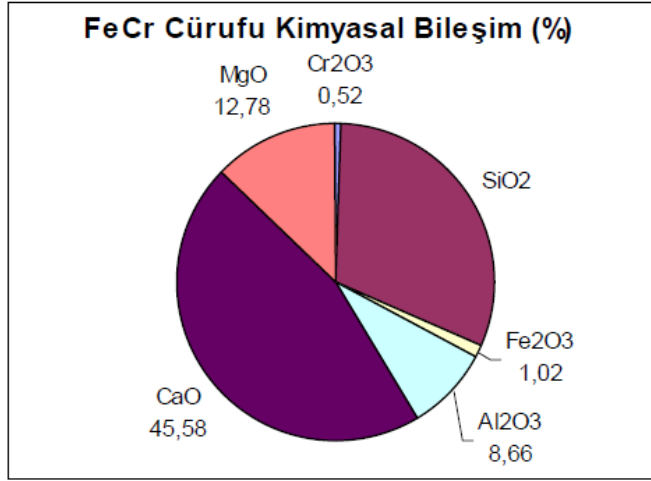
Ferrokrom cürufu, homojen olarak hazırlanmış ve bu malzemelerin beton agregası olarak kullanılabilirliği incelenmiştir (Zelic, 2005).

### **2.1.2. Elazığ ferrokrom fabrikası hakkında genel bilgiler**

Elazığ Ferrokrom fabrikası bölgede büyük rezervlere ulaşan kromit cevherini satış şartlarına uygun olarak ham veya işlenmiş halde pazarlanabilir bir ürün haline getirerek değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Elazığ Ferrokrom fabrikası, Elazığ-Bingöl karayolu üzerinde Elazığ'dan yaklaşık 60 km uzaklıkta olup Elazığ-Kovancılar ilçesi yakınında bulunmaktadır. Hammadde olarak kullanılan maddeler, %42-47 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren parça kromit cevheri (25-125 mm) yanında, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği düşük cevherlerin zenginleştirilmesi ile kazanılan Kef ve Sori Kromit (0-1 mm) konsantreleridir. Yardımcı maddeler ise, metalurjik kok (5-25 mm), kuvarsit (5-75 mm), boksit (5-75 mm) ve soderberg elektrot pastasıdır. Küçük tane boylu kromit konsantresi beslemesi, kullanılan ark-direnç fırınları teknolojisinde gaz geçirgenliğinin azalttığı için sınırlıdır. Fırın içinde ve potalarda, yüksek sıcaklıklarda (1700-1800°C) cürufun iyi erime ve akışkanlık özelliklerine sahip olması için belirli kimyasal bileşimi istenir (Taşdemir, 2006).

### **2.1.3. Ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal bileşimi**

Ferrokrom (FeCr) cüruflarının kimyasal kompozisyonu (Şekil 1) incelendiğinde, dört ana elementin hâkim olduğu görülmektedir. Bunlar; silisyum, magnezyum, alüminyum ve kalsiyumdur. Bu elementler oksitler halinde cürufun yaklaşık %95'ini oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak çok az miktarda demir ve krom bulunmaktadır. Cüruf içerisinde organik madde bulunmamaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2008).



Şekil 1. FeCr cürufunun kimyasal kompozisyonu

Taşdemir, (2006) yaptığı çalışmada çimento enjeksiyon model deneylerinde, katkı malzemesi olarak Elazığ Ferrochrom fabrikasında atık madde olan kristal yapı malzemeler kullanmıştır. Kristal malzemenin rölatif sıklık deneyi yapılarak en sıkı ve gevşek haldeki hacim ağırlıklarını tespit etmiş olup, bu değerleri sırasıyla  $g_{min}=1.54 \text{ kg/dm}^3$  ve  $g_{max}=1.64 \text{ kg/dm}^3$  olarak bulmuştur.

Cüruflar havada yavaş yavaş soğumaya bırakıldığı için kristal yapıdır ve aktif değildir. Bu cüruf türü “Havada soğutulmuş elektrik ark fırını cürufu” olarak adlandırılmaktadır. Bu haliyle cüruf yüksek mekanik özellik göstermekte ve genelde agrega olarak kullanıldığı belirtilmiştir (Stevenson, 1997).

Öte yandan, hızlı soğutma kullanılması sonucunda camsı (amorf) yapıda cüruf elde edilir ve bu tür cüruflar “granüle cüruf” olarak adlandırılır ve bir miktar bağlayıcı özelliğe sahiptirler. Dünyada yapı malzemesi olarak kullanılan cürufların çoğunluğunu, %80-90 oranında havada soğutulmuş, kristal yapı cüruflar oluşturur (Schroeder, 1994).

#### **2.1.4. Elazığ Ferrokrom cürufunun kullanım alanları**

Yapılan çalışmalar granüle yüksek fırın cüruflarının hafif beton yapımında kullanılması ile teknik ve ekonomik avantajlar sağladığını göstermektedir. Granüle cüruf kullanılarak elde edilen betonun birim ağırlığı, normal betona nazaran daha az olduğundan bu betonlardan yapılan yapılar üzerinde deprem etkisinin de daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca hafif betonların ısı iletim katsayılarının yapı malzemelerinin çoğuna göre daha küçük olması soğuk bölgelerde yakıt tüketimine ve dolaylı olarak çevre problemlerinin çözümüne katkısı olacağı açıktır. Gül ve Geçten (1997) tarafından yapılan çalışmada Elazığ Ferrokrom işletmesi granüle cürufunun hafif beton yapımında kullanılarak değerlendirilmesi hedef olarak seçilmiştir. Bu amaç için Elazığ Ferrokrom işletmesinden elde edilen cüruf numuneleri %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kum yerine kullanılarak elde edilen beton ile %100 kum kullanılarak üretilen betonun ısı geçirgenliği, basınç ve çekme dayanımı, elastisite modülü gibi bazı özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma ile bu cürufun hafif beton yapımında değerlendirilebileceği ve böylelikle bu atıkların çevreye yapacağı olumsuz etkinin önemli ölçüde önlenebileceği kanısına varılmıştır.

Ülkemizde, cüruflar konusunda daha çok demir-çelik işletmelerinin yüksek fırın cürufları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu cüruf atıklarının bazı kullanım alanları bulunmaktadır. Ancak, Ferrokrom tesislerinden çıkan fırın cüruflarının yol malzemesi olarak kullanımı konusunda yeterli bilimsel çalışma bulunmamaktadır (Taşdemir, 2006).

#### **2.2. Cüruf Kullanılarak Yapılan Çalışmalar**

Smith ve Obserne (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 alternatifi olarak

kullanılmasının normal Portland çimentosunun CO<sub>2</sub> salınımı bakımından çok faydalı olduğu görülmüştür (Abora *et al.*, 2009).

Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile Portland cüruf çimentolarını aktive etmek için Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'in en etkili aktivatörler oldukları, NaSO<sub>4</sub>'ün ise en etkisiz aktivatör olduğu ifade edilmiştir. Roy (1999) ise yaptığı çalışmada %50 oranında yüksek fırın cürufu içeren çimentoya %4 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklemenin çimentonun dayanımını önemli ölçüde arttıracığını ifade etmiştir (Sağlık, 2009).

Jiang (1997) alkali aktive edilmiş çimentolu malzemeler üzerine kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Farklı aktivatörlerin cürufu çimento harçlarının basınç dayanımına etkisini incelemiştir. En etkili aktivatörün 2M sodyum silikat olduğu tespit edilmiştir. Wang ve Scrivener (1995) yaptıkları çalışmada çözünür sodyum ve potasyum silikat solüsyonunun en yüksek dayanımı verdiğini belirtmişlerdir (Sağlık, 2009).

Hrazdira (1992) yaptığı çalışmada alçıtaşsız Portland çimentosunda cürufun aktivasyonunu incelemiştir. %1'den %3'e kadar Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> eklenmesi ile zemin cürufu ve Portland çimento klinkeri eklenmiş cürufuların basınç dayanımında artış olduğu belirlenmiştir (Sağlık, 2009).

Krizan ve Zivanoviç (2002) tarafından yapılan çalışmada, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı 0.6-1.5 arasında Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren alkali cüruf çimentolarına göre daha yüksek dayanım gösterdiği belirtilmiştir (Sağlık, 2009).

İsveç'in batısındaki Vargön alaşımları, Avrupa'daki 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; kırılgenliği, özgül ağırlığı, Los Angeles değeri, kılcal

özellikleri test edilmiş ve yol malzemesi olarak çok uygun olduğu tespit edilmiştir. Ferrokrom cürufunun kimyasal bileşimi üç ana unsuru içerir bunlar; silisyum, magnezyum ve alüminyum'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. Kobalt, nikel ve kalay'ın yoğunluğu doğal topraktaki yoğunluğundan yaklaşık 100 kat daha fazladır (Lind *et al.*, 2001).

### **2.3. Çimento Üretimi ve Çevreye Etkileri**

Atmosferdeki sera gazının birikmesinden dolayı küresel ısınma hakkındaki mevcut kaygılar, çimento endüstrisini, normal Portland çimentosuna alternatif aramaya yönlendirmiştir. Her çimento üretiminde önemli miktarda CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır. CO<sub>2</sub> sadece çimento üretiminden değil, aynı zamanda malzemelerin reaksiyona girmesi için yüksek sıcaklığa kadar yakılmasından kullanılan fosillerden de kaynaklanmaktadır. Geopolimerler, normal Portland çimentosuna alternatif olan ve en az CO<sub>2</sub> salınımı yapan çimentolardır. Geopolimerler kimyasal reaksiyonlarda CO<sub>2</sub> açığa çıkarmazlar ve üretim tekniklerinden dolayı normal Portland çimentolara göre, çok daha az CO<sub>2</sub> yayarlar (Mcnulty, 2009).

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 CO<sub>2</sub> salınım miktarları Çizelge 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 karbon salınımının yanında, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi ürünlerin yararlanılmasında kullanıldığı için giderek artan bir cazibeye sahiptir (Mcnulty, 2009).

Çizelge 1. Portland çimentolar ile alternatif çimentoların üretiminde oluşan CO<sub>2</sub> miktarları

Çimento Bileşeni	Kullanılan Ana Malzeme	Oluşan CO <sub>2</sub> Miktarı (1 g CO <sub>2</sub> /1 g ürün)
M (Magnezyum oksit)	Magnezit	1.092
C (Sönmemiş kireç)	Kalker	0.785
C <sub>3</sub> S (Alit)	Kalker+Silika	0.578
C <sub>2</sub> S (Belit)	Kalker+Silika	0.511
C <sub>3</sub> A (Trikalsiyum alüminat)	Kalker+Alümina	0.489
C <sub>4</sub> AF (Kalsiyum alüminoferrit)	Kalker+Alümina+Demir oksit	0.362
NS (Sodyum metasilikat)	Soda+Silika	0.361
CA (Monokalsiyum alüminat)	Kalker+Alümina	0.279
C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S (Kalsiyum sülföalüminat)	Kalker+Alümina+Anhidrit	0.216

Li *et al.*, (2009) geopolimer çimento ve magnezyum fosfat çimentolar üzerine çalışmışlardır. Geopolimerler amorf yapıda ve alümina-silikat içeren bir malzeme olup, magnezyum çimento ise MgO bazlı çimento esaslı bir malzeme türüdür. Geopolimerler ve magnezyum fosfat çimentolarının, Portland çimentolarla karşılaştırıldıklarında enerji olarak daha tasarruflu ve çevre dostu oldukları belirtilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda bu iki çimentonun dayanımı, hacimsel kararlılığının ve yangın dayanımının Portland çimentoya göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Habert *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirme metodu kullanarak üretilen geopolimer betonların çevresel etkilerini araştırmışlardır. Daha



önce yapılan literatür çalışmalarında, geopolimer çimento üretimlerinin normal Portland çimentolara göre küresel ısınması üzerinde daha az etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebinin ise uçucu kül tabanlı ve yüksek fırın cürufu geopolimer betonların daha az sodyum silikat çözeltiye ihtiyaç duymasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu üretilen geopolimer betonların, saf metakaolin tabanlı geopolimerlere göre, daha az çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Gelecekte geopolimer beton teknolojisinde araştırma ve geliştirme alanında, iki önemli konuya odaklanmamız gerektiği ifade edilmiştir. İlk olarak, endüstri atıklarının diğer endüstrilerde kullanılmadığı konusu üzerinde, diğeri ise yüksek fırın cürufu ve alkali içeren killerin geopolimer beton olarak kullanılabilmesi üzerinde durulmuştur. Ayrıca, alkali aktivatör olan sodyum silikatların miktarını en aza indirmek için uygun bir Si/Al oranı kullanarak, bu atık malzemelerin tekrar kullanımının sağlanmasının önemli olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, daha önce normal Portland çimentolu betonlar için geliştirilmiş olan beton karışım teknolojisi hesaba katılarak, geopolimer beton üretmek için gerekli bağlayıcı miktarının azaltılabileceği belirtilmiştir.

#### **2.4. Aktivatörler**

Aktivatör; oluşan kimyasal reaksiyonun yapısını etkilemeden kimyasal reaksiyon hızını değiştiren bu madde katalizör olarak tanımlanır. Sağlık (2009)'a göre aktivatör, bir reaksiyonun hızını arttıran ve buna göre denklemde görülen maddedir. Sonuç olarak, aktivatör, bir reaksiyonun sonucunu etkilemeden bir bileşiği istenilen reaksiyon oranına getiren maddedir. Günümüze kadar yapılmış aktivasyon çalışmalarının çoğu, bağlayıcılık değerinden dolayı cürufların alkali aktivasyonu üzerine yapılmıştır. Durabiliteyi arttırmak için Portland çimento klinkeri ilave etmeden cüruf-alkali çimento üretmek, hem daha ekonomik hem de çevreye daha zararsızdır. 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 külle 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-A esaslı deneylerini yaparak, XRD ve kızılötesi ışınlarıyla hidrasyon gelişimi ölçülmüştür.

Atiş *et al.*, (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 dayanımları, eğilmede çekme dayanımları 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 modulünün artmasıyla sıvı sodyum silikatın nihai dayanım kazanmasında ve eğilmede çekme dayanımında 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.

Komljenovic *et al.*, (2010) çalışmalarında; alkali aktive edilmiş uçucu küllü (F sınıfı) geopolimerlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerini araştırmışlardır. Alkali aktivatör olarak  $\text{Ca(OH)}_2$ , NaOH,  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ , KOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (cam suyu) kullanılmıştır. Alkali aktivasyon metodunda en önemli parametrelerin; aktivatör özelliği ve yoğunluğu, uçucu külden ise önemli olanın incelik olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu küllü geopolimerlerin (<43  $\mu\text{m}$ ) basınç dayanımının genellikle yüksek olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek basınç dayanımı sodyum silikat kullanılmasıyla elde edilmiştir. Basınç dayanımının büyük ölçüde Si/Al oranına, bağlı olduğu belirtilmiştir.

Bakhaeva *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 + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, cüruf ağırlığının %8'si Na olacak şekilde) kullanmışlardır. Alkali aktive edilmiş cürufun, betonun erken dayanımını geliştirdiği belirtilmiştir. Fakat yüksek röt ve düşük işlenebilirlik özelliklerinden dolayı uygulamada sıkıntılar olacağını belirtmişlerdir. Sıvı sodyum silikatla üretilen betonun en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Hava sürükleyici katkı, röt azaltıcı katkı ve alçının rötreyi azalttığını, işlenebilirliği geliştirdiğini, basınç dayanımında negatif etkiye sahip olmadığını ve hava sürükleyici katkının alkali aktive edilmiş cürüflü betonlarda, önemli bir etken olduğu sonucuna varmışlardır.

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 dayanımına sahip reaksiyon ürünleri ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

Bondar *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, alkali aktivatör olarak cam suyu çözeltisi kullanılmıştır. En iyi aktivatör sodyum silikat ve potasyum hidroksitin kullanımıyla oluşturulan çözelti olduğu belirtilmiştir. KOH çözeltisinin 5 ve 7.5 M arasında olmasıyla, basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Granizo *et al.*, (2007) yaptıkları çalışmada iki farklı metakaolin farklı yüzeylerle hidrotermal koşulları (85°C) altında (6, 8, 10, 12, 15, 18 ve 20 M Na konsantrasyonları) aktivatörler olarak Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH'ten oluşan çözelti kullanılarak aktive etmişlerdir. Metakaolinin alkali aktivasyonunun 100°C ısı altında güçlü ve dayanıklı çimento esaslı malzemeler oluşturduğu belirtilmiştir. Metakaolinin alkali aktivasyonu ile elde edilen reaksiyon ürününün bileşimi, yapısı,

bileşendeki kaolin miktarı, özgül yüzeyi, kullanılan alkali aktivatör tipi, konsantrasyon ve bağıl miktarı vb faktörler tarafından etkilendiği ifade edilmiştir.

## 2.5. Geopolimer

Yeni bağlayıcılar alkali çimentolar veya alkali aktive edilmiş çimentolar olarak adlandırılmasına rağmen, Davidovits tarafından belirlenen bulgular ve diğer taraftan normal Portland çimentosu ismi üzerine karışıklık olmasından dolayı bu isim oldukça çevrecidir. Bu geopolimer bağlayıcının son on yılda çimento olarak kullanıldığı bilinmektedir. Davidovits bile Portland çimentolarını alkali aktive edilmiş kalsiyum silikatlar olarak adlandırmaktadır. Bu nedenle genel görüş alkali aktive edilmiş bağlayıcılar isminin kullanılmasıdır. Geopolimer ismi ise gerçek geopolimer varlığında yani zeolit ile yarı kristal karakteristik yapı oluştuğu zaman kullanılmalıdır (Torgal *et al.*, 2008b).

Geopolimerler, amorf alüminosilikatlardan oluşan, mükemmel mekanik özellik gösteren, düşük rötre değeri, yüksek yangın dayanımı ve düşük enerji tüketimi gibi özellikler göstermesiyle, sanayi ve mühendislik alanlarında yapılan inşaatlarda kullanılarak büyük ilgi çekmiştir. Endüstriyel atıkların, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi alüminosilikat içerikli malzemelerin alkali aktivasyonlarla karıştırılarak ortam sıcaklıklarında veya yüksek sıcaklıklarda geopolimerler üretilmiştir. Bu tehlikeli atıkların değerlendirilmesi, düşük maliyetli olması, düşük CO<sub>2</sub> içerikli ve çevre dostu olması bu malzemelerin daha çok tercih edilme nedenlerindedir (Zhang *et al.*, 2011b).

İlk olarak Davidovits (1996) geopolimer malzemeler üzerindeki çalışmalarında polimerlere kullanım bakımından bir alternatif ürün üretmek istemiştir. Plastik malzemelerin avantajlarını gözönünde bulundurarak puzolanlardan geopolimer malzeme üretmek için çalışmıştır. Puzolanlar özellikle alüminyum, demir ve silikon oksitlerden oluşan volkanik minerallerdir.

Geopolimerler, zeolitlere benzer kimyasal bileşimlere sahip inorganik polimer malzemelerdir. Geopolimerler insan yapımı kayalar olarak da görülebilir. Geopolimerler, yüksek konsantrasyonlu sulu alkali hidroksitler veya silikat solüsyonları ile katı alüminosilikatların reaksiyona girmeleriyle üretilenlerdir. İnorganik polimerlerin kimyası ve terminolojisi ilk olarak Davidovits tarafından detaylıca araştırılmıştır (Davidovits, 1999).

Geopolimer çimentolar, standart çimentolara alternatif olarak ve atık maddeleri değerlendirmek için üretilen malzemelerdir. Ayrıca geopolimer, beton üretim tesislerinde çevreye verilen gazları azaltmak için geliştirilmiş bir teknolojidir (McClellan *et al.* 2011).

Geopolimer malzemeler, alümino-silikat kaynakların oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda alkali aktivasyonu ile oluşan malzeme sınıfıdır. Geopolimerizasyon, geopolimerlerin oluştuğu karmaşık bir süreçtir. Bazı test metodları geopolimerizasyon sürecini tanımlamak için kullanılmıştır. XRD çok az veri ile geopolimer ürünlerin kristalleşme davranışlarını test etmek için genellikle kullanılmaktadır (Yao *et al.*, 2009).

Yüksek fırın çürümesinde gizli bir hidrolik çimento ürünü olduğu keşfedilmiştir ve bu geopolimer türünün, priz süresini hızlandırdığı, eğilme ve basınç dayanımlarına önemli ölçüde katkıda bulunduğu görülmüştür. Ayrıca, geopolimerler uzun süreli muhafaza edilen toksik atıklarla elde edilen zeolitik özelliğe sahip aside dirençli çimento malzemeleridir (Davidovits 2008).

Alkali aktivasyon teknolojisi farklı hammadde kullanımını, yüksek pH'lı alkali metal solüsyonu (genellikle sodyum silikat esaslı) ile aktive edilmiş ürünleri ve farklı sıcaklıklardaki kür işlemlerini gerektirir. Ağırlıklı olarak kullanılan hammaddeler; uçucu kül metakaolin, atık su arıtma atıkları ve kağıt işleme atıklarıdır. Yüksek alkali ortam malzemenin camsı fazında Si-O kimyasal bağlarını kırar. Bu fazlar daha sonra

sıvı içerisinde alkali türlerinin reaksiyonunda tüketilir. Üretilen geopolimerlerin kimyası, hammaddelerin kompozisyonuna ve kullanılan aktivatörün tipine bağlıdır. Alkali aktive edilmiş malzemeler üzerine temel araştırmalar 1940 yılından beri birçok enstitüde gerçekleştirilmiştir. Bu alanda birçok çalışma, Doğu Avrupa, Avustralya, Yeni Zelanda, Ukrayna, Fransa, Finlandiya ve Eski Sovyetler Birliği'nde yapılmıştır. Fakat kapsamlı bir çalışma 1970'de, İngiltere'deki Yapı Araştırma Kuruluşunda gerçekleştirilmiştir (Abora *et al.*, 2009).

Normal Portland çimentosundan yapılmış beton yapıların ufalanması (dağılması) giderek artan bir öneme sahip olup, endişe verici bir konudur. Daha fazla durabiliteye sahip yeni bağlayıcıların geliştirilmesi artık kaçınılmazdır. Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar normal Portland çimentosuna alternatif olan daha çevreci ve daha gelişmiş durabiliteye sahip bağlayıcılar olarak ortaya çıkmıştır. Artık gelişmiş çevresel ve durabilite performansına sahip bağlayıcıların normal Portland çimentosunun yerini alması gerektiği fikri kabul görmektedir. Kazık temel yapılarının 12 yıl sonra parçalandığı, ayrıca 1975'de Dubai'de tamamlanmış bir tünel yapısında 1986 yılında tamamen onarıma ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Norveçte normal Portland çimentolu köprüler üzerine yapılan çalışmada, 1970'den sonra inşa edilen yapıların %25'nin korozyon problemi ile karşı karşıya olduğu belirtilmiştir. Şimdiye kadar alkali aktive edilmiş bağlayıcılar üzerine yapılmış araştırmalar göstermiştir ki, bu yeni bağlayıcı normal Portland çimentosuna önemli bir alternatif olma potansiyeline sahiptir. Bu bağlayıcılar henüz gelişiminin başlangıç aşamasındadır. Bu sebeple teknik ve ekonomik olarak geçerli yapı malzemesi olması için daha ileri götürülmüş çalışmalara ihtiyaç vardır (Torgal *et al.* 2008b).

Alkali aktivasyon ve alkali çimento karışımlarının tarihsel gelişimi Çizelge 2'de verilmektedir (Roy, 1999).

Çizelge 2. Alkali aktivasyon ve alkali çimento karışımlarının gelişimi

Yazarlar	Yıl	Önemi
Feret	1939	Çimentolar için cüruf kullanılmıştır
Purdon	1940	Alkali cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Teorik esaslar ve alkali çimentoların gelişimi
Glukhovsky	1965	Bileşik olarak kullanılan doğal maddeler olmalarından dolayı ilk kez “alkali çimentolar” isminin kullanılması
Davidovits	1979	Daha büyük geopolimerizasyonu vurgulayan “geopolimer” teriminin kullanılması
Malinowski	1979	Antik kemerlerin karakterize edilmesi
Forss	1983	F çimentolar (Cüruf-alkali-süperakışkanlaştırıcı)
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemeleri karakterize edilmiştir
Davidovits ve Sawyer	1985	Piramitlere götüren patent
Krivenko	1986	$R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$
Malolepsyz ve Petri	1986	Sentetik melilite cürufun aktivasyonu
Malek <i>et al.</i>	1986	Cürufllu
Davidovits	1987	Eski ve modern betonların kıyaslanması
Deja ve Malolepsy	1989	Klor dayanımının gösterilmesi
Kaushal <i>et al.</i>	1989	Adyabatik olarak kür edilmiş nükleer atık biçimlerinden zeolit içeren alkali karışımların oluşumu
Roy ve Langton	1989	Eski beton analogları

Çizelge 2. Alkali aktivasyon ve alkali çimento karışımlarının gelişimi (devamı)

Majumder <i>et al.</i>	1989	C <sub>12</sub> A <sub>7</sub> Cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkali aktive edilmiş cüruflar
Wu <i>et al.</i>	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy <i>et al.</i>	1991	Hızlı kür edilmiş alkali aktive edilmiş çimentolar
Roy ve Silsbee	1992	Alkali aktive edilmiş çimentolar: Genel bir bakış
Palomo ve Glasser	1992	Metakaolin ile kalsiyum bağlama kapasitesi
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentoları
Glukhovsky	1994	Eski, modern ve gelecek betonlar
Krivenko	1994	Alkali çimentolar
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkali aktive edilmiş cürufun mikroyapısı

1970’li yıllarda Fransa şehirlerinde bulunan özellikle ahşap ve çelik yapılı binalarda yangınların artması yeni kaplama malzemelerinin araştırılmasına yöneltmiştir. Organik polimerlerin ana yapısında bulunan petrol türevi karbon içeren monomerler yanıcı olduğundan, kapı ve pencerelerde kullanılan organik kimya ürünü termoset polimerlerin yanmazlık özelliği göstermesi mümkün değildir. Yanmazlık özelliği ancak metal minerallerde (örneğin silisyum) bulunur. Ametal olan karbondan farklı olarak Silisyum elementi metaloit özellikler gösterir. Metaloitler kimyasal olarak ametal gibi davranmakla birlikte yarı iletken olmalarıyla da metal özellik gösterirler. Bir metaloit olan silisyumun iyonizasyon enerjisi karbona nazaran daha düşüktür. Silisyumun oksijen ve diğer elementlerle kurduğu bileşikler daha kararlı davranmakta bu da daha sıkı kristalize ve yanıcılığı az olan malzeme yapısını sağlayabilmektedir. Doğadaki kuartz (SiO<sub>4</sub> bileşiği) en sert taştır. Kuartzı yapay olarak üretmek oldukça zordur, ancak başka element ve bileşiklerin silikatlarla (SiO<sub>2</sub>) kovalent bağlı polimerler oluşturmasıyla üç boyutlu yarı kristal amorf yapıda



basınç ve yanma dayanımı yüksek malzemeler elde edilebilmektedir. Buradan yola çıkılarak ahşap yapı malzemelerinin yangına dayanım gösteren, yapay zeolitler ya da polisialatlarla kaplanmasıyla geopolimer kimyasının temelleri atılmıştır (Arıöz vd., 2009).

Geopolimeri zeolitlerden ayıran özelliklerden biri de 80°C’de sentezlenebiliyor olmasıdır. Bu özellikleri ile de geopolimer yapısında su moleküllerinin bir kısmını da tutabilmektedir. Diğer taraftan, zeolit 150-250°C’de yapısı içinde boşluklar bırakarak kristalleşmektedir (Davidovits, 2008). Alkali aktive ile ilgili çalışmalar ise 1950 yılında Ukrayna’da Gluchowsky ve Krivenko tarafından geliştirilmiştir. Yer bilimci Gluchowsky, tortul kayaçlı kayaların düşük sıcaklık ve basınçta çimento sistemi olarak modellenebileceğini belirtmiştir (Komnitsas and Zaharaki, 2007).

Geopolimerlerin oluşum mekanizması üzerinde de pek çok araştırma yapılmıştır. Davidovits (2008), geopolimer sentezinin üç adımda oluştuğunu belirtmiştir; bunlar alüminosilikatların kuvvetli alkali çözeltilerde çözülmesi, serbest iyon gruplarının dağılımı ve polikondenzasyondur. Ancak her aşama birçok adımdan oluşmaktadır. Örneğin; çözünme aşamasını ele alacak olursak, bu aşama termodinamiğe göre 8 adımdan oluşur ve her farklı yol, geopolimerlerin son özelliklerini belirleyecek farklı iyon gruplarını oluşturabilir. Böylece, geopolimer üretiminde geopolimerizasyon mekanizmasını açıkça anlamak için kesin ve doğru yolu seçmek çok önemlidir. Ancak, bu zamana kadar, bu çalışmaların yeterli olduğu söylenemez. Çünkü geopolimerin oluşması çok hızlıdır. Sonuç olarak, bu üç adım neredeyse aynı anda meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, araştırmalarda bu üç aşamayı ayırmak mümkün değildir (Li *et al.*, 2004).

Davidovits (1994) ticari geopolimerik ürünleri kullanarak toksik atık ve nükleer kalıntıları ağır metal iyonları gibi sağlamaştırmaya çalışmışlardır. Çalışmaların sonucunda ağır metal iyonlarının %90’ından fazlasının üç boyutlu geopolimerik kafeste sıkıca saklanabileceği görülmüştür (Van Jaarsveld *et al.*, 1999).

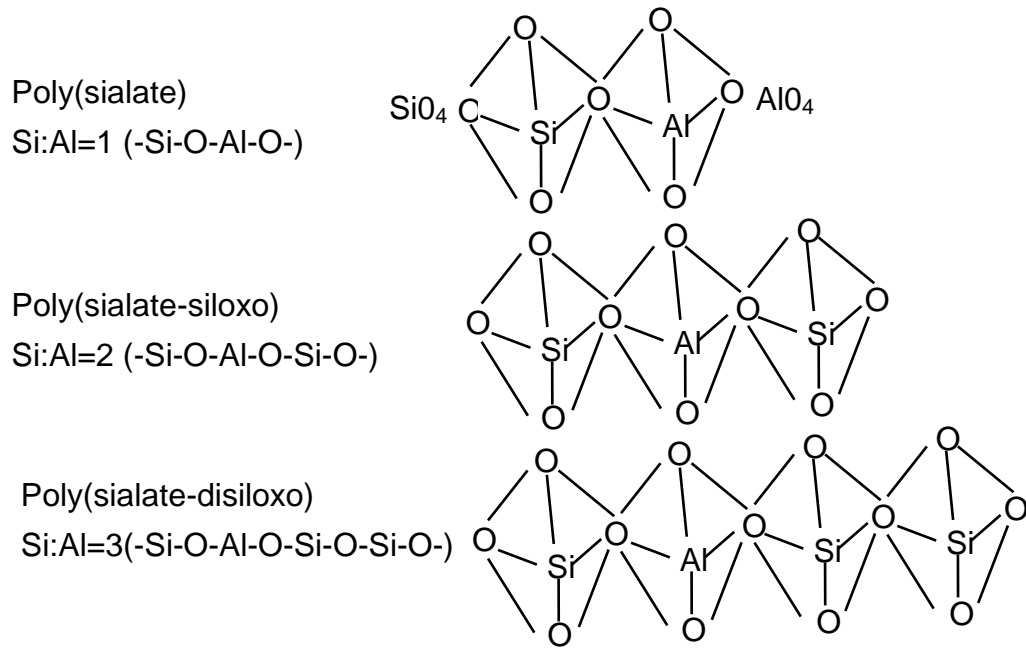
Li *et al.*, (2004) yaptıkları çalışmada geopolimer bileşikleri ve karbonla güçlendirilmiş polyester, vinil, epoksi, siyanat ester, polimid, fenol ve termoplastik laminantlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Testlerin sonucunda büyük organik moleküler polimerler kolayca tutuşmuş ve yüksek oranda ısı ve duman ortaya çıkarmıştır. Ancak karbon fiberli geopolimerik bileşikler tutuşmamış, yanmamış ve yüksek ısıdan sonra hiç duman açığa çıkarmamıştır. Bu çalışmaların ışığında, uçak kabinleri ve kargolar için yanıcı olmayan geopolimerik bileşikler üretilmiştir. Daha sonra bu malzemeler 1998'de A.B.D.'de kullanılmaya başlanmıştır.

Farklı araştırmacılar, bazı gelişmiş teknikler kullanarak geopolimerlerin mikroyapısını araştırmışlardır. Ancak geopolimer karmaşık bir bileşime sahip olduğundan ve amorf yapılı ve üç boyutlu olduğundan, farklı atomların kimyasal durumunu ölçmenin oldukça zor olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar bu zorluğu aşmanın çözümünün onun moleküler yapısını keşfetmek için istatistik teorileri kullanmak gerektiği olduğunu belirtmişlerdir (Li *et al.*, 2004).

### **2.5.1. Geopolimer kimyası**

Geopolimerler ve geopolimerik birleşikler, özellikleri ve potansiyel uygulamaları henüz tam keşfedilmemiş seramik malzeme sınıfıdır. Saf metaller sert, inorganik, alüminosilikat esaslı hidrate jellerdir.  $Na^{+1}$ ,  $K^{+1}$ ,  $Cs^{+1}$  gibi I. grup katyonları ile elektrik yükleri dengelenmiştir. Geopolimerlerin bileşim aralıkları bellidir, fakat düşük bileşimleri  $Al_2O_3.M_2O.nSi_2.10H_2O$  şeklindedir. Sonuç olarak geopolimerler inorganik ve genellikle toz şeklinde solüsyon karıştırılmasıyla elde edilirler. Elde edilen hamur plastik kalıpların içerisine dökülür. Karışım, ortam sıcaklık ve basınç şartlarında 24 saat bekletilir. Geopolimerler polimerlere ve grafitte yapışmazlar, böylelikle çeşitli şekillerde net ölçülerde üretilirler. Geopolimerler asit ve termal etkilere karşı daha dirençlidirler (Bell *et al.*, 2006).

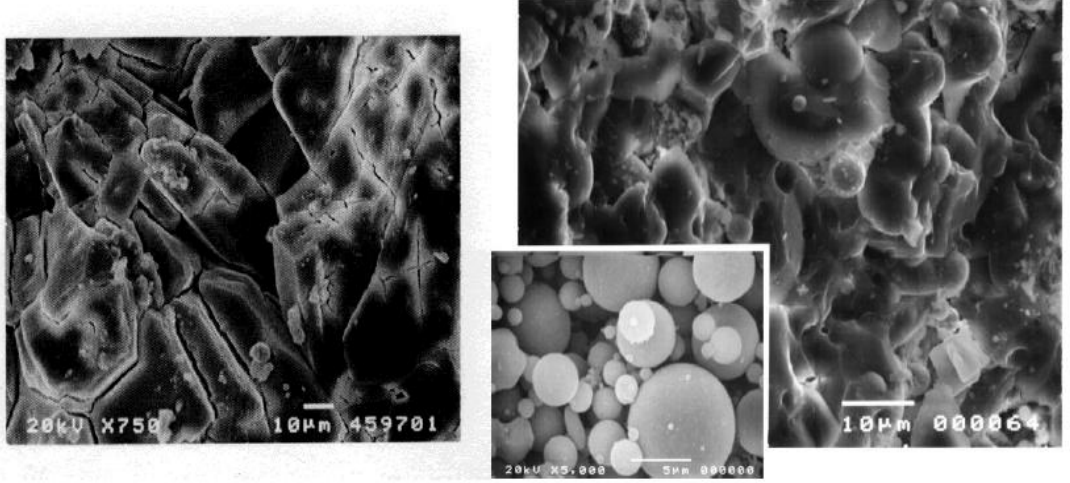
Geopolimerler alüminosilikat minerallerinin alkali aktivasyonundan amorf moleküllerin üretilmesiyle oluşurlar. Pozitif iyon olarak alkali metalin varlığı geopolimer yapısı için gereklidir. Çünkü alkali metal IV katlı koordinasyonda negatif yüklü alüminatı dengeler. Bu geopolimerlerin moleküler yapısı genellikle yüzük veya zincir şeklini alır ve amorf ile yarı kristal aralığında değişir. Büyük ölçüde kristal polimerlerde monomer zincirler, düzensiz sıra bırakmayacak şekilde sıralı satırlar boyunca uzarlar. Amorf polimerler, sıralanmayan düzensiz polimer zincirlerdir (Şekil 2). Geopolimerler düzenli düzensiz polimer yapıları sahiptirler ve bu yüzden yarı kristaller olarak adlandırılırlar (McNulty, 2009).



Şekil 2. Alümino silikat yapıları ile geopolimer türleri

Geopolimerler zeolit eğimli kristal olmayan bağlar olarak yorumlanabilir. Geopolimerler kristal zeolitler gibi aynı altyapılardan oluşurlar, fakat uzun mesafeli düzenleri yoktur. Geopolimerler özel reaksiyon koşullarının (kür sıcaklığı, süresi) yanı sıra katı hammaddenin ve aktivatör solüsyonunun bileşimine bağlı olarak sertleşmeden sonra değişken kristal özellik gösterirler (Buchwald *et al.*, 2009).

Wagh (2011) yaptığı çalışmada Şekil 3'te görüldüğü gibi MgO ile  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  tepkimesi ile oluşan fosfat tabanlı geopolimer sentezlenmiştir. Yüksek kristal yapılar meydana getirmişlerdir ve bu yapılar yaklaşık 20.69 MPa basınç dayanımına sahiptirler. Ayrıca, Şekil 3'te uçucu kül bağlayan amorf (camsı) faz gösterilmektedir.



Şekil 3. Uçucu kül bağlayan amorf (camsı) faz

Geopolimerizasyon, uçucu kül, kömür cürufu, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, volkanik tüf, ufalanmış doğal kayalar, kaolinit kili (metakaolinit) gibi dehidrasyona uğramış alumino-silikat yapıdaki toprak katımlarla, alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkimeye girmesi ile başlamaktadır. Elde edilecek ürünün istenilen amaca uygun fiziksel özellikleri sağlaması; katı hammadde kompozisyonu, ilgili kimyasalların gerekli molar oranlarda karıştırılarak tepkimeye sokulması, uygulanan ısı kuru ya da kalsinasyon işlemi ısı ve süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Davidovits, 2008).

Geopolimerizasyon yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondensasyon (çoklu yoğunlaşma) hareketlerini kapsayan bir ekzotermik kimyasal prosedir. Geopolimer basitçe fırınlanmış kil içinde bulunan aluminatlar ile silikatların oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile kovalent bağlı bileşik oluşturması sentezine dayanır. Silikat ( $\text{SiO}_2$ ) mineralleri son derece kararlı

bileşiklerdir. Alkali aktifleştircilerin SiO<sub>2</sub> monomerlerinin üç boyutlu ağ yapısını zayıflatması, ilerleyen tepkime sürecinde geopolimer ana bileşiği olan Si-O-Al silikatların oluşumunu sağlamaktadır (Davidovits, 2008; Zeybek, 2009).

Geopolimer konsepti ile üretilen gerek düşük teknoloji ve gerekse gelişmiş teknoloji tüm üretimlerde molekül yapısını belirleyici olan, jeolojik toprak, kaynak ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si:Al molar oranıdır (Davidovits, 2008). Bu oranın 1 olduğu sistemlerde zeolit kristaline benzeyen tuğla seramik ve yangından koruyucu ürünler elde edilebilir. Bu oran 2 olduğunda yine seramik amorf arası yapıda geopolimer çimento ve beton sentezlenebildiği gibi biraz daha ileri teknoloji ile radioaktif atıkların istiflenmesi için gerekli yapılar üretilebilmektedir. Si:Al oranının 3 olduğu durumlarda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta fırın kaplamaları, cam elyaf yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için 1000°C dayanabilen malzemeler üretilebilmektedir. Si:Al oranı 3'ün üzerine çıktığında ise dolgu malzemesi köpükler üretilebilir. Si:Al>15 olduğunda 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer pastası oluşmakta ve bu yapı savaş uçaklarında kullanılacak nano kompozit yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanılabilir. Geopolimer ile gelişmiş teknoloji seramik ürünlerin üretiminde reaksiyon stokiometrisi iyi gözlenmelidir. Mineral esaslı tepkimelerde hammaddenin önemli bir kısmı reaksiyona girmez. Ancak uygun molarite ve mol kütlelerinde alkali soda ve tuzların etkilmesi ve ısıl etkilerin tepkime entalpilerinin değerlendirilmesine göre uygulanması ile istenilen fiziksel özellikteki kompozit ya da monolitik malzemeler elde edilir. Mikromoleküler yapı da gözlemlenerek ani soğutma ve ikincil fırınlama işlemleri ile emayeleşme, yüzey parlaklığı gibi dekoratif özellikler geopolimere kazandırılabilir (Davidovits, 2008; Arıöz vd, 2009).

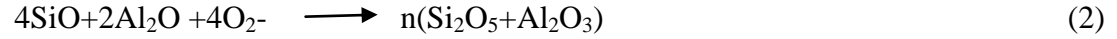
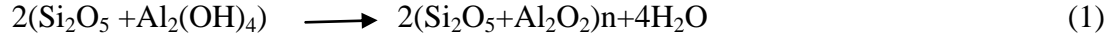
Oda sıcaklığında başlayan geopolimer reaksiyonu istenilen karışım sağlandıktan sonra 40-100°C sıcaklıklarda etüv ya da buhar odasında ısıl işleme tabi tutularak, polimerizasyon süreci uzatılmaktadır. Böylece üretilmek istenilen geopolimer malzeme özellikleri de iyileştirilmiş olur. Metakaolinit içerisindeki silisyumlu ve aliminyumlu oksit parçacıkların üç boyutlu tetrahedral bağlı termoset polimer

mikromoleküler yapıyı oluşturmasıyla elde edilen yarı camı-amorf, seramiksi bir yapı oluşturmaktadır. Tepkime termokinematığının incelenmesi ile istenilen malzeme özelliklerinin geopolimere kazandırılması mümkün olmaktadır. Na, K, Ca gibi alkali metaller elektron vererek, Si ve Al'un oksijen atomlarını paylaşarak kimyasal bağ kurmasını sağlamaktadır. Böylece Si-O-Al moleküllerinden oluşan sialat adı verilen alkali silikon okso-alüminat yapı oluşmaktadır. Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre sialat (Si-O-Al-O-), polisialat-siloxo ya da polisialat-di-siloxo gibi yapılar oluşmaktadır. Sialat yapısı, SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> molekülleri arasında tüm oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurması ile oluşmaktadır (Davidovits, 1999). Geopolimer tepkimesindeki ham madde ve sialat ile alüminatın Si/Al molar oranı oluşacak kristal yapıyı ve dolayısıyla malzeme özelliklerini etkilemektedir (Davidovits, 2008; Arıöz vd., 2009).

Reddy *et al.*, (2011) tarafından yapılan çalışmaya göre, geopolimer malzemelerle ilk olarak 1978'de Davidovits çalışmıştır. Çalışılan bu malzemelerin eski Roma antik tiyatrolar ve Mısır piramitlerinde kullanılan malzeme özelliklerine benzer olduğu belirtilmiştir. Geopolimerler, Portland çimento gibi dayanım sağlayan C-S-H (kalsiyum silika hidratları) oluşturmazlar. Ancak yapısal dayanım elde etmek için, silika ve alümina gibi aktivatörler kullanılmaktadırlar. Geopolimerlerin iki ana bileşeni vardır. Bunlar, malzeme ürünleri ve alkali sıvılardır. Bu ürünler; uçucu kül, silis dumanı, cüruf, pirinç kabuğu külü gibi bol miktarda Si ve Al içeren maddelerdir. Geopolimerler diğer alüminosilikat malzemeler (örneğin alüminosilikattan jeller ve zeolitler) ile karşılaştırıldığında farklıdır. Geopolimerlerin katı yoğunluk oranı alüminosilikat malzemelerden daha yüksektir. Bu polimerizasyon işlemi hızlı kimyasal reaksiyon gösterir ve üç boyutlu polimer zincir ve halka yapılı Si-Al Si-O-Al-O bağlarını oluşturur.

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

polimerik Si-O-Al bağları oluşur. Geopolimerin yoğunlaşma polikondensasyon ile oluşumu ise Denklem 1 ve 2'ye göre gerçekleşir (Arıöz vd., 2009).



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

Alkali ortam hidroksil iyonlarının da etkisiyle silikat ve alüminatların çözünümlerini hızlandırır. Ancak aşırı alkali bir ortam silikat anyonları arasındaki bağları gevşetecektir. Daha hafif bir element olan sodyumun bulunduğu alkali tuzlar potasyumlu tuzlara nazaran daha fazla çözünümler göstermektedir. Bunun sebebi daha hafif ve küçük bir atom olan sodyum silikatlara daha kolay etki ederek onları stabilize etmesidir. Sodyumun elektron ilgisinin daha az olması da hidroksil iyonlarını bırakmasını kolaylaştırmakta olduğu düşünülebilir (Panagiotopoulou *et al.*, 2007). Alkali tuz ile birlikte uçucu kül içerisinde bulunan ana bileşenlerin daha düzenli çözünebilmesi ve böylece geopolimer malzeme özelliklerini iyileştirmek için sodyum silikat veya sodyum alüminat ilave edilmektedir. Bu kimyasalların eklendiği çözeltiler katı-jel çözeltiler olarak adlandırılır. Bu tip çözeltilerde kimyasalları çözmekte kullanılan su miktarının fazla olması malzemenin basınç dayanımı özelliklerini azaltmaktadır. Bu tür oluşumlarda çökelti halindeki sodyum iyonu da fazla miktardadır. Çünkü sodyumlardan ayrılan alüminat ve silikat molekülleri birlikte reaksiyon vermektedirler. Uçucu kül içerisindeki ana elementler olan Al-Si içeren bu kimyasallardan sodyum alüminat, tetrahedral alüminyum bağ yapısı oluşumunu kolaylaştırırken, sodyum silikatın çapraz bağlı silikat molekülleri arttırdığı, nükleer manyetik rezonans ile gözlemlenmektedir (Zeybek, 2009).

### 2.5.2. Agreganın geopolimerlere etkisi

Portland çimentosu üretimi ve atık malzemelerin artmasından dolayı, çevre kirliliğini azaltmak için birçok yol vardır. Bunlardan bir tanesi geopolimer beton içeren malzemeleri geri dönüşümlü beton agregası olarak kullanma yöntemidir (Anuar *et al.*, 2011).

Isabella *et al.*, (2005) yaptıkları çalışmada kum içermeyen metakaolin esaslı geopolimerik bağlayıcıda karışımın basınç dayanımının zamanla arttığı görülmüştür. Orta ve ince boyutta tane çapındaki geopolimer numunelerle, kum içermeyen geopolimer numunenlerin basınç dayanım değerlerine kıyasla daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. İri agregalı geopolimer beton numunesinde 1 günlük basınç dayanımının 22.7 MPa olduğu ve zamanla azaldığı görülmüştür. Bu durumun nedeni, iri agreganın geopolimer hamurunun etkili bir şekilde bağlanması için yeterli ara yüzey sağlamadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece daha düşük basınç dayanımı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, orta tane çaplı geopolimer numunelerde de 1. gün ile 7. gün arasında yaklaşık 7 MPa'lık basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir.

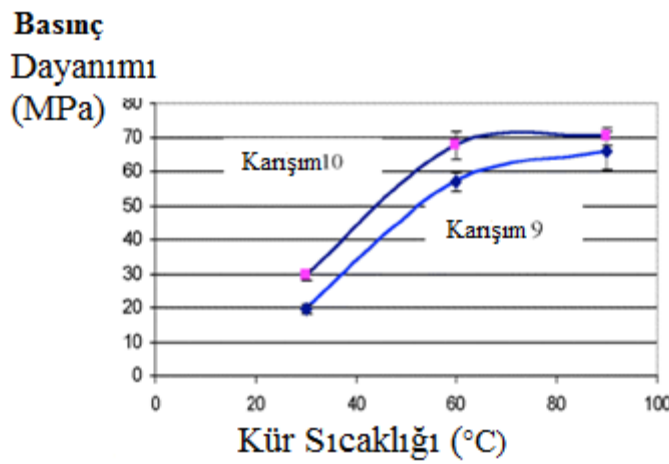
### 2.5.3. Kür sıcaklığının geopolimerlere etkisi

Bakhavera *et al.*, (1999) çalışmalarında alkali aktive edilen cüruf (AAS) betonunun basınç dayanımı, rötresi ve mikroyapısında kür sıcaklığının etkisi üzerinde çalışmışlardır. Aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan betonun; erken dayanımı ve eğilme dayanımı, aynı su/bağlayıcı oranına sahip normal Portland çimentoyla üretilen betondan daha yüksektir, fakat yüksek otojen ve kuruma rötresine sahiptir. Isıl uygulamanın AAS betonun kuruma rötresini azaltmada çok etkili olduğu ve erken dayanımını iyileştirdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte AAS betonunun dayanımının ileri yaşlarda normal betonla kıyaslandığında daha az olduğu belirtilmiştir. Mikroyapısal çalışma, AAS betonunda hidrasyon ürünlerinin dağılımındaki homojensizliğin, dayanımdaki azalmanın bir nedeni olabileceğini ortaya çıkarmıştır. Yüksek sıcaklık küründen önce oda sıcaklığındaki



ön kür AAS betonunun daha yüksek erken dayanım kazanmasını sağladığını ve rötresini oldukça azalttığını belirtmişlerdir.

Rangan *et al.*, (1987) kür sıcaklığının beton dayanımı üzerindeki etkileri incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer betonlar üretmişlerdir. Farklı karışım oranlarında numuneler hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. 60°C kür sıcaklığının beton dayanımı için en iyi sonuçları verdiği ifade edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkileri

Brough ve Atkinson (2002)'a göre 20°C ve 80°C'de 12 saat kürde sodyum silikat ile alkali aktivasyonu gerçekleştirilen cürufun sırasıyla 7 ve 72 MPa basınç dayanımı değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Özellikle kür sıcaklığı 20°C'den 80°C'ye çıkarıldığında basınç dayanımının 7 MPa'dan 72 MPa'a çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden aktivasyon metodundan sonra puzolanların özelliklerinin geliştiği sonucu üzerinde bir fikir birliği oluşmuştur.

Hubler *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada alkali aktivasyonlu cüruf hamuruna, saf kalsiyum silika hidrat eklemişlerdir ve kür edildikten sonra daha yüksek dayanım gösterdiğini tespit etmişlerdir. Alkali aktivasyonlu cüruflar (AAS) daha erken

hidratasyon göstermişlerdir. Bu deney sonucunda AAS hamurunda 1. ile 14. günler arasında yapılan kürün, C–S–H jellerinin dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Hava geçirmez yerlerde kür yapılırken dayanımın arttığı, fakat suda yapılan kürlerde ise çatlama nedeniyle dayanımın azaldığı gözlenmiştir.

Chen *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada değişik oranlarda cüruf, metakaolin ve rezervuar çamur partikülleri farklı oranlarda ve alkali aktivasyon çözeltilerinden sodyum hidroksit, sodyum silikat ve su ile karıştırılarak rezervuar çamur partikül tabanlı geopolimer (RSBG) üretmişlerdir. Sodyum hidroksit, sodyum silikat kimyasal karışımlarından %29.1 SiO<sub>2</sub> ve %9.5 Na<sub>2</sub>O kullanılmıştır. Ayrıca, RSBG geopolimerlerin basınç dayanımları ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, uygun alkali aktivasyonlu çözeltilerle, farklı miktarlarda CRS (kalsine rezervuarlı çamur), metakaolin ve su/bağlayıcı kullanarak, yüksek basınç dayanımına sahip RSBG geopolimerler üretilmiştir. Aynı zamanda, farklı oranlarda su/bağlayıcı oranı kullanarak karıştırma zamanının ve kür sıcaklığının, RSBG geopolimerleri basınç dayanımı değerlerinin üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, RSBG harçlarının, Portland çimento harçlarıyla basınç dayanımları ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Farklı yüzdelerde metakaolin ve CRS kullanarak MBG, RSBG50, RSBG70 and RSBG100 gibi 4 farklı geopolimer ürün üretilmiştir. Sonuç olarak, 23°C kürde 85.5 MPa basınç dayanımı değeri elde edilmiştir.

Xin *et al.*, (2012) yaptıkları çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH (NH), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (NC) kullanılarak hazırlamışlardır, kompozit malzeme olarak uçucu kül tabanlı geopolimer çimento esaslı malzemeler üretmişlerdir. Geopolimer çimentonun hamur numunelerinin sıcaklığı, dayanımı, priz süreleri incelenmiştir. Üretilen numunelerin 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 95<sup>0</sup>C gibi farklı sıcaklık değişimlerinde 28 günlük mekanik özellikleri incelenmiştir. 40<sup>0</sup>C sıcaklıktaki hamur numunelerinin eğilme dayanımı değerleri düşük, ancak basınç dayanımı değerleri en yüksek çıkmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimer çimento priz başlama süresi 50 dakika ile 2 saat arası, priz bitiş süresi ise 8 saat olduğu görülmüştür. Ayrıca, NaOH veya cüruf içeriğinin

artmasıyla, priz süresinin kısaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak 40°C’de numunede en yüksek basınç dayanımı değeri tespit edilmiştir.

Villarreal *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, metakaolin tabanlı geopolimer çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada metakaolin tabanlı geopolimer çimentolar, damıtılmış su, sodyum hidroksit, sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0.31$  olan) molar oranı  $\text{Si}/\text{Al}=1$  ve 1.2 mikron seviyesinde öğütülmüş metakaolin karıştırılıp hazırlanmıştır. Geopolimerler laboratuvarında 2 aşamada kür edilmiştir. İlk olarak, su kaybıyla çatlamayı önlemek için kurutulmuş 40°C’de 2 saat kür edilmişlerdir. İkinci aşamada ise, 30, 40, 50, 60, 75 ve 90°C’de 24 saat kür edilip mekanik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra bu numuneler 30, 60 ve 90°C’de kür edilmiştir. Ayrıca 12.5 g geopolimerlere 250 mL KOH karıştırılmıştır. Ayrıca İzotermal kalorimetre kullanarak farklı sıcaklıkta kür edilmiş metakaolin tabanlı geopolimer çimentoların hidratasyon ısıları da ölçülmüştür. 60°C kür edilmiş geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellik olarak en iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Ferone *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı düşük sıcaklıkta geopolimer tuğlalar üretilirken mekanik özellikleri araştırmışlardır. Değişik kür şartlarında, basınç dayanımları ve mikroyapıları incelenmiştir. 60°C’nin üstünde mekanik özelliklerinin arttığı görülmüştür. Kurutulduktan sonra kullanılan uçucu küller, düşük sıcaklıkta üretilen tuğlaların mekanik özellikleri için iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Fakat ıslak ortamda kullanılan uçucu küller yüksek oranda su içerdiklerinden, mekanik özelliklerinin daha kötü olduğu ifade edilmiştir. 60°C, 7 gün 24 saat kalan uçucu kül tabanlı geopolimer tuğlaların mekanik dayanım olarak 3.5 kat daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Diaz *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada ortalama boyutları yüksek olan ve düşük oranda metakaolin (%70 kaolinite ve %30 quartz) içeren kalsin,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH solüsyonları katılarak geopolimerler üretmişlerdir. 20-80°C kürlerde ve 2.64–4.04 arasında  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranları, 0.62–1.54 arasında  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranları ve yoğunluk

oranları kullanarak, basınç dayanımı değerlerini belirlemişlerdir. 20°C sıcaklıkta,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.96$  ve  $\text{NaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.62$  oranlarındaki karışımlarda 85 MPa basınç dayanım değeri elde edilmiştir.

Ravikumar *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu külle üretilen geopolimer betonların ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) ile oluşturulan geopolimer betonların, farklı oranlarda (4, 6 ve 8 M ) sodyum hidroksitle karıştırılarak; basınç dayanım değerlerini, gözenek yapılarının özelliklerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Yüksek basınç dayanımı değeri elde etmek için, malzemelerin içerikleri, en uygun kür sıcaklık ve süreleri belirlenmiştir. Aktivatörlerin yoğunluklarının, aktivatör ve bağlayıcıların oranlarının basınç dayanımı üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufuyla oluşturulan geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri, uçucu külle üretilen geopolimer betonlardan daha fazladır. Ayrıca uçucu kül tabanlı geopolimerle, yüksek fırın cüruf tabanlı geopolimerlerin en uygun kür sıcaklıklarında, basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. Uçucu külle yapılan geopolimerde, 75°C kürde maksimum basınç dayanımı değeri elde edilmiştir.

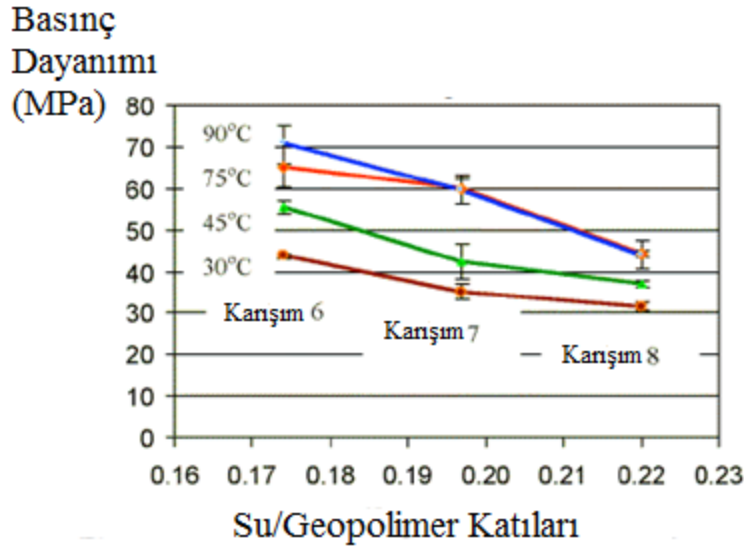
Nazari *et al.*, (2011) uçucu kül ve pirinç kabuğu külü ile üretilen geopolimeri  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı 2.99 olan, 36 saat ve 80°C sıcaklıkta kür edildiğinde basınç dayanımının maksimum olacağını tespit etmiştir.

#### **2.5.4. Su/bağlayıcı oranının geopolimerlere etkisi**

Zivica *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, düşük sıvı/katı oranının bileşimindeki etkisini ve sertleşmiş metakaolin geopolimer hamurunun, basınç sıkıştırması altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, hazırlanan çimento karışımının mühendislik özelliklerinin çok iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Sonuç olarak, metakaolin geopolimer hamurlarında, düşük sıvı/katı oranı ve basınç sıkıştırması altında, daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

Torgal *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak madeni atık çamurlar, az miktarda kalsiyum hidroksitle ve alkali aktivatör olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak geopolimerler üretmişlerdir. Bu oluşturulan geopolimerlerin mikroyapıları XRD ve SEM/EDS cihazlarında incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, alkali aktivatörlerin yoğunluğunun mekanik dayanımları üstünde etkili olduğu görülmüştür. SEM ve EDS analizi sonucunda oluşan hidratasyon ürünlerinin, alkali alüminosilikat jel ve kalsiyum silikat hidratlar olduğu görülmüştür. 1, 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde, farklı oranlarda agrega/bağlayıcı madde kullanarak basınç dayanımları incelenmiştir. Ayrıca  $H_2O/Na_2O$  molar oranı da basınç dayanımında önemli faktördür. NaOH yoğunluğunun artmasıyla moleküller arasındaki bağ gücünün artmasını alüminat ve silikat çözeltilerinin daha iyi çözülmesini sağlamıştır. Karışımlarda agregaların hacimlerini artırmak için işlenebilirliğini minimum seviyede tutmak için, daha çok su eklemek gerektiğini ve sonucunda aynı sodyum hidroksit yoğunluklarıyla farklı agrega hacimlerde,  $H_2O/Na_2O$  farklı oranları elde edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı olarak, farklı agregalar kullanılmış ve granit agregaların, agrega/bağlayıcı oranı 1.5 olan numunelerin basınç dayanımının yaklaşık 88 MPa olduğu gözlenmiştir.

Rangan *et al.*,(1987) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda su katkısının beton dayanımındaki etkilerini saptamışlardır. Şekil 5'te görüldüğü gibi su katkısı arttıkça basınç dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir.



Şekil 5. Su/geopolimer katı madde oranının basınç dayanımına etkisi

### 2.5.5. Mikroyapı özelliklerinin geopolimere etkisi

Nazari *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü ile üretilen inorganik polimerlerin (geopolimer) basınç dayanımını araştırmışlardır. Numunelerin mikroyapıları incelenmiş ve yoğun yapılı ve ince parçacıklı uçucu küllerin dayanım testlerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Alüminosilikat jel ve kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül partikülü içeren bileşikler halindeki geopolimer numunelerin mikroyapıları gözlemlenmiştir. XRD yöntemiyle incelenen sertleşmiş geopolimer bileşiklerin minerolojik yapıları incelendiğinde hidroksisodalit ve herselit gibi amorf alüminosilikat bileşikler oluştuğu tespit edilmiştir (Thakur and Ghosh, 2009).

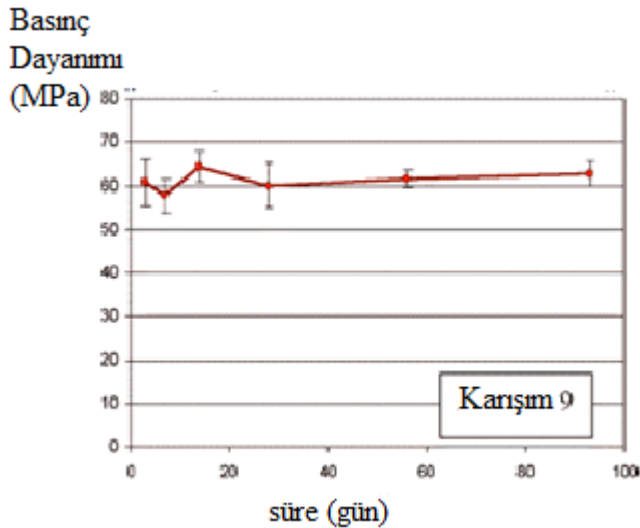
Yeni Zelanda'da yapılan elektrot deneyleri içeren çalışmalar ise geopolimer betonu içerisindeki çeliğin çimentolu betona kıyasla daha az korozyona uğradığını göstermektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer çimento üretiminde uçucu külün

öğütülerek incelik modulünün artırılması oluşacak hamurdaki mikroyapıyı iyileştirerek basınç dayanımını arttırmaktadır (Arıöz vd, 2009).

### 2.5.6. Geopolimerde basınç dayanımı

Çimento ve beton malzemelerin basınç dayanımı, malzemelerin kalitesini ölçmek için yaygın olarak kullanılan ve belki de en önemli parametredir. Çimento malzemelerinin ve aktivatörün yapısı, aktivatörün dozajı, su/çimento oranı, kür sıcaklığı, çimentolu malzemelerin inceliği, aktivatör eklemenin zamanlaması, diğer katkı maddeleri ve sıkıştırma basıncı gibi faktörler, betonun dayanım kazanmasında önemli etkenler olarak sayılabilirler. Jimenez *et al.*, (1999) mekanik dayanımı etkileyen en önemli faktörlerin, alkali aktivatörün yapısı, aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve cürufun özgül yüzeyi olduğunu ifade etmiştir (Sağlık 2009).

Rangan *et al.*, (1987) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda zamanın dayanım üzerine etkilerini tespit etmişlerdir (Şekil 6).



Şekil 6. Zamanın dayanım üzerindeki etkileri

Thakur ve Ghosh (2009) tarafından yapılan çalışmada alkali içeriği, silika içeriği ve geopolimer karışımın su içeriğinin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Su içeriği, geopolimerizasyonun çözünme, polikondenzasyon ve sertleşme aşamalarında önemli rol oynar. Su içeriğinin düşmesi basınç dayanımını iyileştirmiştir. Kür sıcaklığı ve kür süresi geopolimerin nihai basınç dayanımını etkilemiştir. Kür sıcaklığının ve kür süresinin artmasıyla basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. %50'den daha fazla ince agrega eklenmesinin basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür.

Puertas *et al.*, (2003) yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi atık malzemeler alkali aktivasyon çözeltileriyle, çimento ve betona alternatif olarak geliştirilen yeni bağlayıcılar üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, alkali çimento harçlara lifler katılarak mekanik ve dayanıklılık davranışları incelenmiştir. Üç farklı karışım hazırlanmıştır. İlk karışımlarda, yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör olarak cam suyu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ ) kullanılmış ve oda sıcaklığında kür edilmiştir. İkinci karışımda, ana malzeme olarak uçucu kül kullanılmış ve 8 M NaOH aktive edilmiş ve 85°C'de 24 saat süreyle kür edilmiştir. En son karışımda ise, %50 uçucu kül, %50 yüksek fırın cürufu ve alkali çözelti olarak 8 M NaOH kullanılmıştır. Bu malzemelere iki farklı yoğunlukta, %0.5 ve %1 oranlarında fiber katılmış ve bu numunelerin eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. Bu karışımlar sonucunda en iyi eğilme dayanımı hiç fiber kullanmadan ilk karışımda 7.8 MPa olarak bulunmuş ve en yüksek basınç dayanımı ise ilk karışıma %0.5 fiber eklenmesi ile 90 MPa olarak elde edilmiştir.

Bakri *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada her 1 ton betonun, 0.05 ile 0.13 ton arasında değişen CO<sub>2</sub> emisyonlarına yol açtığını ifade etmişlerdir. Bu Portland çimentonun yerine, oluşan CO<sub>2</sub> miktarını azaltmak için; uçucu kül, kil gibi geo tabanlı malzemelerin kullanılabilmesi belirtilmiştir. Yapılan çalışmada, uçucu kül ve alkali aktivatörler kullanarak geopolimer malzemeler üretilmiştir. Değişik oranlarda sodyum hidroksit kullanarak erken dönemlerdeki basınç dayanımını nasıl etkilediği üzerinde çalışılmıştır. Alkali aktivatörler olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılmıştır. Geopolimer hamur numuneleri 70°C'de kür edilip, 1 gün



boyunca oda sıcaklığına bırakılıp test edilmiştir. 1, 2, 3 ve 7 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer hamurun 12 M yoğunlukta maksimum basınç dayanımı değeri gösterdiği tespit edilmiştir. Bu uçucu kül tabanlı geopolimerin 7 günlük basınç dayanımı değeri 94.59 MPa olarak tespit edilmiştir.

### **2.5.7. Geopolimerlerde priz süresi**

Galiano *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada Pb, Cd, Cr, Zn veya Ba içeren uçucu külleri, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum silikat, kaolin, metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanarak oluşturdukları farklı karışımları incelemişlerdir. Kür sıcaklıklarının basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerlerinin, 1 ile 9 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, 60°C sıcaklıkta küre bırakılan numunelerin oda sıcaklığına göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuç olarak, kür sıcaklığı 25°C'ten 60°C'ye artırıldığında, priz süresinin arttığı ve bunun sonucunda basınç dayanımının da arttığı gözlenmiştir.

Bernal *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu ve metakaolini karıştırarak, alkali aktivatörlerle geopolimerler üretmişlerdir. Reaksiyonun ilk evrelerinde metakaolinin eklenmesiyle, toplam priz süresinin arttığını, çıkan ısı miktarının ise azaldığını belirlemişlerdir. Yüksek miktarda silika içeren alkali aktivatörlerin kullanımında, mekanik dayanımlarında bir azalma görülürken, priz süresinde ise önemli ölçüde bir artma gözlenmiştir. Sonuç olarak, metakaolin cürufların ve alkali aktivasyonların karışımıyla oluşan geopolimerlerin SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı malzeme özelliklerinin gücünü göstermektedir. Yüksek modüle sahip numunelerin, mekanik dayanımlarının düşük, priz sürelerinin yavaş ve düşük modüle sahip numunelere göre daha az hidrasyon ısıyı oluşturdukları gözlenmiştir.

López *et al.*, (2009) tarafından yapılan çalışmada, metakaolin tabanlı geopolimer bağlayıcıya sahip numunelerin hidrasyon sürecindeki priz süreleri incelenmiştir.

Portland çimentolu betonların, priz süresinin artmasıyla C-S-H jelleri yoğunlaşmış, emme oranı ve geçirgenliği artmış, fakat yoğunluğunda azalma gözlenmiştir. Aksine, metakaolin tabanlı geopolimer çimentoların priz süresinin artmasıyla, yoğunluğunda artma, emme oranı ve geçirgenliğinde ise azalma görülmüştür. Bu geopolimerlerin değişikliklerinin sebebi, yüksek alkali ve düşük sıcaklıklar altında olmasından kaynaklanmakta olduğunu belirtmiştir.

### 2.5.8. Geopolimerlerde aktivatör oranı etkisi

Vargas *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada uçucu küllerin, puzolanik olarak beton yapılarında kullanılmakta olduğunu ve büyük bir kısmının çevre ortamına atılmakta olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada uçucu küllerin değerlendirilmesi ve mühendislik projeleri için yeterli mekanik özelliklere sahip, alkali aktive uçucu kül tabanlı geopolimerler üretilmesi amaçlanmıştır. Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> molar oranı 0.20, 0.30 ve 0.40 olan ve kür sıcaklıkları 50, 65 ve 80°C olan uçucu kül tabanlı geopolimer harç ve hamur numuneler hazırlanmıştır. Bu hamurların XRD ve SEM/EDS kullanılarak mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Bu deneyler sonucunda 1, 7, 28, 91 ve 180 günlük basınç dayanımları incelenmiş ve molar oranı N/S 0.40 olan harçların basınç dayanımı değerlerinin en yüksek olduğu görülmüştür. N/S oranı 0.40 olan numunenin 180 günlük basınç dayanımı değerinin 20 MPa olduğu tespit edilmiştir.

Pan *et al.*, (2011) çalışmalarında, F tipi uçucu kül kullanarak geopolimerler üretilmesi amaçlamış ve bunların farklı sıcaklıklarda mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan gözlemler sonucunda, kasyonlarda, sodyumdan potasyuma çevrilirken (Ts) sıcaklığı 800°C'ye çıkarılmıştır. Ayrıca, Na/K karıştırılırken (Ts) sıcaklığı 570°C'ye düşmüştür. 530°C ve 730°C sıcaklarda gopolimerlerin dayanımında önemli artışlar görülmüştür. Bu dayanımdaki artışlar reaksiyonun ekzotermik olduğunu göstermektedir. Alkali aktivatörler olarak sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat ve potasyum silikat kullanılmıştır. Uçucu kül ve aktivatörler arasındaki reaksiyon ekzotermik olduğundan, bu reaksiyon yüksek sıcaklıklarda olduğunda basınç dayanımında artış olmadığı gözlenmiştir. Sonuç

olarak, geopolimerlerde alkali katyonlar ve silikat kullanılmasının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli ölçüde katkılarının olduğu tespit edilmiştir.

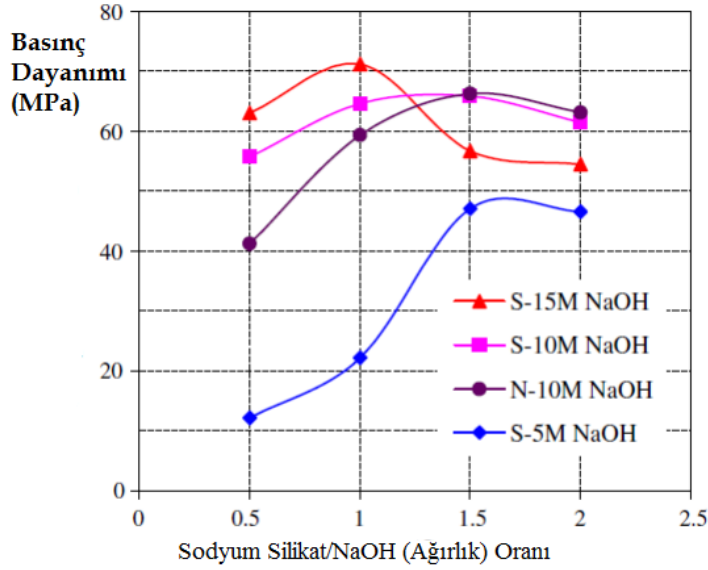
Bernal *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu ve metakaolini karıştırarak, alkali aktivatörlerle geopolimerler üretmişlerdir. Reaksiyonun ilk evrelerinde metakaolinin eklenmesiyle, toplam priz süresinin arttığını, çıkan ısı miktarının ise azaldığını belirlemişlerdir. Yüksek miktarda silika içeren alkali aktivatörlerin kullanımında, mekanik dayanımlarında bir azalma görülürken, priz süresinde ise önemli ölçüde bir artma gözlenmiştir. Kızılötesi spektroskopi ile 180 gün içerisinde jel yapısının geliştiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, metakaolin cürufuların ve alkali aktivasyonların karışımıyla oluşan geopolimerlerin  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı malzeme özelliklerinin gücünü göstermektedir. Yüksek modüle (2.4) sahip numunelerin, mekanik dayanımlarının düşük, priz sürelerinin yavaş ve düşük modüle sahip numunelere göre daha az hidrasyon ısısı oluşturdukları gözlenmiştir.

Xie *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada 54 mikrondan daha küçük boyutlu uçucu küller, metakaolin ve cüruf kullanarak geopolimer üretmişlerdir. Alkali aktivatör olarak, KOH ve  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  kullanılmıştır. Uçucu kül, metakaolin ve cüruf, alkali aktivatörlerle birlikte farklı oranlarda kullanılarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, katı/sıvı ve KOH/ $\text{K}_2\text{SiO}_3$  oranları değiştirilerek basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır. KOH/ $\text{K}_2\text{SiO}_3$  oranı düşük olan numunelerin basınç dayanımlarının da düşük özellik gösterdikleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak en yüksek basınç dayanımı değerinin (31.6 MPa) metakalin, uçucu kül ve cürufun 1:3:3 ağırlıklarında kullanılması ve 24 saat  $60^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki kür ortamındaki numunelerden elde edildiği belirtilmiştir.

Rattanasak *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada, uçucu külle birlikte sodyum hidroksit çözeltisi karıştırılarak geopolimer üretmişlerdir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır.  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 3.2 olan ve 5, 10 ve 15 M yoğunluklarda sodyum hidroksit içeren çözeltiler hazırlanmıştır. Uçucu kül sodyum

hidroksitle karıştırılmış ve daha sonra sodyum silikat çözeltisi eklenmiş ve geopolimer hamurlar oluşturulmuştur. Geopolimer numuneler 65°C, 48 saat kür edilmiş ve bunların mikroyapıları ve basınç dayanımları araştırılmıştır. Sonuç olarak, bu özelliklerin sodyum hidroksit yoğunluğuna ve karıştırma süresine bağlı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanımı değeri 70 MPa olarak, çözelti oranları (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH) 1 ve 10 M yoğunlukta NaOH çözeltilerinde tespit edilmiştir.

Rattanasak ve Chindapasirt (2009), yaptıkları çalışmada NaOH solüsyonu ile karıştırılmış uçucu kül süzüntüsü ile geopolimeri karıştırma üzerine çalışmışlardır. SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> süzüntüleri, uçucu kül ile NaOH solüsyonu farklı zaman aralıklarında karıştırılarak araştırılmıştır. Geopolimer hamuru yapmak için bireysel karıştırma ve normal karıştırma yöntemleri kullanılmıştır. Bireysel karıştırma için NaOH solüsyonu ile uçucu kül ilk 10 dk için karıştırılmıştır. Daha sonra sodyum silikat solüsyonu karışıma eklenmiştir. Normal karıştırma için, uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat solüsyonu birleştirilerek aynı süre karıştırılmıştır. Geopolimerler 65°C'de 48 saat kür edilmiştir. Üretilen hamurun mikro analizi ve harcın basınç dayanımı araştırılmıştır. Sonuçların, uçucu külün çözünürlüğüne, NaOH konsantrasyonuna ve NaOH ile karıştırılma süresine bağlı olduğu belirtilmiştir. Karıştırma işlemi içinse; ayrı karıştırmanın normal karıştırmaya göre biraz daha iyi dayanım harcı sonucunu verdiğini göstermiştir. 10 M NaOH, Sodyumsilikat/NaOH oranı 1 olan ve ayrı karıştırma kullanıldığında 70 MPa kadar dayanımlı geopolimer harçlar elde edilmiştir (Şekil 7).



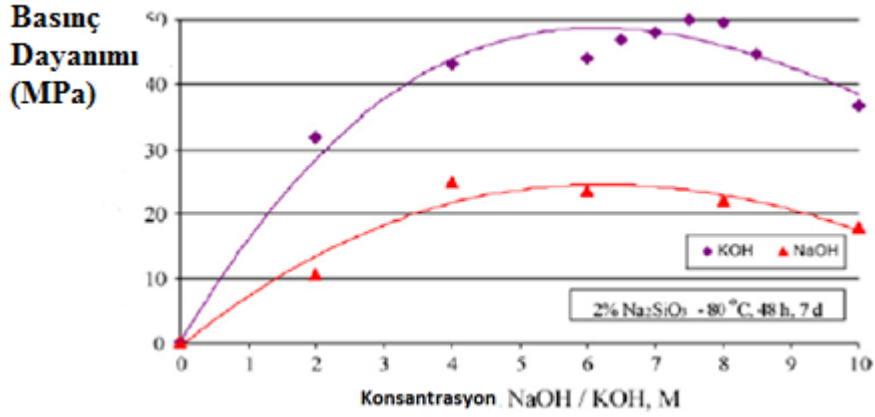
Şekil 7. Sodyum Silikat/NaOH (ağırlık) oranı ile dayanım arasındaki ilişki

Chindaprasirt *et al.*, (2007) yaptıkları çalışmada uçucu kül, 10, 15 ve 20 M yoğunlukta sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Geopolimer harç yapımında özgül ağırlığı 2.65 olan dere kumu kullanılmıştır. Bütün numunelerde dere kumu/uçucu kül oranı 2.75 olarak alınmıştır. Sodyum silikatın, sodyum hidroksite oranı 0.67, 1.00, 1.50 ve 3.00 olan çözeltiler hazırlanmıştır. Örneğin, 10 M sodyum hidroksit ve çözelti oranları 1 olan karışımda, 503 kg uçucu kül, 1382 kg kum, 127.5 kg NaOH, 127.5 kg sodyum silikat ve 40 kg taban suyu kullanılmıştır. Bu malzemeler, laboratuvar şartlarında karıştırılmıştır. Bu 5 dakika karıştırmadan sonra, sodyum silikat, su ve süperakışkanlaştırıcılar eklenmiştir. Bu numunelerin basınç dayanımları araştırılmıştır. Sonuç olarak, sodyum silikat /sodyum hidroksit oranı 0.67-1.0 arasında olan çözeltilerin yüksek basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, 10 M ve 20 M arasındaki yoğunluğa sahip sodyum hidroksitlerin basınç dayanımına etkisinin az olduğu gözlenmiştir. Bu çalışma sonucunda en yüksek basınç dayanım değeri 65 MPa olarak tespit edilmiştir.

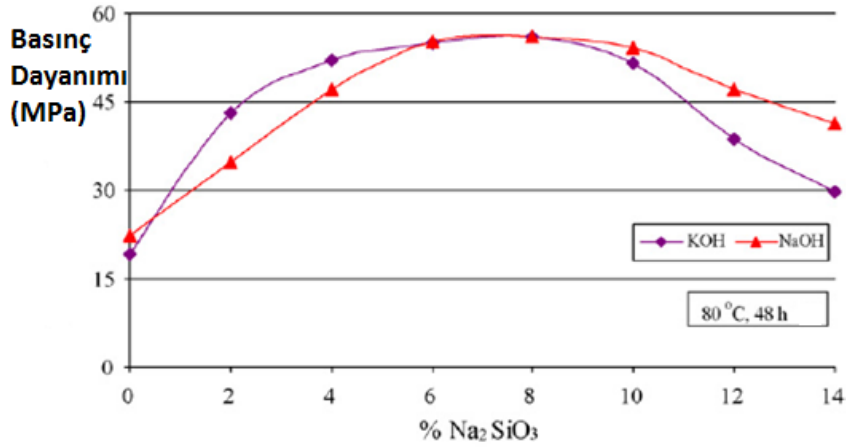
İnorganik polimerler (geopolimerler) ortam sıcaklığında oluşan üç boyutlu amorf alümino-silikatlardır. Reaksiyon süresi alümino-silikat tozu ile sert konsantrasyonlu alkali metal silikat solüsyonunun reaksiyona girdiği kısa süredir. Bu mükemmel

fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren yeni malzemeler, maden ve metal atıklarından belirli koşullar altında elde edilebilir. Son günlerde bu malzemeleri tanımlamak için, alkali bağlı seramikler, hidro seramikler ve alkali aktive edilmiş çimentolar gibi isimler kullanılmaktadır. Fakat her durumda alkali aktivasyonu işlemin özünde yer alır. Bu çimento esaslı malzemelerin ( $M_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ) oluşumu genel olarak komplekstir ve birincil katı fazların yıkımını gerektirir. Bu mekanizmalar pıhtılaşmış tiksotropik ve yoğunlaşmış/kristal yapılara sahip hidrate olmuş ürünlerin oluşumuyla meydana gelir. Faz dönüşümü/kararlılığı ve dayanım özellikleri arasında geçici bir bağ oluşur. Genellikle daha düşük basınç dayanımına sahip zeolit ürünlerin oluşumuna benzetilir. İnorganik polimerler kimyasal bileşim açısından zeolitlere benzerler, ancak yüksek yoğunlukta oluşurlar ve yarı kristal üç boyutlu alümino-silikat yapıya sahiptirler. Sıcaklık, pH ve belirli katyonların varlığı gibi zeolitlerin oluşumunu etkileyen faktörlerin aynı zamanda da inorganik polimer oluşumunu da etkilediği görülmektedir. Amorf inorganik polimerlerin yapısı zeolitlerin hidrotermal şekilde oluştuğu alümino-silikat jellerinden oluşur (Komnitsas *et al.*, 2009).

Alkali metal katyonlarının varlığı katalitik rol oynar, inorganik polimer sentezinin sertleşmesini ve kristalleşmesini kontrol eder ve güçlü yapı oluşumuna katkıda bulunur. KOH, NaOH'e göre daha inorganik polimer yapı sağlar. Çünkü  $K^+$  daha fazla oranda  $Al(OH)^{-4}$  ile bağlanmayı tercih eden silikat polimer oluşturur. Böylelikle daha iyi sertleşme ve daha yüksek basınç dayanımı elde edilir (Şekil 8-9). İnorganik polimer teknolojinin zararlı metalik ve maden atıkları değerlendirmek ve önündeki endüstriyel engelleri aşmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Komnitsas *et al.*, 2009).



Şekil 8. Alkali hidroksit konsantrasyonu ile basınç dayanımı değişimi



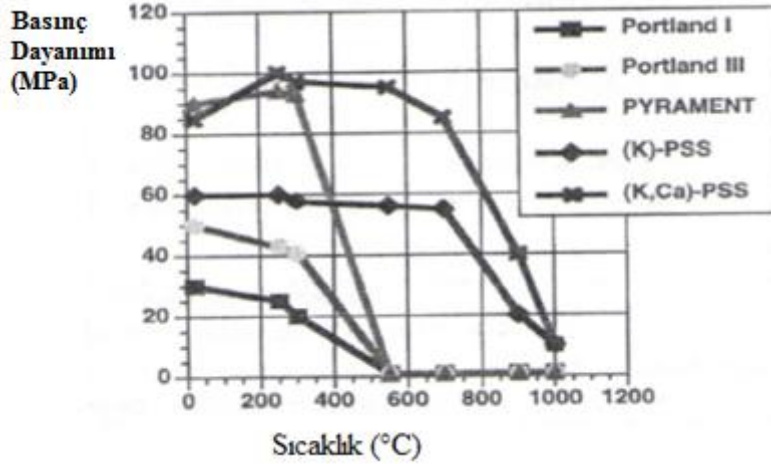
Şekil 9. NaOH veya KOH kullanılması durumunda basınç dayanımının  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranına göre değişimi

Geopolimerizasyon, atık malzemelerin büyük çoğunluğunu fiziksel ve kimyasal özellikleri çok iyi olan malzemelere dönüştürebilir. Yapılan çalışmada inşaat atıklarının,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH bileşimine dayalı alkali aktivatör ile geopolimerizasyonu çalışılmıştır. Parametre olarak su/kuru bağlayıcı oranı, silis modülü, kür süresi ve 28 günlük basınç dayanımı çalışılmıştır. Sonuçlara göre, inşaat atıkları uygun işlenebilirlik, kabul edilebilir priz süresi ve basınç dayanımı olan geopolimer çimentoların oluşumuyla sonuçlanan  $\text{NaSiO}_3$  ve NaOH'ın orantılı karışımı kullanılarak aktive edilebilir (Allahverdi and Kani, 2009).

## 2.5.9. Geopolimerlerde yangın etkisi

Literatüre göre geopolimerler yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklı malzemelerdir (Topçu vd. 2009). Daha önce yapılan çalışmalar, geopolimerlerin çok az veya hiç zehirli gaz yaymadan 1000°C'ye kadar dirençli olduklarını göstermiştir.

McNulty (2009) yaptığı çalışmada, iki tip normal Portland çimentosunun yangın dayanımı ile iki çeşit geopolimer çimentosunun yangın dayanımını karşılaştırmış ve geopolimer çimentonun daha yüksek yangın dayanımı sağladığını tespit etmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Portland çimentosu ile geopolimer çimentolu numunelerin yangın dayanımları

Buchwald *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada geopolimerlerin üstün sıcaklığa dayanıklı olduğunu ifade etmişlerdir. Yüksek sıcaklıktaki faz dönüşümlerinin kullanılan dolgu malzemesinin çeşidinden etkilenmiş olabileceği belirtilmiştir. Genellikle çeşitli tane boyutundaki agregalar poroziteyi ve sertleşmiş malzemenin büzülmesini azaltmak için kullanılır. Özellikle, küçük tane boyutlu agregalar ve belirli miktardaki reaktif faz, alkali aktivasyonu boyunca bağlayıcı malzeme



reaksiyonuna girebilir, hatta sertleşmeden sonra ısı işlem ile de bu yapılabilir. 900°C üzerindeki geopolimerler kil ile reaksiyona girmiş ve ikincil albit oluşturduğu gözlenmiştir. Geopolimerler ve zeolitler arasındaki yakın yapısal ilişki sayesinde, geopolimerlerin termal stabilitesi zeolitlerin termal stabilitesinden türetilebilir. Termal dayanıklılığı önemli ölçüde etkileyen faktörlerin dozaj dengeleyici katyon tipi, Si/Al oranı ve kendi kristal yapıları olduğu ifade edilmiştir. Termal işlem altındaki geopolimer reaksiyonlarının aynı düzeni takip ettiği belirtilmiştir. Yapılan çalışma 1000°C’de termal işlemden önce ve sonra ince agregaların faz kompozisyonu üzerindeki etkisini incelemiştir. Kuvars, şamat ve kil ince agrega olarak kullanılmıştır. Sıcaklık performansı, dayanım, porozite ve büzülme değerleri 40°C’de ölçülmüştür. Numuneler 1000°C’de ısı işleme birkaç saat tabi tutulmuştur. Bundan sonra faz kompozisyonu ve porozitesi ölçülmüştür. Termal davranışlar bağlayıcıların termal analizleriyle gözlemlenmiştir. Çalışma bileşimin sodyum esaslı geopolimerlerin termal davranışı üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. Polimerin büzülmesinin 20-400°C arasındaki dehidratasyonu ve 850-950°C arasındaki faz dönüşümünün yol açtığı hacimsel büzümeye doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Nefelin içerisindeki alümino-silikat geopolimer bağların faz dönüşümlerine ek olarak, yapışmamış alkali akıntı gibi davrandığı ve ısıtmadan yüksek amorf içeriklerde görüldüğü gibi ıslak sinterleme yoluyla büzümeye yol açtığı görülmüştür. Faz dönüşümleri ile ilgili büzülme problemleri Na esaslı geopolimerlerin 850°C’deki çalışma sıcaklığını kısıtlamıştır.

Sarker ve Meillon, (2007) yaptıkları çalışmada 800°C sıcaklığa maruz kalan uçucu kül tabanlı geopolimer betonun dayanımını değerlendirmişlerdir. Her iki numunede 60°C sıcaklıkta kür edilmiş, numunelerin 175°C sıcaklığa kadar dayanımının arttığı, daha yüksek sıcaklıklarda ise, sıcaklıkla dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. 800°C’de her iki betonun dayanımının azaldığını, fakat geopolimer çimentoların dayanımlarının, Portland çimentolarının dayanımlarına göre daha yüksek sonuçlar verdiğini test etmişlerdir.

Elimbi *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada geopolimer çimentolar üretiminde kaolinit kil için en uygun sıcaklığı araştırmışlardır. 450°C ve 800°C sıcaklıkları arasında kimyasal, mikroyapı ve ısı analizlerini incelemişlerdir. Oluşturulan amorf malzemeler ve alkali aktivasyonlarla üretilen geopolimer çimentoların, priz süresi, doğrusal büzölmeleri ve basınç dayanımları incelenmiştir. Sertleşmiş geopolimer çimento hamuru örneklerinin elektron mikroskobu analizleri, X-ışını kırınımı gibi mikro yapı analizleri incelenmiştir. 450°C’de geopolimer çimento hamurunun priz süresi çok uzundur. 500°C ve 700°C arasında geopolimer çimento hamurunun sıcaklık artışıyla priz süresinin azaldığı gözlenmiştir. 700°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda priz süresi artmaya başlamış, fakat 21. ve 28. günler arasında büzölme en düşük değere ulaşmıştır. Geopolimer çimento hamurunun 500°C ve 700°C arasında basınç dayanımı değeri 11.9 ve 36.4 MPa arasında değişmektedir. Sonuç olarak kaolinit kil geopolimer üretmek için en uygun sıcaklık değerinin 700°C civarında olduğu tespit edilmiştir.

Rashad *et al.*, (2011a) yaptıkları çalışmada düşük kalsiyum içeren F tipi uçucu külü kullanmışlardır. Yapılan çalışmada uçucu kül tabanlı geopolimer çimento ile CEM I Portland çimentosu karşılaştırılmıştır. Alkali aktivatör olarak, %8.2 Na<sub>2</sub>O, %27 SiO<sub>2</sub> ve %64 H<sub>2</sub>O içeriğine sahip sodyum silikat kullanılmıştır. 3 adet alkali aktiviteli geopolimer çimento ve Portland çimentosu hazırlanmıştır. %20, 30 ve 40 içerikli sodyum silikat ile uçucu kül karıştırılmış ve geopolimer hamurlar oluşturulmuştur. Deneyde ilk olarak sıvı sodyum silikat ile su karıştırılmıştır. Daha sonra uçucu kül eklenmiş ve mikserde karıştırılmıştır. 25×25×25 mm kalıplara dökülmüş, içindeki hava kabarcıklarını çıkarmak için 1 dakika vibrasyon yapılmıştır. Benzer karışımlar Portland çimentosu içinde yapılmıştır. Tüm numuneler 60 ile 90°C sıcaklıkta %5 bağıl nemde küre bırakılmıştır. 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. 28 günlük numuneler 105°C’de etüvde kurutulmuş ve kurutulduktan sonra 200, 400, 600, 800 ve 1000°C fırına atılıp, yangın dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak; uçucu kül tabanlı geopolimer hamurların, yangın direncinin Portland çimentoya göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Aktivatörlerin yoğunluğunun artmasıyla basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Yüksek yoğunluğa sahip alkali aktivatörlerin

ilk basınç dayanımı 47.28 MPa iken, 1000°C’de basınç dayanımı değeri 33.35 MPa olarak tespit edilmiştir.

Le-ping *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada kaolini 800°C’de, 2 saat kalsine ederek, metakaolin üretmişlerdir. Bu malzemenin boyutu 35–50 µm arasında değişmektedir. Alkali aktivatör olarak, fosforik asit kullanılmış ve damıtılmış su ile karıştırılmıştır. Bu malzemelere, Al tozu %0.06, %0.08, %0.10, %0.12 ve %0.20 oranlarında ilave edilmiştir. Metakaolinden gelen  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al tozu ve fosforik asit 80°C’de, 5 saat süreyle kür edilmiş asit tabanlı geopolimerler üretilmiştir. Bu geopolimerler, bir miktar alüminyum fosfat ve kuartz içerdiğinden dolayı, amorf bir yapı oluşturmaktadır. Ayrıca bu amorf yapı, sodyum silikat tabanlı geopolimer yapısıyla da benzerlik göstermektedir. Bu geopolimer malzemelerin gözenek hacmi ve yapısı Al tozu ve su içeriğiyle kontrol edilmekte ve porozitesi %40 ile %83 arasında değişmektedir. Sonuç olarak, bu polimerler Al tozu içeriği ve porozite etkisiyle, maksimum 13.7 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir ve 1450°C’ye kadar ısıtıldığında sabit basınç dayanımı altında mükemmel bir termal kararlılık göstermiştir.

#### **2.5.10. Geopolimerlerde Si/Al oranının etkisi**

Topçu *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanmışlardır. Alkali aktivasyon olarak, %98 saflıkta sodyum hidroksite bir miktar su eklenerek çözelti hazırlanmıştır. Bu çözeltiye bir miktar uçucu kül karıştırarak, geopolimer harçlar üretilmiştir. Bu karışımlara iki farklı kür uygulanmıştır. Bu çalışmada iki farklı kürün, geopolimer harçlar üzerinde 1, 7, 28, 90 ve 360 günlük basınç dayanımı değerleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. 28 günlük numuneler ilk kür şartında 26.23 MPa ve diğer kür şartında ise 24.14 MPa basınç dayanımı değeri göstermişlerdir. Ayrıca Si/Na atomik oranlarının basınç dayanımlarında da etkisi olduğu gözlenmiştir. Düşük Si/Na (0.5) oranına sahip geopolimer ürünler alüminosilikat jeller olarak daha çok gelişmiştir. Sonuç olarak ilk kür şartlarında (20°C ve %90 RH) basınç dayanımı olarak daha yüksek sonuçlar verdiği

görülmüştür. Geopolimer harçların, sıcaklık 400°C'den 800°C'ye yükseltilirken pembeden griye dönüştüğü ve daha yoğun bir yapı oluşturduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, sıcaklığın artmasıyla geopolimer harçların basınç dayanımının %27.25 oranında azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, 4.54 ve 0.98 Si/Al oranlarına sahip reaksiyonların sonucunda daha amorf yapıya sahip numunelerin ortaya çıktığı görülmüştür.

Pimraksa *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada hafif geopolimer malzemeleri, iki atomlu toprak ve pirinç kabuğunu, alkali aktivatörler olan  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ü farklı oranlarda kullanarak oluşturulan numunelerin mikroyapı özelliklerini ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, geopolimer malzemelerin inceliği, kalsinasyon sıcaklığı, NaOH ve KOH yoğunluğu ve kür sıcaklıklarının geopolimer harçlar üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Sonuçlara göre, kalsinasyon sıcaklığının en uygun değeri 800°C olarak tespit edilmiştir. İki atomlu toprak malzemelerin inceliğinin artmasıyla geopolimer hamurların basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca sodyum hidroksit çözeltisiyle yapılan geopolimer harçların, potasyum ile yapılan harçlara göre daha iyi basınç dayanımı sonuçları verdiği gözlenmiştir. En iyi kür süresi olarak 75°C ve 5 gün olduğu belirlenmiştir. Karışımların başlangıçtaki  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarının da geopolimer hamurların özelliklerini etkilediği görülmüştür.  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranları değiştirilen numunelerin basınç dayanımları değerlerinin 11 ile 60 MPa arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tippayasam *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada puzolanik malzeme olarak uçucu küller, bagasse külü, metakaolin ve pirinç kabuğu küllerini kullanmış ve bunların mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bu puzolanik malzemeler, 10 M sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileriyle karıştırılarak küp kalıplara yerleştirilmiştir. Üretilen numuneler 80°C kürde 24 saat süreyle bekletilmiş ve daha sonra oda sıcaklığında 7 gün bekletilmiştir. Si/Al molar oranlarıyla ve Na/Al molar oranlarının basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, su emme değerleri, yoğunluk değerleri ve gözenek yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak, alkali sıvıların yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımı değerlerinin de arttığı görülmüştür. 1 ve 2

arasında Si/Al yoğunluk oranları ve 1'den küçük Na/Al molar oranları olan numunelerin geopolimer çimento üretmek için en uygun olduğu tespit edilmiştir.

Silva ve Crenstil (2008) yaptıkları çalışmada metakaolin reaksiyonlu alkalilerle hazırlanan ve içerisinde SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O ve H<sub>2</sub>O içeren geopolimer karışımların mikroyapı gelişimleri, kür süreleri, fiziksel özellikleri ve basınç dayanımları araştırılmıştır. 2.50–5.01 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sahip ve 0.60–1.70 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>O oranına sahip geopolimer karışımlar incelenmiştir. Numuneler 7 ay boyunca, 40°C sıcaklıkta küre tabii tutularak XRD ve SEM cihazlarında analiz edilmiştir. Erken yaşta gözlenen amorf Na-Al-Si fazların, yavaş yavaş uzun kürle kristal fazlara dönüştüğü görülmüştür. Özellikle SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar oranları düşük ve Na<sub>2</sub>O içeriği yüksek numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Komnitsas *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer betonların CO<sub>2</sub> emisyonunun, Portland çimentolara göre daha az olduğu gözlenmiştir. Bu geopolimer betonların diğer betonlara göre daha az çevreye zararlı olması sodyum silikatların kullanılması ile olmaktadır. Bugün beton üretimi için CO<sub>2</sub> azaltmanın en iyi yolu, bu endüstriyel malzeme atıklarının uygun silisyum ve alüminyum oranlarıyla birleştirilerek geopolimer beton üretmek olacağı ifade edilmiştir. Magnezyum-demir ve ferronikel cürufları çimento teknolojisi ile birlikte kullanılabilir gibi, geopolimerik bağlayıcı madde olarak da kullanılabilir. Cüruf tabanlı geopolimer betonlar sadece az miktarda sodyum silikat gerektirir ve bu nedenle düşük çevresel etkiye sahiptir. Ayrıca, bu atıkların kullanımı kendi tasarruflarında ve tehlikeli sızıntı sularının sonraki nesil ile ilgili çevresel etkilerini azaltmaktadır. Ayrıca, metakaolin tabanlı geopolimer betonlar, düşük oranda Si/Al içerdiğinden, yüksek miktarda sodyum silikata ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden metakaolinden veya cüruftan daha yüksek Si/Al oranı içeren malzemeler tercih edilmelidir. Bu malzemeler, Portland çimentolara göre daha fazla çevre dostu olmakta ve beton üretimi için önemli bir yatırım sağlamaktadırlar.

### 2.5.11. Geopolimerlerde Na<sub>2</sub>O içeriği

Komljenovic *et al.*, (2010) tarafından yapılan çalışmada F sınıfı uçucu kül ve alkali aktivatörler kullanarak oluşturulan geopolimerin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Alkali aktivatör olarak Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH, NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KOH ve sodyum silikat farklı oranlarda kullanılmıştır. Dane boyutları 43 µm altında olan uçucu küllerin sodyum silikat ile oluşturduğu geopolimerin basınç dayanımı değerinin en yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ve Si/Al oranları da incelenmiş; Si/Al oranları en yüksek olan numunelerin, daha yüksek dayanım değerine ulaştığı gözlenmiştir. %10 Na<sub>2</sub>O içerikli geopolimerin en yüksek basınç dayanımı değerini verdiği tespit edilmiştir.

Abora *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada iki farklı yoğunlukta sodyum silikat kullanarak alkali aktiviteli betonların yoğunluğu ve basınç dayanımları araştırmışlardır. Numuneler, oda sıcaklığında kür edilerek basınç dayanımları incelenmiştir. Malzeme olarak, ggbs, uçucu kül, alkali aktivatörler ve ince ve kaba agregalar kullanılmıştır. İki aktivatörde de aynı silis modülüne sahip SiO<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>O oranı 1.54 olan alkaliler kullanılmıştır. İlk aktivatör olarak, %20 SiO<sub>2</sub>, %13 Na<sub>2</sub>O içeren sodyum silikat, diğer aktivatörde ise daha düşük yoğunlukta %12.3 SiO<sub>2</sub>, %8 Na<sub>2</sub>O içeren sodyum silikat kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, aktivatörlerin yoğunluklarının değişmesiyle, optimum aktivatör/bağlayıcı oranı ve basınç dayanımını da etkilediği belirtilmiştir. Düşük yoğunluğa sahip aktivatörler, maksimum akış göstermesine rağmen, yüksek yoğunluğa sahip aktivatörlerden %25 daha az basınç dayanımı değeri gösterdiği tespit edilmiştir.

Allahverdi ve Kani, (2009) hammadde olarak atık tuğla ve beton parçacıkları kullanmışlardır. Bu atık tuğla ve beton parçacıkları, 26.74 µm ve 24.17 µm seviyelerinde öğütülmüştür. Bu çalışmada, farklı yoğunlukta alkali olan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH geopolimerizasyonları araştırılmıştır. Alkali aktivatör olarak, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı 0.86, silika içeriği %34.32 olan sodyum silikat ve %99 saflıkta sodyum hidroksit kullanılmıştır. Bu sistemlerin su/bağlayıcı oranı, silis modülü, sodyum oksit

yoğunlukları ayarlanmış, priz süreleri ve 28 günlük basınç dayanımları üzerinde çalışılmıştır. Sonuç olarak, bu atık maddelerin alkali aktivatörlerle birlikte geopolimer çimento üretilebileceği gözlenmiştir. Ayrıca, atık tuğla ile üretilen geopolimerlerin 28 günlük basınç dayanımlarının, atık betonlardan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Sadece tuğla atıklarıyla üretilen, %8 Na<sub>2</sub>O içeren kuru bağlayıcıların 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık 40 MPa olduğu tespit edilmiştir.

Tuğla ve beton atıklarının karışımı ile orantılı alkali aktivatörün aktivasyonundan elde edilmiş sonuçlar, inşaat atıklarından geopolimer çimento üretme ihtimalinin olduğunu göstermiştir. Farklı oranlarda tuğla ve beton atıkları 0.6 silis modulünde aktive edilmiş %6-7 Na<sub>2</sub>O konsantrasyonunda ve %8 su ile hazırlanmış karışımın kür süresi 100-250 dk arasında değiştiği görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımlarına göre, geopolimerizasyon reaksiyonları için tuğla atıkları, beton atıklarından daha uygundur. Sadece tuğla atığı ve kuru bağlayıcı ağırlığının %8'i oranında Na<sub>2</sub>O içeren karışım için 28 günlük basınç dayanımı değerinin 40 MPa olduğu tespit edilmiştir (Allahverdi and Kani, 2009).

#### **2.5.12. Geopolimerlerde alkali aktivatör yoğunluğunun etkisi**

Xu ve Deventer, (2000) çalışmalarında geopolimerler zeolitlerin kimyasal yapısına benzemektedir, fakat amorf yapı özelliği göstermektedir. Bu malzemeler yüksek alümina ve silika malzemelerinin geopolimerazasyonu sonucu elde edilir. Genellikle bu atık alümina silikat malzemeleri, yapı malzemelerinde kullanılarak, yangın ve asit dirençlerinde, mükemmel fiziksel ve kimyasal özellik gösterirler. Bu çalışmalarında, alüminyum ve silisyum içeren 15 adet doğal malzemelerin geopolimerazasyonları sonucu üretilen geopolimerin basınç dayanımı araştırılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve KOH kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu bütün mineraller alkali çözeltilerle karıştırılmış ve sonuç olarak KOH çözeltilerinin, NaOH çözeltilerine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuç olarak, NaOH yerine KOH kullanılmıştır. En iyi sonuçlar stilbite mineralinde yaklaşık 18 MPa basınç dayanımı

elde edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda Al ve Si içeren birçok doğal minerallerin geopolimer kaynak olarak kullanılabilceği gözlenmiştir.

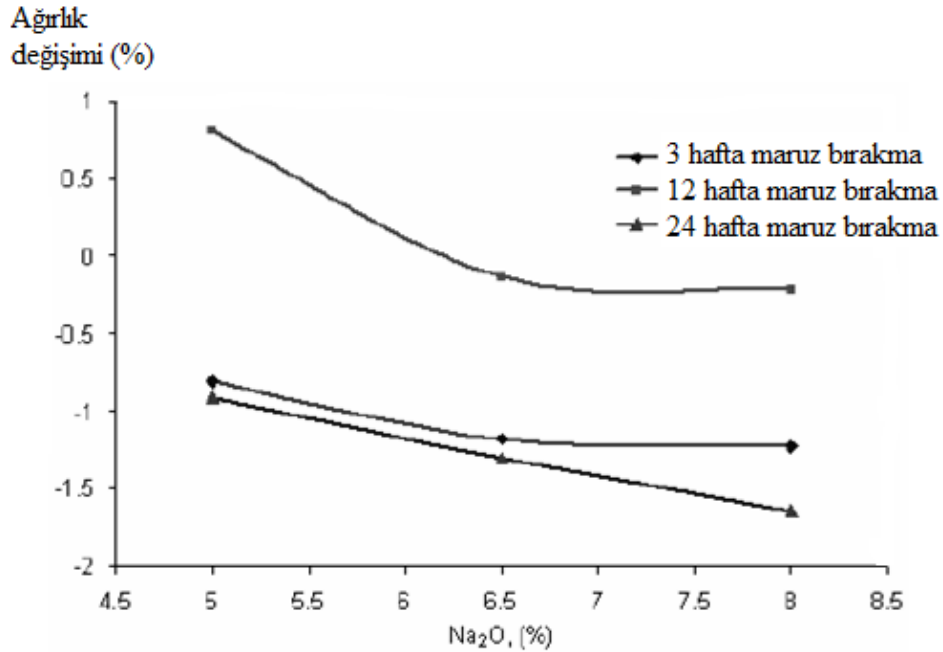
Zhang *et al.*, (2011a) yaptıkları çalışmada yüksek (Si/Al) oranına sahip maden atıklarından F sınıfı uçucu kül ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmıştır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri, SEM ile mikroyapıları görüntülenmiş ve XRD cihazıyla faz bileşimleri analiz edilmiştir. Bu uçucu kül tabanlı geopolimerlerin, Si/Al oranlarının, priz sürelerinin ve sodyum hidroksit yoğunluklarının geopolimere etkisi araştırılmıştır. Numuneler üç farklı uçucu kül (%25, %50 ve %75) içeriği ve 10 M NaOH kullanarak hazırladıkları numuneleri 2, 7, 14 ve 28 gün kür etmişlerdir. Sonuç olarak, Si/Al oranlarının ve alkalilerin geopolimerler üzerinde mekanik ve yapısal olarak önemli ölçüde etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca geopolimer numuneler 2 günde basınç dayanımı kazanmış ve 7 günde nihai basınca ulaşmışlardır. 7 günden sonra basınç dayanımında pek değişiklik olmadığı görülmüştür. Sodyum hidroksit yoğunluğunun artmasıyla, yüksek derecede geopolimerizasyon özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sodyum hidroksit yoğunluğunun artmasıyla, geopolimer jellerin daha yoğun yapı gösterdiği görülmüştür. En iyi basınç dayanımı ise NaOH'in yoğun olduğu numunelerde 21.2 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak bu tip atık madeni malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanılabilceği görülmüştür.

Nazari *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü ile üretilen inorganik polimerlerde 12 M NaOH çözeltisi kullanıldığında maksimum basınç dayanımı elde edildiğini belirtmişlerdir.

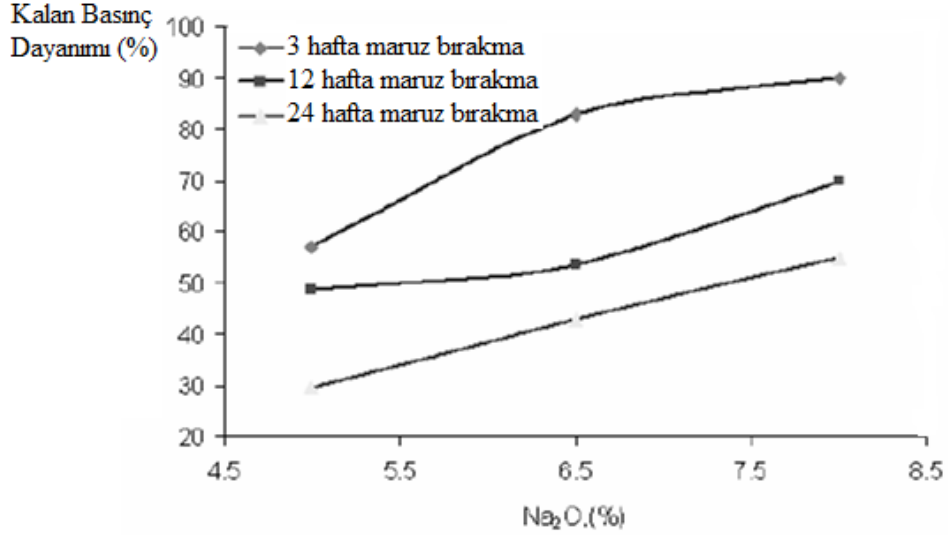
Thokchom *et al.*, (2009a) yaptıkları çalışmada alkali içeriğinin yüksek konsantrasyonlu sülfirik asit etkisinde uçucu kül esaslı geopolimer harç numunelerinin davranışını incelemiştir. Değişik alkali içerikle hazırlanmış geopolimer harçlar sülfirik asit solüsyonu içerisine daldırılmış ve numune yüzeyleri değişimi, ağırlık değişimi, basınç dayanımı ve SEM-EDAX yöntemleriyle mikroyapı değişimleri incelenmiştir. Bu deneysel çalışmalar sonucunda değişik alkali içerikle



elde edilmiş uçucu kül esaslı geopolimer numuneler, sülfirik asit etkisine bırakıldığında değişen bozulma oranları göstermiştir. Harç numunelerin gözle görülebilir yapısal parçalanma göstermemelerine rağmen, yüzeylerinin bozuk olduğu optik mikroskopta açık bir şekilde görülmüştür ve üretilen numunelerdeki alkali içeriğinin düşmesiyle bozulmaların arttığı gözlenmiştir. Bütün numunelerde ağırlık kaybı gözlemlenmiştir, daha yüksek alkali içerikli olanlarda daha fazla ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. En fazla dayanım kaybı minimum alkali içerikli geopolimer harç numunelerde gözlemlenmiştir. 24 hafta sonra %10 sülfirik asit içerisinde kalan numunelerin basınç dayanım değerleri, başlangıç değerinin %29.4'ü kadar olduğu görülmüştür. SEM mikroyapı analizleri asit solüsyonu etkisi öncesi ve sonrasında farklı mikro yapılar göstermiştir. Numunelerin mikro yapılarının sülfirik asit etkisinden sonra, açık renkli çökelti oluşumundan dolayı daha yoğun olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı bakımından, daha yüksek alkali içerikli numunelerin daha düşük içerikli olanlardan daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Şekil 11-12).



Şekil 11. Sülfirik asit çözeltisi içindeki geopolimerin ağırlık kaybına alkali içeriğinin etkisi



Şekil 12. Sülfirik asit çözeltisi içindeki geopolimerin basınç dayanımına alkali içeriğinin etkisi

### 2.5.13. Geopolimerlerde pH etkisi

Rashad *et al.*, (2011b) yaptıkları çalışmada sodyum sülfat aktiviteli cürufaların, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında, kimyasal kararlılığı ve mekanik özellikleri incelemiştir. Ana malzeme olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör olarak iki farklı yoğunlukta (cüruf kütlelerinin %1 ve %3 Na<sub>2</sub>O) sodyum sülfat kullanılmıştır. Bu karışımlar, 7 farklı grubu oluşturmaktadır. Birinci ve ikinci grup numuneler, oda sıcaklığında kür edilmiş, 3 ve 7 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Üçüncü grup numuneler yine oda sıcaklığında kür edilmiş ve bu sefer 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Diğer gruptaki numuneler ise, 200°C'den 800°C'ye kadar yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve dakikada 4°C artırarak, 2 saatte kür edilmişlerdir. Sonuç olarak, 600°C'nin üstündeki Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile aktive edilmiş geopolimerin, Portland çimentolara göre daha iyi direnç ve dayanım gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca hamur numunelerinde yüksek sıcaklıkta pH değerlerinin etkisi de incelenmiştir. Portland çimentolarda pH değerlerinin azaldığı, fakat cüruf tabanlı geopolimerin 600°C'den sonra pH değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, yeterli pH değerinin ayarlanmasıyla, çelik donatıları yüksek derecede koruduğu ve korozyon riskini azalttığı tespit edilmiştir.

Geopolimer, alkali sülfatlar ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ve diğer asit etkilerine de yüksek dayanıklılık göstermekte olup; pH değeri 12'den daha yüksek ortamda sentezlenmesine rağmen geopolimerde tehlikeli ve mikroyapıyı bozucu alkali silika reaksiyonları oluşmamaktadır. Prefabrik geopolimer beton üretimi ile ilgili bir başka çalışmada, atık su büz borularının geopolimer çimentolu betondan üretiminde gerekli olan asit aşınma deneyleri uygulanmıştır. Portland çimentolu betonun 50 yıl dayandığı sülfirik asit etkisine geopolimer betonunun 900 yıl dayanabileceği deneylerde gözlenmiştir. Aynı araştırmacılar alkali agrega oluşumu, karbonatlaşma, çelik korozyonu, klor difüzyonu ile ilgili deneyleri de uygulamışlardır. Portland çimentosunun ana yapısını oluşturan kalsiyum alüminat hidratin geopolimer çimentosunda olmayışı geopolimerin bu tür etkilere de çok daha dayanıklı olmasını sağlamıştır (Arıöz vd, 2009).

#### **2.5.14. Geopolimerlerin uygulama alanları**

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

Geopolimerler silis ve alüminyum zengini hammaddeler ile alkali solüsyonu sonucu oluşan malzemelerdir. Bu malzeme son birkaç yıldır detaylı olarak çalışılmaktadır ve sonuçlar gösterdi ki normal Portland çimentosuna çevreci bir alternatif olabilir. Geopolimerlerin sıfır çimento içeriği ile daha az  $\text{CO}_2$  yaymasının yanında, iyi mühendislik özelliklerinin de olduğu görülmüştür. Geopolimer prefabrik betonların, kutu menfez olarak uygulanabilirliği saptanmıştır. Sonuçlara göre, geopolimer betonlu betonarme kutu menfezlerin üretimi için prefabrik beton santrallerinde kullanılmasının kolaylık sağladığı görülmüştür. Geopolimer betonlu kutu menfezlerin dayanımla ilgili standartları karşıladığı görülmüştür (Temuujin *et al.*, 2009).

Eski Mısır'da M.Ö. 3600 yılında bağlayıcı olarak mezar heykelleri ve seramik yapımında, alkali silikatların kullanıldığı yapılan araştırmalarla keşfedilmiştir. Günümüz teknolojisi ile kuartz kumu ve sodyum karbonatın 1300-1400°C ergitilmesi ve su içinde soğutulması ile sıvı ya da öğütülmüş granüle alkali silikatlar elde edilir. Eski çağlarda bu sıcaklığı sağlayacak bir kimyasal teknolojinin sağlanamayacağı açıktır. Mısır'daki ilk üretim bol silis bulunduran buğday arpa ve kamış küllerinin opal çakmaktaşı krisokolla çakmaktaşı gibi içlerinde tuttıkları suyunda etkisi ile SiO<sub>2</sub> molekülü bağlarının kuartzla kıyasla biraz daha zayıf olduğu volkanik taşlarla birlikte öğüterek elde ettikleri katı karışımı özellikle soda gölleri içinde bulunan sodyum karbonat sodyum klorür sodyum sülfat alkali tuzlarının sulu çözeltisi ile 620°C sıcaklıkta kimyasal reaksiyona sokarak eriyik halinde (Na, K, SiO<sub>2</sub>) alkalisilikatları elde edip yapı ve heykellerinde kullandıkları düşünülmektedir (Davidovits, 2008; Arıöz vd, 2009).

Davidovits (2008), organik polimer kimyası üzerinde daha çok çalışmış ve 1970–1972 yılları arasında Fransa'da meydana gelen afet yangınları sonrasında, alev almaz ve yanmaz plastik malzemeler üzerinde araştırma yapmıştır. Daha sonra, 1972 yılında Cordi SA (kordi geopolimerleri) denilen özel bir araştırma şirketi kurulmuştur. Bu çalışmada, yeni inorganik polimer malzemeleri geliştirmek için, feldspar ve zeolit gibi malzemeler, bazik ortamda bazı organik malzemelerle kullanılarak geopolimerler üretilmiştir.

1973-1976 yıllarında geliştirilen ilk uygulama olarak üretilmiş geopolimerler, yangın dirençli paneller, ahşap çekirdekli, iki nanokompozit geopolimer kaplamalardan oluşmaktadır (Davidovits, 2008).

Tüm paneller tek aşamalı üretilmiştir. Bu çalışmada, organik malzemelerin 150–180°C sıcaklıkları arasında, silikoalüminat minerallerin priz süresiyle ilk defa sertleştiği gözlenmiştir (Davidovits, 2008).

Temuujin *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada geopolimer türü kaplamaları (silis modülü 3.1 olan sodyum silikat ve metakaolin kullanarak üretilen metakaolin tabanlı geopolimerler) çelik yüzeylere uygulamışlardır. Kaplamalar çelik yüzeylerde oldukça iyi bir yapışma göstermiş ve 3.5 MPa'dan daha büyük çekme gerilmesi elde edilmiştir. Su içerisinde 72 saatten fazla çözünen kaplamaların, başlangıçtaki 12.8 ve 34.5 arasında değişen su içeriğine bağlı olduğu gözlenmiştir. Bu metakaolin tabanlı geopolimerler 800°C ısıtıldıktan sonra %3 ısıl genişleme göstermiştir. 1000°C sıcaklıkta 1 saatte kalsine olan amorf yapıları çelik yüzeylerdeki kaplamalar yüksek yapısal bütünlüğü korumuştur.

## 2.6. Betonlarda Sülfat Etkisi

Sülfatın beton bileşenleri ile kimyasal reaksiyona girebileceği ilk olarak 1818 yılında Vicat tarafından açıklanmıştır. Candlot 1890 yılında kalsiyum alümina ve kalsiyum sülfatın sulu çözeltisinden genişleyen bir ürün ortaya çıktığını belirlemiştir. Michealis 1892 yılında çimento bileşenlerinde  $C_3A$  ile sülfatın reaksiyona girerek etrenjiti meydana getirdiğini ortaya çıkarmıştır. Sülfat etkisinde söz edilmesi gereken en önemli kimyasal reaksiyonlar, alçıtaşı ve etrenjit oluşumu ile ilgili olanlardır. Sertleşmiş betonda alçıtaşı oluşumunun kaynağı kalsiyum hidroksit ve dış ortamdan gelen sülfat iyonlarıdır. Denklem 3 ve 4'teki reaksiyonlar sülfat katyonundan bağımsız olarak verilmiştir. Kalsiyum hidroksit kaynağı da esas olarak  $C_3S$ 'dir. Bu yüzden sadece alçıtaşı oluşumu dikkate alındığında  $C_3S/C_2S$  oranı yüksek olan çimentolar uzun vadede sülfat etkisine maruz kalacak ise ve geçirimsizliklerini olumsuz etkileyecek ortamlarla karşılaşırlarsa hasar görme ihtimalleri oldukça yüksektir. Literatürde alçıtaşı oluşumunun genişleme oluşturmayacağını iddia eden araştırmacıların yanında, genişleme oluşturacağını savunan araştırmacılar da mevcuttur. Tian ve Cohen (2000), yaptıkları literatür taramasında bu araştırmacıların görüşlerini bir araya getirmiştir. Hansen alçıtaşının genişleme yaratıcı etkisi olmadığını belirtmiştir. Mehta ise alçıtaşının genişletirici etkisinin, etrenjite kıyasla daha az olduğunu ve dayanımı azaltıcı etkisinin daha belirgin olduğunu iddia etmektedir. Laboratuvar ortamında sentezlenen saf  $C_3S$  ile hazırlanan çimento hamuru sülfat çözeltisinde bekletildiğinde alçıtaşı oluştuğu ve genişleme meydana

geldiği ispatlanmıştır. Ancak sahada daha farklı parametreler de işin içine girdiği için, C<sub>3</sub>S oranı yüksek örneklerde mikroyapı incelemelerinde alçıtaşına rastlansa bile genişleme oluşmadığının rapor edildiği çalışmalar mevcuttur (Tosun, 2009).



Beton dayanıklılığının en büyük problemlerinden biri sülfat etkisidir. Çimento hamuru sülfat ortamında, genişmeden pullanmadan ve yumuşatmadan kaynaklanan bozulmalara uğrar. Genellikle puzolan kullanılarak kalsiyum hidroksitin azaltılmasıyla betonun geçirgenliği artırılır. Bu sayede betonun sülfata karşı direnci artırılır (Malhotra, 1987).

Sülfat etkisi betonda kimyasal ve fiziksel bozulmalara neden olur. Betonda biriken sülfat tuzlarının kristalleşmesi sonucu betonda fiziksel, sülfat iyonlarının çimento hidratasyon ürünleriyle reaksiyonu ile de kimyasal bozulmalar meydana gelir. Betonda kimyasal ve fiziksel bozulmalara neden olan sülfat, kaynağına göre de iç kaynaklı ve dış kaynaklı olarak iki gruba ayrılmaktadır (Skalny vd., 2002). Betonda dış kaynaklı sülfat atağına neden olan başlıca kaynaklar yeraltı suyu, deniz suyu ve sülfatlı zeminlerdir. İç kaynaklı sülfat atağına ise beton üretiminde kullanılan çimento, agrega, su ve katkılarda bulunan sülfat neden olur. İç ve dış kaynaklı sülfat betonda çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyonlar neticesinde alçıtaşı, etrenjit ve tomasit gibi bağlayıcılık özelliği bulunmayan yeni ürünler oluşturur. Oluşan yeni ürünler betonda hacim artışı meydana getirir. Hacim artışı sertleşmiş betonda çatlamlara yol açar. Betonda oluşan çatlaklar betonun geçirimliliğini artırarak daha fazla maddenin beton içerisine girmesine sebep olur. Hem betondaki bağlayıcılık özelliği gösteren maddelerin başka ürünlere dönüşmesi hem de beton içerisine yeni madde girişinin hızlanması betonun servis ömrünü azaltır (Ustabaş, 2008).

### 2.6.1. Sülfat saldırılarının oluşumu

Sülfat saldırıları beton bileşenleri ve sülfat iyonlarının arasında gerçekleşen reaksiyonlarla meydana gelir. ACI (1992) göre sülfat saldırılarının oluşumunda iki tane mekanizma vardır. Bunlar jips ve etrenjit oluşumudur. Bu iki reaksiyon ürünleri katı hacminde artışlara sebep olarak betona zarar vermektedir (Skalny *et al.*, 2002).

Mehta ve Monteiro (1993), sülfat saldırılarının belirtilerinin etrenjit ve alçıtaşından oluşan genişmeden ve çimento hidrasyonun bozulmasından kaynaklanan ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarından oluştuğunu ifade etmişlerdir.

C<sub>3</sub>A, su ve alçıtaşının reaksiyonu sonucu C<sub>4</sub>ASH<sub>12</sub> ve C<sub>6</sub>AS<sub>3</sub>H<sub>32</sub> ürünleri meydana gelmektedir. C<sub>4</sub>ASH<sub>12</sub> (kalsiyum-aluminomonosülfohidrat) oluşması çimento hamurunda bir miktar hacim artışına sebep olmaktadır. Plaka şekline sahip bu kristaller yarı kararlı özelliindedir. Denklem 5'te görüldüğü gibi fazla sülfatın bulunduğu ortamlarda C<sub>6</sub>AS<sub>3</sub>H<sub>32</sub>'ya dönüşürler (Skalny *et al.*, 2002).



C<sub>6</sub>AS<sub>3</sub>H<sub>32</sub> kalsiyum-alumino-trisülfohidrat, Candlot tuzu, veya daha fazla bilinen ismiyle etrenjit olarak adlandırılır. Bu ürüne verilen etrenjit ismi, doğada aynı isimle anılan bir minerale benzerliğinden gelmektedir. Hekzagonal kesitli ve çubuk şekilli etrenjit kristalleri oldukça kararlıdır. Bünyesinde 32 molekül su bulduran etrenjitin oluşması çimento hamurunda büyük oranda hacim artışı meydana getirir (Skalny *et al.*, 2002).

Tomasit oluşumu için etrenjit katalizör olarak kullanılır. Tomasit çekirdek oluşumunu tamamladıktan sonra alümin iyonu çözeltiliye geri döner. Tomasit bundan sonra çevreden sağladığı iyonlarla oluşumuna devam eder. Tomasit oluşumu, gerekli

iyonların sağlandığı, ortamın soğuk ve pH değerinin 10.5'in üstünde olduğu sürece devam eder. Sülfat etkisinde etrenjit ve tomasit oluşumu için kalsiyum gereklidir. Bu gerekli kalsiyum sülfat etkisinin ilk zamanlarında Portlanditten, sonraları ise C-S-H kısmından sağlanmaktadır (Crammond, 2003). C-S-H'daki dekalsifikasyon neticesinde betonun gözenek çözeltisinin 13 olan pH değeri azalarak nötr değer olan 7'ye gelmeye başlar. Eğer pH değeri 10.5 değerinin altına düşerse tomasit oluşumu durur ve C-S-H'da magnezyum iyonu ve alkali karbonat hareketleri başlar. Sülfat atağındaki betonda pH değerinin 7 seviyelerine düşmesi durumunda tomasit stabil kalmaz. Kalsit gibi kalsiyum bulunduran ürünler oluşmaya başlar. Oluşan kalsit 100 mikron çapında kalın kristal kümeler şeklinde oluşur. Bu oluşan ürünün de tomasit gibi bağlayıcı özelliği yoktur. Nemli şartlara maruz betonlardaki bu kalsit olduğu bölgenin yapısını bozarak betonda bozulmalara sebep olur. Bu şekilde oluşan kalsite terminolojide kornflake kalsit, popkorn kalsit veya ikincil kalsit denilmektedir. Popkorn kalsit oluşumu tomasit oluşumunun bittiğini gösterir. Popkorn kalsitin oluşmasıyla sülfat iyonları tekrar gözenek çözeltisine dönerek betonun pH değerinin yüksek olduğu bölgelerde tekrar sülfat atağını tetikler (Ustabaş, 2008).

Sülfatlar betonlarda ciddi hasarlara yol açabilirler. Nemli ve soğuk ortamlarda sülfat etkisi büyük boyutlara ulaşır. Sülfatların varlığının sebebi betonun bulunduğu çevreye (deniz suyu, endüstriyel çevre vb.) ve ortama bağlıdır. Bazı durumlarda ise agregalarla birlikte betonun içerisinde yer alabilirler. Etrenjit ( $C_3A-3CaSO_4-32H_2O$ ) ve tomasit ( $CaSiO_3-CaSO_4-CaCO_3-15H_2O$ ) oluşurken hacim artışı gösterirler ve sülfatların etkisi sonucu beton içerisinde meydana gelirler. Etrenjit oluşumu sıcak ortamda, tomasit oluşumu ise soğuk ortamda hızlandığı belirtilmiştir (Collepari *et al.*, 1991).

### **2.6.2. Sülfat saldırılarının kaynağı**

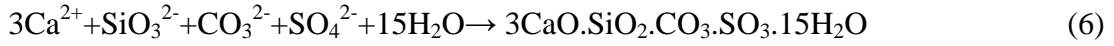
İç sülfat kaynağı ve dış sülfat kaynağı olarak iki kısımda meydana gelir. İç sülfat kaynağı betonun içerisindeki sülfatlardan kaynaklanır. Bu sülfat kaynakları, uçucu kül, cüruf, agraga, kimyasal katkıları ve sudur. Bu iç sülfat kaynağına, çimentoda sülfatın fazla olması ve geçikmeli etrenjitin oluşması örnek olarak gösterilebilir. Dış



sülfat kaynağı olarak ise yer altı su kaynakları, toprak, katı endüstriyel atıklar, gübre, sıvı endüstriyel atıklardan gelen sülfatlar örnek gösterilebilir (Skalny *et al.*, 2002).

Sülfat etkisine maruz Portland çimentosuyla üretilen betonlarda ortamda yeterli miktarda sülfat ve karbonat iyonunun olması durumunda tomasit oluşabilir. Düşük sıcaklıklarda ve pH değerinin 10.5 seviyelerinde tomasit oluşumu daha fazladır (Skalny *et al.*, 2002; Ustabaş 2008).

Tomasit [ $\text{Ca}_3[\text{Si}(\text{OH})_6].\text{CO}_3.\text{SO}_4.12\text{H}_2\text{O}$ ],  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2.\text{CO}_3.\text{SO}_3.15\text{H}_2\text{O}$  veya  $\text{C}_3\text{SCSH}_{15}$  yapısında meydana gelebilir (Denklem 6).



Tomasit oluşumunda ana etken dış kaynaklı sülfat etkisidir. Beton üretimi sırasında karbonat içerikli agrega kullanımı ile iç kaynaklı sülfat etkisiyle de tomasit oluşabilir fakat bu durum çok nadirdir (Skalny *et al.*, 2002). Sülfatlı yeraltı sularına maruz toprağa gömülü betonlarda sıkça tomasite rastlanmaktadır. Tomasit oluşumunda gerekli karbonat iyonu çoğunlukla karbonat içerikli agregalardan sağlanmaktadır. Beton üretiminde dolomitik kireçtaşı ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) veya kireçtaşı ( $\text{CaCO}_3$ ) içerikli agregalar kullanılması durumunda tomasit oluşumu için gerekli  $\text{CO}_3^{2-}$  sağlanmış olur. Karbonat iyonu çimentonun atmosferdeki  $\text{CO}_2$  ile oluşturduğu kalsiyum karbonattan veya yer altı suyundaki yüksek konsantrasyonlu çözülmüş olarak bulunan  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3$ 'dan sağlanabilir. Beton karışımında  $\text{CaCO}_3$  bulunması durumunda tomasitin oluşması daha yaygın ve hızlıdır. Tomasit oluşumu için C-S-H kısmından gelen silikat iyonlarının bulunması gerekmektedir. Tomasit oluşumundaki silikatın ( $\text{SiO}_3$ ) ana kaynağı C-S-H'dir. Bu durumda betondaki C-S-H'nin bozulmasına yol açmaktadır. Silikat beton üretimi sırasında hidrate olmayan  $\text{C}_3\text{S}$  veya  $\text{C}_2\text{S}$ 'den de karşılanabilir. Kireçtaşı fillerinin betonda bulunması tomasit oluşumunu hızlandırır (Crammond, 2003). Tomasit yapısında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bulundurmamasına rağmen az miktardaki alümin iyonu tomasitin oluşmasına neden olabilmektedir (Skalny *et al.*, 2002). Betonda kireçtaşı ve karbonat agregaları tomasit oluşumu için en baskın

karbonat kaynağıdır (Collett *et al.*, 2004). Ancak tomasit oluşumu için bu tek kaynak değildir. Beton bünyesinde hiç karbonat iyonu bulunmasa da yeraltı suyu gibi kaynaklardan tomasit oluşumu için karbonat iyonu karşılanabilir (Collett *et al.*, 2004). Havadaki karbondioksitin betonda bikarbonat iyonları ile reaksiyonu sonucu tomasit oluşumu için gerekli karbonat iyonu temin edilebilir (Ustabaş, 2008).

### **2.6.3. Sülfat saldırılarının mekanizması ve tarihi**

Dış sülfat kaynakları çok uzun yıllardan beri bilinmektedir. Vikat, Le Chatelier, Michaelis ve diğer Avrupalı bilim adamları çimento esaslı beton numunelerin sülfat direnci üzerinde 19. yy'da araştırmalar yapmışlardır. Kuzey Amerikada sülfat hasarları ile ilgili olarak 1908 yılında Amerikalı ve Kanadalı mühendisler tarafından belirtilmiştir. Wig *et al.*, (1915, 1917) yaptıkları çalışmada alkali tuzlara maruz kalan betonları incelemişlerdir. Sonuç olarak, betonda oluşan bozulmalar yüksek gözeneklilik ve düşük çimento içeriğinden kaynaklı yeraltı sularından gelen alkali tuzlardan kaynaklanmıştır (Skalny *et al.*, 2002).

Betonun sülfat içerisindeki dayanıklılığı hakkında ABD, askeri mühendisler, Portland Çimento Birliği, ulusal araştırma konseyi, Kanada Ulusal Araştırma Konseyi ve Saskatchewan Üniversitesi gibi önemli kuruluşlar 1920'li yıllarda ciddi çalışmalar yapmışlardır. Sonuç olarak magnezyum sülfat çözeltilerinin sodyum sülfat ve diğer çözeltilere göre daha yıkıcı olduğu tespit edilmiştir (Skalny *et al.*, 2002).

Alman bilimci Michaelis (1901) ve İtalyan bilimci Ferrari (1919) erken sülfat dayanıklı çimentoların sülfata karşı dayanımı üzerinde çalışmışlardır. Sülfata dayanıklı ASTM V tipi çimento 1930'ların ortalarında ilk olarak önerilmiş ve daha sonra kabul edilmiştir. Ayrıca sülfat saldırılarını önleme konusunda Swenson (1968), Thorvaldson (1952), Thorvaldson *et al.*, (1925, 1927) önemli çalışmalar yapmışlardır (Skalny *et al.*, 2002).

1920'li yılların sonunda, Portland Çimento Birliği ve ulusal araştırma konseyi, Portland çimentoların ana bileşenlerini hesaplamada 'Bogue' yöntemi kullanmışlardır. Bu değişik çimento bileşenlerinin sülfat direncine karşı dayanıklılığını ölçmede önemli bir yöntem olmuştur. Ayrıca bu yöntem mineralojik kompozisyonlarını da belirlemede önemli bir araç olmuştur. Sülfat saldırıları çimento teknolojisinin ilk yıllarında kimyasal ve mekanik açıdan ele alınmıştır. Avrupa'da Le Chatelier, Michaelis, Feret ve diğerleri; Bogue, Thorvaldson, Bates ve diğer birçok bilim adamları ise Amerika ve Kanada'da önemli çalışmalar yapmışlardır (Skalny *et al.*, 2002).

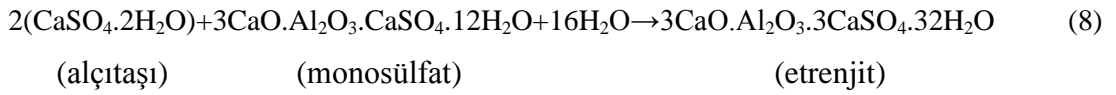
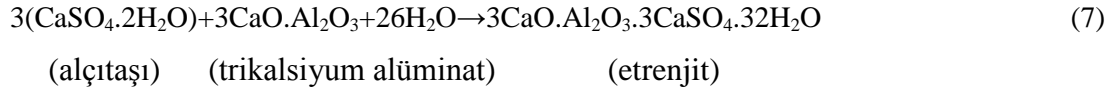
#### **2.6.4. Etrenjit oluşumu ve genleşme**

Alkali sülfatlarla Portland çimentosundan üretilen betonun karşılıklı etkileşimiyle gözeneklerde oluşan etrenjit boşlukları doldurduğu için geçici bir dayanım artışına sebep olduğu gözlenmiştir. Ancak etrenjit kristalleşmesi devam ettikçe açığa çıkan iç basınç betonda hacim artışına ve çatlamaya sebep olmuştur. Düşük Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve yüksek sülfat konsantrasyonlu çimentolarla üretilen betonlarda oluşan alçıtaşının da etrenjit oluşumu kadar hacim artışına yol açtığı görülmüştür (Skalny *et al.*, 2002).

Çimento içerisinde ne miktarda etrenjit oluşacağı ortamdaki sülfat miktarına bağlıdır. Betondaki sülfat çimento üretimi sırasındaki alçıtaşından gelebileceği gibi beton sertleştikten sonra doğal çevreden sülfat bulunduran suların betonun bünyesine girmesiyle de gelebilmektedir. Bu şekilde dış ortamdaki sülfatın betonun bünyesine girmesiyle de etrenjit oluşabilir. Çimento üretimi sırasında klinkerle birlikte fazla miktarda alçıtaşı kullanılması durumunda çimento hamurunda fazla miktarda etrenjit oluşumuna ve betonun hasar görmesine sebep olunabilir (Ustabaş, 2008).

Dış ortamdaki sülfatın beton bünyesine girişi olması halinde (uygun boşluk suyu pH değerleri de mevcutsa) alçıtaşı, C<sub>3</sub>A ve/veya monosülfat ile sülfat reaksiyona girer ve etrenjit oluşturur (Denklemler 7,8). Belli bir konsantrasyona kadar etrenjit oluşumu yine içyapıda hasara yol açmaz. Hatta basınç dayanımında boşluk tıkama nedeniyle,

artış da meydana gelebilir. Bu yüzden belli miktarın altındaki etrenjitle genişleme ve/veya dayanım arasında ilişki kurmak sağlıklı olmayabilir. Öte yandan yapılan karşılaştırma benzer boşluk yapısında (aynı su/bağlayıcı oranı) örnekler kullanılarak yapılırsa yüksek sülfat konsantrasyonlarında bir sonuç elde edilebilir. Sülfat girişi sürekli devam ederse, boşluk yapısına bağlı olarak etrenjit oluşumundaki doygunlukla birlikte hızlı bir genişleme meydana gelir (Tosun, 2009).

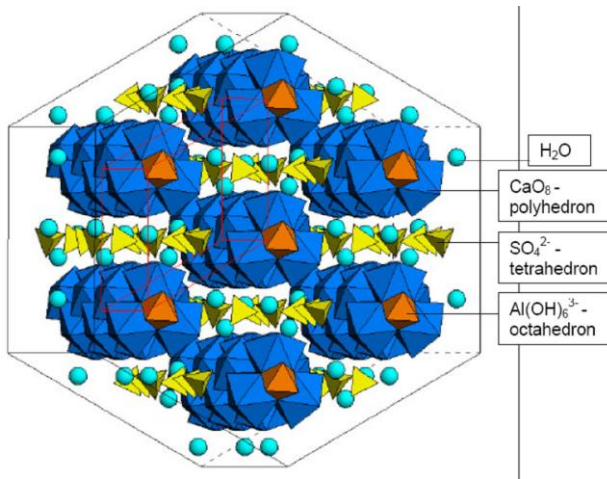


Çimentodaki  $\text{C}_3\text{A}$  oranını belli değerin altında tutmak suretiyle sülfata dayanıklı çimento üretilmektedir. ASTM Tip V olarak bilinen çimento, betonun sülfata karşı dayanıklılığını artırmak için üretilmektedir.  $\text{C}_4\text{AF}$  ana bileşenin hidratasyonu  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın hidratasyon mekanizmasına benzerdir.  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın yapısında bulunan bir kısım alüminanın yerini demir oksit almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum-alümino-sülfohidrat ürünleri  $\text{C}_4(\text{A},\text{F})\text{SH}_{12}$  ve  $\text{C}_6(\text{A},\text{F})\text{S}_3\text{H}_{32}$  bileşimine sahip olmaktadır. Bu ürünlerin yanı sıra bir miktar  $(\text{A},\text{F})\text{H}_3$  meydana gelmektedir. Ortamdaki demir oksidin fazlaşması reaksiyonun yavaşlamasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı takdirde  $\text{C}_4\text{AF}$  ana bileşenin göstereceği hidratasyon  $\text{C}_3\text{A}$ 'ninki kadar şiddetli olmadığı ve oldukça hızlı olduğu ve açığa büyük miktarda ısı çıkardığı tespit edilmiştir. Bu olay ani prize yol açabilmektedir.  $\text{C}_3\text{A}$  oranı düşük  $\text{C}_4\text{AF}$  oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat etkisine oldukça dayanıklı olduğu görülmüştür (Erdoğan, 2003). Birincil etrenjit oluşumu hızlı ve homojen bir yapıya sahiptir. Hacim artışı meydana getirir. Fakat bu hacim artışı beton için zararlı değildir. Çimento klinkerindeki kalsiyum alümin ile öğütülen alçıtaşıdaki sülfattan kaynaklandığı

bilinir. Taze betondaki hacim artışı betonda meydana gelen büzölmeleri dengeleyerek betonu korur (Collepari, 2003).

Etrenjit hekzagonal prizmatik kristaller biçiminde oluşur. Taylor'un modeline göre  $Al(OH)_6^{3-}$  merkezde bulunmakta ve bunun çevresinde  $CaO_8$  bulunmaktadır. Burada alüminyum iyonları kalsiyum iyonlarıyla hidroksit iyonlarını ortak kullanarak birbirine bağlanmaktadır. Kristallerin ara kanallarında da  $SO_4^{2-}$  iyonu ve  $H_2O$  molekülleri vardır (Şekil 13). Su molekülleri kristal yapı içinde sıcaklık değişimlerinden çabuk etkilenir. Bu yüzden etrenjitler farklı su molekölü bulundururlar (Ustabaş, 2008).



Şekil 13. Etrenjitin kristali yapısı

Mehta elektron mikroskobuyla etrenjit kristalleri ( $3CaOAl_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) incelemelerinde bunların küresel olarak kümelenmiş veya paralel iğne kristaller şeklinde değişik tür ve boyutlara sahip olduğunu belirlemiştir. Değişik tür ve boyuttaki etrenjit kristallerini iki gruba ayırmıştır. Uzun düz şekilli, 10  $\mu m$ 'dan 100  $\mu m$ 'na kadar uzunluğu olan ve kalınlığı çok küçük olan kristalleri birinci grup olarak sınıflandırmıştır. Birinci grup kristallerinin düşük hidroksit iyonlu konsantrasyonda geliştiğini ve hacim artışına etkisi olmadığını belirtmiştir. Çubuğa benzer şekilli, 1~2  $\mu m$  uzunluğunda ve 0.1~0.2  $\mu m$  kalınlığındaki etrenjit kristallerini ikinci grup olarak

sınıflandırmıştır. İkinci grup kristallerin su absorbe etmesiyle hacim artışına sebep olduğunu belirtmiştir (Ustabaş, 2008).

#### **2.6.5. C-S-H jelinin oluşumuyla sülfatın etkileşimi**

Bentur (1976) ve Mehta *et al.*, (1979) yaptıkları çalışmada Al taşıyan Portland çimentonun klinkeri ve hidratasyon ürünleri sülfat iyonlarıyla kimyasal etkileşim göstererek, C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S hidratasyonu ile C-S-H jelleri oluşturur. Laboratuvar deneylerinde jips ve C<sub>3</sub>S birlikte kullanıldığında %40 oranında basınç dayanımı kayıpları göstermiştir. Portland çimentoda basınç dayanımını artırmak için jips miktarını artırarak optimum değerini elde edildiği belirtilmiştir. Dış sülfat saldırılarında sülfat iyonlarının betonun içerisinde çimento hamuru oluşturan Portlandit ve C-S-H jellerini yavaş yavaş ayrıştırır. Bu durumda bağlayıcı/su oranı azaldığında Ca<sup>2+</sup> oranı artarak betonun yapısından ayrılmaya başlar. Bu olay sonucunda bağlanma yeteneği giderek azalarak, çimento hamurunda basınç kayıpları meydana gelir. Bu tip saldırılar genelde alkali sülfatlarda oluşur. Ama amonyum sülfat ve saf sülfirik asitlerde betonda aşınma ve korozyona sebep olurlar (Skalny *et al.*, 2002).

Baradan ve Aydın yaptıkları çalışmada, puzolanların, düzgün kür edilmiş betonda geçirimsizliği arttırmalarının yanı sıra, betonun içindeki Ca(OH)<sub>2</sub>'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyona girecek öğelerden birini azaltmalarının olumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ancak kullanılacak puzolan rastgele seçilmemelidir. Örneğin, C sınıfı uçucu külün bazı durumlarda sülfat dayanıklılığını arttırmak yerine azaltabildiği dikkate alınmalıdır. Çok şiddetli etki durumunda, Ca(OH)<sub>2</sub> ve C-S-H'nin de sülfat hassasiyetini de dikkate alarak, iki önlemin (C<sub>3</sub>A miktarını düşürmek ve puzolan kullanmak) bir arada uygulanmasını önermektedirler.

Buhar kütü gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda, ilk zamanlarda oluşması gereken etrenjit kristalleri oluşmayıp, etrenjit oluşumuna neden olan monosülfatlar C-S-H jelinin kristalleri arasına yerleştiği görülmüştür. Yüksek ısıda üretilen beton

eleman normal sıcaklık şartlarında soğumaya bırakıldığında dışardan gelen su ve nemin etkisiyle sertleşmiş betonda etrenjit kristalleri oluşmuştur. Bu etrenjit kristalleri sertleşmiş betonda bulunan hava boşluklarında ve çatlaklarda oluşmuştur. Oluşan bu etrenjit, hacim artırıcı bir ürün olup betonun genleşmesine ve çatlamasına neden olmaktadır. Yüksek ısı kürü uygulanan betonlarda yapılan mikroskopik inceleme sonucunda çimento hamurunda ve agreganın çevresinde 25-30 mikron genişliğinde çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların kısmen veya tamamen sonradan oluşan etrenjitle dolduğu gözlenmiştir (Skalny *et al.*, 2002).

İç kaynaklı sülfat etkisinde gecikmiş etrenjit oluşumu sırasında ana reaksiyonlar C-S-H jelinden, monosülfatlardan ve gözenek çözeltisinden kaynaklandığı belirtilmiştir. C-S-H jelinin reaksiyona  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OH^-$ ,  $H_2O$ ; monosülfatlar reaksiyona  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OH^-$ ,  $Al(OH)_4^-$ ,  $H_2O$ ; gözenek çözeltisi de  $H_2O$  ve  $SO_4^{2-}$  sağlamaktadır. Bu ürünlerle birlikte gelişen reaksiyon sonucunda etrenjit oluştuğu gözlenmiştir (Taylor *et al.*, 2001). Betondaki Portlanditin tükenmesinden sonra ortamda sülfat iyonu bitmemişse gerekli  $Ca^{2+}$  iyonu C-S-H'dan sağlanmaya başlar. C-S-H'dan kalsiyum iyonlarının ayrılmasına dekalsifikasyon denir. Betonda bağlayıcılık özelliği sağlayan C-S-H'da ki bu bozulma çok önemlidir. C-S-H yapısındaki  $CaO/SiO_2$  oranındaki azalma betonun zamanla bağlayıcılık özelliğinin kaybolmasına yol açmaktadır. C-S-H'dan mevcut tüm kalsiyum iyonlarının ayrılması çok yüksek konsantrasyonlu sodyum sülfat çözeltilerinde gerçekleşebilir (Skalny *et al.*, 2002).

#### **2.6.6. Sülfat saldırılarının önlenmesi**

Yıldırım ve Sümer yaptıkları çalışmada deniz suyu sülfat etkisinde önlem olarak çimentoda  $C_3A$  içeriğinin %3'ten az,  $SO_3$  içeren çimentoda ise %10 ile sınırlanması önerilir. ACI 318 standardı su/çimento oranı 0.5 olan betonda  $C_3A$  içeriğini %8 ile sınırlamakta, su/bağlayıcı oranının 0.4'e düşürülmesi ile  $C_3A$  üst limitine artırarak %10 değerine müsaade edilebileceği belirtilmektedir. Tekrarlı ıslanma-kuruma ve aşınma problemi olan beton yüzeyler incelendiğinde ince agregaların beton kütesinden kolay ayrılarak, kaba agregalarında zamanla yok olarak hasar gözlenmiş olup bunun önlemi

olarak su emmesi düşük ve yoğun bir agrega karışımı kullanılması önerilir. Betonda meydana gelen hasar donma-çözülme nedeniyle ise bu bölgelerde yapılacak beton elemanlarda bozulmayı önleyecek en etkili önlem betonda hava sürükleyici katkı maddesi kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Bu bölgelerde yüksek dozajlı beton sınıfı seçilmeli, şiddetli etki durumunda C30-C35 üzeri beton kullanılmalıdır. Betonun küründe gözlenen olumsuzluklar ortadan kaldırılmalıdır. Betonda karbonatlaşma olayının hızını arttıran oluşum olan yüksek su/çimento kullanımını engellemek gerekir. Islanma-kurumaya maruz elemanlarda su/çimento oranı 0.50 civarında olmalıdır. Esasında tüm beton yüzeylerin geçirimsiz maddeler ile kaplanması en uygun yöntem olarak önerilir. Betonda korozyonu önlemek için beton üretiminde kullanılan malzemelerin kalitesine, çimento türüne, sıkıştırma miktarına ve üretimin her aşamasında kalite kontrolünün iyi yapılmasına özen gösterilmelidir. Yeterli kalınlıkta paspayı kullanılmalıdır. Korozyon bölgesinde pas payı en az 50-60 mm olmalıdır. Yapı elemanlarının tasarımı yapılırken zararlı suların eleman üzerinden kolayca nasıl uzaklaştırılacağı düşünülmelidir. Bu bağlamda yapının dış cephesindeki mimari detaylarda, yağmurun yıkama etkisi, toz, kir, klorür ve zararlı maddelerin birikiminin olabileceği düşünülmeli bunun içinde yatay yüzeylerden kaçınılmalıdır. Çok şiddetli etki durumunda betonun izole edilmesi, donatının korozyona karşı koruyucu maddelerle kaplanması önerilir. Uygun karışım oranlarında üretilen betonların karışım oranları iç sülfat saldırılarında önemli bir faktördür. Beton karışımlarında kullanılan malzemeler (çimento, agrega, katkı maddeleri) karışım oranları sülfata dayanıklı olarak üretilmesi gerekir. Genelde su/çimento oranı düşük olması tavsiye edilir. Sülfata karşı dayanıklı betonlar için üç temel özelliğe sahip olmalıdır. Bunlardan ilki yüksek kalitede geçirimsiz betonlar kullanılmalıdır. İkincisi, sülfata karşı dayanıklı bağlayıcı malzemeler kullanılmalıdır. Son olarak ise betonun yerleştirilmesi ve kürü önemle dikkat edilmelidir (Skalny *et al.*, 2002).

Betonda sülfat saldırılarını önlemek için sülfata dayanıklı çimentolar kullanılmalı, puzolonik özellikte mineral katkıları kullanılmalı, betonun geçirimsizliği sağlanmalı, çok zararlı etkilerde 360 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajında kullanılmalı, en büyük su/çimento oranı 0.45 olması sağlanmalı ve gerektiğinde bohçalanarak zeminden tamamen korunmalıdır (Değirmenci).



### 2.6.7. Sülfat saldırısı ile ilgili standartlar

Sülfatla ilgili farklı ülkelerde çok sayıda standart çalışmaları yapılmıştır. Bunlardan bazıları ASTM C150, C1157, C1012, E632, BRE363'dir. ASTM C150-95 göre Portland çimento tipi II (orta dereceli sülfatlarda) C<sub>3</sub>A içeriği maksimum %8 olmalıdır. Ayrıca, ASTM V türü Portland çimentolarda (yüksek sülfat etkisine) karşı ise, C<sub>3</sub>A içeriği %5 olmalı, C<sub>3</sub>A+C<sub>4</sub>AF içeriği ise maksimum %20 olmalıdır. İngiliz standardı olan BS 4027 göre ise C<sub>3</sub>A içeriği %5 olmalıdır (Skalny *et al.*, 2002).

ASTM C1012'ye göre harç numunelerinde 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içinde, 23°C sıcaklıkta bekletilen numunelerde yaklaşık 20 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca bu numunelerin genleşmesi de incelenmiş ve 6 aydan sonra %0.10'u geçmediği tespit edilmiştir. Bu yöntem genelde farklı çimentolarda ve katkı çimentolarda kullanılmıştır. Ayrıca sülfat etkisinde maruz bırakılan numunelerde ASTM C1157 kullanılmıştır (Skalny *et al.*, 2002).

ASTM C452'ye göre Portland çimentoya jips eklenerek harç numuneleri üretmek için %7 SO<sub>3</sub> içeriği ayarlanmıştır. Kalıplara konulduktan sonra 23°C su içerisinde bekletilerek 14 günün sonunda genleşmesi incelenmiştir. Sonuç olarak yüksek sülfat etkisine karşı dayanıklı çimento olan V türü Portland çimentoların genleşmesinin %0.04 geçmediği tespit edilmiştir. Bu yöntem farklı sülfat direnci seviyesine sahip Portland çimentolarda arasında kullanılabileceği ancak katkı çimentolarda ayrımı görmek için kullanılamayacağı belirtilmiştir (Skalny *et al.*, 2002).

### 2.6.8. Katkı maddeleri içeren beton ve harç numunelerinin sülfata karşı dayanıklılığı

Mehta (1985) yaptığı çalışmada, düşük su/bağlayıcı oranına sahip betonların katkısız, lateksli ve çimentonun %15'i kadar silis dumanı içeren türlerinin çeşitli asitlere karşı

dirençlerini araştırdığını ve silis dumanlı betonların asit çözeltilerine karşı diğer iki betondan daha iyi direnç gösterdiğini bildirmiştir.

Cohen *et al.*, (1990), Portland çimentosu ve silis dumanı katkılı karışımların magnezyum sülfat ve sodyum sülfat dayanıklılığını incelemişler, silis dumanı ilavesinin geçirgenliği azaltması ve puzolanik aktivitesi nedeniyle sertleşmiş çimento hamurunun sodyum sülfat tesirine dayanıklılığını artırdığını, magnezyum sülfat tesirine karşı ise bir değişikliğin olmadığını bildirmişlerdir.

Aköz *et al.*, (1996) silis dumanı katkılı harçlara sodyum klorür ve magnezyum klorürün etkisine maruz bırakılarak yaptıkları çalışmalarında, silis dumanının bu kimyasal maddelere karşı harç numunelerinin performansını arttırdığını ve MgCl<sub>2</sub>'nin olumsuz etkisinin NaCl'den daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Park *et al.*, (1999) yaptıkları çalışmalarında, sülfata maruz yüksek dayanımlı beton numunelerde görülen dayanım kayıplarını tespit etmek için magnezyum sülfat atağı ve sodyum sülfat çözeltilerinde bekletilmiştir. Basınç dayanımı açısından en fazla zarar silis dumanlı ve süperakışkanlaştırıcı betonlarda gözlenmiştir. Silis dumanlı yüksek dayanımlı betonlar sodyum sülfat atağına karşı en etkili performansı gösterirken, magnezyum sülfat atağına karşı silis dumanı ilavesinin artması ile basınç dayanımında azalmalar olduğunu belirtmiştir.

Zivica (2000), yaptığı çalışmada sulandırılmış silis dumanının ilavesi ile elde edilen bağlayıcı malzemeyi beton üretiminde kullanmış ve elde edilen betonların sülfat direncinde önemli bir artış meydana geldiğini tespit etmiştir.

Roy *et al.*, (2001) yaptıkları çalışmada doğal olarak tahrip edici etkiye sahip ortamları sülfürik, hidroklorik, nitrik, asetik ve fosforik gibi farklı asitlerle birlikte

sodyum sülfat ve magnezyum sülfatlı karışımlarla benzerlik göstererek silis dumanı, metakaolin ve düşük kalsiyumlu uçucu küllerle hazırlanan harçların davranışını incelemişler ve %1'lik hidroklorik, sülfürik ve nitrik asit çözeltilerinde silis dumanı, metakaolin ve uçucu külün bu kimyasallara karşı direnci arttırdığı tespit edilmiş fakat %5 konsantrasyonlu sülfirik, asetik ve fosforik asit çözeltilerine karşı daha düşük bir direnç gösterdiklerini belirtmişlerdir. Genel olarak düşük kalsiyumlu uçucu külün silis dumanı ve metakaolinden daha düşük bir direnç gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Erdoğan (2003), silis dumanlı betonların su geçirgenliği daha az olduğundan bu tür betonlara daha az sülfat içerikli su sızabilmektedir. Bu nedenle, silis dumanlı betonlar sülfatlara karşı daha yüksek dayanım gösterdiği gözlenmiştir. Norveç'te yapılan araştırmalarda, silis dumanlı betonların sülfat dayanıklılığının, sülfata dayanıklı Portland çimentolu yapılan betonlardaki kadar yüksek olduğu görülmüştür.

Türkmen (2002) yaptığı çalışmada sertleşmiş bir beton yapının, oksijen, karbondioksit ve agresif iyonların, çevreden betona etki etmesinde, betonun boşluk yapısının rolü üzerinde durmuştur. Belirli oranda silis dumanı katılan betonların, kimyasal etkilere karşı direncinin iyileştiğini ve aynı zamanda, betonun geçirimsizliği ve dayanımında da önemli iyileşmeler olduğunu belirtmiştir.

Silis dumanı ve silis içeren uçucu kül katkılarını içeren harç ve betonların sülfat dirençleri ASTM C452 ve C1012 metodlarına ilâveten, numuneleri %10'luk sodyum ve %8.4 konsantrasyonlu magnezyum sülfat çözeltileri içinde bekleterek yapılan bir araştırmada, çimento yerine %16 oranında katılan silis dumanı ile sodyum sülfata karşı en iyi direnç elde edilmiştir. Katkı maddeleri ve özellikle silis dumanı magnezyum sülfata karşı direnci olumsuz etkilemişlerdir (Özcan, 2005).

Özcan (2005) yaptığı çalışmada sodyum sülfat çözeltisinin normal ve silis dumanı katkılı harçlara etkisinin araştırıldığı çalışmada, 20°C ve 40°C'de saklanan numuneler üzerinde yürütülen deneyler sonucunda çözelti sıcaklığının artması harç özelliklerini genelde olumlu yönde etkilediği, çözelti sıcaklığının yükseltilmesinin bu çalışmadaki deneysel koşullarla sınırlı kalmak üzere, harçların sodyum sülfat çözeltisinin etkisine karşı direncini saptamak için hızlı deney yöntemi olarak kullanılmayacağını belirtmişlerdir.

Diaz-Loya *et al.*, (2010) uçucu kül tabanlı geopolimer betonların kimyasal dayanımlarını incelemişlerdir. Bu geopolimerlerin, sülfirik aside karşı korozyon direncinin, Portland çimentolara göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

### 2.6.9. Geopolimer betonlarda sülfat etkisi

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

Geopolimer, alkali sülfatlar ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ve diğer asit etkilerine de yüksek dayanıklılık göstermekte olup; pH değeri 12'den daha yüksek ortamda sentezlenmesine rağmen geopolimerde tehlikeli ve mikroyapıyı bozucu alkali silika reaksiyonları oluşmamaktadır. Prefabrik geopolimer beton üretimi ile ilgili bir başka çalışmada, atık su büz borularının geopolimer çimentolu betondan üretiminde gerekli olan asit aşınma deneyleri uygulanmıştır. Portland çimentolu betonun 50 yıl dayandığı sülfirik asit etkisine geopolimer betonun 900 yıl dayanabileceği deneylerde gözlenmiştir. Aynı araştırmacılar alkali agrega oluşumu, karbonatlaşma, çelik korozyonu, klor difüzyonu ile ilgili deneyleri de uygulamışlardır. Portland çimentosunun ana yapısını oluşturan kalsiyum alüminat hidratın geopolimer çimentosunda olmayışı geopolimerin bu tür etkilere de çok daha dayanıklı olmasını sağlamıştır. Geopolimerin yangın direnci de Portland çimentolu betonun yangın direnci ile karşılaştırılmış ve geopolimer betonun 1000°C sıcaklıkta yanmadığı gözlenmiştir. Ayrıca prefabrik beton üretiminde 60°C sıcaklıkta 3–4 saat uygulanan buhar

küründe 70 MPa dayanımı olan Portland çimentolu beton kür sırasında 20 MPa'lık dayanımına ulaşırken, 100 MPa dayanım vermesi istenilen geopolimer çimentolu prekast betonu 70°C sıcaklıkta 2 saat kür ile 70 MPa'lık erken dayanıma ulaşmaktadır (Arıöz vd, 2009).

Davidovits (1994), geopolimer çimentolar, yüksek alkali içeren malzemelerin polimerizasyonu ile elde edilen, üç boyutlu zeolitik yapılardır. Bu yüksek teknoloji K-Poly (sialate-siloxo) (Potasyumlu geopolimer) bağlayıcılarının birçok endüstri alanı olan; otomobil ve havacılık sanayisinde, demirdışı dökümhanelerde ve plastik sanayisinde kullanılmıştır. Geopolimer çimentolar, oda sıcaklığında hızlıca sertleşmiş ve 20°C sıcaklıkta 4 saat sonunda 20 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. 28 günün sonunda ise 70-100 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca bu geopolimer bağlayıcılar atık maddeleri değerlendirerek bağlayıcı malzemeler üretmek açısından da, önemli bir yere sahiptirler. Bu malzemelerin eşsiz özellikleri, erken yüksek dayanımı, düşük büzülme, donma çözülme, sülfata ve korozyona karşı dayanıklılıktır. Ek olarak, bu geopolimer çimentolar hava kirliliğinin azalmasına da önemli katkıda bulunmaktadır. Bu malzemeler, Portland çimentolarının CO<sub>2</sub> emisyonunu %80 oranında azaltmakta ve gelecekte küresel ısınma sorununa önemli bir katkıda bulunacaklardır.

Yapılan deney sonuçlarına göre geopolimer çimentolar klor solüsyonları, asit, alkali ve sülfat gibi çimentolu malzemelerin bozulmalarına neden olan kimyasal etkilere karşı daha dirençlidirler. Sonuç olarak geopolimer yapılar doğrudan su tutmadıklarından betondaki su kayıplarının çimento yapılarına zarar vermesini kısmen engelleyebilirler. Çimento özellikleri kimyasal yapıdan kaynaklanır ve normal Portland çimentosunun üzerinde gelişim sağlar (McNulty, 2009).

### 2.6.10. Normal çimentolu betonlarda sülfat etkisi

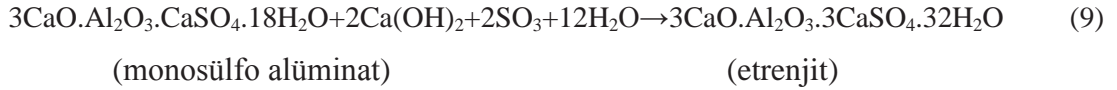
Alçıtaşının yanında etrenjit oluşumu da sülfat etkisi ile meydana gelen kimyasal reaksiyonlar arasındadır. Ancak etrenjit oluşumu her zaman hasar verici etki oluşturmaz. Etrenjitin oluşum zamanı, boyutu ve bulunduğu ortam özellikleri genişleme oluşturup oluşturmadığını belirleyen parametrelerdir. Etrenjit aynı zamanda hidratasyon ürünlerinden biri olup, taze betonda oluşarak priz dengeleme işlevini yerine getirir. Bu yüzden sülfat hasarı görmemiş örneklerde de bir miktar etrenjite rastlanır. Sertleşmiş betonda da etrenjit, termodinamik denge ve betonun boşluk yapısına bağlı olarak çözünüp yeniden oluşabilir. Üstelik ortamda ilave sülfat olması da gerekmez. Bu şekilde oluşan ve genişleme oluşturmeyen etrenjite “ikincil etrenjit” denir. Candlot tuzu veya etrenjit ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$ ) içerdiği çok miktardaki hidrat suyu nedeniyle büyük bir hacim kaplar (Ün, 2007).

Etrenjitin yoğunluğunun  $1.73 \text{ g/cm}^3$ , diğer hidratasyon ürünlerinin ortalamasının  $2.50 \text{ g/cm}^3$  olması teorik olarak genişleme oluşabileceği izlenimini vermektedir.  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın etrenjite dönüşümünde %126'lık bir hacim genişmesi meydana gelmektedir. Ancak aynı zamanda su ve alçıtaşı da tükenmektedir. Monosülfatın etrenjite dönüşümünde ise %51'lik bir hacim genişmesi olmaktadır. Ancak yine su ve alçıtaşı harcanmaktadır. Teorik hacim hesapları ile genişleme olup olmayacağını öngörmek betonun boşluk yapısını ve boşluk suyu konsantrasyonunu bilmeden sağlıklı sonuç vermeyecektir. Etrenjitin hasar verebilmesi için boşluk suyunda kompozisyon açısından doygunluğa ulaşmış mikro-kristalin yapıda oluşması gerekir. Kristalizasyon basıncının boşluk çeperlerini itererek matris çekme dayanımını aşması genişlemeyi ve hasarı ortaya çıkaracaktır (Tosun, 2009).

Sülfat çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütlede yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Beton kolayca ufalanır ve yumuşar. Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Çalılık dışında bitki ağaç yetiştirmeyen yüzeylerde beyaz lekeler,

tuz birikintileri görülen çorak topraklarda sülfat etkisinden şüphe edilmelidir (Değirmenci).

Betona deniz suyunun (özellikle sülfat) etkisi, uzun yıllardan beri incelenmektedir. Sülfat iyonları, çimento içindeki  $C_3A$  (tri kalsiyum alüminat) ile reaksiyona girerek etrenjit bileşimini meydana getirir. Bu reaksiyonu önlemek için çimento bileşimindeki tri kalsiyum alüminatın düşük olması ( $C_3A < \%6$ ) gerekmektedir. Denklem 9'da görüldüğü gibi betonda sülfat reaksiyonu  $C_3A$  ve sülfat iyonları arasında önce monosülfo-alüminat ve daha sonra da etrenjit oluşumu şeklindedir (Kılınçkale, 2003).



Monosülfo-alüminat bileşiminde  $CaSO_4$ 'ın yerini  $Ca(OH)_2$  alır ve  $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 18H_2O$  oluşur. Her iki alüminat bileşiği,  $SO_4^{-2}$  iyonları ile etrenjit ( $C_6AS_3H_{32}$ ) oluşturur. Sülfat iyonlarının etkileşimi oldukça karmaşıktır. Sülfat reaksiyonları,  $Na_2SO_4$ ,  $K_2SO_4$ ,  $CaSO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $(NH_4)_2SO_4$  gibi tuzlarla görülebilir, meydana gelen tuzların basıncı, ıslanma-kuruma, fiziksel koşullar vd. hasar sürecini etkilemektedir. Etrenjit oluşumuna benzer, ancak sülfatlı ortamda görülmeyen gecikmiş etrenjit (delayed ettringite formation) denen hasar da son yıllarda görülmüştür. Bu olay, ilk kez 1980 yılında Almanya'da ısıl işlem gören traverslerde gözlenmiş ve gecikmiş etrenjitten kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu reaksiyon  $SO_4^{-2}$  iyonlarının sertleşmiş betona sonradan girmesiyle değil, çimento içindeki  $SO_4^{-2}$  iyonlarından kaynaklandığı saptanmıştır. Gecikmiş etrenjit oluşumu üç ana faktöre bağlanabilmektedir (Kılınçkale, 2003).

- 1- Çimentonun yapısında zamanla çözünecek yüksek oranda sülfat içermesi,
- 2- Betonun mikro ve makro boşluk içermesi,

3- Yapı elemanının sürekli veya aralıklı olarak suyla temas etmesi veya nemli ortamda bulunması (Kılınçkale 2003).

Sülfat iyonu konsantrasyonunun korozyona neden olabileceği kesin sayılar vermek oldukça güçtür. Sülfat agresifliğini, katyon türlerini, ortam sıcaklığını, ıslanma-kuruma ve beton geçirimsizliğini tanımlamak gerçekçi bir yaklaşım değildir (Kılınçkale 2003).

## **2.7. Sülfat Etki Türleri**

Betondaki bozulma mekanizmalarından biri olan sülfat etkisi, fiziksel ve kimyasal olarak oluşan reaksiyonlar sonucu meydana gelip betonun servis ömrünü azaltan bir etkidir. Sülfat etkisi iç kaynaklı ve dış kaynaklı olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

### **2.7.1. İç kaynaklı sülfat etkisi**

Beton üretiminde kullanılan çimento, agrega, su ve katkılardan gelen sülfat iyonlarının betonun sertleşmesinden sonra uygun ortam şartlarında yeni ürünler oluşturmasıyla gelişen olaya iç kaynaklı sülfat etkisi denilmektedir. İç kaynaklı sülfat etkisinde betona dış ortamdan sülfat gelmemektedir. İç kaynaklı sülfat etkisi ile beton bünyesinde mevcut sülfat iyonu sertleşmiş betonda etrenjit kristalleri oluşturmaktadır. Oluşan bu etrenjit kristalleri betonda hacim artışı meydana getirebilmektedir. Sertleşmiş betondaki hacim artışının meydana getirdiği iç basınç betonun çatlamasına sebep olmaktadır. Çatlak gelişimi ve betondaki fiziksel ve kimyasal bozulma mekanizmalarının birlikte hareketiyle betonun servis ömrü kısalmaktadır. İç kaynaklı sülfat etkisine neden olan sülfat iyonu betona çimento, agrega veya karışım suyu ile girebilmektedir. Çimentonun ani prizini önlemek amacıyla çimentoya %3 ile %6 oranında katılan alçıtaşı ana sülfat kaynağıdır. Beton agregasında bulunan sülfat uygun ortam şartlarında iç kaynaklı sülfat etkisine neden olur (Casanova *et.al.*, 1997; Ustabaş 2008).



## a) İç kaynaklı sülfat etkisinin oluşum türleri

Oluşan iç kaynaklı sülfat etkisi iki kısma ayrılabilir. Bunlardan birincisi normal sıcaklık altındaki beton ve harçlarda meydana gelen iç kaynaklı sülfat etkisidir. İkincisi beton üretimi sırasında buhar kürü gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlardaki iç kaynaklı sülfat etkisidir.

### 1) Ortam sıcaklığı altında iç kaynaklı sülfat etkisi

Bu konuda çalışma yapan araştırmacılar (Collepari, 2003; Batic *et al.*, 2000) yaptıkları mikroyapısal incelemelerde normal betonlarda değişik ortam şartları içinde betonun sertleşmesinden sonra yeni etrenjit kristallerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Betonun sertleşmesinden sonraki etrenjit oluşumundan literatürde ikincil etrenjit oluşumu olarak bahsedilmektedir (Ustabaş, 2008).

Betonun üretimi sırasında çimento ürünleriyle suyun reaksiyonu sonucu çimentodaki alüminlerle sülfat bulunduran elemanların reaksiyonu sonucu birincil etrenjit oluştuğu gözlenmiştir. Çimentonun hidratasyonu sırasında fazla gelen  $SO_3$  ve  $Al_2O_3$  betonun sertleşmesinden sonra uygun çevre şartları altında kimyasal reaksiyonlara girerek çimento hamurunda ve agrega ara yüzeyinde etrenjit oluşturabilmektedir. Çevre sıcaklığı altında üretilen betonlarda aşırı miktarda sülfat veya sülfür içerikli bileşikler varsa sertleşmiş beton için zararlı durum oluşturabilir. Betona çimento ile birlikte katılan sülfatlar, alitlerle ( $C_3A$  ve  $CA$ ) ve az kısmı da feritlerle ( $C_4AF$ ) reaksiyona girerek tüketilirler. Aşırı miktardaki sülfat iyonları sertleşmiş beton hidratasyon ürünü kristalleri arasında kalarak sonradan gelen suyun etkisiyle yavaşça çözünerek yeni etrenjit grupları oluşturabilir (Skalny *et.al.*,2002; Ustabaş, 2008).

İkincil etrenjit oluşumunu araştıran bazı araştırmacılar, yavaş gelişen bir olay olduğunu ve zaman içinde yüksek oranda sülfat bulunduran betonlar için zararlı gerilme artışlarıyla genleşmelere neden olduğunu belirtmektedirler. Beton üretimi sırasında yüksek ısıya maruz kalmaması durumunda iç kaynaklı sülfat atağı

sonucunda betonda hacim artışı meydana gelmeyeceğini belirttiler (Collepari, 2003; Ustabaş, 2008).

Taylor *et al.* (2001), beton üretimi sırasında yüksek ısıya maruz kalmaması durumunda iç kaynaklı sülfat atağı sonucunda betonda hacim artışı meydana gelmeyeceğini söylemişlerdir (Skalny *et al.*, 2002).

Batic (2000), farklı bozulma mekanizmalarına maruz iki tip çimento ile üretilmiş betonlarda mikro yapısal inceleme yapmışlardır. Çalışmalarında dış ortamdan sülfat iyonu gelmeden ıslanma-kuruma gibi dönüşümler uygulanan numunelerde ikincil etrenjit oluşumuna rastlamışlardır (Ustabaş, 2008).

Collepari (2003) ve Hime (1996) ise çalışmalarında betonun, kürü sırasında yüksek sıcaklığa maruz kalmasa da yüksek sülfat içerikli çimento ile üretilmesi durumunda da ikincil etrenjit oluşumu ile hacim artışının oluşabileceğini belirttiler (Ustabaş, 2008).

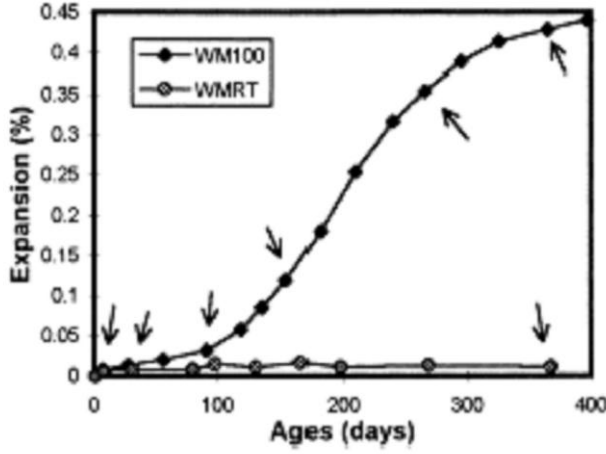
## **2)Yüksek sıcaklıkta kür gören betonlarda iç kaynaklı sülfat etkisi**

Yüksek sülfat içerikli çimentolarla yapılan ve üretimi sırasında buhar kürü veya yüksek sıcaklıkta bakım uygulanan betonlarda iç kaynaklı sülfat etkisine rastlanmaktadır. Bu yüksek sıcaklık betonun imalatı sırasındaki yüksek çevre sıcaklığından veya betonun hidratasyonu ile açığa çıkan ısıdan da kaynaklanabilir. Üretimi sırasında yüksek sıcaklıkta küre maruz betonlarda kürden sonra nemli ortamlarda buldukları zaman betonda iç kaynaklı sülfat atağı ile etrenjit oluşmaktadır. Bu etrenjit oluşumu betonda hacim artışına ve çatlaklara sebep olmaktadır. Buhar kürü gibi yüksek sıcaklıkta üretilen betonlarda bünyedeki sülfattan dolayı etrenjit oluşumuyla kendini gösteren bu olay literatürde gecikmiş etrenjit

oluşumu olarak adlandırılmaktadır (Collepari, 2003; Skalny *et.al.*, 2002; Ustabaş, 2008).

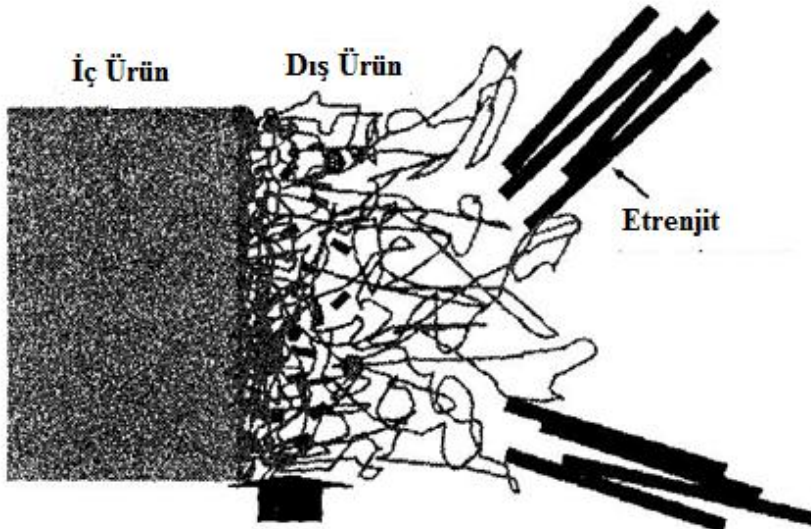
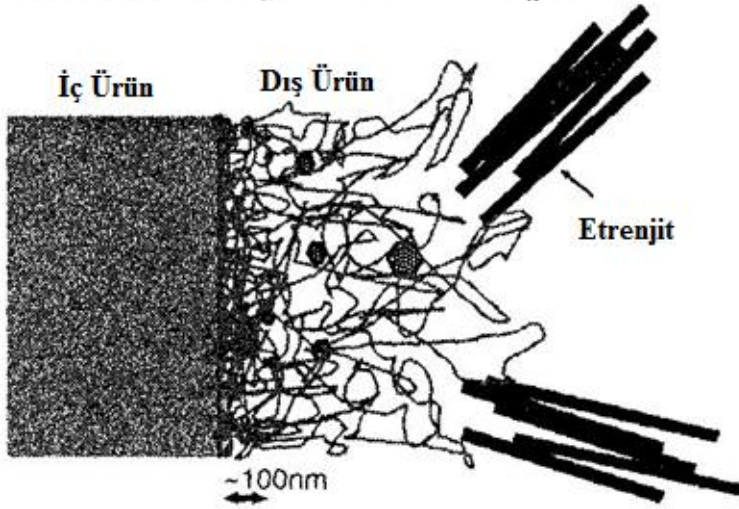
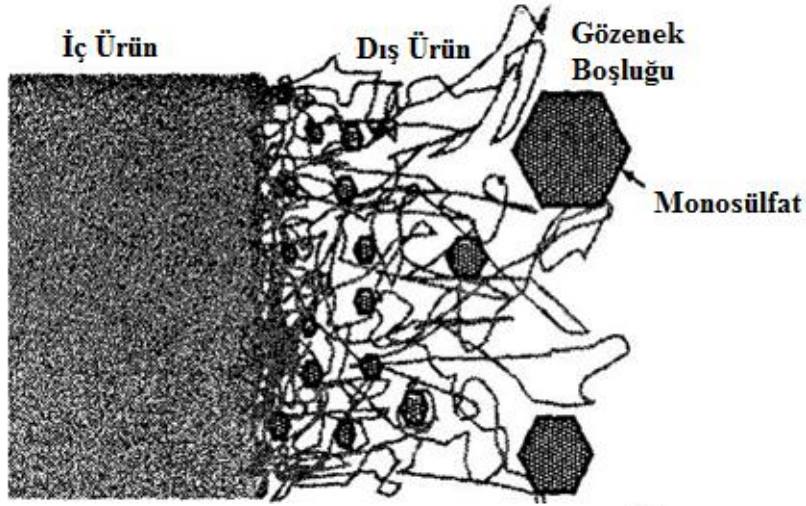
Isıl bozulmanın neden olduğu gecikmiş etrenjit oluşumu 1980’li yıllarda ön gerilmeli köprü kirişlerinde rastlanan çatlakların incelenmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Buhar kürü gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda, ilk zamanlarda oluşması gereken etrenjit kristalleri oluşmayıp, etrenjit oluşumuna neden olan monosülfatlar C-S-H jelinin kristalleri arasına yerleşmektedir. Yüksek ısıda üretilen beton eleman normal sıcaklık şartlarında soğumaya bırakıldığında dışarı’dan gelen su ve nemin etkisiyle sertleşmiş betonda etrenjit kristalleri oluşmaktadır. Bu etrenjit kristalleri sertleşmiş betonda bulunan hava boşluklarında ve çatlaklarda oluşur. Oluşan bu etrenjit, hacim artırıcı bir ürün olup betonun genleşmesine ve çatlamasına neden olmaktadır. Yüksek ısı kürü uygulanan betonlarda yapılan mikroskopik inceleme sonucunda çimento hamurunda ve agreganın çevresinde 25-30 mikron genişliğinde çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların kısmen veya tamamen sonradan oluşan etrenjitle dolu olduğu görülmüştür. Hamurdaki mikro çatlaklarda da etrenjit oluşumlarına rastlanmıştır (Skalny *et.al.*, 2002; Ustabaş, 2008).

Yang ve Lawrence (1999) yüksek ısı kürüne maruz kalmayan betonlarda hacim artışı sonucu çatlak oluşmadığını belirtmektedirler. Yaptıkları çalışmada aşağıdaki grafikteki zamana bağlı genleşme değerlerini elde etmişlerdir. Şekil 14’de görülen iki harç numunesinden 100°C’de kür uygulanan numunede fazla miktarda hacim artışı meydana gelirken 20°C’de bakım uygulanan numunede belirgin bir hacim artışı olmadığı görülmüştür. 100°C’de 12 saat kür uygulanan numunelerde dokuz günde hacim artışının başladığı ve bir yılda genleşmesini tamamlandığı görülmektedir. Oda sıcaklığında kür uygulanan numunelerde oluşan etrenjitin büyük bir kısmı hidratasyon sırasında meydana geldiği ve yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelerde hemen etrenjitin görülmediği gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelerde yedi gün sonra oda sıcaklığında su içinde bekletildiği zaman gecikmiş etrenjit oluşumu görülmeye başlandığını belirtmişlerdir. (Skalny *et al.*, 2002).



Şekil 14. Normal sıcaklıkta 20°C ve 12 saat 100°C’de kür edilen betonlarda hacim artışı

Gecikmiş etrenjit oluşumunun sebep olduğu hacim artışıyla ilgili iki ana görüş vardır (Taylor *et al.*, 2001). Bu görüşlerin birincisinde betonun çatlak ve boşluklarında sonradan oluşan büyük etrenjit kristallerinin hacim artışına neden olduğu belirtilmektedir (Taylor *et al.*, 2001; Yang ve Lawrence, 1999; Diamond, 1996). Diğer görüşte ise çimento hamuru içindeki mikro boşluklarda sonradan oluşan çok küçük etrenjit kristallerinin hacim artışına neden olduğu belirtilmektedir (Taylor *et al.*, 2001). Mikroyapısal araştırmalar bu görüşlerin her ikisini de desteklemektedir. Bu iki görüş üzerine önerilen hacim artışı mekanizması şu şekildedir. Beton üretimi sırasında buhar kürü uygulanması durumunda yüksek sıcaklığa maruz kaldığında etrenjit kristallerinin oluşmasına neden olan monosülfatlar C-S-H jellerinin dış kısım ürünlerinin arasına yerleşmektedir. Beton üretimi sonrası normal sıcaklıkta dışardan gelen nemin etkisiyle C-S-H jelinin dış kısmında yerleşen monosülfatlar yavaşça harekete geçerek etrenjit kristalleri oluşturmaya başlamaktadır (Şekil 15). Bu çok sayıdaki mikro boyutlara sahip çimento hamurundaki gözeneklerdeki kristalleşme basıncı genişlemeye neden olmaktadır. Bu genişleme sonucunda betonun agrega çevresinde ve hamurunda çatlaklar meydana gelmektedir. Bu oluşan çatlaklarda etrenjit ve kalsiyum hidroksit tekrar kristalleşmektedir. Ancak meydana gelen bu çatlaklar büyük olduğunda tekrar kristalleşen etrenjit bir iç basınç oluşturmamaktadır (Skalny *et al.*, 2002; Ustabaş, 2008).



Şekil 15. Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasında yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nemin etkisiyle etrenjit oluşumunun şematik gösterimi

### 2.7.2. Dış kaynaklı sülfat etkisi

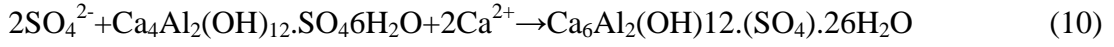
Dış kaynaklı sülfat etkisi, sertleşmiş betona dış kaynaklardan gelen sülfat iyonunun çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal olarak reaksiyona girmesi biçiminde tanımlanmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda betonda yeni bazı ürünler meydana gelir. Oluşan yeni ürünler betonda hacim artışı, kohezyon kaybı, kütle kaybı gibi oluşumlara ilaveten çatlamaya da neden olabilmektedir. Dış kaynaklı sülfat etkisi kimyasal bozulma mekanizması şeklinde başlar. Bu kimyasal reaksiyonlardan çıkabilecek muhtemel bozulmalara fiziksel bozulma mekanizmaları da katkı yapar. Bu mekanizmaların birlikte etkimesi sonucu beton yapı elemanlarının servis ömrü önemli derecede kısalmıştır (Skalny *et al.*, 2002; Ustabaş, 2008).

En çok dış sülfat kaynağı olarak bilinen yeraltı sularıdır. Göl ve nehir suları da dış kaynaklı sülfat atağına sebep olabilecek miktarda sülfat içerebilirler. Ayrıca, endüstriyel atık suları da diğer bir sülfat kaynağıdır. Endüstriyel atık sularındaki sülfat miktarı genellikle göl ve nehir sularına göre daha fazla miktarda bulunmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanan ve arıtma üniteleri bulunmayan enerji santrallerinin yer aldığı bölgelerdeki yağış suları da yüksek miktarda sülfürik asit içerebilirler. Özellikle kurak bölgelerdeki topraklarda mevcut alçıtaşı, sülfat kaynağı bakımından zengin kil ve diğer toprak türleri de dış kaynaklı sülfat kaynağı olabilmektedir. Bu tür bölgelerdeki sülfat yağış sularının etkisiyle yeraltı ve yüzeysel sulara karışarak dış kaynaklı sülfat etkisine neden olabilmektedir. Tarım sahalarındaki toprakta kullanılan gübre de sulara karışarak betona ulaşabilir ve sülfat etkisinde betonun bozulmalarına neden olabilir (Skalny *et al.*, 2002).

#### a) Sodyum Sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) Etkisi

Dış kaynaktan betona giren sodyum sülfat hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girerek betonda alçıtaşı ve etrenjit oluşturur. Sodyum sülfatın su tarafından betona taşınarak

betonun içerisine girmesiyle monosülfatlarla reaksiyona girerek yeni ürünler oluşturur (Denklem 10).



Denklem 10’da görülen reaksiyon için gerekli  $\text{Ca}^{2+}$  iyonu Portlanditin çözünmesiyle sağlanmaktadır (Denklem 11).



Betondaki Portlanditin tükenmesinden sonra ortamda sülfat iyonu bitmemişse denklemde oluşan reaksiyon için gerekli  $\text{Ca}^{2+}$  iyonu C-S-H’den sağlanmaya başlar. C-S-H’den kalsiyum iyonlarının ayrılmasına dekalsifikasyon denir. Betonda bağlayıcılık özelliği sağlayan C-S-H’da ki bu bozulma çok önemlidir. C-S-H yapısındaki  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  oranındaki azalma betonun zamanla bağlayıcılık özelliğinin kaybolmasına yol açmaktadır. C-S-H’den mevcut tüm kalsiyum iyonlarının ayrılması çok yüksek konsantrasyonlu sodyum sülfat çözeltilerinde gerçekleşebilir (Skalny *et al.*, 2002; Ustabaş, 2008).

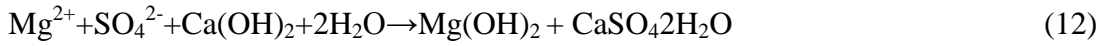
Eğer  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonu etkisiyle ortamdaki  $\text{Al}^{3+}$  iyonu tükenirse ve halen ortamda sülfat iyonu mevcutsa etrenjitten ziyade alçıtaşı oluşur. Betonun yüzey kısmında sülfat iyonları alüminat iyonlarından fazla olduğu için alçıtaşı beton yüzeyine daha yakın yerinde oluşur.

Alkali sülfatlarla Portland çimentosundan üretilen betonun karşılıklı reaksiyonu sonucu gözeneklerde oluşan etrenjit boşlukları doldurduğu için geçici bir dayanım artışına sebep olduğu gözlenmiştir. Fakat etrenjit kristalleşmesi devam ettikçe açığa çıkan basınç betonda hacim artışına ve çatlamaya sebep olmaktadır. Düşük  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve yüksek sülfat konsantrasyonlu çimentolarla üretilen betonlarda oluşan alçıtaşı da etrenjit oluşumu kadar hacim artışına yol açtığı belirtilmiştir (Skalny *et al.*, 2002).

Cüruflu Portland çimentoların kullanılmasıyla normal çimentolara göre betondaki alkali sülfat etkisi zararları azaldığı belirtilmiştir. Sodyum sülfat etkisinde cüruflu Portland çimentolu betonlarda çatlama ve yumuşamaya rastlanmadığı, ancak normal çimentoyla üretilen betonlarda çatlak, parçalanma ve daha fazla hacim artışına rastlandığı gözlenmiştir (Skalny *et al.*, 2002).

### **b) Magnezyum Sülfat (MgSO<sub>4</sub>) Etkisi**

Betona giren magnezyum sülfat ilk olarak kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek brusit ve alçıtaşı oluşturur (Denklem 12).



Bu reaksiyon sonucu oluşan brusit (Mg(OH)<sub>2</sub>) suda çözünürlüğü az olan bir ürün olup betondaki boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasına neden olur. Magnezyum sülfat atağına maruz betonda yüzeyde ve yüzeye yakın kısımda alçıtaşı tabakası oluşur (Bonen ve Cohen, 1992). Betondaki kalsiyum hidroksitin sülfat etkisi ile tükenmesi durumunda reaksiyon için gerekli Ca<sup>2+</sup> iyonu C-S-H jellerinden sağlanmaya başlanır. C-S-H jelinde dekalsifikasyonun başlaması C-S-H jellerinin amorf hidrit silikaya (SiO<sub>2</sub>.aq) veya zayıf kristal yapıya sahip magnezyum silika hidrata (M<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) ya da her iki ürüne birden dönüştürür. Bu ürünler yanında reaksiyon ilave alçıtaşı, brusit ve magnezyum silika hidrat oluşturur (Skalny *et al.*, 2002; Ustabaş, 2008).

Magnezyum sülfatın betona etkisinde C-S-H'nin bozulması diğer sülfat etkilerinden daha hızlı olduğu görülür. Magnezyum hidroksitin normal sıcaklıktaki çözünürlüğü yalnızca 0.01 g/lt'dir. Bu durum doygun çözeltinin pH değerinin 10.5 değerinde olmasını sağlar. Bu seviyedeki pH değeri C-S-H'nin stabilitesini sürdürmesi için çok düşük bir değerdir. Serbest kalsiyum hidroksitin tamamının tükenmesinden sonra ortamın pH değerini dengelemek için C-S-H kalsiyum hidroksit üretmeye başlar. Bu



kalsiyum hidroksit ortamda magnezyum sülfaat olduğu sürece üreilmeye devam eder. Böylece betonun C-S-H yapısı magnezyum silika hidrata, brusite ve alçıtaşına dönüşür. Magnezyum sülfaat etkisi ile pH değerinin çok düşmesi durumunda kalsiyum alüminat sülfaat (CAS) kısımlarda da bozulma olur. CAS'deki  $Ca^{2+}$  ve  $SO_4^{2-}$  iyonları yapıdan ayrılır (Skalny *et al.*, 2002; Ustabaş, 2008).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) ve özellikleri

EFC, Elazığ Ferrokrom tesislerinden temin edilmiştir. Temin edilen Ferrokrom cürufu irili ufaklı tanelerden oluşmaktadır. Fakat tanelerin %90'nın tane çapı 2 mm'den daha küçüktür. EFC'nin alkali aktivatörlerle reaktivitesini artırmak için, EFC normal Portland çimentosunun tane boyutuna getirmek amacıyla öğütülmüştür. Elazığ Ferrokrom cürufunun kimyasal bileşimi Çizelge 3'te verilmektedir.

Çizelge 3. Elazığ Ferrokrom cürufu kimyasal bileşimi

Bileşim (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
EFC	33.80	25.48	0.61	1.10	35.88	2.12

##### 3.1.2. Aktivatörler

Alkali aktivatör olarak, sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan aktivatörlerin kimyasal özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir.

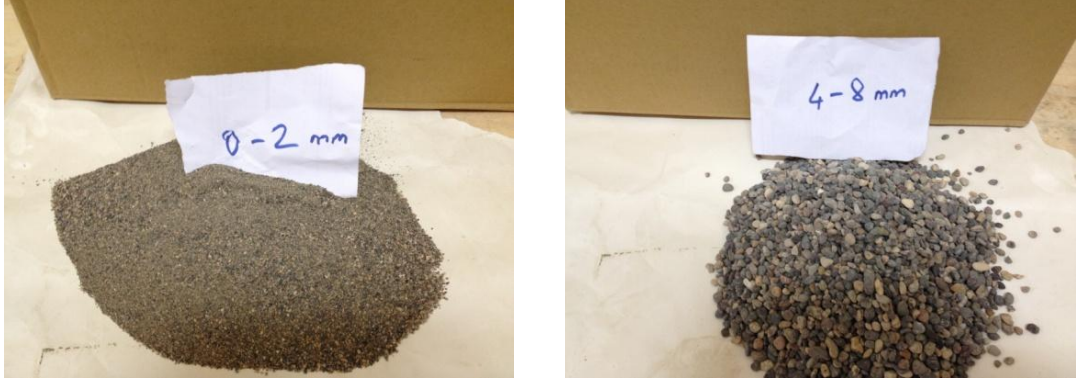
Çizelge 4. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri

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

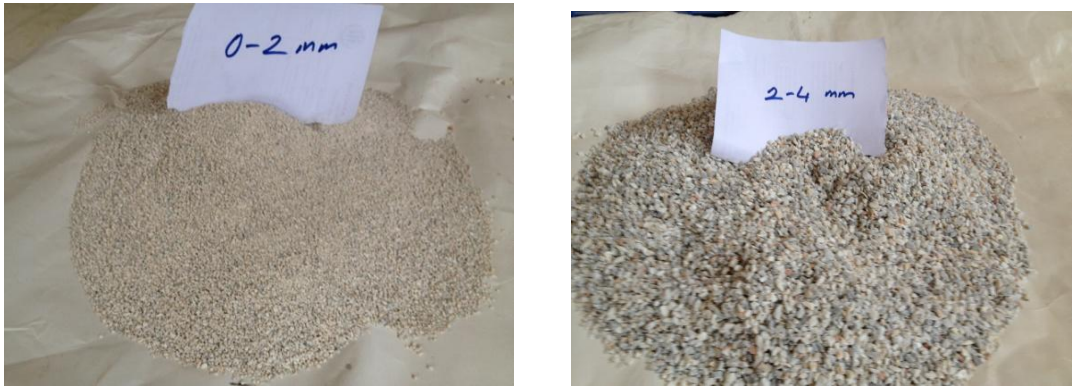
### 3.1.3. Agrega ve silis kumu

Basınç dayanımı ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi için üretilen geopolimer harçların üretiminde yalnızca standartize edilmiş %99 kuvars içeren silis kumu kullanılmıştır. Beton numuneler için ince agrega olarak dere kumu ve kırma kum, iri agrega olarak ise, dere çakılı kullanılmıştır (Şekil 16-17). Betonlu oluşturan agregaların tane dağılımı en büyük tane büyüklüğüne bağlı olarak TS 802 (1985)'de belirtildiği gibi gösterilen ideal bölgeye düşecek şekilde seçilmiştir. Bu açıdan araştırma da agregalar ayarlanmış granülometri eğrisine uygun olarak kullanıldığından agregalar 2, 4 ve 8 mm'lik eleklerden elenmiş ve eleklerden elenerek elde edilen agregalar kum için 0-2 ve 2-4, iri dere agregası için 4-8'lik tane sınıfları halinde kullanılmak üzere muhafaza edilmiştir. Deneylerde kullanılan dere agregası kırılmamış, doğal agrega dere malzemesi olup kullanımdan önce yıkanmış halde temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan kırma kum agregası da eleklerden elenmiş olup, laboratuarda su ile yıkanarak temizlenmiştir. Kullanılan agregalardan alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerle malzemelerin çeşitli özellikleri tespit

edilmiş ve elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



Şekil 16. Dere agregası



Şekil 17. Kırma kum agregası

### 3.1.4. Çimento

Çalışma kapsamında CEM I 42.5 N Portland çimentosu kullanılmıştır.

### 3.1.5. Magnezyum sülfat

Sülfat çözeltileri olarak %3, %5 ve %7 konsantrasyona sahip oranlarında  $MgSO_4$  çözeltileri kullanılmıştır. Üretilen beton numuneler bu sülfat çözeltilerinde bekletilmiş ve sülfata karşı dayanıklılığı incelenmiştir.

### **3.1.6. Karma suyu**

Beton üretiminde kullanılacak suyun temiz olması ve betona olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. Çalışmada karma suyu olarak damıtılmış saf su kullanılmıştır.

## **3.2. Yöntem**

### **3.2.1. Hamur numunelerinde priz süresi ölçümü**

Priz süresinin tayini (ASTM C191-01) için Vicat iğnesi kullanılmıştır. Vicat iğnesi ile yapılan deney aşağıda açıklanmıştır.

Öncelikle Vicat cihazının iğnesi tabandaki cam plakaya değene kadar indirilmiş ve skala sıfırlanmıştır. Dolu Vicat kabı deney odasındaki cam taban plakasının üstünde veya standartlara uygun rutubetli kabinde saklanmış ve uygun bir süre sonra Vicat cihazının iğnesinin altına konmuştur. İğne hamurun üst yüzeyine değene kadar dikkatli bir şekilde indirilmiştir. İğne, sondada ani darbe ve çarpma etkisi olmaması için (1-2) saniye bu konumda tutulmuştur. Ardından sonda hızla serbest bırakılmıştır. İğnenin hamura düşey şekilde saplanması durduğunda veya en geç 30 saniye sonra skala okunmuştur. Bunlardan ilk oluşan değer esas alınmıştır. İğne ile cam plaka arasındaki mesafe ve hamurun hazırlanışından bu ana kadar geçen süre kaydedilmiştir. Aynı numune üzerinde, birbirinden ve kenardan en az 10 mm mesafe kalacak şekilde ve uygun sürelerle (örneğin, 10 dakika) iğne batırma işlemleri tekrarlanmıştır. Numune, batırma deneyleri arasındaki sürede, standartlara uygun koşullara sahip odada veya rutubetli kabinde saklanmıştır. Karışımın tamamlanmasından itibaren plakanın üst yüzü ile iğnenin ucu arasındaki mesafenin 4 mm olduğu ana kadar geçen süre hamurun priz başlangıç süresi olmuştur.

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 çevrilmiştir. Karışımın tamamlanmasından itibaren iğne ucunun en çok 2.5 mm battığı ana kadar geçen süre hamurun priz sona erme süresi olmuştur. Batma derinliği, priz başlama süresinin tayininde tarif edildiği gibi belirlenmiştir. Vicat iğnesi Şekil 18’de, geopolimer hamur numunelerde priz ölçümü ise Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 18. Vicat iğnesi



Şekil 19. Geopolimer hamur numunelerde priz ölçümü

### **3.2.2. Hamur numunelerinde hidrasyon ısı ölçümü**

Hamur numunelerin hidrasyon ısıları tayini Şekil 20'deki ToniCAL izotermal kalorimetre aracılığıyla ölçülmüştür. Bu yöntem hamur numunelerinin hidrasyon ısısının belirlenmesinde, ısının kesintisiz saptanması nedeni ile çok avantajlıdır. Bu alet sabit sıcaklıktaki hidrasyonun incelenmesinin olduğu hallerde hidrasyon ısısının bulunmasında daha hassas ve doğru bir yöntemdir. Ayrıca zaman tasarrufu nedeni ile ToniCAL aletiyle hidrasyon ısısının belirlenmesi daha uygun olmuştur.



Şekil 20. ToniCAL İzotermal Kalorimetre

Kalorimetre cihazı yaklaşık 96 saat sürede optimum sonuç vermektedir. Deney hazırlanırken 10 gr katı malzemesi tüpe yerleştirilir. Daha sonra 5 gr sıvı enjektörle çekilip tüpün içine yerleştirilerek ToniCAL Kalorimetre cihazındaki numune kısmına tam oturacak şekilde yerleştirilir. Cihazın kapağı kapanarak ısı dengesi 0.05'den az olana kadar beklenir ve kapağın üstündeki kol çevrilerek sıvı yavaş yavaş verilmeye başlanır. Bu işlem yaklaşık 4 gün boyunca cihazda bekletilerek farklı zamanlara göre hidrasyon ısı grafiklerini verir.

Binici *vd.*, (2006) tarafından yapılan çalışmada hidrasyon ısı ölçümünün iki metotla yapılabildiği ve bu metotların nasıl olduğu belirtilmiştir. Çimentonun su ile yapmış olduğu kimyasal reaksiyona hidrasyon denir. Ancak, bu reaksiyon çok karmaşık bir yapıya sahiptir. En basit ifadesi ile çimento-su arasındaki reaksiyon başlangıçta her bir bileşenin tek başına suyla reaksiyonu olarak açıklanabilir. Bu ilişki ve etkileşimlerdeki rolleri henüz tam anlaşılmamıştır. Buna karşın, çimento hidrasyonu aşağıdaki gibi basit bir şekilde açıklanmaktadır. Su ile çimentonun teması, çimentonun tüm reaktif fazlarda çeşitli iyonlar suya geçerek eriyebildikleri düşük hidrate bileşenler oluşturur. Bu bileşenler daha önce su ile dolu olan boşlukları doldurarak poroziteyi azaltır.



Hidratasyon sırasında ısı açığa çıkar. Bu ısının büyük bir bölümü ilk günlerde meydana gelir. Normal Portland çimentosunun toplam hidratasyon ısısı yaklaşık 120 cal/g (500 J/g)'dır. Hidratasyon ısısı, çimentonun kimyasal içeriği ve inceliği ile ilgilidir (Binici *vd.*, 2006).

Hidratasyonun gelişmesi birçok faktöre bağlı bulunmakla beraber genel olarak yıllarca devam eder. Hidratasyon olayının zamanın bir fonksiyonu olarak artması son derece önemli olup çimentonun çeşitli özelliklerinin değişmesine ve bu arada dayanımın zamana bağlı olarak artmasına neden olur. Hidratasyon hızının artması, dayanım artışına neden olur. Hidratasyon ısısının artışı ile basınç dayanımının artışı arasında paralellik gözlemlenmiştir. Betonun dökümünden sonraki ilk üç gün içerisinde hidratasyon ısısı en yüksek değere ulaşır. Çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin su ile birleşerek başlattıkları kimyasal reaksiyonlar ekzotermik, yani dışarıya ısı çıkaran türdendir (Binici *vd.*, 2006).

Kimyasal reaksiyonlar devam ettiği sürece ısının açığa çıkması da devam eder. Ancak, bilindiği gibi hidratasyon ilk saatlerde oldukça hızlı olmakta ve zaman ilerledikçe hızı yavaşlamaktadır. Çimentonun hidratasyon ısısı çimentonun belirli bir sıcaklık koşulunda hidratasyona başlayıp hidratasyon sonuna kadar açığa çıkardığı ısı miktarıdır. Hidratasyon ısısı kalori/gram (cal/g) veya joule/gram (j/g) birimleri ile ifade edilir.  $1 \text{ cal/g} = 4.19 \text{ j/g}$ 'dır. Portland çimentoları ilk 1 ile 3 gün arasında toplam ısılarının yaklaşık yarısını açığa çıkartmaktadır. 7 gün sonra açığa çıkan hidratasyon ısısı, toplamın yaklaşık dörtte üçü kadar ve altı ay içerisinde açığa çıkan ısı toplamın %83-%91'i kadardır. Hidratasyon hızını ve hidratasyon ısısının açığa çıkma hızını etkileyen önemli faktörler; çimentodaki ana bileşenlerin yüzdeleri, çimentoların inceliği ve hidratasyonun yer aldığı sıcaklık koşullarıdır. Çimentonun hidratasyonu hidrate olmamış kristallerinin hidrate kristaller haline dönüşmesidir. Sağlam ve dengeli olan bu kristaller çimentonun dayanımını oluştururlar. Birçok araştırmacı çimentonun hidratasyon mekanizmasını açıklamak üzere yıllardır araştırmalar yapmakta, her gün yeni buluşlar ortaya koymaktadırlar (Binici *vd.*, 2006).

Hidratasyon süresince çimentodan ısı yayılması kimyasal bileşime de bağlı olarak çimento jelinin oluşup katılaşması yani priz süreleri ile ilişkilendirilebilir. Normal bir portland çimentosu hamuru için hidratasyon süresinde ısı yayılma ve sıcaklık aşamaları aşağıda özetlenmiştir (Binici *vd.*, 2006).

**Birinci Aşama:** Çimento taneleri su içinde asılı hale gelip ıslanmaya başlar. Alüminat ve sülfatların hidratasyonu ilk dakikalarda yüksek ısı açığa çıkarır, ortamda etrenjit kristalleri görünür. Daha sonra kalsiyum ve hidroksit iyonları serbest kalır, hidroliz başlar. Alüminatların çözünebilirliğinin sülfatlı ortamda azalması ile açığa çıkan ısı da hızla azalır.

**İkinci Aşama:** Aşamada ısı yayınmasında bir durgunluk söz konusudur. Bu arada hidroliz devam eder ve iyon yoğunlukları kristalleşme için gerekli değere ulaşır. Taze çimento hamurunda plastikliğin ilk kaybedilişi yani priz başlangıcı bu aşamanın sonunda meydana gelir. İkinci aşamada ısı yayınması yine hızlanır.  $C_3A$ 'dan etrenjit oluşmaya devam eder,  $C_3S$ 'den C-S-H kristalleşmeye başlar, çözelti içinde CH kristalleri görülür. Çimento jeli tamamen katılaşp sertleşmeye başlar. Buradaki pik priz bitişi olarak kabul edilir.

**Üçüncü Aşama:** Gerek  $C_3A$  taneleri yüzeyindeki etrenjit gerekse  $C_3S$  taneleri yüzeyindeki C-S-H su ile tane arasında bir sınır oluşturarak hidratasyonu yavaşlatır ve ısı yayınması giderek azalır. Burada sadece ortamda sülfatın tükenip  $C_3A$ 'dan etrenjit yerine monosülfatın oluştuğunu gösteren küçük bir pik görünebilir. Çimentonun erken dayanım kazanma hızını bu aşama belirler.

**Dördüncü Aşama:** Çimento taneleri etrafındaki hidratasyon ürünlerinin, özellikle C-S-H'nin tabakaları gittikçe kalınlaştığından su içeriye, hidrate olmamış tane bölgesine ancak difüzyon ile ulaşabilir. Dolayısı ile hidratasyon ve ısı oluşumu giderek yavaşlar, ancak çok uzun süre devam edebilir. Deneysel çalışmalarla dört ana bileşen yüzde fraksiyonlarına bağlı olarak çimentoların değişik yaşlarda yayınlayacakları hidratasyon ısılarını hesaplayacak bağıntılar geliştirilmiştir.

Çimentonun hidratasyon ısısının belirlenmesinde birçok izotermal kalorimetri yöntemi olduğu gibi çok eskilerden beri uygulanan ve TS 687’de yer alan Bekman termometresi de kullanılmaktadır. Değişik ticari isimlerle kullanıma sunulan yöntemlerden birisi de İzotermal Kalorimetre yöntemidir. Bu çalışmada TS EN 196-9 standardı ile önerilen yöntem kullanılmıştır.

### **3.2.3. Hamur ve harç numunelerinde mikroyapı analizi**

Numunelerin mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinde XRD ve SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Hamur ve harç numunelerle ilgili bazı mikroyapı görüntüleri Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

#### **a) SEM ölçüm metodu:**

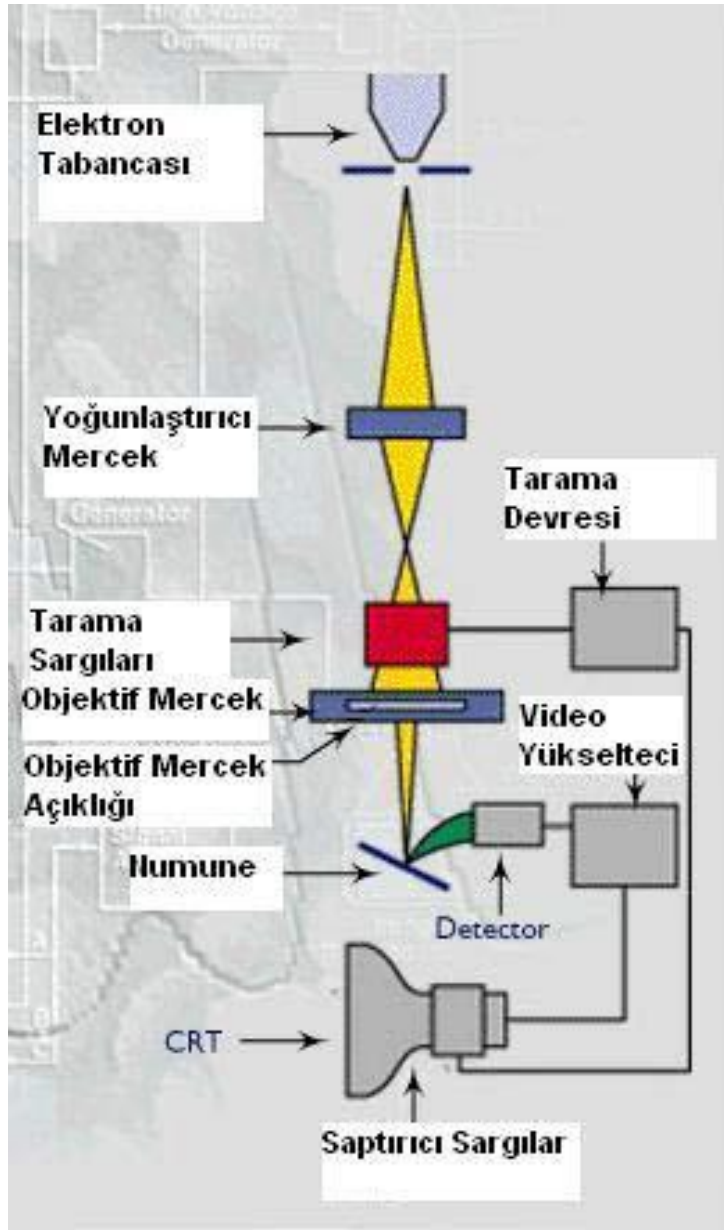
1931 yılında Almanya’da elektron ışınlarının manyetik bobinler tarafından odaklanması ile ilk elektron mikroskobu yapılmıştır. Elektron mikroskobu yüksek vakum bölgesinde yer alır; hava molekülleri tarafından sapdırılmaz. Elektron mikroskopları iki çeşittir. Bunlar:

TEM (Transmisyon Elektron Mikroskobu): Bu mikroskopta elektron ışını çok ince bir örneğe yönlendirilir. Elektron mikroskobunda, projeksiyon mercekleri olarak adlandırılan mercekler gerçek görüntüyü flouresans ya da fotografik film üzerine düşürmelidir, çünkü gözümüz elektron görüntüsünü doğrudan göremez. TEM için kullanılan örnekler çok ince olmalıdır. 10-20 nm (100 atom kalınlığı) kadar ince örnekler özel yöntemlerle hazırlanabilmektedir.

SEM (Scanning Elektron Mikroskobu): Daha kalın örnekler elektron ışınlarının yüzeyden yansıması ile incelenebilir. Bu inceleme SEM ile yapılabilir. Elektron ışını örnek yüzeyine odaklanır ve örnek yüzeyini taramaya başlar. Işının

örnek yüzeyini taramaya başlamasıyla yüzeyden yansıyan elektronlar örneğe göre birkaç yüz volt pozitif voltajda tutulan anot ile toplanır. Toplayıcı anottaki akım yükseltilir ve katot ışın tüpündeki mikroskop ışını ile eşzamanlı olarak taranan elektron ışınlarını değiştirmek için kullanılır. Bu nedenle katot ışın tüpü örneğin oldukça büyütülmüş olan görüntüsünü alır. SEM'in ayırma gücü 10 nm mertebesindedir. SEM'in şematik görünüşü Şekil 21'de verilmiştir.

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.



Şekil 21. SEM'in şematik görünüşü

Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir.

Çalışma prensibi olarak; SEM Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. 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 kondenser mercekleri, demeti numune üzerinde odaklamak için

objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta aparatlar 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 numuneler bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.

Üretilen karışımlardan alınan parçalar üzerinde SEM ile görüntü alınmıştır. Numuneler öncelikle vakumlanmış, daha sonra 75 s süre içinde Au-Pd ile kaplanmıştır. Bu alışma için LEO-EVO 40 adlı cihaz kullanılmıştır. SEM analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

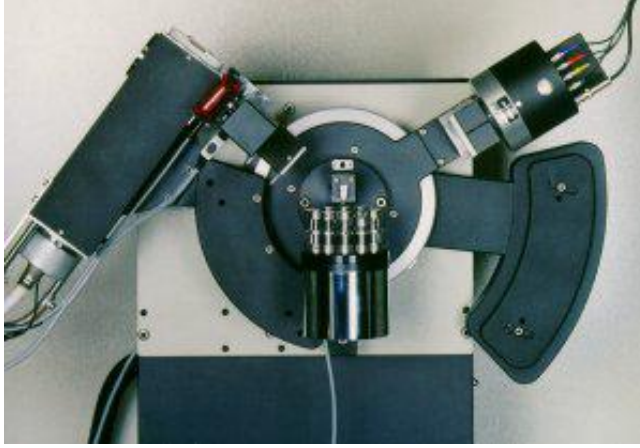
#### **b) XRD lm Metodu:**

XRD spektroskopisi olarak bilinen X-ışını Difraksiyon spektroskopisi isminden anlaşılacağı üzere X-ışını denilen Ultraviyole ışından 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 dedektör ve ışın doğası da önemli etkenlerdir.

Çalışma prensibi olarak örneğe X-ışını göndererek kırılma ve dağılma verileri toplaması söylenebilir. Benzetme yapmak gerekirse niversite hazırlık sınavlarındaki klasikleşmiş fizik sorularından kırılma indisi-aı soruları uygun olacaktır. Kristal yapısına göre ışını farklı açılarda ve şiddette kıran örnekler çok hassas biçimde analiz edilebilmektedir.

Şekil 22’de ışını üreten sol üst başlık ile dedektör (sağ üst) birbirine V şeklinde bir açıyla bağlanmıştır. Bu açı değişebilmekte olup orta hazne örnek yüklemesi için kullanılmaktadır.



Şekil 22. XRD cihazı

Fourier Transform devriminden sonra XRD makineleri de bayağı profesyonelleşmiş önceleri her açıyı ayrı ayrı analizleyip toplu değer sunan makineler şimdi geniş açıları 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.

X- Işını spektroskopisi yüksek enerjili, düşük dalga boylu elektromanyetik ışımalarıdır. Yüksek hızlı elektronların hedef malzemenin atomlarına çarpmasıyla oluşur. Hedef atomlar karakteristik ve sürekli ışınlar yayarlar. Kristal yapısının ve simetrisinin anlaşılmasında önemlidirler. X-Işınları Kırınım Tekniği malzemenin içerdiği fazları belirlemede, nicel faz analizinde, sıcaklık, basınç vs. fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerinde, tanecik boyutu belirlemede, tanecik yönelimi belirlemede, kimyasal kompozisyonu belirlemede, örgü sabitlerini bulmakta kullanılan bir tekniktir.

### 3.2.4. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Deneyleerde kullanılmak üzere laboratuara getirilen dere agregası ve kırma kum agregası için agrega deneyleri yapmak üzere numune alınmasında TS 1114 (1986)'de belirtilen dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) metodu kullanılmıştır. Bu metotta belirtildiği gibi, laboratuardaki malzemenin tümünü temsil etmesi için yığının her tarafından alınan örnekler düz bir zemin üzerine her tarafı eşit ve çapı yüksekliğinin dört katı olan bir daire oluşturacak şekilde serilmiştir. Daha sonra bu dairesel yığın kürekle dörde bölünmüş, karşılıklı iki parçası atılıp, deneyler için yeterli miktarda örnek kalıncaya kadar çeyrekleme işlemine devam edilmiştir.

Her bir deney için, numuneler üzerinde üçer defa agrega deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Bu değerler Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

Dere agregası ve kırma kum agregalarının tane büyüklüğü dağılımı TS 3530 (1999)'a göre belirlenmiştir. Deneyleerde TS 1227 (1996)'ye uygun toplama kabı, 2 mm ile TS 1226 (1996)'ye uygun 4 mm, 8 mm, 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.

Organik madde tayini deneyi TS 1744-1 (2000)'e göre yapılmıştır. Bu deneyde %3'lük NaOH çözeltisi içinde numune 24 saat bekletilerek gözlem yapılmıştır. İnce madde oranı tayini deneyi TS 3527 (1980)'de, özgül ağırlık ve su emme deneyleri ise TS 3526 (1980)'da belirtilen kurallar çerçevesinde yapılmıştır.

Deneyleerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı 8 mm'dir. 4-8 mm tane sınırları arası iri, 0-4 mm'nin altındaki agrega ince olarak seçilmiştir. Bu çalışmada TS 706'ya göre betonlarda %30 iri agrega, %70 ince agrega kullanılmıştır. İnce agreganın %50'si 0-2 mm, %20'si ise 2-4 mm arasında alınmıştır.



### **3.2.5. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi**

Bu bölümde, üretilen beton karışımlarının tespiti ve bu betonlarda kullanılan agregaların granülometri eğrilerinin tespitinde izlenen yol açıklanmıştır.

Beton karışımlarında başlangıçta kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 16 mm olarak alınmıştır. Ancak, üretilen beton numunelerin basınç dayanım deneyi sonuçları maksimum agrega tane boyutu dikkate alındığında geopolimer betonlarda maksimum agrega tane çapı küçük olan betonlarda daha büyük çıktığından deneme karışımlarından sonra, maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak alınmıştır. Maksimum agrega tane çapı 8 mm olan beton numunelerin basınç dayanımını değerlerinin maksimum agrega tane çapı 16 mm olan beton numunelerinkinden daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Agreganın tane dağılımı ise en büyük tane çapına bağlı olarak TS 706 (2003)'da verilen sınır değerler içinde kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu ayarlama sonucu tane sınıflarının oranları, 0-2 için %50, 2-4 için %20, 4-8 için %30 olarak belirlenmiştir.

Yukarıda açıklandığı şekilde çalışmada ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır. Bu sebeple agregalar karışımlara doğal halleri ile değil de tane sınıflarına ayrılmış olarak katılmışlardır. Ayırma işleminde 0-4 mm ince agrega için hem dere kumu hem de kırma kum, 4-8 mm'lik iri agrega için ise dere çakılı kullanılmıştır.

### **3.2.6. Karışım oranlarının belirlenmesi**

Beton karışımlarda EFC dozajı  $400 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır. Optimum silis modülü 1.35 ve ağırlıkça sodyum oksit miktarı 9.13 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla karışımda kullanılan aktivatörlerin miktarı saptanmıştır. Bu malzemelerin hacimleri  $1 \text{ m}^3$ 'den çıkarılarak toplam agrega hacmi bulunmuştur. Elde edilen agrega hacmi tane sınıflarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır (Çizelge 5).

Karışıma giren agregaların ağırlıkları bulunurken, dere agregası ve kırmataş agregaları için hacimler özgül ağırlık ve nem yüzdeleri ile çarpılmıştır. Normal Portland çimentolu numunelerde geopolimer beton numunelerdeki kıvamı elde etmek için %2 oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 5. 1 m<sup>3</sup> beton için karışımlarda kullanılan malzeme miktarları

Karışımlar		Dere Agregalı Geopolimer Betonlar	Kırma Kum Agregalı Geopolimer Betonlar	Normal Portland Çimentolu Betonlar
EFC (kg)		400	400	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)		171	171	-
NaOH (kg)		68	68	-
Çimento (kg)		-	-	400
Su (kg)		-	-	158
Süper Akışkanlaştırıcı (kg)		-	-	8
Agrega (kg)	0-2 mm	821	827	821
	2-4 mm	356	359	356
	4-8 mm	544	544	544
Teorik Birim Hacim Ağırlık, kg/m <sup>3</sup>		2360	2369	2287

### **3.2.7. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı**

Karışım oranları belirlenen malzemeler 1 g hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra dere agregalı geopolimer beton numuneleri üretmek için, ilk önce alkali aktivatörler 5 dakika karıştırılmıştır. Sonra sırasıyla EFC, kum ve iri agregalar eklenerek karşılaştırılmıştır.

Üretilen beton numuneler 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlardaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Numunenin kalıplardan kolaylıkla çıkarılabilmesi için, kalıpların içi ince motor yağı ile yağlanmıştır. Hazırlanan betonun kalıplara iyice yerleşmesi için şişleme çubuğu kullanılmıştır. Daha sonra kalıpların yüzeyleri çelik mala ile düzeltilmiştir. Beton numuneler üretildikten sonra %60 nem oranında 75 °C sıcaklıkta 72 saat buhar küründe bekletildikten sonra çıkarılarak laboratuvar ortamında deney gününe kadar bekletilmiştir.

### **3.2.8. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler**

Bu çalışma kapsamında, geopolimer beton numuneler hem dere kumu hem kırma kum ile üretilmiş olup, bu numuneler üzerinde basınç dayanımı ve sülfat direnci değerleri tespit edilmiştir. Geopolimer betonlarda elde edilen deney sonuçları normal Portland çimentosu ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

#### **a) Basınç dayanımı**

Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımının belirlenmesinde ASTM C109/C109M test metotları kullanılmıştır. Geopolimer ve normal beton numuneler için ASTM C39 test metodu kullanılmıştır. Üretilmiş olan geopolimer harçlar üç farklı kür ortamına bırakılmıştır. İki grup 20 saat süreyle; ilk grup 60 °C sıcaklıkta ve diğer grupta 80 °C sıcaklıkta etüvde bekletilmiştir. Üçüncü grup numuneler ise herhangi bir kür uygulanmadan laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir.

Numuneler kalıplardan 1 gün sonra çıkarılıp, deney sürelerine kadar oda sıcaklığında (laboratuarda) bırakılmıştır. Her bir karışım için üçer numunenin ortalaması alınmıştır.

Deney makinası yükleme başlıklarının yüzeyleri silinerek temizlenmiş ve numunenin başlıklarla temas edecek yüzeylerinde bulunan herhangi gevşek çıkıntı veya tane alınmıştır. Deney numunesi ve deney makinasının yükleme başlığı arasında, aralık ayarlama blokları (TS EN 12390-4) ve ilâve plâkalardan başka yerleştirme parçası kullanılmamıştır. Küp numuneler, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda yerleştirilmiştir. Numuneler, makinanın alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir. Küp numuneler, belirtilmiş boyutta numuneler, belirtilmiş çapının  $\pm\%1$ 'i doğrulukla merkeze yerleştirilmiştir. İlâve yükleme plâkaları kullanılmış ve bunlar, numunenin alt ve üst yüzeylerine göre ayarlanmıştır. 0.2 MPa/s arasında sabit bir yükleme hızı seçilmiştir. Yük, numuneye, darbe tesiri olmaksızın, seçilen hızdan sapma,  $\pm\%10$ 'u geçmeyecek şekilde, en büyük yüke ulaşıncaya kadar sabit hızda uygulanmıştır. Göstergeden okunan en büyük yük kaydedilmiştir.

Basınç dayanımı, denklem 13 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$F_c = P / A_c \quad (13)$$

Burada;

$F_c$ : Basınç dayanımı, MPa,

$P$ : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

$A_c$ : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı,  $\text{mm}^2$ . Bu alan, numunenin belirtilen ölçüleri kullanılarak (EN 12390-1), numune üzerinde ölçülen gerçek boyutlar kullanılarak hesaplanmıştır.

Her karışımdan basınç dayanımı için üç adet 50x50x50 mm küp numune üretilmiş ve sonuç olarak bu üç numunenin ortalaması alınmıştır. Üretilen beton numunelerin basınç dayanımının belirlenmesinde ASTM C39 test metodu kullanılmıştır.

Sonuç olarak, beton numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır. Her numuneden üç adet üretilmiş ve elde edilen deney sonuçları bu üç numunenin ortalaması alınarak bulunmuştur.

#### **b) Sülfat direnci**

Sülfat direnci; ağırlıktaki kayıp, genleşme miktarları ve basınç dayanımındaki kayıp ile değerlendirilmiştir. 28 gün küre tabi tutulan beton numuneleri , %3, %5 ve %7 oranlarında MgSO<sub>4</sub> solüsyonunda bekletilmiştir. Sülfata dayanıklılık testlerinde, +2 iyonuna sahip, en çok tercih edilen ve en etkili sülfat olması nedeniyle MgSO<sub>4</sub> tercih edilmiştir. Genleşme 3 adet prizmatik (40x40x160 mm<sup>3</sup>) beton numunesi üzerinde, basınç dayanımı da her bir karışımdan kübik (50x50x50 mm<sup>3</sup>) numuneler üzerinde test edilmiş ve aynı karışım, oda şartlarında kür edilen ve aynı yaştaki numunelerle karşılaştırılmıştır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu alıŐma kapsamında, EFC'den üretilen geopolimer imento kullanılarak hamur, harç ve beton numunelerin üretilmesi ve bu numunelerin özelliklerinin araştırılması planlanmıŐtır. Bu alıŐma hamur, harç ve beton olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir.

Hamur numuneleri üretildikten sonra, yapılan priz süresi ve basınç dayanımı deneyleri sonucunda en iyi sonuçları veren numunelerin silis modülü 0.7 ve sodyum oksit içeriği %7 olan numuneler olduğu belirlenmiştir. En iyi sonuçları veren bu karışım harç fazı için esas alınmıştır. Ayrıca hamur numunelerden elde edilen deney sonuçları göz önüne alınarak, harç numuneler üretilmiştir.

Üretilen hamur ve harç karışımların sonuçları gözönüne alınarak verilen en uygun karışım olan, silis modülü 0.70 ve ağırlıkça Na<sub>2</sub>O oranı %7 olan karışım seçilmiştir. Seçilen bu karışım doğrultusunda, deneme dökümleri yapılmıştır. Ancak bu Şartlar altında üretilen geopolimer betonlardan arzu edilen (C20 ve üzeri) taŐıyıcı beton basınç dayanımı elde edilememiŐtir. Farklı kür Şartlarında ve farklı karışım oranlarında deneme dökümleri yapılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir (izelge 6). Yapılan deneme dökümleri sonucunda, 0.70 olan silis modülü artırılarak 1.35'e çıkarılmıŐ ve %7 olan Na<sub>2</sub>O içeriği, %9.13'e çıkarılmıŐ ve üretilen betonlar 75 C, %60 nem oranında, dökümü izleyen ilk 72 saat buhar krnde bekletilmiştir. Bu Şartlar doğrultusunda, dere agregalı ve kırma kum agregalı geopolimer betonlar ayrı ayrı dökülmüştür. Ayrıca, normal Portland imentolu betonlar dökülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6. Geopolimer betonlarda deneme dökümleri

Döküm No	Silis Modülü	Na <sub>2</sub> O %	3 Günlük (MPa)	7 Günlük (MPa)	28 Günlük (MPa)	Kür Şartları
1	0.70	7.00	3.24	3.60	4.20	Laboratuar Ortamı
2	1.35	7.60	9.66	12.24	13.20	Laboratuar Ortamı
3*	1.35	7.60	12.12	13.20	9.60	Laboratuar Ortamı
4	2.15	7.00	7.04	12.4	17.00	Laboratuar Ortamı
5	0.87	7.05	1.96	4.04	8.16	Laboratuar Ortamı
6	1.04	11.8	9.20	11.36	17.00	Laboratuar Ortamı
7	1.35	9.13	9.30	13.96	18.20	Laboratuar Ortamı
8	1.04	11.8	15.12	18.96	16.00	75 °C, 72 saat Buhar Kürü
9	1.35	7.60	7.55	12.94	16.00	75 °C, 72 saat Buhar Kürü
10*	1.35	7.60	12.8	12.34	17.32	75 °C, 72 saat Buhar Kürü
11	2.15	7.00	2.04	3.24	18.28	75 °C, 72 saat Buhar Kürü
12	1.35	9.13	17.84	26.36	35.10	75 °C, 72 saat Buhar Kürü

\*: %2 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Bu çalışmada geopolimer hamur, harç ve beton numunelerin deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar çizelge ve şekiller ile desteklenerek daha da anlaşılır hale getirilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, bu dökümler doğrultusunda üretilen geopolimer ve normal Portland çimentolu beton numunelerin, 28 gün küre tabi tutulan beton numuneleri %3, %5 ve %7 oranlarında MgSO<sub>4</sub> solüsyonunda bekletilmiştir. Daha sonra üretilen bu geopolimer beton numuneler, normal Portland çimentolu beton numunelerle karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

## **4.1. Geopolimer Hamur Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma**

Hamur numunelerin priz süreleri, basınç dayanım değerleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen hamur numunelere ait deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

### **4.1.1. Geopolimer hamur numunelerin priz süreleri**

Geopolimer hamurların priz başlangıç ve bitiş süreleri, silis modülü ve sodyum oksit içeriğine bağlı olarak Çizelge 7’de verilmiştir. Farklı silis modülü ve farklı Na<sub>2</sub>O içeriklerine bağlı olarak priz süreleri değişkenlik göstermiştir. Priz başlangıç sürelerinin 60 ile 245 dakika arasında, priz bitiş sürelerinin ise 120 ile 870 dakika arasında olduğu tespit edilmiştir. En kısa priz bitiş süresi, silis modülünün 0.7 ve Na<sub>2</sub>O içeriğinin %4 olduğu numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca 0.7 silis modülüne sahip olan karışımlarda Na<sub>2</sub>O içeriği arttıkça priz süresinin arttığı gözlenmiştir. 1 numaralı karışım hariç geopolimer hamur numunelerinin priz süresi normal Portland çimentolu betonlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca karışımların priz tamamlama süresi 45 ile 635 dakika arasında gerçekleşmiştir.



Çizelge 7. Geopolimer hamurların priz başlangıç ve bitiş süreleri

Sıra No	Silis Modülü	Na <sub>2</sub> O, (%)	Priz Başlangıcı, (Dakika)	Priz Bitişi, (Dakika)	Priz Süresi (Dakika)
1	0.5	4	235	870	635
2	0.5	7	140	220	80
3	0.5	10	110	195	85
4	0.5	12	100	250	150
5	0.6	4	150	255	105
6	0.6	7	80	140	60
7	0.6	10	120	165	45
8	0.6	12	175	310	135
9	0.7	4	60	120	60
10	0.7	7	110	170	60
11	0.7	10	225	300	75
12	0.7	12	245	380	135

Geopolimer hamurların priz süreleri, normal Portland çimentosuna göre sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive edilmiş çimentolarda daha erken olduğu belirtilmiştir (Atiş *vd.*, 2009). Kalsiyum klorürlü geopolimer hamurların, başlangıç ve bitiş priz sürelerini azalttığı görülmüştür (Rattanasak *et al.*, 2011). Xin *et al.*, (2012) çalışmasında geopolimer çimento ile yapılan numunelerin priz başlama süresinin 50 dakika ile 2 saat arasında olduğunu, priz bitiş süresinin ise 8 saat olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, NaOH veya cüruf içeriğinin artmasıyla, priz süresinin kısaldığını belirlemiştir. Allahverdi *et al.*,(2008) çalışmalarında priz

sürelerinin, farklı silis modülü ve Na<sub>2</sub>O içeriklerine bağlı olarak incelemiştir. Priz sürelerinin 120 ile 870 dakika arasında değişiklik gösterdiğini tespit etmiştir.

López *et al.*, (2009) tarafından yapılan çalışmada, metakaolin tabanlı geopolimer bağlayıcıya sahip numunelerin hidrasyon sürecindeki priz süreleri incelenmiştir. Portland çimentolu betonların, priz süresinin artmasıyla C-S-H jelleri yoğunlaşmış, emme oranı ve geçirgenliği artmış, fakat yoğunluğunda azalma gözlenmiştir. Aksine, metakaolin tabanlı geopolimer çimentoların priz süresinin artmasıyla, yoğunluğunda artma, emme oranı ve geçirgenliğinde ise azalma görülmüştür. Bu geopolimerlerin değişikliklerinin sebebi, yüksek alkali ve düşük sıcaklıklar altında olmasından kaynaklanmakta olduğunu belirtmiştir.

Metakaolinit ile üretilen geopolimerin priz alma süresini, SiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O molar oranının etkilediği belirlenmiştir. 80°C'deki sentezde 1.23 SiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O molar oranında 1 saatte priz alırken, bu oran 2'yi geçtiğinde uygun sertliğe 4 saatte ulaşılmaktadır (Davidovits, 2008).

Bernal *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu ve metakaolini karıştırarak, alkali aktivatörlerle geopolimerler üretmişlerdir. Reaksiyonun ilk evrelerinde metakaolinin eklenmesiyle, toplam priz süresinin arttığını, çıkan ısı miktarının ise azaldığını belirlemişlerdir. Yüksek miktarda silika içeren alkali aktivatörlerin kullanımında, mekanik dayanımlarında bir azalma görülürken, priz süresinde ise önemli ölçüde bir artma gözlenmiştir. Sonuç olarak, metakaolin cürufların ve alkali aktivasyonların karışımıyla oluşan geopolimerlerin SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı malzeme özelliklerinin gücünü göstermektedir. Yüksek modüle sahip numunelerin, mekanik dayanımlarının düşük, priz sürelerinin yavaş ve düşük modüle sahip numunelere göre daha az hidrasyon ısıyı oluşturdıkları gözlenmiştir.

#### 4.1.2 Geopolimer ve Portland çimentolu hamur numunelerin hidrasyon ısıları

Geopolimer ve Portland çimentolu hamur numunelerin hidrasyon ısıları, farklı silis modülü ve sodyum oksit içeriğine bağlı olarak Çizelge 8’de verilmiştir. Farklı silis modülü ve farklı Na<sub>2</sub>O içeriklerine bağlı olarak hidrasyon ısıları değişkenlik göstermiştir. En az hidrasyon ısı, silis modülünün 0.6 ve Na<sub>2</sub>O içeriğinin %4 olduğu geopolimer hamur numunesinden elde edilmiştir. 0.5 silis modülüne sahip geopolimer hamur numunelerinin Na<sub>2</sub>O içeriğinin artmasıyla hidrasyon ısısının da arttığı gözlenmiştir. CEM I 42.5 N Portland çimentolu hamur numunelerin 251.40 J/g hidrasyon ısı elde edilmiştir. Ayrıca, geopolimer hamur numunelerin Portland çimentoya göre oldukça düşük ısı çıkardığı gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri elde edilen 10 numaralı geopolimer hamur numunesine ve normal Portland çimentosuna ait hidrasyon ısı grafikleri sırasıyla Şekil 23 ve Şekil 24’te verilmiştir.

Çizelge 8. Hamur numunelerin hidratasyon ısıları

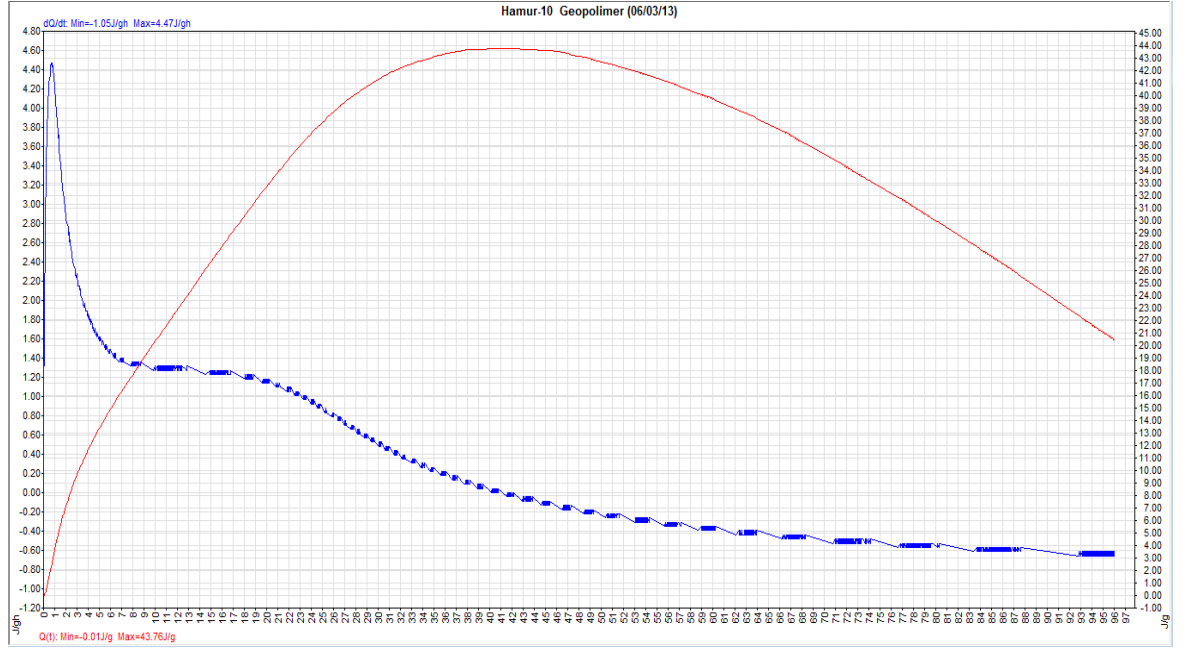
Sıra No	Silis Modülü	Na <sub>2</sub> O, (%)	Q(t), (J/g)
1	0.5	4	16.80
2	0.5	7	27.05
3	0.5	10	49.76
4	0.5	12	53.25
5	0.6	4	3.80
6	0.6	7	24.85
7	0.6	10	51.57
8	0.6	12	51.23
9	0.7	4	7.17
10	0.7	7	43.76
11	0.7	10	45.61
12	0.7	12	36.35
13	CEM I 42.5 N Portland Çimento		251.40

Cüruf ile yapılan geopolimer betonların hidratasyon ısıları düşük olduğu için, bu tür malzeme özellikle kütle beton yapımında önem taşımaktadır. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır. Düşük hidratasyon ısılarının sağladığı avantajlar sayesinde baraj inşaatlarında kullanılabilir. Cürufli geopolimerlerin hidratasyon ısılarının düşük olması nedeniyle adyabatik sıcaklığı oldukça düşüktür ve bu durum kütle betonlarının ön ve ard soğutma ihtiyaçlarını büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Böylelikle soğutma amaçlı yatırımlara da ihtiyaç duyulmamaktadır. Beton iç sıcaklığı düşük olduğundan üretim sonrası çatlak (rötre çatlağı) riski düşüktür.

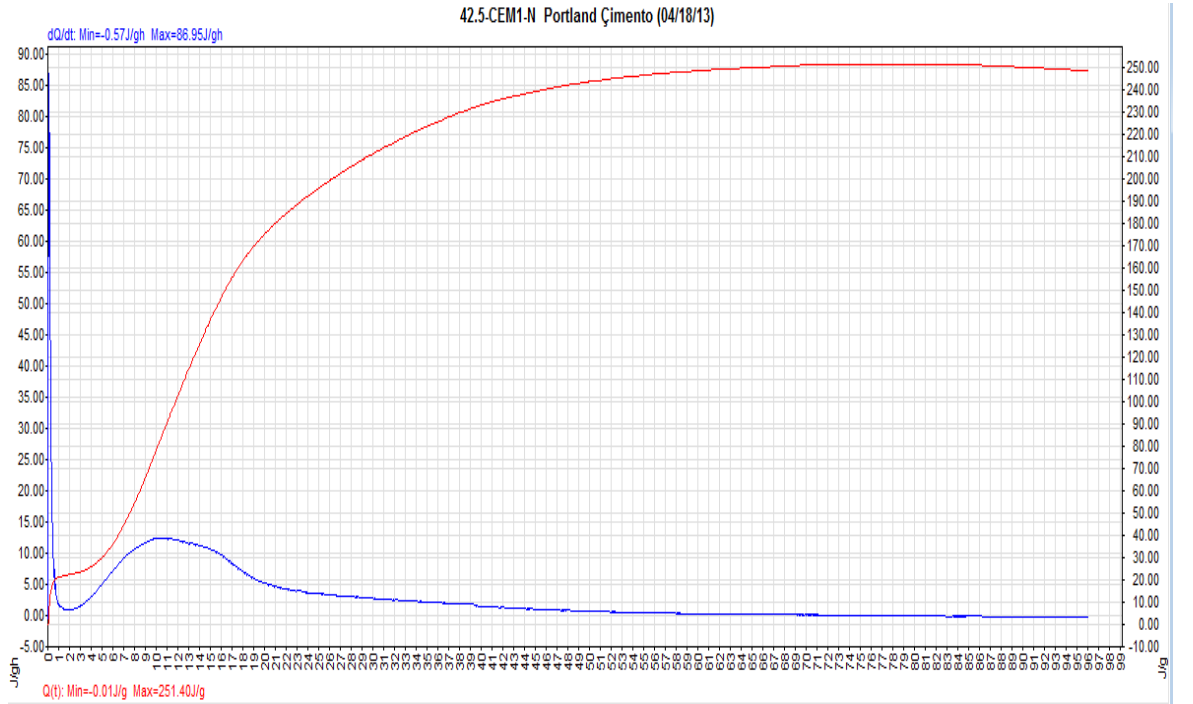
Qiao *et al.*, (2009) yeni bir puzolanik malzemede kimyasal aktivatörlerin etkisini araştırmak için, mekanik ve termal muamele görmüş ince taneli (<14 mm) uçucu külü incelemişlerdir. Uçucu kül ince halde öğütülmüş, ısı işlem (800°C) görmüş ve CaOH<sub>2</sub> ile karıştırılarak, partiküllerin aktive edilmesi için; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH, KOH ve CaCl<sub>2</sub> kimyasalları kullanılmıştır. Aktive edilmiş çimentonun mikro yapısı ve hidrasyon özellikleri X-ray ve termogravimetri yöntemleriyle incelenmiştir. Bununla birlikte, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH ve KOH katkılarının mukavemet ve hidrasyon reaksiyonunu yavaşlattığını ve bazı kimyasalların hidrojen gazı oluşumunu artırdığından dolayı daha çok boşluklu numuneler ürettiğini belirtmişlerdir. CaCl<sub>2</sub> eklenmesinin, termal uygulama gören uçucu küllü numunelerin hidrasyonunun da negatif etki gösterdiği açıklanmıştır.

Guo *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu kül, alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanarak geopolimerler üretmişlerdir. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranları 1.0, 1.5 ve 2.0 M olacak şekilde alkali aktivatörlerin silis modülleri ayarlanmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimerlerin, Portland çimentolara göre daha az hidrasyon ısı oluştuğundan, çevreye verdiği CO<sub>2</sub> miktarının da az olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, geopolimer çimentoların çevre ve enerji kaynaklarının korunmasında daha etkili olduğu görülmüştür.

Bernal *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu ve metakaolini karıştırarak, alkali aktivatörlerle geopolimerler üretmişlerdir. Reaksiyonun ilk evrelerinde metakaolinin eklenmesiyle, toplam priz süresinin arttığını, çıkan ısı miktarının ise azaldığını belirlemişlerdir. Yüksek miktarda silika içeren alkali aktivatörlerin kullanımında, mekanik dayanımlarında bir azalma görülürken, priz süresinde ise önemli ölçüde bir artma gözlenmiştir. Kızılötesi spektroskopi ile 180 gün içerisinde jel yapısının geliştiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, metakaolin cürufuların ve alkali aktivasyonların karışımıyla oluşan geopolimerlerin SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı malzeme özelliklerinin gücünü göstermektedir. Yüksek modüle (2.4) sahip numunelerin, mekanik dayanımlarının düşük, priz sürelerinin yavaş ve düşük modüle sahip numunelere göre daha az hidrasyon ısı oluşturdukları gözlenmiştir.



Şekil 23. 10 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidratasyon ısısı



Şekil 24. Normal Portland çimento hamur numunesinin zamana bağlı hidratasyon ısısı

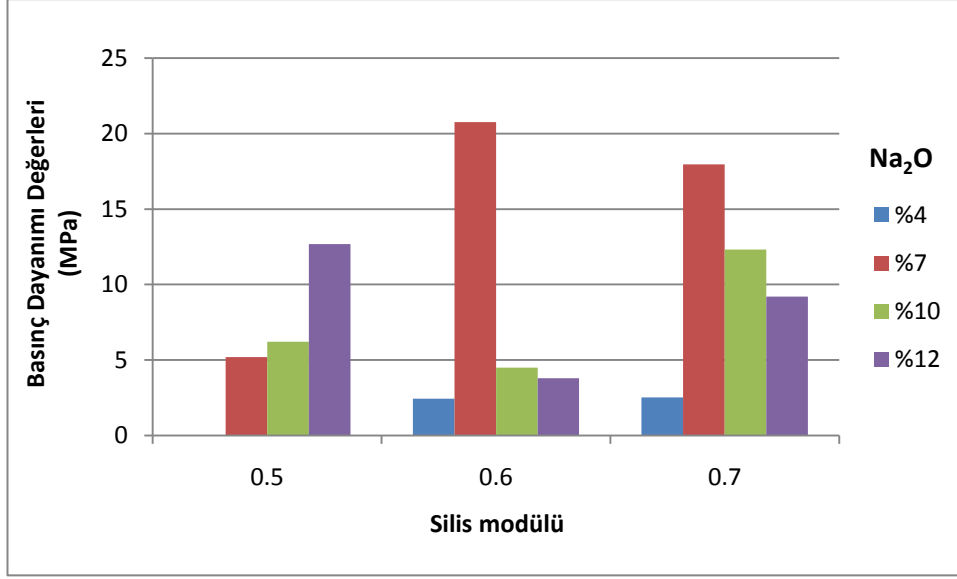
#### 4.1.3 Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımları

Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanım değerleri, silis modülü ve sodyum oksit içeriğine bağlı olarak Çizelge 9'da verilmiştir. Silis modülü 0.5 olan numunelerin Na<sub>2</sub>O içeriği arttıkça basınç dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir. Geopolimer hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımları incelenmiş ve en iyi dayanım silis modülünün 0.7 ve Na<sub>2</sub>O içeriğinin %7 olduğu karışımda elde edilmiştir. Bu deney sonucunda bu karışım hamur aşaması için optimum karışım olarak seçilmiştir. Geopolimer hamur numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının farklı silis modüllerine ve farklı Na<sub>2</sub>O içeriklerine göre değişimi, sırasıyla, Şekil 25 ve Şekil 26'da verilmiştir.

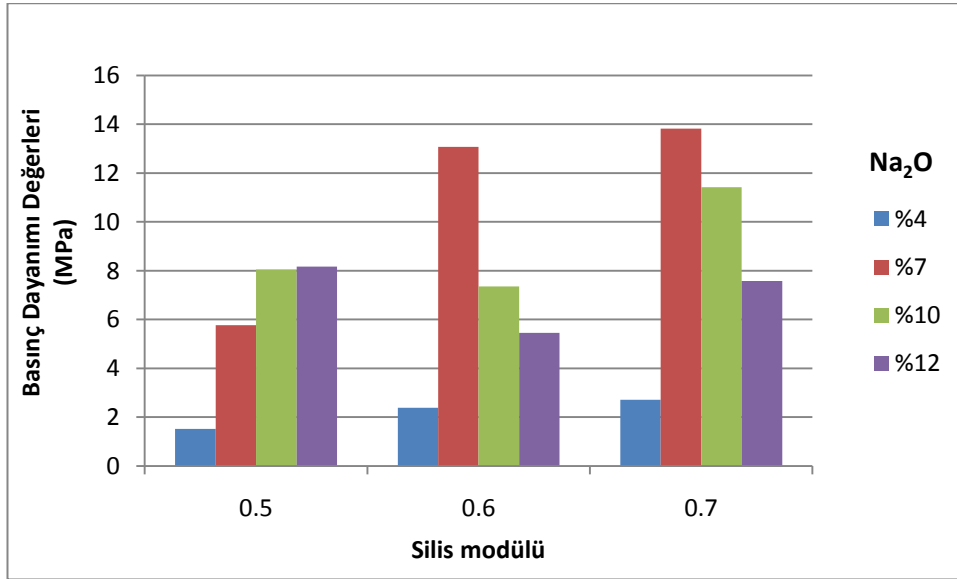
Çizelge 9. Geopolimer hamur numunelerde basınç dayanımı değerleri

Sıra No	Silis Modülü	Na <sub>2</sub> O, (%)	Basınç Dayanımı, (MPa)	
			7 Günlük	28 Günlük
1	0.5	4	-	1.52
2	0.5	7	5.20	5.77
3	0.5	10	6.20	8.05
4	0.5	12	12.68	8.17
5	0.6	4	2.44	2.38
6	0.6	7	20.76	13.08
7	0.6	10	4.48	7.36
8	0.6	12	3.80	5.45
9	0.7	4	2.52	2.72
10	0.7	7	17.96	13.82
11	0.7	10	12.32	11.42
12	0.7	12	9.20	7.58





Şekil 25. Geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri



Şekil 26. Geopolimer hamur numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri

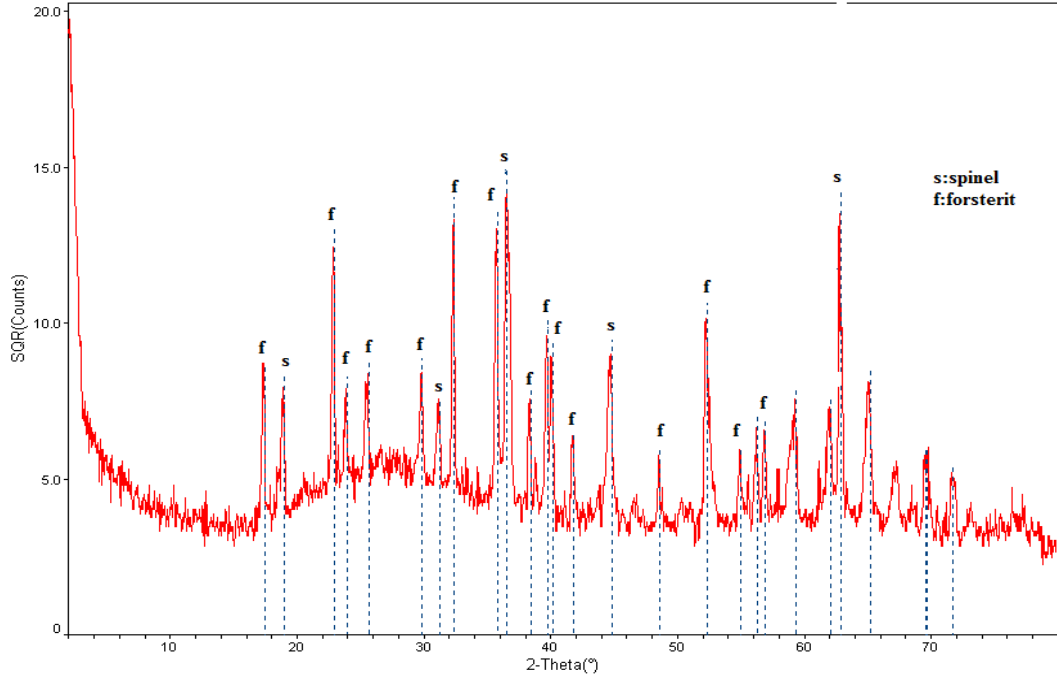
Swanepoel ve Strydom (2002) uçucu kül, kaolin, sodyum silikat çözeltisi ve suyu karıştırarak geopolimerik hamur numuneler üretmişlerdir. Numuneler 40, 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda 6, 24, 48 ve 72 saat kür edilmiştir. Optimum şartlar 48 saat 60°C de kür edilen numunelerde görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımı ise 8 MPa olarak bulunmuştur. Çalışmaların sonucunda 60°C'de 48 saat ısıtılan numunelerde

geopolimerizasyon reaksiyonu görülmüş ve basınç dayanımındaki artış dayanım oluşum reaksiyonlarını göstermiştir. Yapılan çalışmalar bu hammaddeleri kullanarak 60°C'nin altında ısıtma yapıldığında geopolimerizasyon reaksiyonlarının belirli bir oranda görülmesi ihtimalinin oldukça düşük olduğunu göstermiştir.

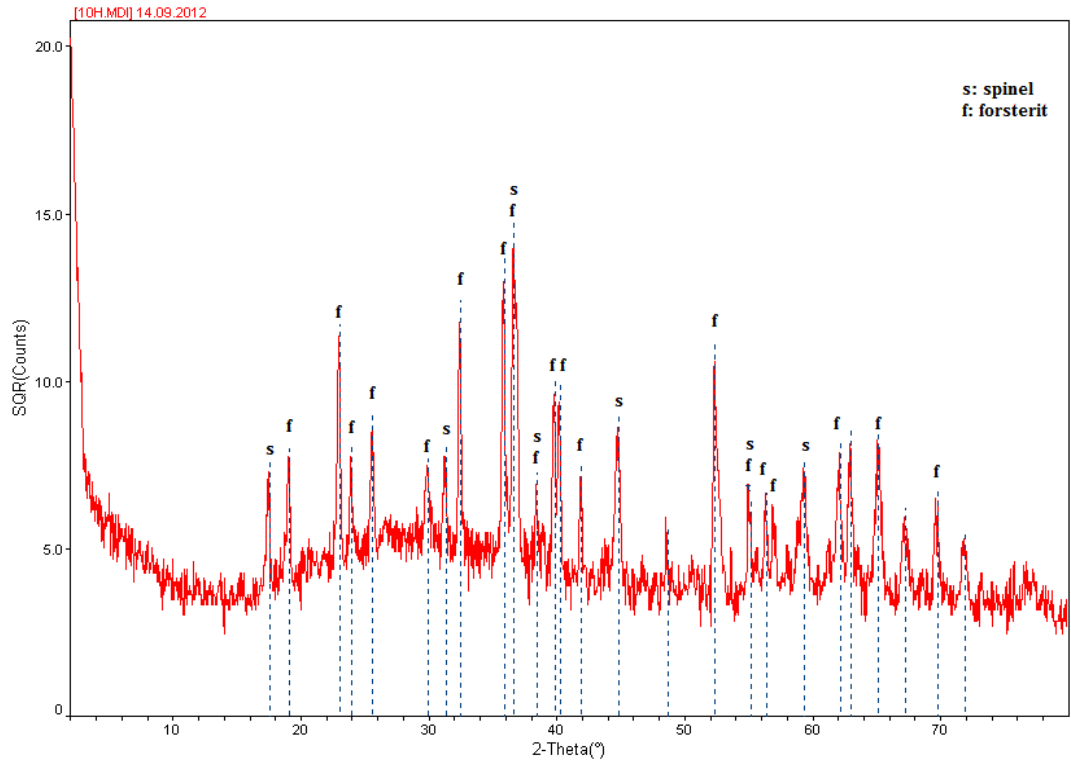
Pimraksa *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, karışımların başlangıçtaki Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranlarının geopolimer hamurların özelliklerini etkilediği ifade edilmiştir. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranları değiştirilen numunelerin basınç dayanımları değerlerinin 1.1 ile 6.0 MPa arasında olduğu tespit edilmiştir.

#### **4.1.4. Geopolimer hamur numunelerin mikroyapı özellikleri**

Şekil 27'de silis modülü 0.5 ve Na<sub>2</sub>O içeriği %4 olan hamur numunelerin XRD difraktogramı verilmiştir. Şekil 28'de ise silis modülü 0.7 ve Na<sub>2</sub>O içeriği %7 olan geopolimer hamur numunelerin XRD difraktogramı görülmektedir. Silis modülü 0.7 ve Na<sub>2</sub>O içeriği %7 olan geopolimer hamur numunelerine ait piklerin yer aldığı difraktogramlar incelendiğinde, referans numunede 36.659° 2θ açılarında yer alan numunenin maksimum pik yüksekliği yapmış ve bu malzemenin spinel (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) kristal fazları temel bileşeni olduğu tespit edilmiştir. Şekil 27 ve Şekil 28'de XRD difraktogramı analiz sonuçları incelenmiş ve içerisinde forsterit (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) spinel (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) mineralleri içerdiği görülmüştür.



Şekil 27. Silis modülü 0.5 ve Na<sub>2</sub>O içeriği %4 olan hamur numunelerin XRD difraktogramları



Şekil 28. Silis modülü 0.7 ve Na<sub>2</sub>O içeriği %7 olan geopolimer hamur numunelerin XRD difraktogramları

Yazıcı ve Kaya (2003), yaptıkları çalışmada ferrokrom cürufundan alınan numunelerin minerolojik bileşimini incelemişlerdir. Krom elementini içeren fazlar difraktogramlarda gözlenememiştir. Çünkü bütün fraksiyonlardaki elementel analiz sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Ancak, forsterit ( $Mg_2SiO_4$ ) ve spinel ( $MgAl_2O_4$ ) kristal fazları temel bileşen olarak ortaya çıkmaktadır. Pik şiddetleri esas alınırca forsteritin ağırlıklı olduğu anlaşılmaktadır. Spinel pik şiddetlerinde belirgin bir değişim bulunmamaktadır. Analiz sonuçları ile serbestleşme derecesi mukayese edildiğinde de, forsteritin belirgin şekilde ortaya çıkması normaldir. Ayrıca X-ışınları difraksiyon çalışmalarından da temel bileşen olarak forsterit ve spinel kristal fazları ortaya çıkmıştır.

Silva ve Crenstil (2008) yaptıkları çalışmada metakaolin reaksiyonlu alkalilerle hazırlanan geopolimer karışımların mikroyapı gelişimleri araştırılmıştır. 2.50–5.01  $SiO_2/Al_2O_3$  sahip ve 0.60–1.70  $Al_2O_3/Na_2O$  oranına sahip geopolimer karışımlar incelenmiştir. Numuneler 7 ay boyunca, 40°C sıcaklıkta küre tabii tutularak XRD cihazlarında analiz edilmiştir. Erken yaşta gözlenen amorf Na-Al-Si fazların, yavaş yavaş uzun kürle kristal fazlara dönüştüğü görülmüştür. Özellikle  $SiO_2/Al_2O_3$  molar oranları düşük ve  $Na_2O$  içeriği yüksek numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

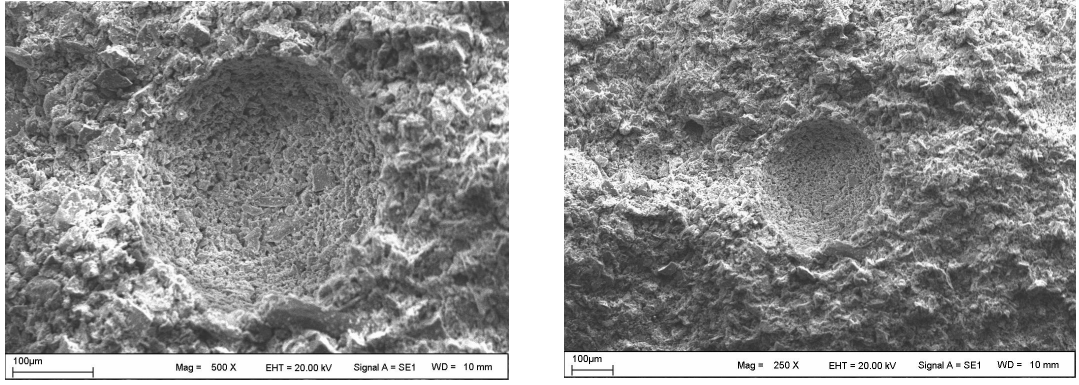
Zhang *et al.*, (2011b) yaptıkları çalışmada yüksek Si/Al oranına sahip maden atıklarından F sınıfı uçucu kül mikroyapıları özellikleri incelenmiştir. Bu uçucu kül tabanlı geopolimerlerin, Si/Al oranlarının, priz sürelerinin ve sodyum hidroksit yoğunluklarının geopolimere etkisi araştırılmıştır. Bu sodyum hidroksit yoğunluğunun artmasıyla, geopolimer jellerin daha yoğun yapı gösterdiği görülmüştür. Sonuç olarak, Si/Al oranlarının ve alkalilerin geopolimerler üzerinde mekanik ve yapısal olarak önemli ölçüde etkisi olduğu görülmüştür. Sodyum hidroksit yoğunluğunun artmasıyla, yüksek derecede geopolimerizasyon özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu tip atık madeni malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Nazari *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü ile üretilen inorganik polimerlerin (geopolimer) basınç dayanımını araştırmışlardır. Numunelerin mikroyapıları incelenmiş ve yoğun yapılı ve ince parçacıklı uçucu küllerin dayanım testlerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Geopolimerlerin kimyasal bileşimi zeolite çok benzer olmasına rağmen, geopolimerler amorf yapıya sahiptir. Geopolimerler polimerik Si-O-Al-O kafesinden oluşmakta olup, bu kafes de SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> bileşiklerinden oluşmaktadır (Swanepoel and Strydom, 2002).

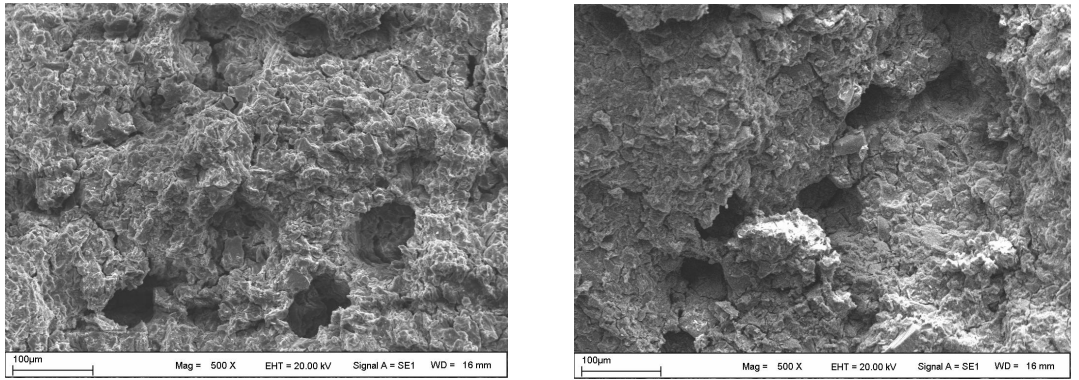
Yunsheng *et al.*, (2010), çalışmalarında kaolin tabanlı geopolimer çimentoların kimyasal özelliklerinin analizini incelemiştir. 9 tane farklı poly-sialate-disiloxo (Na-PSDS) geopolimer çimento harçları, 3 farklı parametre, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O kullanarak bu oranların, mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki etkisi üzerinde durmuştur. Sonuç olarak, Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve H<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O oranlarının basınç dayanımlarına önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu farklı yoğunluktaki numunelerin SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=5.5, Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=1.0 ve H<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O=7.0 olan numunede maksimum basınç dayanımı değeri 34.9 MPa elde edilmiştir. IR spektrumlarıyla kimyasal yapıları da incelenmiş ve en iyi basınç dayanım değerleri, geopolimer miktarı yüksek orana sahip olan numunelerden elde edilmiştir.

Geopolimerin amorf yapısı ve kompozisyon içindeki kaba taneciklerin ayrışması pasta içerisinde boşluklar oluşturduğunu düşündürmektedir (Arıöz *vd.*, 2009). Basınç dayanımında önemli ölçüde düşüşe sebep olan bu boşluklar Şekil 29'da görülmektedir.



Şekil 29. Silis modülü 0.5 ve Na<sub>2</sub>O içeriği %4 olan geopolimer hamur numunelerin SEM görüntüleri

Geopolimer gibi amorf ve yarı seramik malzemelerin değişken dizilimi de SEM ile değerlendirilebilmektedir (ARIÖZ *vd.*, 2009). Yapılan incelemelerde özellikle Na<sub>2</sub>O içeriğinin artmasıyla hamur numunelerin içerisinde birbirine yakın boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu boşluklu hamur numunelerden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. Na<sub>2</sub>O içeriği %12 olan geopolimer hamur numunelerin SEM görüntüleri

Bondar *et al.*, (2011) yaptığı çalışmalarda SEM aletiyle alkali aktivasyonlu mineral katkılı ve katkısız taftan puzolanların mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Kaolin ve kalsin katkılı Shahindej puzolanları ve kireç katkılı taftan puzolanlarının basınç dayanımları karşılaştırılmış ve mineral katkısız puzolanların jel boşluklarının

azaldığı ve mineral katkılı çimentoların basınç dayanımı için daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Thakur ve Ghosh, (2009) yaptıkları çalışmada, geopolimer numunelerin SEM ve XRD mikroyapıları incelenmiş ve amorf yapı olan alümino-silikatların basınç dayanımını geliştirdiği gözlenmiştir.

Bakhavera *et al.*, (1999) çalışmalarında alkali aktive edilen cürüfların kür sıcaklığının mikroyapıya etkisini araştırmıştır. Mikroyapısal çalışmada, alkali aktive edilen cürüflü geopolimerlerin hidrasyon ürünlerinin dağılımındaki homojensizliğin, dayanımdaki azalmaya neden olacağını belirtmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklık küründen önce oda sıcaklığındaki ön küre tabi tutulan geopolimerlerin, daha yüksek ve erken dayanım kazanmasını sağladığını ve rötresini oldukça azalttığını belirtmişlerdir.

Torgal *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada geopolimerlerin mikroyapıları XRD ve SEM/EDS cihazlarında incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, alkali aktivatörlerin yoğunluğunun mekanik dayanımları üstünde etkili olduğu görülmüştür. SEM ve EDS analizi sonucunda oluşan hidrasyon ürünlerinin, alkali alüminosilikat jel ve kalsiyum silikat hidratlar olduğu görülmüştür. NaOH yoğunluğunun artmasıyla moleküller arasındaki bağ gücünün artmasını alüminat ve silikat çözeltilerinin daha iyi çözülmesini sağlamıştır. Karışımlarda agregaların hacimlerini artırmak için işlenebilirliğini minimum seviyede tutmak için, daha çok su eklemek gerektiğini ve sonucunda aynı sodyum hidroksit yoğunluklarıyla farklı agrega hacimlerde, H<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O farklı oranları elde edilmiştir.

## **4.2. Geopolimer Harç Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma**

Hamur numuneleri üretildikten sonra, yapılan priz süresi ve basınç dayanımı deneyleri sonucunda en iyi sonuçları veren numunelerin silis modülü 0.7 ve sodyum oksit içeriği %7 olan numuneler olduğu belirlenmiştir. En iyi sonuçları veren bu karışım harç fazı için esas alınmıştır. Bu karışımdan üretilen numuneler 3 farklı kür ortamına tabi tutulduktan sonra, basınç dayanımı değerleri (3, 7, 28 ve 90 günlük) tespit edilmiş ve mikroyapıları incelenmiştir.

### **4.2.1. Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ile ilgili bulgular**

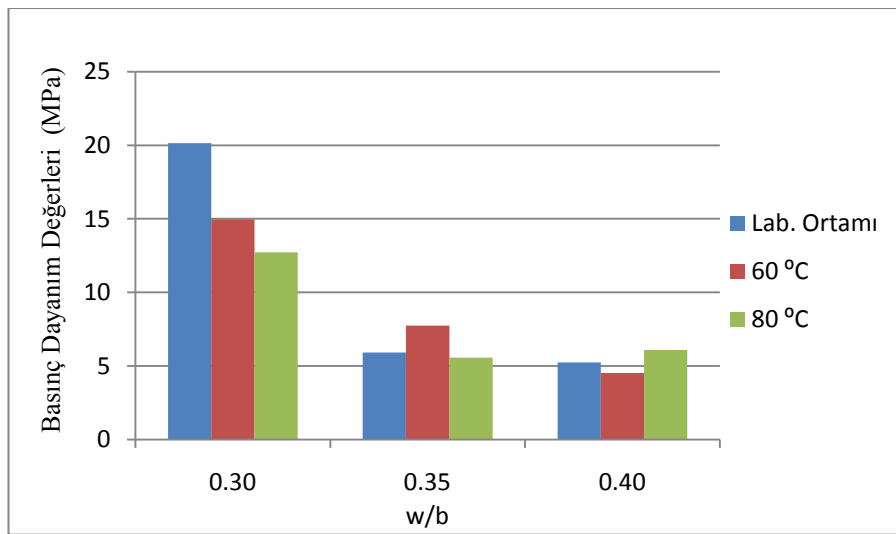
Farklı karışım oranında ve kür şartlarında hazırlanan harç numunelerine, Materyal ve Yöntem bölümünde belirtildiği gibi basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Farklı w/b (su/bağlayıcı) ve kür şartlarında üretilen geopolimer harç numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri Çizelge 10'da verilmiştir. Bu karışımlardan w/b oranı 0.30 olan numunelerden, diğer karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek basınç dayanım değerleri laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde görülmüştür (Şekil 31).

w/b oranı 0.30 olan laboratuvar ortamındaki bekletilen numunelerde 3 günlük basınç dayanım değerlerini referans kabul edildiğinde, w/b oranı 0.30 olan laboratuvar ortamında bekletilen geopolimer harç numunelerde 7 günlük basınç dayanımı değerinde %15, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde ise, %52 oranında artış gözlenmiştir. Buna karşın, w/b oranı 0.35 olan laboratuvar ortamında bekletilen geopolimer harç numunelerde 7 günlük basınç dayanımı değerinde %60, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde ise, %59 oranında azalma gözlenmiştir. Ayrıca w/b oranı 0.40 olan 80 °C sıcaklıkta bekletilen geopolimer harç numunelerde ise 28 günlük basınç dayanımı değerinde %75 oranında azalma gözlenmiştir.



Çizelge 10. Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerleri

w/b oranı	Kür şartı	Basınç dayanımı (MPa)			
		3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
0.30	Lab. Ortamı	15.20	17.52	22.04	20.15
	60 °C	12.17	16.60	14.84	14.96
	80 °C	8.80	14.00	12.87	12.73
0.35	Lab. Ortamı	5.23	6.06	6.30	5.90
	60 °C	3.86	5.12	5.86	7.73
	80 °C	2.94	4.42	5.28	5.56
0.40	Lab. Ortamı	2.07	3.60	4.80	5.23
	60 °C	1.24	2.66	4.63	4.52
	80 °C	1.76	3.48	3.75	6.08



Şekil 31. Farklı w/b oranına sahip geopolimer harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri

Isabella *et al.*, (2005) yaptıkları çalışmada kum içermeyen metakaolin esaslı geopolimerik bağlayıcıda karışımın basınç dayanımının zamanla arttığı görülmüştür. Orta ve ince boyutta tane çapındaki geopolimer numunelerle, kum içermeyen geopolimer numunelerin basınç dayanım değerlerine kıyasla daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. İri agregalı geopolimer beton numunesinde 1 günlük basınç dayanımının 22.7 MPa olduğu ve zamanla azaldığı görülmüştür. Bu durumun nedeni, iri agreganın geopolimer hamurunun etkili bir şekilde bağlanması için yeterli ara yüzey sağlamadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece daha düşük basınç dayanımı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, orta tane çaplı geopolimer numunelerde de 1. gün ile 7. gün arasında yaklaşık 7 MPa'lık basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir.

Skvára *et al.*, (2003) tarafından yapılan çalışmada kullanılan uçucu küllü geopolimerler, iri ve ince taneli agregalar, uçucu küller ve alkali çözeltiler gibi karışımlarla inceleme yapılmıştır. Silis modulünün 0.6 ile 1 arası elde edilmesi için bir miktar NaOH eklenmiştir. Na<sub>2</sub>O yoğunluğu uçucu kül ağırlığının %7-10 arası değişmektedir. 24 saat 70 °C 'de kür edilmiş numunelerin 7 günlük basınç dayanımı 52 MPa iken, 28 günlük basınç dayanımı 51.3 MPa elde edilmiştir. Bununla beraber, 24 saat 80 °C'de kür edilmiş numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri 53.1 MPa iken, 28 günlük basınç dayanım değeri azalarak 51.9 MPa basınç dayanım değerine düşmüştür.

Jiang (1997) alkali aktive edilmiş çimentolu malzemeler üzerine kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Farklı aktivatörlerin cüruflu çimento harçların basınç dayanımına etkisini incelemiştir. En etkili aktivatörün 2M sodyum silikat olduğu tespit edilmiştir. Wang ve Scrivener'in (1995) yaptıkları çalışmada çözünür sodyum ve potasyum silikat solüsyonunun en yüksek dayanımı verdiğini belirtmişlerdir (Sağlık, 2009).

Jones *et al.*, (2011) çalışmalarında, MK-750 tabanlı (Ca, K)-Poli (sialate-siloxo) geopolimer çimento ile ön ürün karıştırıldıktan sonra, harçlar hazırlanmıştır. 2 gün sonra, nihai basınç dayanımı değerinin %90'ına ulaşmıştır ve 28 gün içinde yaklaşık

20 MPa basınç dayanımı değeri sağlanmıştır. Böylece, kalsine kaolinitik kil bazlı bağlayıcı tabanlı geopolimer madde üretilmiştir.

Topçu ve Toprak, (2009) yaptıkları çalışmada termik santral taban külünün (TK) alkalilerle aktive edilerek hafif harç üretiminde kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öğütülmüş TK sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) alkali çözeltileri kullanılarak çimentosuz harç karışımları üretilmiştir. Numunelere 20 saat 75°C’de etüvde ve laboratuvarında 20°C’de havada kür olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. En iyi numune TK’nın sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali çözeltileri ile aktivasyonu ve oda sıcaklığında (20°C) kür yapılarak elde edilmiştir. Üretilen en iyi harç numunesinin birim ağırlığı 1.59 gr/cm<sup>3</sup>, basınç dayanımı 18.51 MPa ve su emmesi %6.58 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada kullanılan agregalar genişterek geopolimerin yüksek sıcaklık direncini düşürdüğü belirlenmiştir.

Vargas *et al.*, (2011) tarafından yapılan çalışmada uçucu küller, elektrik enerji santrali üretiminde kömür mineralinden elde edilmiştir. Bu çalışmadaki amaç alkali aktivasyonlardan kullanarak uçucu kül tabanlı geopolimerin inşaat projelerindeki mekanik özellikleri üstünde durmaktır. Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> molar oranı 0.20, 0.30 ve 0.40 ve 7, 28, 91, 180 günlük 3 farklı numune incelenmiştir. Molar oranı 0.40 olan harç numuneleri en yüksek basınç dayanımı değerini vermiştir.

Chindaprasirt *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, akışkan yataklı küllerin, pulverize kömür yanmalı uçucu küllerin kimyasal yapıları incelenerek, geopolimer malzemelerin oluşturulmasını amaçlamışlardır. FBC uçucu külleri ve PCC uçucu külleri, alkali aktivatörlerle karıştırılarak geopolimer harçlar oluşturulmuştur. Alkali aktivatör olarak, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum silikat ve 10 M sodyum hidroksit kullanılmış ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı 1.5, 65°C kür edilip 48 saat bekletilmiştir. FBC uçucu külleri ve PCC uçucu külleri farklı oranlarda kullanılmış, fakat 60:40 oranında kullanılan uçucu küllerin en iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha sonra basınç dayanımları test edilmiştir. FBC ve PCC uçucu külleriyle oluşan geopolimer harçların 35–44 MPa arasında basınç dayanımı

gösterdiği gözlenmiştir. Ek olarak, ince FBC uçucu küllerin, kaba FBC uçucu küllere göre, yüksek reaksiyon derecesi ve yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Allahverdi *et al.*, (2008) çalışmalarında Taftan dağı civarında ki pomza tipi doğal puzolanı ve aktivatör olarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün kombinasyonlarını kullanarak geopolimer çimento hazırlamışlardır. Sodyum silikatlara, sodyum hidroksit ekleyerek, silika modülü 0.52, 0.60 ve 0.68 olan üç değişik alkali aktivatör hazırlanmıştır. Sodyum oksit içeriği kuru bağlayıcı ağırlığının %4, 7 ve 10 oranında 3 değişik geopolimer çimento sistemleri oluşturulmuştur. Su/çimento oranı 0.36, 0.40 ve 0.44 olarak alınmıştır. Çalışma sonucunda; NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün uygun oranlarda kullanılmasıyla Taftan puzolanın aktive edilebileceğini; uygun işlenebilme ve 28 günlük basınç dayanımı olarak 63 MPa'ı sağlayan geopolimer çimento formasyonuna dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir. Doğal puzolan esaslı geopolimer çimentonun kalitesinin alkali aktivatörün bileşimine, su/bağlayıcı oranına ve doğal puzolanın kalitesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Rattanasak *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada, uçucu küllle birlikte sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi karıştırılarak geopolimer üretmişlerdir. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı 3.2 olan ve 5, 10 ve 15 M yoğunluklarda sodyum hidroksit içeren çözeltiler hazırlanmıştır. Geopolimer numuneler 65°C, 48 saat kür edilmiş ve bunların mikroyapıları ve basınç dayanımları araştırılmıştır. Sonuç olarak, bu özelliklerin sodyum hidroksit yoğunluğuna ve karıştırma süresine bağlı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanımı değeri 70 MPa olarak, çözelti oranları (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH) 1 ve 10 M yoğunlukta NaOH çözeltilerinde tespit edilmiştir.

Temuujin *et al.*, (2010) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül tabanlı geopolimer harçların agregalar kullanarak fiziksel ve mekaniksel özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca uçucu kül tabanlı geopolimer harçlardaki basınç dayanımları, agrega ve bağlayıcı malzemelerin arasındaki bağ kuvvetine bağlıdır. Harçlar içinde agrega oranının artması geopolimerizasyonu azalttığı fakat basınç dayanımı olarak fazla bir etkisi

olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak geopolimerlerde alkali miktarının artmasıyla basınç dayanımında arttığı gözlenmiştir.

Thakur ve Ghosh, (2009) yaptıkları çalışmada, alkali içeriğinin artmasıyla, basınç dayanımının da düzenli olarak arttığı görülmüştür. Alkali içeriği yüksek olan numunelerde basınç dayanımı değeri 48.20 MPa olarak bulunmuştur.

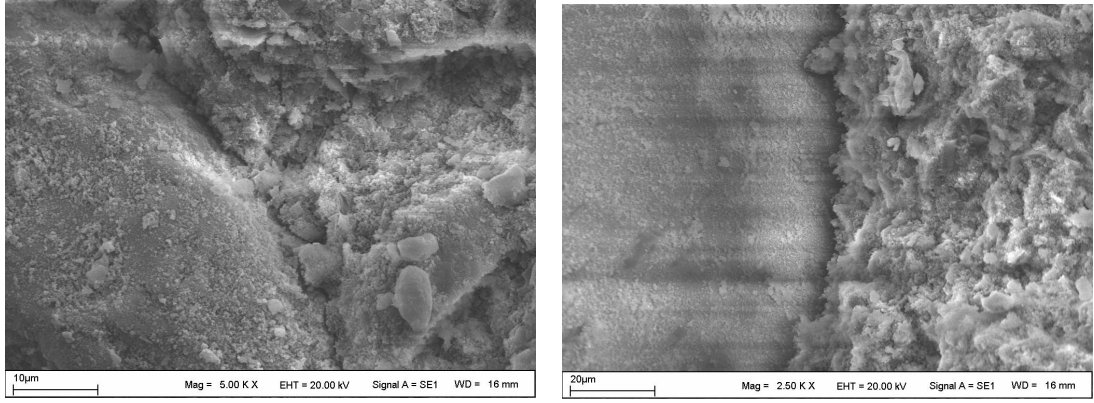
Maragkos *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada, geopolimer olarak kullanılan, metalürjik tesislerden elde edilen ferronikel atıkları kullanmışlardır. Geopolimerlerin silika yoğunluklarının basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, başlangıçta 0.7 M yoğunluğa sahip geopolimerlerin basınç dayanım değeri 48 MPa olarak tespit edilmiştir. 4 M yoğunluğa sahip silika ve 7 M sodyum hidroksit kullanılarak oluşturulan geopolimerlerin basınç dayanım değerleri ise 2.5 kat artarak 120 MPa olarak tespit edilmiştir.

Zivica *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, düşük sıvı/katı oranının bileşimindeki etkisini ve sertleşmiş metakaolin geopolimer harçların, basınç sıkıştırması altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, metakaolin geopolimer harçların, düşük sıvı/katı oranı ve basınç sıkıştırması altında, daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

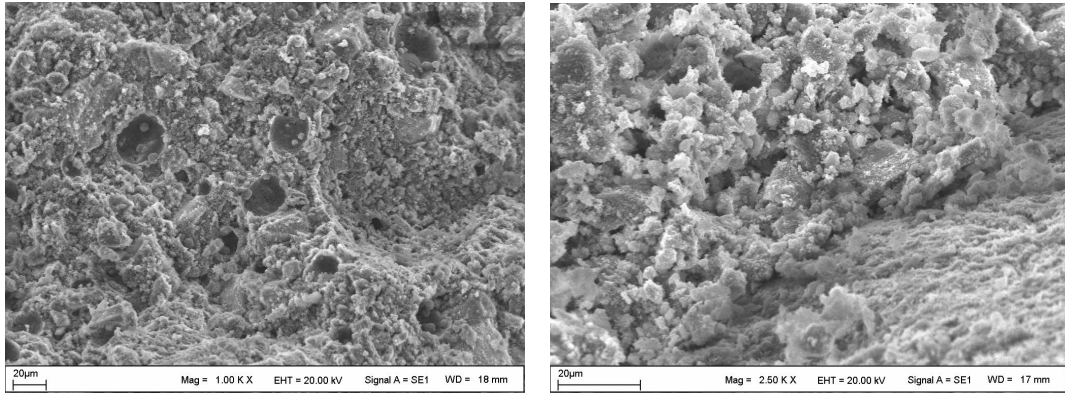
#### **4.2.2. Geopolimer harç numunelerin mikroyapı özellikleri**

Tarayıcı Elektron mikroskopu ile harç örneklerin farklı yerlerinden alınan SEM görüntüleri ile harçların mikroyapı analizleri yapılmıştır. w/b oranı 0.30 olan laboratuvar ortamında kür edilen harç numunelerin SEM görüntüleri Şekil 32'de verilmiştir. Şekil 33'te görüldüğü gibi, oluşan geopolimer çok yoğun bir faz oluşturmuş ve agrega ile iyi bir aderans sağlamıştır. w/b oranı 0.40 olan ve 80°C'de kür edilen harç numunelerin SEM görüntüleri ise Şekil 33'te verilmiştir. Bu

numunelerin SEM görüntüsüne dikkat edildiğinde çeşitli boyutlarda boşlukların hamur fazı içinde olduğu görülmektedir. Bu boşlukların basınç dayanımının azalmasında önemli bir etki oluşturduğu düşünülmektedir.



Şekil 32. w/b oranı 0.30 olan laboratuvar ortamında kür edilen harç numunelerin SEM görüntüleri

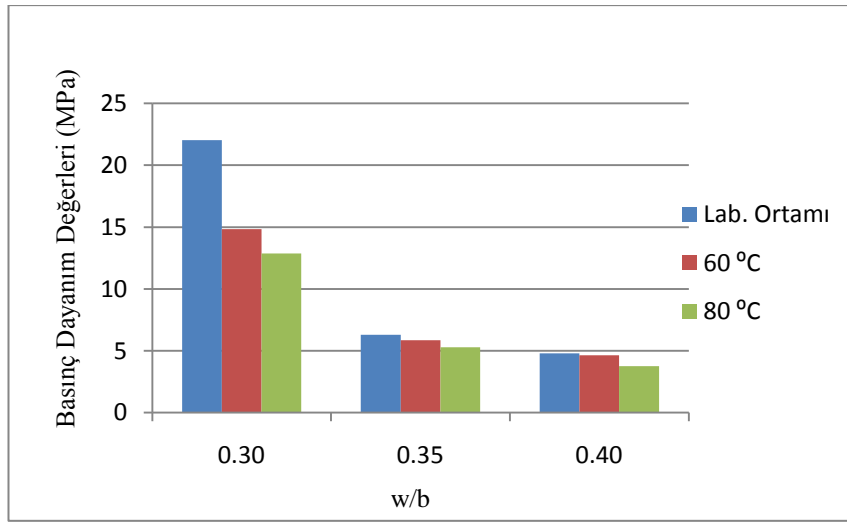


Şekil 33. w/b oranı 0.40 olan 80 °C kürdeki harç numunelerin SEM görüntüleri

Thakur ve Ghosh, (2009) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı, alkali içeriğinin, silika içeriğinin, karışım oranlarının etkisi geopolimer harçların mikroyapıları incelenmiştir. Ayrıca, geopolimer numunelerin SEM ve XRD mikroyapıları incelenmiş ve amorf yapı olan alümino-silikatların basınç dayanımını geliştirdiği gözlenmiştir.

#### 4.2.3. Geopolimer harç numunelerinde w/b oranının basınç dayanım değerlerine etkisi

Şekil 34'te görüldüğü gibi w/b oranı azaldıkça 28 günlük basınç dayanım değerleri artmıştır. w/b oranı azaldıkça, geopolimer harç numunelerdeki su miktarı azaldığından ve dolayısıyla harç içindeki alkali aktivatörlerin yoğunlukları artmış olup, bu yoğunluk artışının basınç dayanım değerlerinin artmasına yol açtığı düşünülmektedir.



Şekil 34. Farklı kür şartlarına sahip geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

#### 4.3. Agrega Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma

Agregaların organik madde içeriği basit bir asit-baz reaksiyonu ile belirlenmiştir. Konsantrasyonu %3 olan NaOH eriği ile karıştırılan agregalar, 24 saat bekletildikten sonra suyun rengi esas alınmıştır. Kullanılan agregalar üzerinde ayrı ayrı yapılan deneylerde, malzeme üzerinde kalan sıvılarda herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir. TS 1744-1'e göre sıvının renksiz veya açık sarı olması durumunda zararlı oranda organik madde bulunmadığına, koyu sarı, kahverengi veya kırmızımsı bir renk alması durumunda ise zararlı organik madde bulunduğu karar verilir.

Böylelikle çalışmada kullanılan agregaların beton üretimi için organik madde içeriği açısından uygun olduğu gözlenmiştir.

Dere agregası ve kırma kum agrega için özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneyde kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve 24 saatlik su emme oranları tayini iri ve ince agrega için ayrı ayrı yapılmıştır. TS 3526 'ya göre yapılan bu deneyde elde edilen sonuçlar Çizelge 11 'de verilmiştir.

Çizelge 11. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayin deney sonuçları

Özellik	Dere Agregası			Kırma Kum Agregası	
	0-2	2-4	4-8	0-2	2-4
Kuru özgül ağırlık	2.34	2.55	2.60	2.35	2.57
Doymun kuru yüzey özgül ağırlık	2.40	2.60	2.65	2.42	2.61
Görünen özgül ağırlık	2.57	2.62	2.68	2.59	2.64
Nem oranları, (%)	-2.6	-2.0	-1.9	-3.0	-1.6

#### 4.4. Geopolimer Beton Deneyleri ile ilgili Bulgular ve Tartışma

Materyal ve Yöntem bölümünde anlatıldığı gibi basınç dayanımı, sülfat etkisinde ağırlığı, basınç dayanımı ve görsel görünümü gibi bazı sertleşmiş beton deneyleri yapılmış ve bulunan sonuçlar aşağıda başlıklar altında ayrı ayrı incelenmiştir.

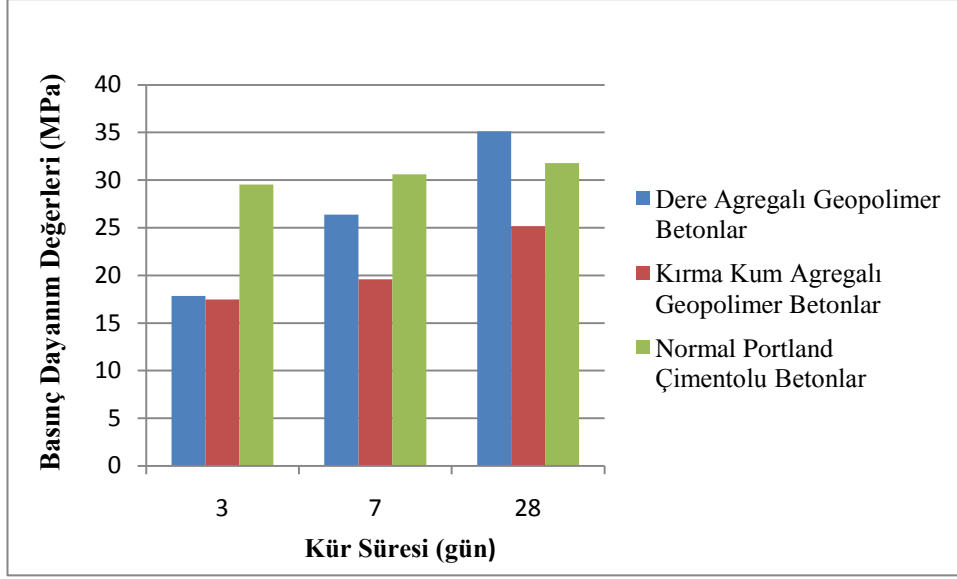


#### 4.4.1. Beton numunelerinin basınç dayanımı ile ilgili bulgular

Dere agregalı, kırma kum agregalı geopolimer beton numuneler ve normal Portland çimentolu beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır. 3 günlük basınç dayanım değerleri referans kabul edildiğinde, dere agregalı geopolimer betonlarda 7 günlük basınç dayanımı değerinde %48, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde ise, %97 oranında artış gözlenmiştir. Kırma kum agregalı betonlarda ise 7 günlük basınç dayanımı değerinde %12, 28 günlük basınç dayanımı değerinde de %44 oranında artış gözlenmiştir. Buna karşın, normal Portland çimentolu betonların 7 günlük basınç dayanımı değerlerinde %4, 28 günlük basınç dayanımı değerinde ise %8 oranında artış gözlenmiştir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere beton numunelerin kür süreleri arttıkça, basınç dayanımları da artmıştır. Ayrıca, geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı değeri artışı, normal Portland çimentolu betonlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Beton numunelerinin basınç dayanım değerleri Çizelge 12’de verilerek Şekil 35’te gösterilmiştir.

Çizelge 12. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri

Kür Süresi	Dere Agregalı Geopolimer Beton Numuneler (MPa)	Kırma Kum Agregalı Geopolimer Beton Numuneler (MPa)	Normal Portland Çimentolu Beton Numuneler (MPa)
3 gün	17.84	17.46	29.52
7 gün	26.36	19.58	30.61
28 gün	35.10	25.18	31.80



Şekil 35. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri

Skvára *et al.*, (2003) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül kullanılmıştır. Geopolimerler, iri ve ince taneli agregalar, uçucu küller ve alkali çözeltiler gibi karışımlar üzerinde incelenmiştir. Silis modülü 0.6 ile 1.6 arası elde edilmesi için bir miktar NaOH eklenmiştir. Na<sub>2</sub>O yoğunluğu uçucu kül ağırlığının %4-10 arası değiştirilmiştir. Aynı zamanda yüksek fırın cürufu, alçıtaşı, kireçtaşı gibi kalsiyum içeren malzemeler beton karışımlara ilave edilmiştir. Priz süresi sonunda harç karışımları laboratuvar ortamında 28 gün boyunca %40 bağıl nemde kür edilmiştir. Örnekler daha sonra Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> ve NaCl çözeltilerine bırakılarak kür edilmiştir. Uçucu küllü geopolimerler ilk 28 günde 15 ile 70 MPa arasında dayanım gösterirken, 360 günün sonunda 100-160 MPa basınç dayanıma ulaşılmıştır.

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

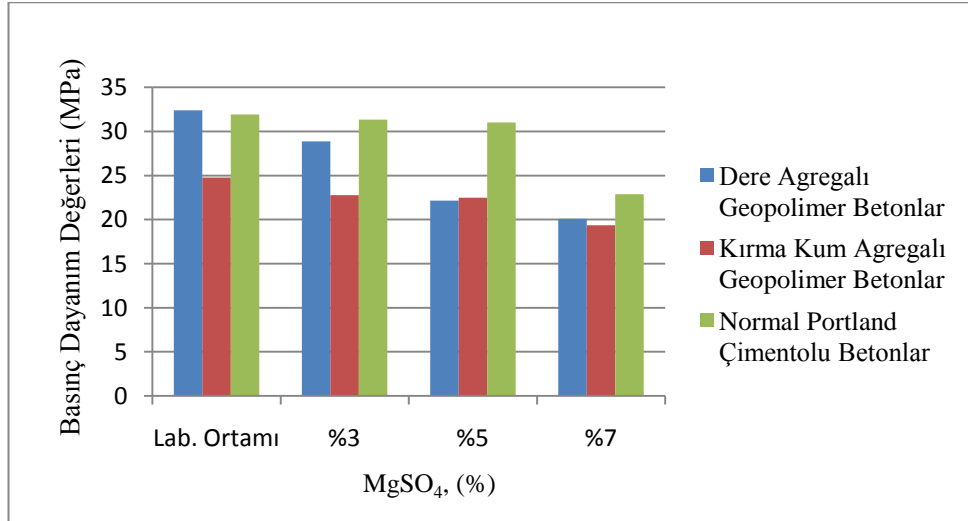
Brough ve Atkinson (2002)'a göre 20°C ve 80°C'de 12 saat kürde sodyum silikat ile alkali aktivasyonu gerçekleştirilen cürufun sırasıyla 7 ve 72 MPa basınç dayanımı değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Özellikle kür sıcaklığı 20°C'den 80°C'ye çıkarıldığında basınç dayanımının 7 MPa'dan 72 MPa'a çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden aktivasyon metodundan sonra puzolanların özelliklerinin geliştiği sonucu üzerinde bir fikir birliği oluşmuştur.

#### **4.4.2. Beton numunelerinin sülfat etkisinde basınç dayanımı ile ilgili bulgular**

Dere agregalı, kırma kum agregalı geopolimer beton numuneler ve normal Portland çimentolu beton numuneler %3, %5 ve %7 magnezyum sülfat çözeltileri içerisinde 90 gün bekletilerek sülfat etkisinde basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Her karışımdan basınç dayanımı için üç adet 50x50x50 mm küp numune üretilmiş ve bu numuneler farklı yoğunluklara sahip çözeltilere yerleştirilmiştir. Daha sonra 90 gün bu çözeltiler içerisinde beton numuneler bekletilmiş ve sonuç olarak bu üç numunenin ortalaması alınmıştır. 90 gün laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde basınç dayanım değerleri referans kabul edildiğinde, dere agregalı geopolimer betonlarda %3 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen numunede basınç dayanımı değerinde %11, %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen numunede basınç dayanımı değerinde %32, %7 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen numunede basınç dayanımı değerlerinde ise, %38 oranında azalma gözlenmiştir. Kırma kum agregalı betonlarda ise %3 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen numunede basınç dayanımı değerinde %8, %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen numunede basınç dayanımı değerinde %9, %7 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen numunede basınç dayanımı değerlerinde ise, %22 oranında azalma gözlenmiştir. Buna karşın, normal Portland çimentolu betonlarda %3 ve %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltileri içerisinde bekletilen numunelerde önemli bir basınç kaybı gözlenmemiş, ancak %7 MgSO<sub>4</sub> çözeltileri içerisinde bekletilen numunelerde yaklaşık %28 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere beton numunelerin magnezyum sülfat içeriği arttıkça, basınç dayanımı değerlerinde azalma görülmüştür. Beton numunelerinin basınç dayanım değerleri Çizelge 13'te verilerek Şekil 36'da gösterilmiştir.

Çizelge 13. Beton numunelerin  $MgSO_4$  çözeltisi içerisinde 90 günlük basınç dayanım değerleri

Kür Koşulu	Dere Agregalı Geopolimer Beton Numuneler (MPa)	Kırma Kum Agregalı Geopolimer Beton Numuneler (MPa)	Normal Portland Çimentolu Beton Numuneler (MPa)
Lab. Ortamı	32.38	24.76	31.92
% 3 $MgSO_4$	28.88	22.78	31.34
% 5 $MgSO_4$	22.17	22.49	31.01
% 7 $MgSO_4$	20.08	19.35	22.89



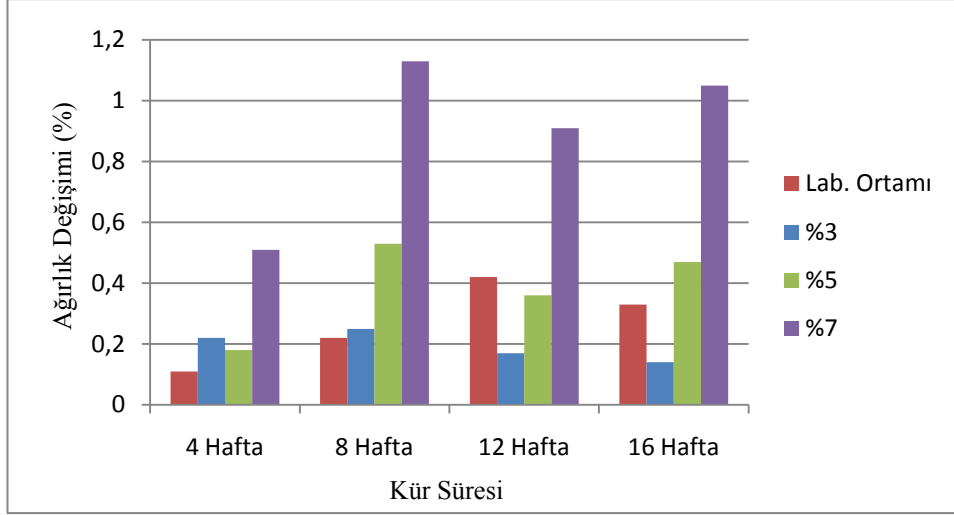
Şekil 36. Beton numunelerin laboratuvar ve farklı magnezyum sülfat çözeltileri içerisinde 90 günlük basınç dayanım değerleri

#### 4.4.3. Beton numunelerinin sülfat etkisinde ağırlık değişimi ile ilgili bulgular

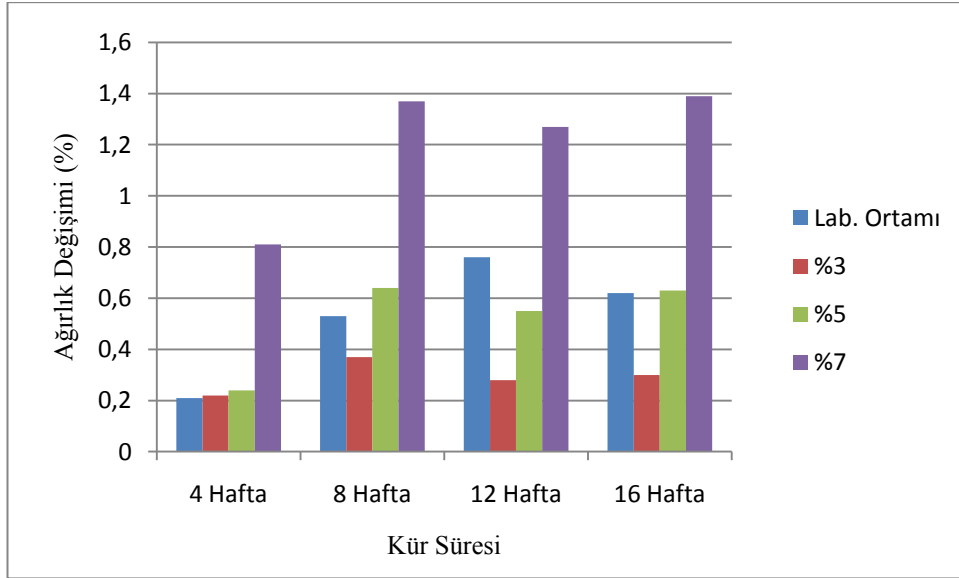
Beton numunelerinin farklı konsantrasyonlara sahip çözeltiler içinde kütle ağırlıkları incelenmiştir. Bütün numunelerde kütle artışı olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni beton numuneler sülfat etkisinde kütle artışlarının yüzeylerindeki boşlukları dolduran pul pul veya iğne şeklindeki beyaz tortulardan kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca geopolimer beton numunelerde sülfat etkisinde kütle artışının küçük değerlerde olduğu görülmüştür. 16 hafta sonunda en fazla kütle artışı %7 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerinden elde edilmiştir. Beton numunelerin ağırlık değişim değerleri Çizelge 14’te verilerek Şekil 37, 38 ve 39’da gösterilmiştir.

Çizelge 14. Beton numunelerin MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde ağırlık değişimleri

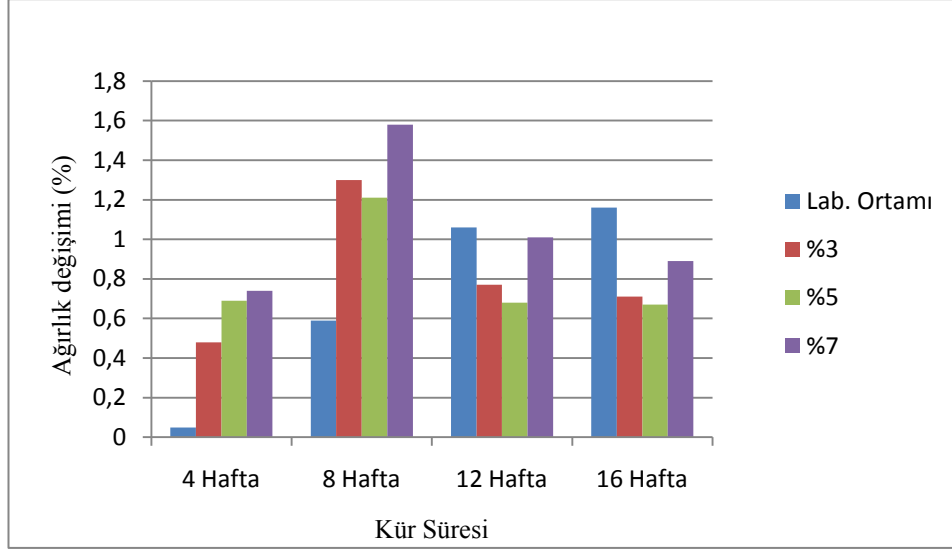
		4 hafta	8 hafta	12 hafta	16 hafta
Dere Agregalı Geopolimer Beton Numuneler	Lab. Ort.	0.11	0.22	0.42	0.33
	%3 MgSO <sub>4</sub>	0.22	0.25	0.17	0.14
	%5 MgSO <sub>4</sub>	0.18	0.53	0.36	0.47
	%7 MgSO <sub>4</sub>	0.51	1.13	0.91	1.05
Kırma Kum Agregalı Geopolimer Beton Numuneler	Lab. Ort.	0.21	0.53	0.76	0.62
	%3 MgSO <sub>4</sub>	0.22	0.37	0.28	0.30
	%5 MgSO <sub>4</sub>	0.24	0.64	0.55	0.63
	%7 MgSO <sub>4</sub>	0.81	1.37	1.27	1.39
Normal Portland Çimentolu Beton Numuneler	Lab. Ort.	0.05	0.59	1.06	1.16
	%3 MgSO <sub>4</sub>	0.48	1.30	0.77	0.71
	%5 MgSO <sub>4</sub>	0.69	1.21	0.68	0.67
	%7 MgSO <sub>4</sub>	0.74	1.58	1.01	0.89



Şekil 37. Dere agregalı geopolimer beton numunelerinin farklı yoğunlukta MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde zamana bağlı ağırlık değişimleri



Şekil 38. Kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerinin farklı yoğunlukta MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde zamana bağlı ağırlık değişimleri



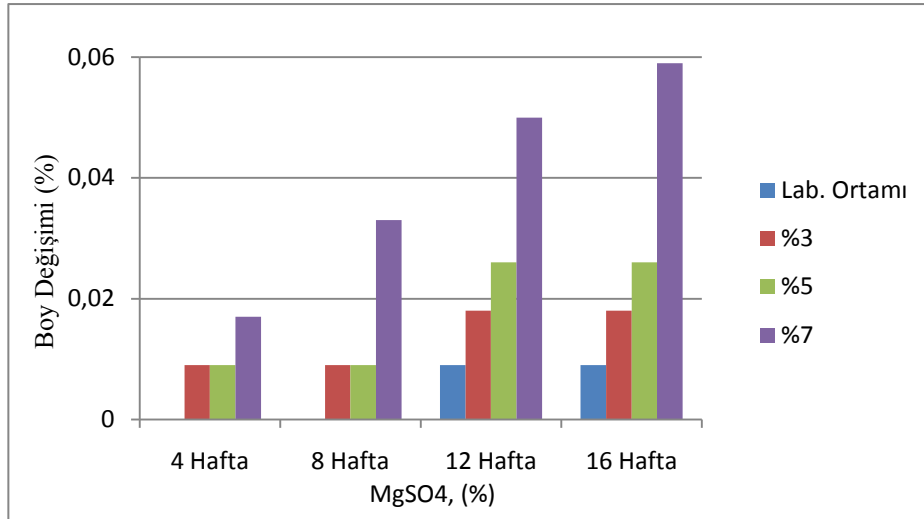
Şekil 39. Normal Portland çimentolu beton numunelerin farklı yoğunlukta  $MgSO_4$  çözeltisi içerisinde zamana bağlı ağırlık değişimleri

#### 4.4.4. Beton numunelerinde sülfat etkisinde genleşme ile ilgili bulgular

Geopolimer beton numunelerin ve normal Portland çimentolu betonların farklı magnezyum sülfat çözeltileri içerisindeki boy değişimleri incelenmiştir. Genel olarak numunelerin boy değişimleri zamana bağlı olarak artmıştır. 16 hafta sülfata maruz bırakılan geopolimer beton numunelerde boy değişimleri incelenmiş ve Portland çimentolu betonlara göre daha fazla boy değişimi olduğu tespit edilmiştir. Beton numunelerin genleşme değerleri Çizelge 15’te verilerek Şekil 40, 41 ve 42’de gösterilmiştir.

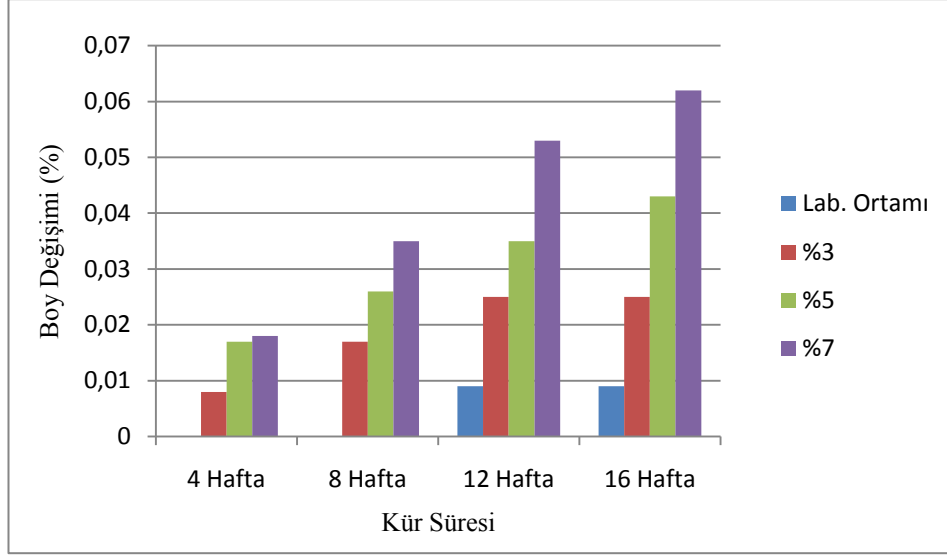
Çizelge 15. Beton numunelerin MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde genleşmesi

		4 hafta	8 hafta	12 hafta	16 hafta
Dere Agregalı Geopolimer Beton Numuneler	Lab. Ort.	0	0	0.009	0.009
	%3 MgSO <sub>4</sub>	0.009	0.009	0.018	0.018
	%5 MgSO <sub>4</sub>	0.009	0.009	0.026	0.026
	%7 MgSO <sub>4</sub>	0.017	0.033	0.050	0.059
Kırma Kum Agregalı Geopolimer Beton Numuneler	Lab. Ort.	0	0	0.009	0.009
	%3 MgSO <sub>4</sub>	0.008	0.017	0.025	0.025
	%5 MgSO <sub>4</sub>	0.017	0.026	0.035	0.043
	%7 MgSO <sub>4</sub>	0.018	0.035	0.053	0.062
Normal Portland Çimentolu Beton Numuneler	Lab. Ort.	0.009	0.009	0.017	0.017
	%3 MgSO <sub>4</sub>	0.008	0.017	0.025	0.034
	%5 MgSO <sub>4</sub>	0.017	0.025	0.033	0.042
	%7 MgSO <sub>4</sub>	0.026	0.043	0.069	0.086

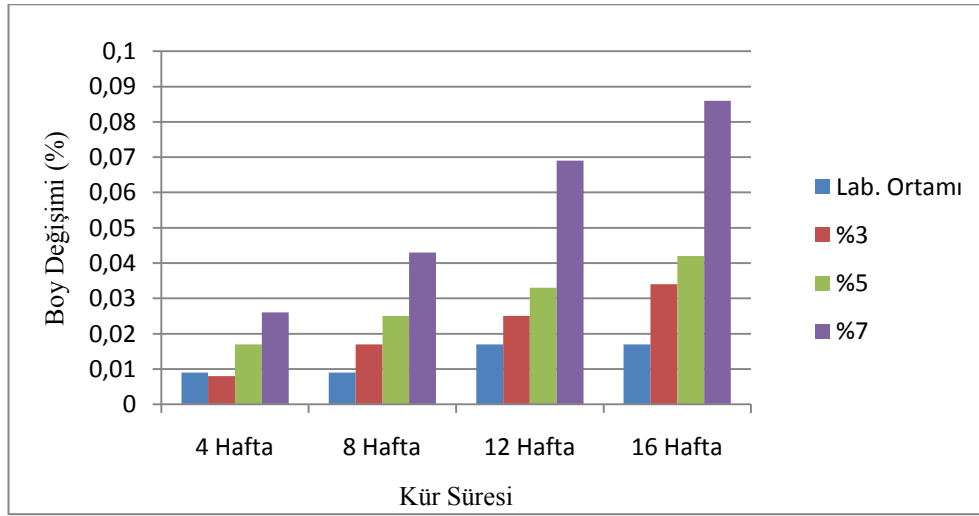


Şekil 40. Dere agregalı geopolimer beton numunelerin farklı yoğunlukta MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde genleşmesi





Şekil 41. Kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerin farklı yoğunlukta  $MgSO_4$  çözeltisi içerisinde genişmesi



Şekil 42. Normal Portland çimentolu beton numunelerin farklı yoğunlukta  $MgSO_4$  çözeltisi içerisinde genişmesi

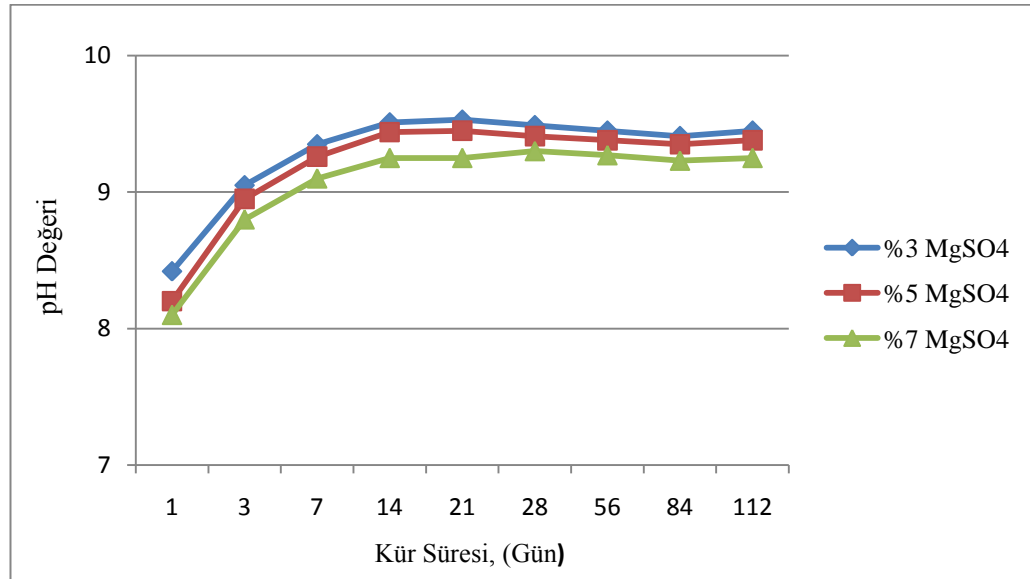
#### 4.4.5. Beton numunelerde sülfat etkisinde pH değeri ile ilgili bulgular

Beton numuneler %3, %5 ve %7  $MgSO_4$  çözeltisi içerisinde bekletilmiş ve zamana bağlı olarak pH değerlerinin değişimleri incelenmiştir. 1. gün %5  $MgSO_4$  çözeltileri

içerisinde bekletilen numunelerde pH değerleri 8.2 iken, 21. günde maksimum değere ulaşarak, pH değeri 9.45 elde edilmiştir. %3 MgSO<sub>4</sub> çözeltileri içerisinde bekletilen numunelerde de 21. güne kadar pH değeri artmış, daha sonra bir azalma gözlenmiş ve 112. günün sonunda sabit bir değere ulaşmıştır. Sonuç olarak, magnezyum sülfat çözeltilisinin içeriği arttığında pH değerinde azalma gözlenmiştir. Beton numunelerin pH değerleri Çizelge 16’da verilerek Şekil 43’te gösterilmiştir.

Çizelge 16. Beton numunelerin MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde pH değişimi

pH Değerleri									
Kür koşulları	1 Günlük	3 Günlük	7 Günlük	14 Günlük	21 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	84 Günlük	112 Günlük
%3	8.42	9.05	9.35	9.51	9.53	9.49	9.45	9.41	9.45
%5	8.20	8.95	9.26	9.44	9.45	9.41	9.38	9.35	9.38
%7	8.10	8.80	9.10	9.25	9.30	9.30	9.27	9.23	9.25



Şekil 43. Beton numunelerin MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde farklı kür sürelerinde pH değişimi

#### 4.4.6. Beton numunelerinde sülfat etkisinde görsel görünümü ile ilgili bulgular

Beton numuneler %3, %5 ve %7 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilmiş ve görsel olarak laboratuvar ortamındaki numunelerle karşılaştırılmıştır. Sülfat çözeltileri içerisinde 90 gün bekletilen beton numunelerde görsel görünümü olarak önemli bir değişiklik olmamıştır (Şekil 44).



Şekil 44. 90 gün magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan beton numuneler

#### 4.4.7. Beton numunelerin sülfat etkisindeki yapılan çalışmaları ve bulguları

Bakharev (2005) yaptığı çalışmada, uçucu küllü yapılan geopolimer malzemelerin sülfata karşı dayanıklılığını incelemiştir. %5 magnezyum sülfat ve %5 sodyum sülfat karıştırarak 5 ay boyunca geopolimer malzemeleri bekletmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.30 ve sodyum içeriği ise %8–9 arası alınarak farklı geopolimer malzemeler üretilmiştir. Ayrıca Portland çimentolu numunelerde dökülmüştür. Bu numunelerin sülfat içerisinde ağırlık değişimleri ve basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak geopolimer malzemelerin önemli bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca geopolimer malzemelerin Portland çimentolu betonlara göre daha iyi basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir.

Daha yüksek alkali içerikle üretilmiş numunelerin, alkali içeriği daha düşük olan numunelerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. %8 alkali içerikli numuneler, 24 hafta sülfirik asit içerisinde kalmasından sonra %55 oranında basınç dayanımlarında azalma olmuştur (Thokchom *et al.*, 2009a).

Škvára *et al.*, (2005) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve cüruf kullanarak geopolimer harçların sodyum klorür, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri içindeki davranışını incelemiştir. Geopolimer malzemelerin bu çözeltiler içerisindeki 360, 540 ve 720 gün basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, magnezyum sülfat içerisinde bekletilen numunelerin, sodyum klorür ve sodyum sülfat içerisinde bekletilen numunelere göre daha düşük basınç dayanımları elde edildiği gözlenmiştir.

Wallah *et al.*, (2005) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve alkali aktivatör olarak, %98 saflıkta sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak, geopolimer betonlar üretmiştir. Bu çalışmada, sodyum sülfat ve sülfirik asit içerisinde boy değişimi, basınç dayanımı ve ağırlık değişimleri incelenmiştir. 24 saat küre maruz bırakılan 4, 8 ve 12 haftalık sodyum sülfat çözeltileri içerisindeki geopolimer betonların basınç dayanımları laboratuvar ortamına bırakılan numunelere göre daha yüksek sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ayrıca 12 hafta oda koşullarında bekletilen geopolimer betonların basınç dayanım değerleri, yaklaşık 55 MPa iken, sodyum sülfat çözeltileri içerisinde az düşüş gözlenirken, sülfirik asit çözeltileri içerisinde ise önemli bir düşüş göstererek yaklaşık 38 MPa'lık basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Görsel görünüş olarak sodyum sülfat çözeltisi içerisindeki 12 hafta bekletilen geopolimer numunelerde önemli bir değişiklik gözlenmezken, sülfirik asit çözeltisi içerisinde bekletilen geopolimer beton numunelerinde önemli bir aşınma gözlenmiştir. Ayrıca sodyum sülfat çözeltileri içerisinde bekletilen numunelerde %0.01'den daha az boy değişimi olduğu tespit edilmiştir. Oda koşullarında betonun birim ağırlığı 2356 kg/m<sup>3</sup>'tür. Bu değer sodyum sülfat çözeltisi içerisinde değişmemiştir. Fakat sülfirik asit çözeltileri içerisinde ise tutulan numunelerde ise kütlede azalma görülmüştür.

Betonun sülfat etkisine karşı direnci; geçirimsizlik, su/çimento oranı, çimento tipi, sülfat katyon tipi, sülfat konsantrasyonu, sülfatın etkime süresi gibi etkilere bağlıdır (Skalny vd., 2002; Neville, 2003; Cohen, 1991). Aynı çevresel şartlar için çimento tipi ve bileşimi ile geçirimsizlik betonun sülfata dayanıklılığı açısından iki ana parametredir. Betonun geçirimsizliğini azaltmak için puzolanik madde kullanımı tavsiye edilmektedir (Neville, 2003; Mehta ve Monterio, 1997). Puzolanlar sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleşerek hidrolik bağlayıcılık gösteren malzemelerdir (Topçu, 2006). Beton üretiminde kullanılan mineral maddelerin homojen olmaması, kimyasal bileşimlerinde oldukça fazla bileşik bulunması, bulunan bileşiklerin oranlarının farklılığı gibi her bir unsur sülfat ortamındaki betonun performansı üzerinde farklı etkilere neden olabilmektedir. Bu husus araştırmacıları bu konuda fazla sayıda çalışma yapmaya sevk etmektedir. Beton doğada kolaylıkla bulunabilen malzemelerin basitçe bir araya getirilmesiyle üretiliyor gibi görünmesine karşın oldukça karmaşık bir malzemedir. İstenilen tüm koşullar sağlanarak üretilen bir beton çok uzun süre özelliklerini yitirmeden hizmet verebilir (Topçu, 2006; Ustabaş, 2008).

Songpiriyakij (2006) yaptığı çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer harç numuneleri ve normal Portland çimentolu numuneler üzerinde çalışmıştır. %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde basınç dayanımı ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde boy değişimi incelenmiştir. Boy değişimi olarak geopolimer harçlarla, normal Portland çimentolu malzemeler benzer performans göstermiştir. Ayrıca geopolimer betonlar magnezyum sülfata karşı önemli bir direnç gösterdiği tespit edilmiştir.

Thokchom *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer harçların magnezyum sülfat çözeltisi içindeki performansı incelenmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Bu numuneler %10 magnezyum sülfat çözeltisinde 24 hafta bekletilmiştir. Dökülen bu numunelerin, görsel görünüş, pH değişimi, ağırlıktaki kayıp ve basınç dayanım değerindeki değişiklik incelenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer numunelerin görsel görünümü önemli bir değişiklik olmadan ve çatlak olmadan sağlam kalmıştır. Ayrıca geopolimer harçların numuneler bırakılmadan önce pH değeri 7.92 olarak tespit

edilmiştir. 18 hafta sonra önemli ölçüde artarak pH değeri 9 olarak tespit edilmiştir. Ek olarak %10 magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde ağırlıkları zamanla artmıştır. %5 Na<sub>2</sub>O içeriğine sahip numunelerde ağırlık artışı maksimum iken, %8 Na<sub>2</sub>O içeriğine sahip numunelerde ise minimum ağırlık artışı gözlenmiştir. 24 hafta boyunca sülfata maruz bırakılan numunelerde Na<sub>2</sub>O içeriği en yüksek olan numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

El-Sayed *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu kullanarak farklı sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak geopolimer malzemelerin %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde mekanik özellikleri ve pH değerlerini incelemişlerdir. Farklı oranlarda alkali aktivatör kullanarak, pH ölçümlerini yapmışlardır. %3 sodyum hidroksit ve %3 sodyum silikat kullanarak, maksimum pH değeri elde edilmiştir. En düşük pH değeri ise %2 sodyum hidroksitle üretilen numunelerden elde edilmiştir. Düşük sodyum silikat oranına sahip numunelerde düşük mekanik özellikler göstermiştir. 6 ay boyunca %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakılan numunelerde %3 sodyum hidroksit ve %3 sodyum silikat ile üretilen numunelerde maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Sonuç olarak geopolimer malzemelerin sülfata karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

Geopolimer betonların %10 sülfirik asit solüsyonu içerisinde 56 gün bekletilmesinde yapılan durabilite deneylerinde geopolimer çimentolu betonların normal Portland çimentolu betonlara kıyasla daha üstün özellikler gösterdiklerini tespit etmişlerdir. Uçucu kül esaslı geopolimerlerin uzun süreli özelliklerini araştırmak için yaptıkları çalışmada geopolimer bileşiklerin oldukça dayanıklı olduklarını göstermişlerdir. Performans üzerine yapılmış son çalışmalarda geopolimerlerin dayanım kayıplarında iyi sonuçlar verdikleri tespit edilmiştir. Uçucu kül esaslı sertleşmiş geopolimer hamurların düşük ve yüksek konsantrasyonlu sülfirik asit içerisinde korozyon mekanizmaları araştırılmış ve farklı konsantrasyonlarda farklı davranışları olduğu gözlemlenmiştir (Thokchom *et al.*, 2009a).

Sata *et al.*, (2012) yaptıkları çalışmada, linyit külü kullanarak, geopolimer harç numuneler üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmış ve 75°C 48 saat küre tabii tutulmuştur. Üretilen bu numuneler %3 sülfürik asit ve %5 sodyum sülfat çözeltileri içerisinde maruz bırakılmış ve boy değişimi, ağırlık değişimi ve basınç dayanımı incelenmiştir. Ayrıca Portland çimentolu beton numuneler üretilmiş ve geopolimer betonlarla karşılaştırılmıştır. %5 sodyum sülfat çözeltileri içerisinde maruz bırakılmış numunelerde 360 güne kadar boy değişimi incelenmiş ve en fazla boy değişimi Portland çimentolu beton numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca, %3 sülfürik asite maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi incelenmiştir. En az ağırlık değişimi uçucu küllü üretilen geopolimer harçlardan elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise 360 günün sonunda uçucu küllü üretilen geopolimer numunelerden elde edilmiştir.

Chindaprasirt *et al.*, (2012) yaptıkları çalışmada yüksek kalsiyumlu uçucu kül kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak 10 M sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. 50 mm küp kalıplar kullanılmıştır. Bu karışımlardan 5 adet geopolimer harç numune üretilmiştir. %3 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve %5 MgSO<sub>4</sub> sülfat çözeltilerine bırakılmış ve 90 ve 180 günlük basınç dayanım kayıpları incelenmiştir. Sonuç olarak, pH değeri 0.85 olan %3 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve pH değeri 9.85 olan %5 MgSO<sub>4</sub> sahip numunelerde basınç dayanım değerlerinde azalma gözlenmiştir.

Khatib ve Wild, (1998) yaptıkları çalışmada, çimentoyla birlikte farklı oranlarda (%0, 5, 10, 15, 20 ve 25) metakaolin ekleyerek 6 farklı harç karışımları oluşturulmuş ve %5 sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) çözeltisi içinde genleşmesi, basınç değişimi ve ağırlık değişimi gibi deneysel çalışmalar yapılmıştır. Harç numunelerinde genleşmesi 520 güne kadar incelenmiştir. %5, 10 oranında metakaolin eklenen harç numunelerinde 40. ve 70. günün sonunda hızlı bir genleşme göstermiştir. Fakat, %20, 25 oranında metakaolin eklenen harç numunelerinde ise önemli bir değişim göstermemiştir. Yüksek C<sub>3</sub>A'ya sahip sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen harç numunelerinin metakaolin miktarının artmasıyla basınç dayanımında artış olduğu gözlenmiştir. Ağırlık değişimi olarak bütün numunelerde artış gözlenmiş

ayrıca en fazla artış %5 oranında metakaolin eklenen harç numunelerinde görülmüştür.

Thokchom *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak geopolimer numunelerin fiziko-mekanik özelliklerini incelemiştir. Alkali aktivatör olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat uygun miktarlarda kullanılarak %8 Na<sub>2</sub>O içeriğiyle geopolimer harç numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler %10 magnezyum sülfat çözeltisi içinde 15 hafta bekletilerek, görsel görünümü, ağırlık değişimi ve basınç dayanımı değişimi incelenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmış geopolimer numunelerin fiziksel görünümünde mikroyapısına bakarak 12 hafta sonunda iğne şeklinde uzun kristal yapılar oluşmaya başlamıştır. Ayrıca ağırlık değişimi 15 hafta boyunca incelenmiş ve 9. haftada ağırlık değişimi artarak maksimum değere ulaşmıştır. Ek olarak, magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde silis dumanı katılan geopolimer hamur numunelerinde daha düşük basınç dayanımı elde edildiği tespit edilmiştir. Fakat silis dumanı katılarak oluşturulan geopolimer harç numunelerinin ise magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde daha iyi mekanik özellikler gösterdiği gözlenmiştir.

Kılınçkale (1997) yaptığı çalışmada, çimentoya ek olarak %20 oranında silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve tras eklenerek farklı karışımlar üretilmiştir. Bu üretilen harç numuneler %5 MgSO<sub>4</sub> ve HCl çözeltileri içerisinde basınç dayanımları ve ağırlık değişimleri incelenmiştir. Bütün harç numunelerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu hariç basınç dayanımlarında kontrol numunelerine göre artış gösterdiği gözlenmiştir. HCl çözeltileri içerisinde bekletilen silis dumanı ve uçucu külle üretilen harç numunelerinde ağırlık kaybı gözlenirken, diğer numunelerin ağırlığında ise artma gözlenmiştir.

Ustabaş, (2008) yaptığı çalışma sonucunda standart küre maruz betonlarda en yüksek dayanıma yüksek fırın cürufu ilaveli betonlarda rastlamıştır. Bunu sırasıyla ilk yaşlarda silis dumanı ilaveli betonlar, ilerleyen yaşlarda uçucu kül ilaveli betonlar takip etmiştir. En düşük dayanımı veren betonlar mineral katkı içermeyen betonlar



olmuştur. Magnezyum sülfat atağına maruz betonlarda yüzey yumuşamasıyla birlikte çatlak oluşumu türünde bozulmalara rastlanırken sodyum sülfat çözeltilisine maruz betonlarda yüzey yumuşaması olmaksızın benzer bozulmalara rastlanmıştır. 5°C, oda sıcaklığı ve 40°C'de magnezyum sülfat çözeltilisine maruz harç numunelerden oda sıcaklığında bekletilenler çamurumsu bir yapı gösterecek şekilde dağılmışlardır. Mineral katkıların betonun sülfat ortamında performansını artırdığı, sıcaklık etkisinin harçlarda farklı bozulma mekanizmalarına neden olduğu araştırma sonucunda tespit edilen bulgulardan birkaçıdır.

Uçucu kül esaslı geopolimer betonlar mükemmel basınç dayanımına sahiptir ve yapı uygulamaları için uygundur. Taze ve sertleşmiş betonun dayanımını etkileyen belirgin faktörler belirlenmiştir. Sertleşmiş betonun elastik özellikleri ve davranışı ve basınç dayanımı Portland çimentolu betonlarınkine benzerdir. Uçucu kül esaslı geopolimer betonlar mükemmel sülfat direncine sahiptir ve çok küçük büzülmelelere uğrarlar (Rangan *et al.*,1987).

Rattanasak *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, Tayland'ın kuzeyindeki enerji santralinden elde edilen uçucu külleri 19 µm seviyesinde öğüterek kullanmışlardır. Bu uçucu küller yüksek miktarda CaO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedir. Alkali aktivatör olarak 10 mol sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, yüksek kalsiyum içeren geopolimerlerin kimyasal karışımlar eklenmesiyle oluşturulan numunelerin priz süresi ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Kimyasal katkı olarak; kalsiyum klorit, kalsiyum sülfat, sodyum sülfat ve sakaroz kullanılmıştır. Kalsiyum klorürlü geopolimer hamurların, başlangıç ve bitiş priz sürelerini azalttığı görülmüştür. Ayrıca, sakarozun bitiş priz sürelerini geciktirdiği görülmüştür. Kimyasal katkılı uçucu kül tabanlı geopolimerlerin reaksiyon derecesinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Geopolimer harçlar üretilmiş ve vikat halkasında ASTM C191 standartlarında incelenmiştir. Geopolimer harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri ortalama 60 ve 130 dakika sürmektedir. Fakat %1 ve %2 oranlarında kullanılan CaCl<sub>2</sub> geopolimerlerin priz süresini azalttığı görülmüştür. Başlangıç priz sürelerinin 26 ila 35 dakika arasında azaldığı, bitiş sürelerinin ise 45 ile 60 dakika arasında azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca CaCl<sub>2</sub>'ün geopolimer hamurların

priz süresini hızlandırdığı, basınç dayanımına da etki ettiği tespit edilmiştir. %1 oranında CaCl<sub>2</sub> kullanılmasının basınç dayanımını artırdığı, fakat %2 oranında CaCl<sub>2</sub> kullanıldığında ise basınç dayanımını değiştirmedeği görölmüştür. Sonuç olarak 25.8 MPa basınç dayanımı göstermiştir.

Petermann *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer harçların MgSO<sub>4</sub> ve NaCl çözeltileri içindeki 1.5 yıllık performansını incelemişlerdir. Bu çalışmada, basınç dayanım kaybı ve kütle kaybı incelenmiştir. Uçucu kül tabanlı geopolimer harçların, önemli bir kütle ve basınç kaybı olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca geopolimer betonlarında, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> maruz bırakılmış ve yüzeyde bozulma çatlama gibi görsel görünümde önemli bir değişim göstermediği görölmüştür. Ayrıca rötre değişimlerinde de önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sülfat çözeltileri içinde %0.5, %1 ve %2 sülfirik çözeltileri içinde de 1 yıl bekletilmiştir. Davidovits'e geopolimer harçların %5 HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerinde bekletilmiş kütle uzunluk ve basınç dayanım değerleri incelenmiş ve önemli bir değişikliğin olmadığını tespit etmiştir.

Davidovits tarafından yapılan çalışmada geopolimer çimentoları %5 sülfirik asit ve hidroklorik asit içerikli solüsyon içine batırıldığında %5-8 oranında kütle kaybı gerçekteşmiştir. Buna karşı normal Portland çimentolar aynı ortamda tamamen tahrip olmuştur. Bokharev tarafından yapılan çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer çimentoların %5 sülfirik asit içerikli solüsyona 5 ay maruz bırakılmışlardır ve geopolimer malzemelerin normal Portland çimentosundan daha dirençli olduğunu tespit etmişlerdir (Thokchom *et al.*, 2009a).

Sumajouw *et al.*, (2004) yaptıkları çalışmada, geopolimer beton numunelerinin yüksek basınç dayanımı ve düşük kuruma rötresi gösterdiği söylenmiştir. Ayrıca geopolimer beton numunelerinin bazı sert ortamlar için olumlu bir yapı malzemesi olduğu ve sülfat saldırılarına karşı da mükemmel bir dirence sahip olduğu gözlenmiştir.

Khale *et al.*, (2007) yaptıkları çalışmada, 24 hafta sülfata maruz bırakılan numunelerde geopolimer malzemelerde boy değişimini incelemiş ve %0.02'den daha az değişim olduğu tespit edilmiştir.

Rangan yaptığı çalışmada, %5 sodyum sülfata maruz bırakılan geopolimer beton numunelerinin 1 yıl dayanıklılığını incelemiştir. 1 yıl sonunda sülfata maruz bırakılan numunelerin görsel görünümünde herhangi bir bozulma çatlama gözlenmemiştir. Ayrıca basınç dayanımında ve ağırlık değişiminde de önemli bir değişim görülmemiştir. Boy değişiminde ise %0.015'ten daha az bir değişim olduğu tespit edilmiştir.

Fernandez *et al.*, (2007) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer numunelerinin sodyum sülfat, hidroklorik asit ve iyonu giderilmiş suda dayanıklılıklarını incelemiştir. Sülfat ve iyonsuz suya bırakılan numunelerde daha iyi mekanik sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Wallah ve Rangan (2006) yaptıkları çalışmada uçucu kül tabanlı geopolimer betonların %5 sodyum sülfat çözeltileri içinde bekletilen numunelerin görsel görünümü, boy değişimi, ağırlık değişimi ve basınç dayanımı değişimleri incelenmiştir. Görsel görünüm olarak yüzey bozulması, çatlama gibi önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Boy değişiminin ise %0.015 'den daha az olduğu görülmüştür. 1 yıl sodyum sülfata maruz bırakılmış geopolimer numunelerde %1.5 ağırlık artışı gözlenmiştir. Ayrıca uçucu kül tabanlı geopolimer beton numunelerde çok az basınç dayanımı değerleri tespit edilmiştir.

Tikalsky ve Carasquillo (1992) yaptıkları çalışmada geopolimer beton numuneler ile Portland çimentolu betonların boy değişimi incelenmiştir. Boy değişiminde maksimum sınır %0.5'tir. Geopolimer beton numunelerinde %0.015 'den daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca geopolimer beton numunelerin boy değişimi Portland çimentolu beton numunelerine göre daha az değiştiği tespit edilmiştir.

Lea, (1970); Neville, (2000) yaptığı çalışmada, Portland çimentolu betonların jipsin ve etrenjit oluşmasıyla beton numunelerde çatlama ve genişleme meydana gelmektedir. Sülfat saldırılarında etrenjit ve jipsin oluşmasıyla nemden dolayı hacimlerinde %124 ve %227 oranında artış olduğu belirtilmiştir.

Mehta (1983) yaptığı çalışmada, düşük çimento hamuru ile yüksek su emmeden dolayı etrenjit oluşmuştur. Ayrıca, sülfat saldırılarında, agrega parçacıkları ve çimento hamurları arasında düşük kohezyon oluşmasından dolayı yüzey çatlama ve bozulması, betonların basınç dayanımlarında kayıplar meydana gelmiştir (Neville, 2000).

Çeşitli çalışmalarda, Portland çimentolu beton numunelere sülfat direncini iyileştirmek için uçucu kül kullanılmıştır (Malhotra and Mehta, 2002; Tikalsky and Carrasquillo, 1992; Torii *et al.*, 1995). Ayrıca bazı önemli faktörlerinden kalsiyum oksit oranı veya kalsiyum hidroksit oranı düşük olan beton numunelerinde ince gözenek yapısı ve düşük geçirgenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Thokchom *et al.*, (2010) sülfat etkisinde kütle artışlarının GH yüzeylerindeki boşlukları dolduran pul pul veya iğne şeklindeki beyaz tortulardan, kütle azalmalarının ise geopolimerden çözeltiliye alkalilerin geçişinden kaynaklandığını, sülfat etkisinde kütle artışının küçük değerlerde (%0.41-1.98) kaldığını belirtmiştir.

Song *et al.*, (2005) uçucu kül tabanlı geopolimer betonlar ile Portland çimentolu betonlar farklı hidrate ürünler oluşmaktadır. Geopolimer numunelerde oluşan ürünler sülfata karşı duyarlı değildirler. Bu geopolimer malzemelerde sülfat saldırısında etrenjit ve jipsin oluşumu gözlenmemiştir. Ancak etrenjit ve jipsin oluşumu beton içerisindeki yani uçucu kül ve agregadan gelen kalsiyumdan kaynaklandığı söylenmiştir.

Khatri *et al.*, (1997) yaptıkları çalışmada betonların sülfata karşı dayanıklılığını incelemişlerdir. Bunun sülfat direncini artırmak için su/bağlayıcı oranını sınırlayarak geçirgenliği azaltmışlardır.

Visitanupong (2009) yaptığı çalışmada, uçucu kül kullanarak üretilen geopolimer harçların sülfat etkisinde ağırlık ve basınç dayanımını incelemiştir. Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltisine bırakılan geopolimer harçlarda görsel görünüm olarak fazla bir değişiklik olmamıştır. Ancak 120 günün sonunda sülfat çözeltileri içerisinde bekletilen numunelerde küçük bir görünüm değişikliği olmuştur. 14 M ile üretilen geopolimer harçlarda basınç dayanımında 6.74 MPa azalma görülürken, Portland çimentolu harçlarda 31.53 MPa azalma görülmüştür. 10 M ile üretilen magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen geopolimer harç numunelerinde 11.84 MPa azalma görülürken, sodyum sülfat çözeltileri içerisinde bekletilen numunelerde 7.87 MPa azalma tespit edilmiştir. Sonuç olarak geopolimer harç numunelerinde Portland çimentolu harç numunelere göre daha iyi mekanik özellikler gösterdiği görülmüştür.

Thokchom *et al.*, (2009a) yaptıkları çalışmada sülfirik asit etkisine maruz bırakılmış geopolimer harçlara alkali içeriğinin etkisini gösteren deneysel verileri sunmaktadır. Geopolimer harç numuneleri F sınıfı uçucu külden sodyum hidroksit ve %5 ile %8 arasında Na<sub>2</sub>O içeren sodyum silikat solüsyonun aktivasyonu ile üretilmiştir. Numunelerin durabiliteleri %10 sülfirik asit içeren solüsyon içerisinde batırılarak değerlendirilmiştir. 24 haftanın sonunda ağırlık değişimleri %1.5 ve basınç dayanım değerinde ise %29.4 oranında azalma gözlenmiştir. Aktivatör solüsyonu içerisindeki alkali içeriğinin, sülfirik asit içerisinde olan uçucu kül esaslı geopolimerin durabilitesine önemli ölçüde etkisi olduğu saptanmıştır.

Thokchom *et al.*, (2009b) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu kül, alkali çözelti olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. F sınıfı uçucu külleri sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile karıştırılarak geopolimer bağlayıcılar üretilmiştir. Atık malzeme olan uçucu küller zengin silika ve alümina içeren ve bazı

alkalilerle kullanılarak geopolimer malzeme oluşturulabileceği görülmüştür. Bu geopolimer çimentolar, Portland çimentolara göre daha erken dayanım ve dayanıklılık göstermişlerdir. Bu çalışmada geopolimer harçlar, %10 oranında sülfürik ve nitrik asit çözeltilerine konarak, yüzey korozyonu, alkali kalıntıları, ağırlık kayıpları, basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, gözle görülür renk değişimi ya da yapısal değişiklik göstermemiştir. Numuneler, 12 haftalık asit çözeltileri içerisinde kaldıktan sonra, alkalilik özelliklerini kaybetmişlerdir. %0.81-1.64 aralığında sülfürik asit ve %0.21-1.42 nitrik asit aralıklarında çok düşük ağırlık kaybı göstermişlerdir. Numunelerin basınç dayanımı, sülfürik asit çözeltisinde %44-71 arasında, nitrik asit çözeltisinde ise %40-70 arasında azalma olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, geopolimerlerin sülfürik ve nitrik asit çözeltilerine dayanıklı olduğu belirtilmiştir.

Hekal *et al.*, (2002) yaptıkları çalışmada, Portland çimento hamurlarının %10 magnezyum sülfat içerisindeki farklı oranlarda cüruf, kalsiyum karbonat ve silikat kullanarak 60°C, kür edilen numunelerin basınç dayanım değerlerini incelemişlerdir. %40 cüruf ve %5 kalsiyum karbonat kullanılan numunelerin sülfata karşı yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Bakharev *et al.*, (2002) yaptıkları çalışmada, alkali aktivasyonlu cürufların sülfat ortamında dayanıklılığı incelenmiştir. %5 magnezyum sülfat ve %5 sodyum sülfat çözeltileri içerisinde üretilen geopolimerlerin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Basınç dayanımlarında %17 oranında azalma gözlenmiştir.

Patsikas *et al.*, (2012) yaptıkları çalışmada, beyaz çimentolu harçların %15 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve Ca(OH)<sub>2</sub> sülfat çözeltileri içerisinde 90 günlük basınç dayanım değerlerini incelemişlerdir. 4×4×16 cm lik kalıplar kullanılmıştır. Ayrıca sodyum sülfat ve kalsiyum hidroksit çözeltileri içerisinde bekletmiş ve bu harçların basınç dayanımında önemli bir dayanıklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Veiga ve Gastaldini (2010) yaptıkları çalışmada, beyaz çimento ile alkali aktiviteli yüksek fırın cürufları kullanılarak sülfat içersindeki dayanıklılıkları araştırmışlardır. Sülfat çözeltisi olarak %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmıştır. 2 yıl boyunca bu çözelti içersinde bekletilmiştir. Bu çalışmada sülfat çözeltisi içersinde basınç dayanım değerleri incelenmiş ve sonuç olarak iyi bir dayanıklılık gösterdiği tespit edilmiştir. %50 içerikli cüruf kullanılarak oluşturulan harçların yüksek sülfat direnci gösterdiği tespit edilmiştir.

Tosun ve Felekoğlu (2012) yaptıkları çalışmada, Portland çimentolara %,5 %10, %20 ve %40 farklı oranlarda kireçtaşı kullanarak oluşturulan harçların sülfat dayanıklılığını incelemişlerdir. 50×50×50 mm küpler kullanılmıştır. 1 ay laboratuvar ortamında bekletilmiş ve farklı sülfat çözeltileri içersinde Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> bekletilerek 3 ve 6 ay boyunca boy değişimi ve basınç dayanımı kaybı incelenmiştir. %40 kireçtaşı kullanılan numunelerin %60–80 oranında basınç dayanım kaybı gösterdiği tespit edilmiştir.

Bakri *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer betonlar üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit 1.5 oranında %10 Na<sub>2</sub>O içerikli geopolimer numuneler üretilmiştir. Bu numuneler 6, 12 ve 18 hafta %10 sülfürik asit çözeltisinde bekletilmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri ve işlenebilirlikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer betonların, Portland çimentolara göre daha iyi işlenebilirlik ve basınç dayanım sonuçları verdiği gözlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üretilen hamur numunelerin priz süreleri, hidrasyon ısıları, mikroyapı özellikleri, harç karışımların basınç dayanımları, beton numunelerin ise basınç dayanımları ve sülfat direnci incelenmiştir. Sonuçları en yüksek olan karışım en uygun karışım olarak seçilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1.Hamur numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Priz süreleri ve basınç dayanımı değerleri göz önüne alınarak, en iyi sonuçları veren karışımın silis modülü 0.7 ve Na<sub>2</sub>O oranı %7 olan karışım olduğu görülmüştür.
- 2.Priz başlangıç sürelerinin 60 ile 245 dakika arasında, priz bitiş sürelerinin ise 120 ile 870 dakika arasında olduğu tespit edilmiştir. En kısa priz bitiş süresi, silis modülü 0.7 ve Na<sub>2</sub>O içeriği %4 olan hamur numunelerinden elde edilmiştir.
- 3.Geopolimer hamurların hidrasyon ısılarının Portland çimentolu betonlara göre oldukça düşük çıktığı gözlenmiştir.
- 4.w/b oranı 0.30 olan harç numunelerden, diğer karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değerleri laboratuvar ortamında bekletilen harç numunelerinden elde edilmiştir.
- 5.Beton numunelerin kür süreleri arttıkça, basınç dayanımları da artmıştır. Ayrıca, geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı değeri artışının, normal Portland çimentolu betonlara göre daha fazla olduğu görülmüştür.
6. MgSO<sub>4</sub> çözeltilisinin konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımlarındaki azalma miktarı da artmıştır.
- 7.16 hafta sonunda en fazla kütle artışı %7 MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen Portland çimentolu beton numunelerinden elde edilmiştir.
- 8.16 hafta sülfata maruz bırakılan geopolimer beton numunelerde boy değişimleri incelenmiş ve Portland çimentolu betonlara göre daha az boy değişimi olduğu tespit edilmiştir.



Deneysel çalışmalar sırasında edinilen gözlemlerle aşağıdaki öneriler sıralanabilir;

- 1.Geopolimer betonların donatı içinde nasıl davranış gösterdiği araştırılabilir.
- 2.Geopolimer beton numunelerin farklı silis modüllerinde ve kür şartlarında mekanik özellikleri nasıl değiştiği daha kapsamlı biçimde araştırılabilir.
- 3.Geopolimer ve normal Portland çimentolu betonların farklı yoğunlukta asit çözeltileri içerisinde, ağırlık değişimi, genleşme ve basınç dayanım değeri araştırılabilir.
4. EFC ile birlikte farklı oranlarda uçucu kül ve silis dumanı katılarak üretilen geopolimer beton numunelerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri incelenilebilir.
- 5.Farklı atık maddelerin geopolimer bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılabilir.
- 6.Çimento ihtiyacını azaltmak ve böylece enerji tasarrufu sağlamak, atık durumdaki bu yan ürünü piyasaya kazandırmak, endüstriyel kirlenmeyi ve hava kirliliğinin azaltmada yarar sağlayacaktır.
- 7.Ayrıca soğuk hava şartlarında ve kalıbın erken alınması gereken yerlerde aktive edilen bağlayıcının hızlı priz almasından dolayı kalıp alma sürelerinin kısalması, kür maliyetlerinin azalması ve soğuk havalardan dolayı oluşan dayanım ve durabilite problemleri azaltılmış olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Abora K., Quillin K., Paine K. A., Dunster A. M., 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, (2009).
- Aköz F., Türker, F., Koral, S., Yüzer, N., Effects of Raised Temperature of Sulfate Solutions on the Sulfate Resistance of Mortars With and Without Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, 29,4, 537-544, (1999).
- Allahverdi A., Mehrpour K., Kani E. N., Taftan Pozzolan-Based Geopolymer Cement, *IUST International Journal of Engineering Science*, 19, 1-5, (2008).
- Allahverdi A. , Kani E. N., Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders, *International Journal of Civil Engineerng*. Vol:7, No:3,154-160, (2009).
- Anuar K.A, Ridzuan A.R.M.,Ismail S., Strength Characteristic of Geopolymer Concrete Containing Recycled Concrete Agregate, *International Journal of Civil Environmental Engineering*, Vol: 11, No: 01,81-85, (2011).
- Arıöz Ö.,Tuncan, M.,Tuncan, A.,Kavas, T., Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, (Tübitak Projesi), Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Eskişehir (2009).
- ASTM C109/C109M, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, *American Society for Testing and Materials Information Handling Services*, (2000).
- ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *American Society for Testing and Materials Information Handling Services*, (1999).
- Atış C. D., Bilim C., Çelik Ö., Karahan O., Influence of Activator on the Strength and Drying Shrinkage of Alkali-activated Slag Mortar, *Construction and Building Materials*, 23, 548-555, (2009).

- Bakharev T., Sanjayana J. G., Cheng Y. B. Effect of Elevated Temperature Curing on Properties of Alkali-activated Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 1619–1625, (1999).
- Bakharev T., Sanjayana J. G., Cheng Y. B., Effect of Admixtures on Properties of Alkali-Activated Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 1367-1374, (2000).
- Bakharev T., Sanjayan J.G. , Cheng Y.B., Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag, *Cement and Concrete Research*, 32, 211 –216, (2002).
- Bakharev T., Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions, *Cement and Concrete Research*, 35, 1233– 1246, (2005).
- Bakri A.M.M.A., Mohammed H. , Kamarudin H. , Niza and Zarina Y., Review on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Without Portland Cement , *Journal of Engineering and Technology Research* ,Vol.:3(1), 1-4, (2011).
- Baradan B., Aydın S., Betonun Durabilitesi, 265-288.
- Bell J. L., Gordon M. , Kriven W. M, Nano and Microporosity in Geopolymer Gels, *Microscopy Society of America*, 1017, 552-553 ,(2006).
- Bentur A., Effect of Gypsum on Hydration and Strength of C<sub>3</sub>S Pastes, *Journal of the American Ceramic Society*, 59, 210–213, (1976).
- Bernal Susan A. , Provis J. L. , Rose V. , Gutierrez Ruby M., Evolution of Binder Structure in Sodium Silicate-Activated Slag-Metakaolin Blends, *Cement and Concrete Composites*, 33, 46-54, (2011).
- Binici H., Çağatay İ. H., Kaplan H., Çimentonun Hidratasyon Isısının Ölçümünde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 207-216, (2006).
- Bondar D., Lynsdale C.J. , Milestone N. B. , Hassani N. , Ramezaniapour A.A., Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, 33, 251-260, (2011).

- Brough A.R., Atkinson A., Sodium Silicate-Based Alkali-Activated Slag Mortars: Part I. Strength, Hydration and Microstructure, *Cement and Concrete Research*, 32, 865–879, (2002).
- Buchwald A. , Hohmann M. , Posern K. , Brendler E., The Suitability of Thermally Activated Illite/Smectite Clay As Raw Material for Geopolymer Binders, *Applied Clay Science*, 46, 300–304, (2009).
- Casanova I., Aguado, A. ve Agullo, L., Aggregate Expansivity Due to Sulfide Oxidation-II Physico-Chemical Modeling of Sulfate Attack, *Cement and Concrete Research*, 27, 1627-1632, (1997).
- Chen J., Huang J. S. , Chang Y.W., Use of Reservoir Sludge As A Partial Replacement of Metakaolin in The Production of Geopolymers, *Cement Concrete Composites*, 33, 602-610, (2011).
- Chindaprasirt P., Chareerat T., Sirivivatnanon V., Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer, *Cement Concrete Composites*, 29, 224–229, (2007).
- Chindaprasirt P., Rattanasak U., Utilization of Blended Fluidized Bed Combustion (FBC) Ash and Pulverized Coal Combustion (PCC) Fly Ash in Geopolymer, *Waste Management*, 30 , 667–672, (2010).
- Chindaprasirt P., Rattanasak U., Taebuanhuad S., Resistance to Acid and Sulfate Solutions of Microwave-assisted High Calcium Fly-ash Geopolymer, *Materials and Structures*, (2012).
- Cohen M.D., Olek, J., Dolch, W.L., Mechanism of Plastic Shrinkage Cracking in Portland Cement and Portland Cement-Silica Fume Paste and Mortar, *Cement and Concrete Research*, 20, 103-119, (1990).
- Collepari M., Kozanoğlu, C., Yanardağ, C., Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite, 2. *Ulusal Beton Kongresi Yüksek Dayanımlı Beton Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 67-75, (1991).
- Collepari M., A State-of-the Art on Delayed Ettringite Attack on Concrete, *Cement and Concrete Composition*, 25, 401-407, (2003).

- Criado M., Palomo A., Fernandez J.A., Alkali Activation of Fly Ashes Part 1: Effect of Curing Conditions on the Carbonation of the Reaction Products, 84, 2048-2054, (2005).
- Davidovits J., Properties of Geopolymer Cements, Published in Proceedings, First International Conference on Alkaline Cements and Concretes ,*Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 131-149, (1994).*
- Davidovits J., From Ancient Concrete to Geopolymers, *Geopolimer Institute, (1996).*
- Davidovits J., Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology, *Geopolymer '99 International Conference, France, 9-40, (1999).*
- Davidovits J., *Geopolymer Chemistry and applications, Saint Quantin, France, (2008).*
- Değirmenci N., Betonda Kalıcılık-Durabilite.
- Diaz E. I. ,Loya P.D. Candidate Erez N. Allouche Ph.D., P.E., Engineering Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *International Concrete Sustainability Conference, Dubai, UAE, (2010).*
- Elimbi A., Tchakoute H.K., Njopwouo D., Effects of Calcination Temperature of Kaolinite Clays on The Properties of Geopolymer Cements, *Construction and building materials, 25, 2805-2812, (2011).*
- El-Sayed H.A., Abo El-Enein S.A., Khater H.M., Hasanein S.A., Resistance of Alkali Activated Water-Cooled Slag Geopolymer to Sulphate Attack, *Housing and Building National Research Centre, (2), 153-160, (2011).*
- Erdoğan T.Y., Beton Kitabı, Metu Pres, Ankara, (2003).
- Ferone C., Colangelo F., Cioffi R., Fabio M., Luciano S., Mechanical Performances of Weathered Coal Fly Ash Based Geopolymer Bricks, *Procedia Engineering,21, 745-752, (2011).*
- Fernandez J., A., Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., “Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cementitious Materials”, *J Mater Sci, 42-3055-3065, (2007).*

- Galiano Y.L., Pereira C.F., Vale J., Stabilization/Solidification of A Municipal Solid Waste Incineration Residue Using Fly Ash-Based Geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 185, 373-381, (2011).
- Granizo M.L., Varela B., Ramirez S., Sika S.A, Alkali Activation of Metakaolin Parameter Affecting Mechanical, Structural and Microstructural Properties, *Special Edition Advance in Geopolymer Science Technology*, 42, 2934–2943, (2007).
- Guo X., Shi H., Dick W.A., Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer, *Cement Concrete Composites*, 32, 142–147, (2010).
- Gül R., Geçten, O., Elazığ Ferrokrom İşletmesi Granüle Cürufunun Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, Sayı 3*, 1-7, (1997).
- Habert G., Lacaillerie E.J.B., Roussel N., An Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: Reviewing Current Research Trends, *Journal of Cleaner Production*, 19 ,1229-1238, (2011).
- Hekal E.E., Kishar E., Mostafa H., Magnesium Sulfate Attack on Hardened Blended Cement Pastes Under Different Circumstances, *Cement and Concrete Research*, 32, 1421–1427, (2002).
- Hubler M.H., Thomas J.J., Jennings H.M. , Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Kinetics and Compressive Strength of Alkali Activated Slag Paste, *Cement and Concrete research*, 41 , 842-846, (2011).
- Isabella C., Xu H., Lukey G. C., Deventer V.J.S.J, The Effect of Aggregate Particle Size on Formation of Geopolymeric Gel, *Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings, and Other Structures III*, Art. ,9, (2005).
- Jones P.T., Pontikes Y., Elsen J., Cizer Ö., Boehme L., Gerven T.V., Geysen D., Guo M., Blanpain B., 2nd International Slag Valorisation Symposium, Leuven, 1-17, (2011).

- Khale, Divya, Chaudhary, Rubina, "Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing its Development: A Review", *Journal Material Science*, 42, 729-746, (2007).
- Khatib J.M., Wild S., Sulphate Resistance of Metakaolin Mortar, *Cement and Concrete Research*, 28, 83–92, (1998).
- Khatri R.P., Sirivivatnanon V. and Yang J.L., Role of Permeability in Sulphate Attack, *Cement Concrete Research*, 27(8), 1179–1189, (1997).
- Kılınçkale F., Betonda Dayanıklılık, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 427, 32-33, (2003).
- Kılınçkale F.M., The effect of MgSO<sub>4</sub> and HCl Solutions on the Strength and Durability of Pozzolan Cement Mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 12, 1911 -1918 (1997).
- Komljenovic M., Bascarevic Z., Bradic V., Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 181,35-42, (2010).
- Komnitsas K., Zaharaki D., Perdikatsis V., Effect of Synthesis Parameters on The Compressive Strength of Low-Calcium Ferronickel Slag İnorganic Polymers, *Journal of Hazardous Materials*, 161, 760-768, (2009).
- Lea F. M., London: Edward Arnold, *The Chemistry of Cement and Concrete.*, (1970).
- Le-Ping L., Rashad C. X. A. M., Zeedan Z., Shu H., Jun-li Q. Y., Lin Z., Preparation of Phosphoric Acid-Based Porous Geopolymers, *Applied Clay Science*, 50, 600-603, (2010).
- Li Z., Ding Z., Zhang Y., Development of Sustainable Cementitious Materials, *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, 55-76, (2004).

- Li L., Fan M., Brown R. C., Koziel J. A., Leeuwen J. V., Production of a New Wastewater Treatment Coagulant From Fly Ash with Concomitant Flue Gas Scrubbing, *Journal of Hazardous Materials*, 162, 1430–1437, (2009).
- Lind B.B., Fallman A.M., Larsson L.B., Environmental Impact of Ferrochrome Slag in Road Construction, *Waste Management*, 21, 255-264, (2001).
- Lopez C.M., Araiza J.L.R., Ramírez A.M., Avalos J.C.R., Bueno J.J.P., Villareal M. S.M., Ramos E.V. and Vorobiev Y., Synthesis and Characterization of a Concrete Based on Metakaolin Geopolymer, *Inorganic Materials*, Vol. 45, No. 12, 1429–1432, (2009).
- Malhotra V.M., *Supplementary cementing materials for concrete*, CANMET, Canadian Government Publishing Centre, (1987).
- Malhotra V.M., Mehta, P.K., High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories. Ottawa, *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc*, (2002).
- Mclellan B.C., Williams R.P., Lay J., Riessen A.V., Corder G.D., Costs and Carbon Emissions For Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement, *Journal of Cleaner Production*, 19, 1080-1090, (2011).
- Mcnulty E., Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement, Department of Chemistry, *The Catholic University of America*, (2009).
- Mehta P.K., Pirtz, D., Polivka, M., Properties of Alite Cement, *Cement and Concrete Research*, 9, 439–450, (1979).
- Mehta P.K., Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete-Another Look. *Cement and Concrete Research*, 13(3), 401-406, (1983).
- Mehta P.K. Influence of Fly Ash Characteristics on the Strength of Portland Fly Ash Mixtures, *Cement and Concrete Research*, 5(3), 669–674, (1985).
- Mehta P.K., Monteiro, P. *Concrete*, 2nd edn, McGraw-Hill, (1993).



- Nazari A., Bagheri A., Riahi S., Properties of Geopolymer with Seeded Fly ash and Rice husk bark ash, *Material Science and Engineering A*, 528, 7395-7401, (2011).
- Neville A.M., Essex, England: Pearson Education, Longman Group *Properties of Concrete* (Fourth and Final ed.), (2000).
- Özcan F., Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür ile Dayanım Tahmini, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
- Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T., Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329, (1999).
- Pan Z., Jay G., Factors Influencing Softening Temperature and Hot-Strength of Geopolymers, *Cement and Concrete Composites*, 1-4, (2011).
- Park Y.S., Sulh, J.K., Lee, J.H., Shin, Y.S., Strength Deterioration of High Strength Concrete in Sulfate Environment, *Cement and Concrete Research*, 29, 9, 1397-1402, (1999).
- Patsikas N., Katsiotis N., Pipilikaki P., Papageorgiou D., Chaniotakis E., Beazi-Katsioti M., Durability of Mortars of White Cement Against Sulfate Attack in Elevated Temperatures, *Construction and Building Materials*, 36, 1082–1089, (2012).
- Petermann J.C., Saeed A., Hammons M.I., Alkali-Activated Geopolymers, A Literature Review, 97, (2010).
- Pimraksa K., Chindaprasirt P., Rungchet A., Sagoe C.K., Sato T., 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*, 528, 6616-6623, (2011).
- Puertas F., Amat T., Jimenez A. F., Vazquez T., Mechanical and Durable Behaviour of Alkaline Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibres, *Cement and Concrete Research*, 33, 2031–2036, (2003).
- Qiao X.C., Cheeseman C.R., Poon C.S., Influences of Chemical Activators on Incinerator Bottom Ash, *Waste Management*, 29, 544-549, (2009).

Rangan B.V., Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J, Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Faculty of Engineering and Computing*, Curtin University of Technology, (1987).

Rangan B.,V., “Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”, available at:  
[www.yourbuilding.org/display/yb/Fly+Ash-Based+Geopolymer+Concrete](http://www.yourbuilding.org/display/yb/Fly+Ash-Based+Geopolymer+Concrete).

Rashad A.M., Zeedan S.R., The effect of Activator Concentration on the Residual Strength of Alkali-Activated Fly Ash Pastes Subjected to Thermal Load, *Constuction and Building Materials*, 25, 3098-3107, (2011a).

Rashad A.M., Bai Y., Basheer P.A.M., Collier N.C., Milestone N.B., Chemical and Mechanical Stability of Sodium Sulfate Activated Slag After Exposure to Elevated Temperature, *Cement and Concrete Research*, 1-11, (2011b).

Rattanasak U., Chindaprasirt P., Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer, *Minerals Engineering*, 22, 1073–1078, (2009).

Rattanasak U., Pankhet K., Chindaprasirt P., Effect of Chemical Admixtures on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume:18, 364, (2011).

Ravikumar D., Peethamparan S., Neithalath N., Structure and Strength of NaOH Activated Concretes Containing Fly Ash or GGBFS As The Sole Binder, *Cement Concrete Composites*, 32 ,399–410 , (2010).

Reddy B., Siva K., Reddy K., Naveen K., Varaprasad J., Influence of Curing Condition on Compressive Strength of Cement Added Low Lime Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *Journal of Engineering Research and Studie*, 103-109, (2011).

Roy D.M., Alkali-activated Cements Opportunities and Challenges, *Cement and Concrete Research*, Volume 29, 2, 249-254, (1999).

Roy D.M., Arjunan P., Silsbee M.R., Effect of Silica Fume, Metekaolin and Low-Calcium Fly Ash on Chemical Resistance of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 1809-1813, (2001).

- Sağlık A.Ü., Alkali-Silica Reactivity and Activation of Ground Perlite-Containing Cementitious Mixtures, PhD thesis, *Middle East Technical University, Ankara*, (2009).
- Sarker P.K. and Meillon T., “Geopolymer Concrete After Exposure to High Temperature Heat” *Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Zingoni A. (ed.), Millpress, Rotterdam, the Netherlands, 1566-1571, (2007).
- Sata V., Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Resistance of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar to Sulfate and Sulfuric Acid Attack, *Cement & Concrete Composites*, 34, 700–708, (2012).
- Schroeder R.L., “The Use of Recycled Materials in Highway Construction”. (1994).
- Silva P.D. and Crenstil K.S. Medium-Term Phase Stability of  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  Geopolymer Systems, *Cement and Concrete Research*, 38, 870–876, (2008).
- Skalny J., Marchand J., Odler I. Sulfate Attack on Concrete, (2002).
- Skvara F., Losar J., Bohunek J., Marková A., Alkali-Activated Fly Ash Geopolymeric Materials, *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*, Durban, South Africa, (2003).
- Skvara F., Jílek T., Kopecky L., Geopolymer Materials Based on Fly Ash, *Ceramics Silikáty* 49, (3), 195-204, (2005).
- Song X.J., Munn R., Marosszeky M., Brungs M., Investigation of Cracking Developed in Sulphuric Acid Resistant Concretes. *Paper presented at the CIA 22nd Biennial Conference*, Concrete 05, Melbourne, Australia, (2005).
- Songpiriyakij S., Engineering Properties of Mae Moh Fly Ash Geopolymer Concrete, *International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer Khon Kaen, Thailand*, May 24-25, (2006).
- Stark J., Bollmann, K., Delayed Ettringite Formation in Concrete, (2002).
- Stevenson J, Slag Characterization and Utilization, *Research Experience*, (1997).

- Sumajouw D.M.J., Hardjito D., Wallah S.E., Rangan B.V., “Geopolymer Concrete for a Sustainable Future”, *Presented: Green Processing Conference, Fremantle, WA., 10-12 May, (2004).*
- Swanepoel J.C., Strydom C.A., Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material, *Applied Geochemistry, 17(8), 1143-48, (2002).*
- Taşdemir A., Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Kristal Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (2006).
- Taylor H.F.W., Famy, C., Scrivener K.L., Delayed Ettringite Formation, *Cement and Concrete Research, 31, 683-693, (2001).*
- Temuujin J., Riessen A.V., Williams R., Influence of Calcium Compounds on The Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes, *Journal of Hazardous Materials, 167, 82-88, (2009).*
- Temuujin J., Riessen V.A., MacKenzie K.J.D., Preparation and Characterisation of Fly Ash Based Geopolymer Mortars, *Construction and Building Materials, 24, 1906-1910, (2010).*
- Thakur R.N., Ghosh S., Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites, *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL: 4, ISSN 1819-6608, 68-74, (2009).*
- Thokchom S., Ghosh P., Ghosh S., Effect of Na<sub>2</sub>O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid, *International Journal of Natural Sciences and Engineering, 77-82, (2009a).*
- Thokchom S., Ghosh P., Ghosh S., Acid Resistance of Fly Ash Based Geopolymer Mortars, *Int. Journal of Recent Trends in Engineering, Vol: 1, 6, 36-40, (2009b).*
- Thokchom S., Ghosh P., Ghosh S., Performance of Fly ash Based Geopolymer Mortars in Sulphate Solution, *Journal of Engineering Science and Technology, 36-40, (2010).*

- Thokchom S., Dutta D., Ghosh S., Effect of Incorporating Silica Fume in Fly Ash Geopolymers, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60, (2011).
- Tikalsky P.J., Carrasquillo R.L., Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, 89(1), 69-75, (1992).
- Tippayasam C., Boonsalee S., Sajjavanich S., Ponzoni C., Kamseu E., Chaysuwan D., Geopolymer Development by Powders of Metakaolin and Wastes in Thailand, *Advances in Science and Technology*, Vol: 69, 63-68, (2010).
- Topçu İ.B. ve Toprak M.U., Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, Vol: XXII, No:2, 153-164, (2009).
- Torgal F.P., Gomes J.C., Jalali S., Alkali-Activated Binders: A Review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture, *Construction and Building Materials*, 22, 1315-1322, (2008a).
- Torgal F.P., Gomes J.G., Jalali S., Alkali-Activated Binders: A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products, *Construction and Building Materials*, 22, 1305–1314, (2008b).
- Torgal F.P., Gomes J.C. , Jalali S., Tungsten Mine Waste Geopolymeric Binder: Preliminary Hydration Products Investigations, *Construction and Building Materials* 23, 200–209, (2009).
- Torii K., Taniguchi K., Kawamura M., Sulfate Resistance of High Fly Ash Content Concrete, *Cement and Concrete Research*, 25(4), 759-768, (1995).
- Tosun K., Felekoğlu K., The Effect of C<sub>3</sub>A Content on Sulfate durability of Portland Limestone Cement Mortars, *Construction and Building Materials*, 36, 437–447, (2012).
- Tosun K., Felekoğlu B., Baradan B., Altun İ., Portland Kalkerli Çimento Bölüm II – Sülfat Dayanıklılığı, *İMO Teknik Dergi*, 310, 4737-4757, (2009).
- TS 706 EN 12620, Beton agregaları, *TSE, Ankara*, (2003).

- TS 802, Beton Karışımı Hesap Esasları, *TSE, Ankara*, (1985).
- TS 1114, Hafif Agregalar-Beton İçin, *TSE, Ankara*, (1986).
- TS 1226 ISO 3310-2, Deneş Eleklere - Teknik Özellikler ve Deneşler - Kısım 2: Delikli Metal Levhalı Deneş Eleklere, *TSE, Ankara*, (1996).
- TS 1227 ISO 3310-1, Deneş Eleklere - Teknik Özellikler ve Deneşler - Kısım 1: Tel Örgülü Deneş Eleklere, *TSE, Ankara*, (1996).
- TS EN 1744-1, Agregaların Kimyasal Özellikleri için Deneşler- Bölüm 1: Kimyasal Analiz, *TSE, Ankara*, (2000).
- TS 3526, Beton Agregalarında Özgöl Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, *TSE, Ankara*, (1980).
- TS 3527, Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini, *TSE, Ankara*, (1980).
- TS 3530 EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneşler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu, *TSE, Ankara*, (1999).
- TS EN 12390-1, Deneş Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, *TSE, Ankara*, (2002).
- TS EN 12390-4, Basınç Dayanımı Deneş Makinalarının Özellikleri, *TSE, Ankara*, (2002).
- TS EN 12390-7, Sertleşmiş Beton Yoğunluğunun Tayini, *TSE, Ankara*, (2010).
- Türkmen İ., Korozif Etkiler Altında Yüksek Fırın Cürufu ve Silis Dumanı Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri ve Dayanıklılığı, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, (2002).
- Ustabaş İ., Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton ve Harçların Performansının İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
- Ün H., Çimento, Pamukkale Üniversitesi, (2007).
- Van Jaarsveld J.G.S., Van Deventer J.S.C., Schwartzman A., The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilize Toxic Metals: Part II, *Material and Leaching Characteristics, Minerals Engineering*, 12(1), 75-91, (1999).

- Vargas A.S.D., Molin D.C.C.D., Vilela A.C.F., Silva F.J., Pavao B, Veit H., The Effects Of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  Molar Ratio, Curing Temperature and Age on Compressive Strength, Morphology and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash-Based Geopolymers, *Cement concrete composites*, 33, 653-660,(2011).
- Veiga K.K., Gastaldini A.L.G., Sulfate Attack on a White Portland Cement with Activated Slag, *Construction and Building Materials* 34, 494–503, (2012).
- Villarreal M.S., Ramírez A.M., Bulbarela S., Tirado J.R.G., Araiza J.L.R., Avalos J.C.R., Bueno J.J.P., Apatiga L.M., Cadena A.Z., Borrás V.A., The Effect of Temperature on the Geopolymerization Process of a Metakaolin-Based Geopolymer, *Materials Letters*, 65, 995-998, (2011).
- Visitanupong C., Durability of Fly Ash Based Geopolymer Mortar, Thesis Approval Graduate School, Kasetsart University, (2009).
- Wallah S.E., Hardjito D., Sumajouw D.M.J., Rangan B.V., Performance of Geopolymer Concrete Under Sulfate Exposure, *Ed Nawy Symposium, American Concrete Institute*, April (2005).
- Wallah S.E., Rangan B.V., Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Curtin University of Technology Perth, Australia, (2006).
- Wagh A.S., Phosphate Geopolymers, *Developments in Strategic materials and computational design* II, Vol. 32, Naperville, 91-103, (2011).
- Xie J., Yin J., Chen J., Xu J., Study on The Geopolymer Based on Fly Ash and Slag, *International Conference on Energy and Environment Technology*, 578-581, (2009).
- Xin L., Jinyu X., Erlei B., Weimin L., Systematic Study on The Basic Characteristics of Alkali-Activated Slag-Fly Ash Cementitious Material System, *Construction and Building Materials*, 29 , 482-486, (2012).
- Xu H., Van Deventer J.S.J., The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals, *Int. J. Miner. Process*, 59 , 247–266, (2000).

- Yao X., Zhang Z., Zhu H., Chen Y., Geopolymerization Process of Alkali–Metakaolinite Characterized by Isothermal Calorimetry, *Thermochimica Acta*, 493, 49-54, (2009).
- Yazıcı A., Kaya M., Ferrokrom Cürufunun Karakterizasyonu, *F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(4), 539-548, (2003).
- Yıldırım K., Sümer M., Denize Yakın Ortamda Beton Korozyonu.
- Yılmaz A., Sütüş İ., Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, *İMO Teknik Dergi*, 294, 4455-4470, (2008).
- Yunsheng Z., Wei S., Zongjin L., Composition Design and Microstructural Characterization of Calcined Kaolin-Based Geopolymer Cement, *Applied Clay Science*, 47, 271–275, (2010).
- Zelic J., Properties of Concrete Pavements Prepared with Ferrochromium Slag as Concrete Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 35, 2340–2349, (2005).
- Zeybek O., Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir, (2009).
- Zhang Y.J., Li S., Wang Y.C., Xu D.L., Microstructural and Strength Evolutions of Geopolymer Composite Reinforced by Resin Exposed to Elevated Temperature, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1-5, (2011a).
- Zhang L., Ahmari S., Zhang J., Synthesis and Characterization of Fly Ash Modified Mine Tailings-Based Geopolymers, *Construction and Building Materials*, 25, 3773-3781, (2011b).
- Zivica V., Sulfate Resistance of the Cement Materials Based on the Modified Silica Fume, *Construction and Building Materials*, 14, 17-23, (2000).
- Zivica V., Balkovic S., Drabik M., Properties of Metakaolin Geopolymer Hardened Paste Prepared by High-Pressure Compaction, *Construction and Building materials*, 25, 2206-2213, (2011).



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Müslüm Murat MARAŞ

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Şanlıurfa - (07.07.1986)

**Adres:** İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü  
MALATYA

**E-Posta:** murat\_maras44@hotmail.com

**Lisans:** Gaziantep Üniversitesi - 2011