

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFUNDAN ALKALİ AKTİVASYON METODUYLA
ÜRETİLEN GEOPOLİMER ÇİMENTOLU BETONLARIN YANGIN DAYANIMININ
ARAŞTIRILMASI

FATİH KANTARCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MALATYA
Temmuz 2013

Tezin Başlığı: Elazığ Ferrookrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Fatih KANTARCI

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

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN**
İnönü Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. M. Burhan KARAKOÇ
İnönü Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Yaşar AYZ
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet ALPASLAN

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Fatih KANTARCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFUNDAN ALKALİ AKTİVASYON METODUYLA ÜRETİLEN GEOPOLİMER ÇİMENTOLU BETONLARIN YANGIN DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

Fatih KANTARCI

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

120 + x sayfa

2013

Danışman: Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Elazığ ili Maden ilçesinde bulunan ve dünya rezervinin %10'unu oluşturan kromit yatakları, Elazığ ferrokrom tesislerinde işlenmektedir. Bu fabrikada ana ürünün dışında oluşan birçok yan ürünün atılması, uzaklaştırılması, depolanması veya yok edilmesi büyük bir sorun oluşturmaktadır. Bu yan ürünlerden bir tanesi olan Elazığ Ferrokrom cürufu (EFC) şimdiye kadar inşaat sektöründe çimento katkı maddesi ve agrega olarak kullanılmış olup, üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Ancak EFC'nin alkali ile aktivasyonu ve aktivasyon sonucu oluşan geopolimer bağlayıcı madde ile üretilen betonların özellikleri henüz bilinmemektedir.

Bu çalışmada, EFC çimento inceliğinde öğütülmüş ve aktivatör (Na_2SiO_3 ile NaOH birleşmesi ile oluşan) ile birleştirilerek bağlayıcı madde oluşturulmuştur. Bu bağlayıcı madde ve agrega (dere agregası ve kırma kum) kullanılarak geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (3, 7 ve 28 gün), bazı fiziksel özellikleri, yangın dayanımları (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C) ve mikro yapıları incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar normal Portland çimentolu beton numunelerle karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, EFC ve aktivatör kullanılarak üretilen dere agregalı geopolimer beton numunelerde 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık 35 MPa olduğu görülmüştür. Bu değer aynı kür şartları altında üretilen normal Portland çimentolu beton numunelerde elde edilen basınç dayanım değerinden (31.8 MPa) büyüktür. Yangın sonrası basınç dayanımlarında ise kontrol numunelerine göre, bütün karışımlarda 100 ve 300 °C sıcaklıklarda basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. 700 °C'de ise bütün beton numunelerinde minimum basınç dayanımı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler:Geopolimer çimento, Elazığ ferrokrom cürufu, alkali-aktivatör, yangın dayanımı

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF FIRE RESISTANCE OF GEOPOLYMER CONCRETE PRODUCED FROM ELAZIĞ FERROCHROME SLAG BY ALKALI ACTIVATION METHOD

Fatih KANTARCI

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

120 + x pages

2013

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

The chromite deposits which are 10% of the world reserves located within the boundaries of Maden town of Elazig are processed in Elazığ ferrochrome plants. The disposal, removal and storage of by-products which are produced apart from the main product is a big problem. Many studies have been done over Elazığ Ferrochrome slag (EFC) which is one of these by-products and it was used in the construction industry as cement additive and aggregate. However, the activation of EFC with alkali and the properties of concretes produced with geopolymer binding substance as a result of activation with alkali and EFC is still unknown.

In this study, EFC was ground as fine as cement and geopolymer binding material was made by combining ground granulated EFC with activator (formed by combination of NaOH with Na_2SiO_3). Geopolymer concrete samples were produced by using this binding material aggregates (river sand and crushed sand). Compressive strength, some physical properties, fire resistance (100, 200, 300, 400, 500, 600 and 700°C) and microstructures of geopolymer concrete samples were obtained experimentally. In addition, it was compared to concrete samples produced using by normal Portland cement.

As a result of experiments, 28 days compressive strength of geopolymer concrete by using EFC and activator was obtained nearly 35 MPa. This value, the compressive strength (31.8 MPa) obtained from river aggregates geopolymer concrete, is greater than for the same conditions by using normal Portland cement. Compressive strength of all samples exposed temperature at 100 and 300 °C increased compared to control samples. At 700 °C, minimum compressive strength was obtained for all concrete samples.

Keywords: Geopolymer cement, Elazığ ferrochrome slag, alkali-activator, fire resistance.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının konusunu öneren ve çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek tez çalıőmamı tamamlamamı sağlayan 111M147 numaralı TUBİTAK proje yürütücüsü ve danışman hocam Sayın Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e;

Çalıőmalarımızda yol gösterici hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a, karışım oranlarının belirlenmesinde yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan TEMUR ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK'a, deneysel çalışmalar ve tez yazımı sırasında her türlü fedakarlığı gösteren beraber alıőtığım Sayın Müslüm Murat MARAŐ'a;

Çalıőmalarımıza 111M147 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK-ARDEB yetkililerine; çalıőmalarımıza 2012/01 numaralı proje ile maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimine; deneysel çalışmalarda kullanılmak amacıyla cüruf temin etmemizi sağlayan Elazığ ferrokrom fabrikası yetkililerine; her türlü laboratuvar çalıőmamızda yardımlarını esirgemeyen İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü teknisyeni Sayın İlhami BAYSAL'a;

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..... | iv |
| TEŞEKKÜR..... | v |
| İÇİNDEKİLER..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | x |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ..... | 4 |
| 3. KURAMSAL TEMELLER..... | 25 |
| 3.1. Atık Malzeme Olarak Elazığ Ferrookrom Cürufu ve Kimyasal Kompozisyonu.. | 25 |
| 3.2. Elazığ Ferrookrom Fabrikası..... | 26 |
| 3.3. Günümüze Kadar Çimento Teknolojilerinin Gelişimi..... | 27 |
| 3.4. Çimento Üretimine Çevreye Verdiği Zararlar..... | 28 |
| 3.5. Alkali Aktivatörler..... | 31 |
| 3.6. Geopolimer..... | 32 |
| 3.6.1. Geopolimer kimyası..... | 38 |
| 3.6.2. Geopolimerin molekül yapısı ve kimyasal mekanizmasını tespiti için ışın deneyleri..... | 42 |
| 3.7. Geopolimer türleri..... | 43 |
| 3.7.1. Alkali silikatlar (siloksonat-silikat çözeltisi) Si/Al=1:0..... | 44 |
| 3.7.2. Kaolonit/hidrosodalit esaslı geopolimerler Si/Al=1..... | 47 |
| 3.7.3. Metakaolonit esaslı geopolimerler..... | 49 |
| 3.7.4. Kalsiyum esaslı geopolimerler Si/Al=1-3..... | 51 |
| 3.7.5. Kayaç esaslı geopolimerler Si/Al=1-5..... | 52 |
| 3.7.6. Silis esaslı geopolimerler (silokso-siloksonat bağı) Si/Al>5..... | 54 |
| 3.7.7. Uçucu kül esaslı geopolimerler..... | 55 |
| 3.7.8. Fosfat esaslı geopolimer..... | 58 |
| 3.7.9. Organik mineral geopolimer..... | 59 |
| 3.7.10. Geopolimer bağlayıcılar (Çimentolar)..... | 59 |
| 3.7.11. Zeolit tabanlı geopolimerler..... | 63 |
| 3.7.12. Ferronikel tabanlı geopolimerler..... | 64 |
| 3.7.13. Pomza tabanlı geopolimerler..... | 64 |
| 3.7.14. Geopolimer tuğlalar..... | 65 |
| 3.7.15. Çelik lif tabanlı geopolimerler..... | 66 |
| 3.7.16. Cüruf esaslı geopolimerler..... | 66 |
| 3.8. Geopolimerlerin Kullanım Alanları..... | 67 |
| 4. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 69 |
| 4.1. Materyal..... | 69 |
| 4.1.1. Elazığ ferrookrom cürufu (EFC) ve özellikleri..... | 69 |
| 4.1.2. Çimento..... | 69 |
| 4.1.3. Aktivatörler..... | 70 |
| 4.1.4. Agregalar..... | 70 |
| 4.1.5. Karma suyu..... | 72 |
| 4.2. Yöntem..... | 72 |
| 4.2.1. Agregalar deneylerinde uygulanan yöntemler..... | 72 |
| 4.2.2. EFC'nin öğütülmesi..... | 73 |
| 4.2.3. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi..... | 74 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.4. Karışım oranlarının belirlenmesi..... | 75 |
| 4.2.5. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı | 76 |
| 4.2.6. Hamur numunelerinde hidrasyon ısı ölçümü..... | 77 |
| 4.2.7. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler..... | 79 |
| 4.2.7.1. Basınç dayanımı | 79 |
| 4.2.7.2. Su emme deneyi | 80 |
| 4.2.7.3. Yangın dayanımı | 81 |
| 4.2.7.4. SEM | 82 |
| 4.2.7.5. XRD | 83 |
| 5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA | 86 |
| 5.1. Agrega Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma | 86 |
| 5.2. Geopolimer ve Portland Çimentolu Hamur Numunelerin Hidratasyon Isıları ... | 87 |
| 5.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma | 95 |
| 5.3.1. Beton numunelerin basınç dayanımı | 95 |
| 5.3.2. Beton numunelerin fiziksel özellikleri | 97 |
| 5.3.2.1 Beton numunelerde su emme | 97 |
| 5.3.2.2. Beton numunelerde hacimsel yoğunluk | 99 |
| 5.3.3. Beton numunelerin yangın sonrası basınç dayanımı..... | 100 |
| 5.3.4. Beton numunelerin yangın sonrası su emme değerleri | 102 |
| 5.3.5. Mikroyapı analizi | 103 |
| 5.3.5.1. SEM | 103 |
| 5.3.5.2. XRD | 107 |
| 6. SONUÇ ve ÖNERİLER..... | 110 |
| 7. KAYNAKLAR | 112 |
| ÖZGEÇMİŞ | 120 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|-----|
| Şekil 1. FeCr cürufunun kimyasal kompozisyonu | 25 |
| Şekil 2. Atmosferik CO ₂ konsantrasyonu ile dünya PÇ üretiminin yıllara göre değişimi. | 30 |
| Şekil 3. 2015 yılı için çimento çeşitleri dağılımı (toplam 3500 milyon ton). | 30 |
| Şekil 4. Normal Portland çimentosu ile geopolimer çimentoların basınç dayanımları ile kür süresi arasındaki ilişki..... | 33 |
| Şekil 5. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları | 39 |
| Şekil 6. Hidrosodalit oluşumu..... | 47 |
| Şekil 7. Geopolimer türleri..... | 48 |
| Şekil 8. Dere agregası | 71 |
| Şekil 9. Kırma kum agregası | 71 |
| Şekil 10. Cürufun öğütme işlemi | 73 |
| Şekil 11. ToniCAL İzotermal Kalorimetre | 77 |
| Şekil 12. Yüksek sıcaklık fırını | 81 |
| Şekil 13. XRD cihazı..... | 84 |
| Şekil 14. 1 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 88 |
| Şekil 15. 2 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 88 |
| Şekil 16. 3 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 89 |
| Şekil 17. 4 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 89 |
| Şekil 18. 5 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 90 |
| Şekil 19. 6 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 90 |
| Şekil 20. 7 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 91 |
| Şekil 21. 8 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 91 |
| Şekil 22. 9 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 92 |
| Şekil 23. 10 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 92 |
| Şekil 24. 11 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 93 |
| Şekil 25. 12 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 93 |
| Şekil 26. Portland çimento hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı | 94 |
| Şekil 27. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri..... | 96 |
| Şekil 28. Beton numuneler | 96 |
| Şekil 29. Beton numunelerinin su emme değerleri | 98 |
| Şekil 30. Beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri | 99 |
| Şekil 31. Betonl numunelerde yangın sonrası basınç dayanımı değerleri | 101 |
| Şekil 32. Betonlarda farklı yangın sıcaklıklarında su emme değerleri | 103 |
| Şekil 33. Sıcaklığın dere agregalı geopolimer beton numunelerde mikroyapı özelliklerine etkisi | 104 |
| Şekil 34. Sıcaklığın kırma agregalı geopolimer beton numunelerde mikroyapı özelliklerine etkisi | 105 |
| Şekil 35. Sıcaklığın normal Portland çimentolu beton numunelerde mikroyapı özelliklerine etkisi | 106 |
| Şekil 36. Dere agregalı geopolimer beton numunelerin XRD difraktogramları | 107 |
| Şekil 37. Kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerin XRD difraktogramları | 108 |
| Şekil 38. Normal Portland çimentolu beton numunelerin XRD difraktogramları | 108 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|---|-----|
| Çizelge 1. Alkali aktivasyon ve alkali çimento karışımlarının gelişimi | 35 |
| Çizelge 2. Elazığ ferrokrom cürufu kimyasal bileşimi | 69 |
| Çizelge 3. CEM I 42.5 N Portland çimentosu kimyasal bileşimi | 69 |
| Çizelge 4. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri | 70 |
| Çizelge 5. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları (1 m ³ beton için) | 75 |
| Çizelge 6. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayin deney sonuçları..... | 86 |
| Çizelge 7. Geopolimer ve Portland çimentolu hamur numunelerin hidrasyon ısıları | 87 |
| Çizelge 8. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri | 95 |
| Çizelge 9. Beton numunelerinin su emme değerleri | 98 |
| Çizelge 10. Beton numunelerin hacimsel yoğunluğu ve birim ağırlığı | 99 |
| Çizelge 11. Beton numunelerde yangın sonrası basınç dayanımı değerleri..... | 100 |
| Çizelge 12. Beton numunelerin yangın sonrası su emme değerleri | 102 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al₂O₃: Aluminyum oksit

CaO: Kalsiyum oksit; sönmemiş kireç

EFC: Elazığ ferrokrom cürufu

MK 750: 750°C’de fırınlanmış kaolinit kili; metakaolonit

O: Oksijen

P: Fosfat

PH: Potasyum hidroksit (KOH)

SH: Sodyum hidroksit (NaOH)

SS: Sodyum meta-silikat Na₂SiO₃

Si: Silisyum

SiO₂: Silisyum dioksit

TEM: Geçirimli elektron mikroskobu (Transmitting electron microscope)

w/b: Su/bağlayıcı oranı

SEM: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)

XRD: X Işını kırınım yöntemi

ASR: Alkali silika reaksiyonu

CO₂: Karbon dioksit

FBC: Akışkan yataklı küller

PCC: Pulverize kömür yanmalı uçucu küller

SAK: Süperakışkanlaştırıcı

1.GİRİŞ

Ferrokrom, genellikle paslanmaz ve ısıya dirençli çelik üretiminde kullanılan bir metal bileşimidir. Ferrokrom ve silikoferrokrom cürufu ise ferrokrom üretimi yapan tesislerin elektrik-ark fırınlarından işlem sonucu açığa çıkan atık malzemelerdir. Ferrokrom ve silikoferrokrom üretimi esnasında indirgenmeyen oksitler ile bir miktar SiO₂ metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturur (Yılmaz ve Süttaş, 2008). Çalışmaya 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 Cr₂O₃ içermektedir (Yazıcı ve Kaya, 2003). Bugüne kadar birikmiş ve gelecekte birikecek cüruf miktarı gözönüne alındığında bu cürufu değerlendirme yollarının ortaya konulmasının önemi açıktır.

Günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzeme normal Portland çimentosuyla oluşturulmaktadır. Tüketimdeki yüksek oran enerji, ekonomik ve çevresel problemleri de ortaya çıkarmıştır. Dünyada toplam CO₂ yayılımının %7'sinin çimento üretiminden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu yüzden Portland çimentosuna alternatif çimentolar üretmek güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Ayrıca çimento üretimi, yüksek sıcaklıkta (1400-1500°C) gerçekleşebildiği için önemli ölçüde enerji tüketimi ve dolayısıyla yüksek maliyetlerle elde edilmektedir.

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 çimentolarına 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.*, 2009).

Geopolimer terimi ilk olarak Davidovits tarafından dile getirilmesinden beri, bu alanda detaylı araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca aynı tip malzemeler için farklı isimlendirmeler kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklı alüminosilikatlar (Rahier *et al.*, 1996), alkali aktive edilmiş çimentolar (Palomo and Fuente, 2003), alkali bağlı seramikler (Mallicoat *et al.*, 2005), inorganik polimer beton (Sofi *et al.*, 2007) ve hidroseramik (Bao *et al.*, 2005) gibi nitelermeler sıklıkla kullanılanlardandır (Nugteren *et al.*, 2009).

Geopolimerler olarak da bilinen inorganik polimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin önemli kısmı alümino silikatların alkali aktivasyonu ile oluşur ve bu özellikleri ile malzemeleri birçok uygulama için yararlı hale getirir. Yapılan son deneysel çalışmalarda inorganik polimerler ferronikel cürufundan üretilebilmektedirler (Komnitsas *et al.*, 2009).

Geopolimerlerin kullanımı ve özellikleri, organik kimya, fizikokimya, mineroloji, jeoloji ve mühendislik teknolojisi gibi, birçok bilimsel ve endüstriyel alanlarda araştırılmaktadır. Geopolimerlerin uygulama alanları oldukça fazladır. Bunlar özellikle, yangına dayanıklı malzemelerde, dekoratif taşlı eserlerde, düşük enerjili seramiklerde, çimento ve beton üretimlerinde, altyapı ve onarım için kompozit karışımlarda, radyoaktif ve zehirli atık maddelerin değerlendirilmesi gibi birçok alanda kullanılmıştır (Davidovits, 2008).

Bu çalışmanın amacı, Elazığ ferrokrom tesislerinin atık ürünü olan Elazığ ferrokrom cürufu (EFC)'nu, çeşitli aktivatörlerle geopolimer bağlayıcı yaparak, beton içerisinde çimento yerine kullanmaktır. Bu çalışma sonucunda elde edilen verilerle çimento ihtiyacını azaltmak ve böylece enerji tasarrufu sağlamak, atıl 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 geopolimer çimentoların çevre dostu malzemeler olması, enerjiden tasarruf sağlaması konunun önemini artırmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada, öğütülmüş EFC, aktivatör (Na_2SiO_3 ve NaOH birleşmesi ile oluşan) ve agrega (dere kumu, kırma kum) ile karıştırılarak geopolimer betonlar üretilmiştir. Ayrıca, aynı karışım oranlarında EFC yerine CEM I 42.5 N tipi Portland çimento, kimyasallarda oluşan su miktarı kadar ise normal su katılarak normal betonlar üretilmiştir. Üretilen bu geopolimer betonlar ile normal Portland çimentolu betonların basınç dayanım değerleri (3, 7 ve 28 günlük), fiziksel özellikleri, yangından önce ve sonra (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C) basınç dayanım değerleri, su emme değerleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Ayrıca hamur numunlerin hidrasyon ısıları tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Aaron *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada iki tanesi diyatumlu şekilde amorf silika içeren, dört tane kireçtaşı bazlı alkali aktive edilmiş cürüflü ince agregalı betonlar, farklı aktivasyon solüsyonları (NaOH/Na₂SiO₃) kullanılarak üretilmiştir. Oda sıcaklığında kür edilmesine rağmen bu ince agregalı betonlar yüksek basınç dayanımı (45 MPa) göstermiştir. Ayrıca NaOH ile aktive edilmiş betonların çekme dayanımları 2.6 MPa (1 günlük) dan 4 MPa'a (28 günlük) kadar yükseldiği belirtilmiştir. Na₂CO₃ ile aktive edilmiş numunelerin 1 günlük çekme dayanımlarında gözle görülebilir bir artış gözlemlenmiştir. 28 günlük dayanımlarında ise 2.5 MPa kadar bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Malolepszy (1986), yapılan çalışmada, Na₂CO₃'ün bol miktarda C₂MS (M:alkali metal) içeren cürüfları aktive etmek için uygun olduğunu ifade etmiştir. NaOH'ın ise bol miktarda C₂AS içeren cürüflar için iyi bir aktivatör olduğu belirtilmiştir. Farklı sistemlerin, NaOH, Na₂CO₃ ve Na₂OSiO₂ ile aktivasyonu Krivenko (1992) tarafından incelenmiş olup, Na₂OSiO₂ alkali aktivatörün CaO-SiO₂, CaO-Al₂O₃, CaO-Al₂O₃-SiO₂ ve CaO-Mg-SiO₂ için en etkili aktivatör olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Na₂CO₃'ün, CaO-Al₂O₃ için en uygun aktivatör olduğu ifade edilmiştir. Na₂SiO₃'ün (sodyum silikat veya cam suyu) çok etkili bir aktivatör olduğu belirtilmiştir (Sağlık, 2009).

Shi *et al.*, (2006) yaptıkları çalışmada %4 Na₂SO₄ ve %4 CaCl₂.2H₂O içeren kireç cüruf hamurunun geniş aktivasyon özelliği gösterdiğini tespit etmişlerdir. Beton yaşı 90 güne kadar CaCl₂, Na₂SO₄'den daha fazla aktivasyon özelliği gösterdiği belirtilmiştir (Sağlık, 2009).

Wang ve Scrivener (1995) yaptıkları çalışmada 95-100°C'ye kadar ısıtılmanın alkali aktive edilmiş cürüfların basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. 2M aktivatör

olması durumu için optimum oran 8-10 saat ısıtım olarak tespit edilmiştir (Sağlık, 2009).

Bakherev *et al.*, (1999) tarafından yapılan çalışmada sodyum silikat solüsyonu, sodyum hidroksiti ve sodyum karbonatı Avusturya cürufu çimentoları üzerine aktivatör olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada en iyi dayanım sodyum silikat solüsyonu ile elde edilmiş olmasına rağmen, harçların büzölme özellikleri düşünülerek sodyum karbonat tavsiye edilmiştir. Isıtım işleminin dayanım gelişimini hızlandırdığı vurgulanmıştır, fakat sonraki aşamalarda basınç dayanımının oda sıcaklığında kür edilmiş betonlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir (Sağlık, 2009).

Kong ve Sanjayan (2010) alışmalarında metakaolin ve uçucu külü birlikte yüksek sıcaklığa tabi tutarak daha aktif bir duruma getirmişlerdir. Metakaolinin yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 800°C) amorf yapıya sahip olduğunu ve aktive bir alümino silikata dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmada agrega, akışkanlaştırıcı ve sıcaklığın geopolimer imento üzerinde etkileri araştırılmıştır. Numune ebatları büyüdükçe basınç dayanımının termal çatlaklardan dolayı düştüğü belirtilmiştir. Agreganın tane çapları 10 mm'den küçük olursa kabuk atma daha çok olmaktadır. 10 mm'den daha büyük olması durumunda ise bu olayı önleyebileceği düşünülmüştür. Süperakışkanlaştırıcı katkının geopolimerli betonlarda mukavemeti düşürmekte ve toplam işlenebilirlikte önemli bir katkısı olmadığı belirtilmiştir.

Collins ve Sanjayan (1999) alışmalarında normal kür sıcaklığında normal Portland çimentosuyla üretilen betonun 1 günlük dayanımına eşit olacak şekilde bir işlenebilirlik değeri; bağlayıcı olarak alkali aktive edilmiş cüruf içeren betonlar üzerine çalışmışlardır. İki aktivatör tipi (sodyum karbonat, sodyum hidroksit) ve sönmüş kireç ile birlikte sodyum silikat kullanılmıştır. Taze betonda çökme, çökme kaybı, hava içeriği, akma değeri, alkali aktive betonun mekanik özellikleri incelenerek Portland çimentosuyla üretilen betonlarla kıyaslanmıştır. Düşük erken

dayanım probleminin alkalilerle aktive edilen cürüfla telafi edilebileceği belirtilmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş cürüfla üretilen betonların basınç dayanımlarının, bütün kür sürelerinde normal Portland çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanımlarından daha iyi olduğu belirtilmiştir.

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

Anuar *et al.*, (2011) çalışmalarında alkali sıvı olarak, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) karıştırılarak kullanmışlardır. Bu çalışmada, geopolimer beton numuneler iki farklı molarlarda (8M'lık ve 14M'lık sodyum hidroksit kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. 14 M NaOH kullanıldığında basınç dayanımının maksimum olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, atık kağıt çamur külü ve molaritesi artırılan geopolimer betonun mukavemetinin arttığı gözlenmiştir.

Swanepoel ve Strydom (2002) uçucu kül, kaolin, sodyum silikat çözeltisi ve suyu karıştırarak geopolimerik hamurlar 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 numunede geopolimerizasyon reaksiyonu görülmüş ve basınç dayanımındaki artış mukavemet 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.

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 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) kullanarak bu oranların, mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki etkisi üzerinde durmuşlardır. Sonuç olarak, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oranlarının basınç dayanımlarına önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu farklı yoğunluktaki numunelerin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=5.5$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3=1.0$ ve $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=7.0$ olan numunede maksimum basınç dayanımı (34.9 MPa) elde edilmiştir. IR spektrumlarıyla kimyasal yapıları da incelenmiş ve en iyi basınç dayanımları, geopolimer miktarı yüksek orana sahip olan numunelerden elde edilmiştir.

Jones *et al.*, (2011) çalışmalarında geopolimer çimento üretmek için kaolinitik kömür kaya atıkları kullanmışlardır. Kaya cüruf tabanlı geopolimer çimento, inşaat ve altyapı da kullanmak için üretilmiştir. Sonuç olarak 7 günde 40 MPa ve 28 günde 105 MPa basınç dayanımına ulaşmışlardır.

Bakri *et al.*, (2011a) yaptıkları çalışmada geopolimerasyon sürecinde uçucu kül kullanarak geopolimer ürünlerinin üzerinde durmuşlardır. Uçucu külün ağırlığına göre %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında kaolin kullanmışlardır. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit and sodyum silikat kullanılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı, su emme miktarları incelenmiştir. Kaolinin yüzdesi artarken

mukavemetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada %10 kaolin kullanımının, 7. ve 28. günlerde maksimum basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir.

Bondar *et al.*, (2011) tarafından yapılan çalışmada çevre ortamında depo edilen kimyasal karışimli doğal puzolanlar, alkali aktivatörlerle birlikte kullanılarak geopolimer çimento üretilmiştir. Bu çalışmada, geopolimer çimentonun mekanik özelliklerini geliştirmek için, mineral katkı maddeler kullanılarak, basınç dayanımları incelenmiştir. Alkali aktivatör olarak potasyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Taftan puzolanları ve doğal Shahindej puzolanlara; kaolinit, kalsin ve kireç gibi mineral eklenerek farklı kürlerde basınç dayanımlarına bakılmıştır. SEM aletiyle alkali aktivasyonlu mineral katkı ve mineral katkısız taftan puzolanların mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Kaolin ve kalsin katkı Shahindej puzolanları ve kireç katkı taftan puzolanlarının basınç dayanımları karşılaştırılmış ve mineral katkısız puzolanların jel boşluklarının azaldığı ve mineral katkı çimentoların 44 MPa basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür.

Vizcayno *et al.*, (2010) 1 saat süreyle 700°C'de termal uygulamayla elde edilen metakaolinle 15 ile 120 dakika arasında Herzog değirmeninde öğütülerek mekanik uygulamayla elde edilen amorf metakaolinlerin puzolanik aktivitelerini karşılaştırmışlardır. Uygulamanın her iki tip kaolin kilerden reaktif puzolanların elde edilmesinin mümkün olduğu sonucuna varmışlardır. Yüksek kuvars içeren ham kaolinden mekanik uygulamayla elde edilen puzolanın performansının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Az miktarda kaolinit içeren numunelerde mekanik metotla aktive puzolan elde etmenin mümkün olduğunu fakat termal metotla bunun mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Öğütülerek elde edilen mekanik özellikler ve puzolanik indeksin termal uygulamaya benzer olduğunu, mekano-kimyasal metot çıktılarının kullanılan kaolin tipine, mineralojik yapısına ve öğütülme süresine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Mekanik uygulama ile elde edilen katkı harçların ısıl uygulamaya göre daha boşluklu olduğu sonucuna varmışlardır. Mekano-kimyasal metotla malzemelerin hem yüzey alanlarının hem de puzolanik reaktivitelerinin arttığını

açıklamışlardır. Bu yüzden, öğütme süresinin artması; kaolinin dehidroksilasyonunu ve puzolanik indeksini artırdığı belirtilmiştir.

Jones *et al.*, (2011) çalışmalarında, MK-750 tabanlı (Ca, K)-Poli (sialate-siloxo) geopolimer çimento ile ön ürün karıştırıldıktan sonra, harç kalıpları hazırlanmıştır. 2 gün sonra, nihai basınç dayanımı %90'a ulaşmıştır ve son 28 gün içinde yaklaşık 20 MPa basınç dayanımı sağlanmıştır. Böylece, kalsine kaolinitik kil bazlı bağlayıcı tabanlı geopolimer madde üretilmiştir.

Torgal *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, metakaolin bazlı geopolimer harçların işlenebilirliğini ve mekanik dayanımlarına etki eden faktörleri incelemişlerdir. 432 numune dökülmüş ve 48 tane farklı harç karışımından, farklı yoğunluklarda (10 M, 12 M, 14 M, 16 M) sodyum hidroksit kullanarak metakaolin tabanlı geopolimer harçların özelliklerine bakılmıştır. Sonuç olarak, sodyum hidroksitin yoğunluğunun, kalsiyum hidroksit ve süperakıştırtıcılarla artmasıyla işlenebilirliğin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sodyum hidroksitin molaritesinin artmasıyla, basınç ve eğilme mukavemetlerinin de arttığı görülmüştür. %3 süperakıştırtıcı, %10 kalsiyum hidroksit ve 12 M sodyum hidroksitin kullanılmasıyla mekanik dayanımlarda azalmalara neden olmadığı tespit edilmiştir.

Rovnanik (2010) çalışmasında, metakaolin, alkali silikat çözeltileri ve kuvars kumu kullanarak metakaolin tabanlı geopolimerler üretmiştir. Daha sonra, farklı kür sıcaklıklarında (10, 20, 40, 60 ve 80°C) basınç ve eğilme mukavemetleri, gözenek yapısı ve mikroyapıları incelenmiştir. Sonuçlara göre, yüksek sıcaklıktaki kürlerde, dayanımı kazanma hızının arttığı görülmüş, fakat 28. gün sonundaki sıcaklığın azalmasında ise mekanik dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, sıcaklığın artmasıyla gözenek çaplarının arttığı, ancak sonuçta mekanik özelliklerine olumlu katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımları 60 ve 80°C sıcaklıklarda elde edilmiştir. Bu sıcaklıklardaki iki veya daha fazla saat içinde kür edilmiş ve 3 günün sonunda 50 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Ayrıca, eğilme

dayanımları da 1 ve 4 saat süreyle 60 ve 80°C kür sıcaklıklarda bırakılanlarda da en yüksek değere ulaşmış ve yaklaşık 13 MPa eğilme dayanımı göstermiştir.

Komnitsas *et al.*, (2011) tarafından geopolimer alanında birçok çalışma yapılmıştır. Kaolinin, 750°C kalsinasyonun sonucunda üretilen metakaolin tabanlı geopolimerler üretilmiştir. Xu ve Van Deventer (2000), Al-Si içerikli 16 farklı malzeme kullanarak, geopolimer üretimi yapmaya çalışmışlardır. Bu malzemeler, her ülkede büyük miktarda üretilen, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerdir. Bu malzemeler alkali aktivatör olan, sodyum veya potasyum hidroksit ve sodyum silikatlarla karıştırılarak, geopolimerler üretilmiştir. Bu çalışmada, ana malzeme olarak %82 ferronikel cürufu, %6 su, %3 KOH ve %9 Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Elde edilen homojen bir karışımla 1 veya 2 gün içinde 80°C sıcaklıkta küre bırakılmış ve kalıplara dökülmüştür. Numuneler kendi aralarında yapısal bağlarını geliştirmek için 7 veya 28 gün bekletilmiştir. Sonuç olarak, 28 gün sonunda erken ve hızlı bir şekilde sertleşerek, 100 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

Lopez *et al.*, (2009) tarafından yapılan makalede, metakaolin tabanlı geopolimer betonların sentezi ve karakterizasyonu araştırılmıştır. Ek olarak, fiziksel ve termal özelliklerine bakılmış, Portland çimentolu betonlarla karşılaştırılmıştır. Bu iki farklı bağlayıcıya sahip numunelerin hidratasyon 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 kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu betonların 28 günlük basınç dayanımları da incelenmiştir. Metakaolin tabanlı geopolimer betonların, Portland çimentolu betonlara göre daha yüksek basınç dayanıma sahip olduğu ayrıca termal iletkenliğinin de daha düşük olduğu görülmüştür. Bu metakaolin tabanlı geopolimer betonların, basınç dayanımı olarak daha yüksek dayanımlar elde edilmesinden dolayı, inşaat sektöründe potansiyel bir kullanım alanı olduğunun göstergesidir.

Diop *et al.*, (2011) 4 M ve 12 M arasında sodyum hidroksit çözeltileri ve alüminosilikat malzemeleri düşük sıcaklıklarda geopolimer tuğlanın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İlk olarak, Senegalde kaolin içerikli toprak malzemesi olan killer kullanılmıştır. Bu çalışmada, Niemenike doğal ve kalsinli killerinin tuğla üretiminde kimyasal ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Numuneler 1 hafta ile 3 ay arasında 40°C sıcaklıkta ve %60 bağıl nemde saklanmış, sodyum hidroksit yoğunluğunun değişimiyle dayanımının değiştiği görülmüştür. Bütün yoğunluklardaki numuneler için 14. gün maksimum dayanım elde edilmiştir. Ayrıca bütün numunelerde, doğal killerle oluşturulan geopolimer tuğlalar uzun süre içinde daha büyük dayanım göstermiştir. Fakat, kısa sürede kür edilen numunelerde ise (6, 12, 24 saatlik) kalsinli killerin mekanik özelliklerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat, uzun veya kısa sürelerde kalsinli veya doğal killerin her zaman yoğunluklarının artmasıyla basınç dayanımlarının da arttığı tespit edilmiştir.

Cheng ve Chiu (2003) tarafından yapılan çalışmada yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanarak, alkali aktivatörlerle geopolimerler üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak, potasyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Sıcaklık, KOH yoğunluğu, metakaolin ve sodyum silikatın içerikleri geopolimerin priz süresinde etkili olduğu görülmüştür. Yüksek fırın cüruf tabanlı geopolimerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Maksimum basınç dayanımı 79 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca, farklı yoğunluklarda potasyum hidroksit kullanımının da yangın dayanımını etkilediği görülmüştür. Ek olarak, geopolimerlerde K₂O içeriği de mekanik özelliklerde etkili olmuştur. K₂O içeriğinin artmasıyla, priz süresinin, basınç ve yangın dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Buchwald *et al.*, (2009b) tarafından yapılan çalışmada, metakaolin ve uçucu küllerin bağlayıcı malzeme olarak kullanılabileceği araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ise, illit ve simektit kil minerallerinin, alkali aktivasyonlardan sonra, geopolimer bağlayıcı malzeme olarak kullanılabileceği incelenmiştir. Bu nedenle, illit kil içeren malzemelerin 550 ve 950°C arasında aktivasyon ısıları ve basınç dayanımları üzerinde durulmuştur. Alkali aktivatör olarak, NaOH kullanılmıştır. Numunelerin 750°C ve 850°C'de, daha hızlı çözünme ve yüksek silikat yoğunluğu elde edilmiştir.

Aynı numuneler, 950°C’de ise en yüksek silikat yoğunluğuna ulaşmış, fakat çözünmesi gecikmiştir. Bu çözünmüş silikat ve alüminat monomerler çözeltilerde Si/Al oranının etkisi de incelenmiştir. 750°C’de sıcaklığın üstünde Si/Al oranı artmasıyla stabil bir fazda alüminat bir birleşme ve yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Sonuç olarak, 28 gün sonunda 550 ve 650°C hidrasyon ısılarında çok düşük basınç dayanımı göstermiştir. Fakat 750°C ve üzerindeki sıcaklıklarda gerçekte kalsinasyonlarda ise, daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Olivia ve Nikraz (2012) yaptıkları çalışmada, geopolimer beton üretirken uçucu kül kullanılmış ve en iyi karışımı elde etmek için mekanik özellikleri ve dayanıklılığı incelemişlerdir. 9 tane karışım hazırlamış ve agrega içerikleri, kür sıcaklıkları, alkali aktivatörlerle uçucu küllerin ve sodyum silikat ile sodyum hidroksit oranlarının, geopolimer beton üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak 28 günde 55 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer beton üretmişlerdir. Bu karışımlardan, Portland çimentoya göre çekme ve eğilme mukavemeti daha yüksek, fakat elastisite modülü daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Tüm geopolimer karışımların basınç dayanımı, ıslak ve kuru ortamlarda önemli ölçüde değişmiştir. Ancak ağırlık kayıpları Portland çimentolu betonlara göre daha yüksek olduğu görölmüştür. Sonuç olarak, geopolimer karışımların, Portland çimentoya göre deniz suyu ortamlarında mekanik özellik olarak daha iyi sonuçlar verdiği görölmüştür.

Nazari *et al.*, (2011) uçucu kül ve pirinç kabuğu külü ile üretilen inorganik polimerler kullanarak, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını araştırmışlardır. İlk numuneler oda sıcaklığında küre bırakılmış, diğer numuneler ise 36 saat 40°C ile 90°C arası sıcaklıkta bekletilerek basınç dayanımları ölçölmüştür. Sonuç olarak, en yüksek basınç dayanımı, SiO₂/Al₂O₃ oranı 2.99 ve 80°C sıcaklıkta kür edildiğinde, 58.9 MPa olarak elde edilmiştir.

Russell *et al.*, (2005) pulverize yakıt külü için bir aktivatör olarak atık mantar kompostu külünün kullanma potansiyelini araştırmışlardır. Portland çimentosu yerine pulverize yakıt külü kullanımının beton özelliklerini geliştirmekle beraber, puzolanik aktivitesinin düşük olduğunu bunun sonucu olarak da betonun erken yaşlarda dayanımının az geliştiğini belirtmişlerdir. Bu problemin çözümü içinde mekanik, kimyasal, termal olarak aktive metotlarını araştırdıklarını belirtmişlerdir. Atık mantar kompostu, pulverize yakıt külü/normal Portland çimentosuna eklendiğinde betonun erken dayanımını geliştirmiştir. XRD sonuçlarına göre; %20 atık mantar kompostu içeren karışımlarda hem 7 hem de 28 günlük etrenjit formasyonunun geliştiğini belirtmişlerdir.

Guo *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu kül, alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanarak geopolimerler üretmişlerdir. SiO_2/Na_2O oranları 1.0, 1.5 ve 2.0 M olacak şekilde alkali aktivatörlerin silis modülleri ayarlanmıştır. Bütün numelerde su/CFA (C sınıfı uçucu kül) oranı 0.4 kabul edilmiştir. Ayrıca, karışımlarda silis modülünü ayarlamak için bir miktar saf su da kullanılmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri, SiO_2/Na_2O oranları 1.5 ve Na_2O içeriği %10 olan numulardan elde edilmiştir. Ayrıca 23°C ve 75°C sıcaklıkta 7 ve 28 gün kür sürelerinde basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. En iyi sonuç olarak, 23°C ve 28 günde 63.4 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Ek olarak, uçucu kül tabanlı geopolimerlerin, Portland çimentolara göre daha az hidrasyon ısıyı oluşturduğundan, çevreye verdiği CO_2 miktarının da az olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, geopolimer çimentoların çevre ve enerji kaynaklarının korunmasında daha etkili olduğu görülmüştür.

Lee *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada petek biriket külünü ve alkali-aktivatör olarak, farklı yoğunluklarda sodyum hidroksit kullanmışlardır. Kullanılan küller yüksek miktarda silis ve %9.88 yanmamış karbon içermektedir. Bu malzemeler farklı yoğunluklarda karıştırılarak, farklı kür ve sıcaklıklara bırakılmışlardır. Petek biriket kül tabanlı geopolimerlerin basınç dayanımlarını, yanmamış karbon miktarına, NaOH çözelti yoğunluğuna, kür sıcaklığına ve kür süresine bağlı olarak

incelemişlerdir. Yanmamış karbon tabanlı geopolimerler üretilerek, 12 M sodyum hidroksit çözeltisinde 80°C kür şartları altında 65.63 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Sonuç olarak, yanmamış karbon tabanlı geopolimer çimentoların, Portland çimentoya alternatif olarak kullanılabilmesi görülmüştür.

Topçu ve Toprak, (2009) yaptıkları çalışmada termik santral taban külünün (TK) alkalilerle aktive edilerek hafif harç üretiminde kullanılması amaçlamışlardır. Bu amaçla öğütülmüş TK sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) alkali çözeltileri kullanılarak çimentosuz harç karışımları üretilmiştir. Numunelere 20 saat 75°C sıcaklıkta etüvde veya laboratuvarında 20°C sıcaklıkta havada kür olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. 1, 7 ve 28. günlerde numunelerin birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada taşınması ve depolanması oldukça maliyetli olan ve önemli çevre kirliliğine neden olan TK'nın hızla ekonomiye kazandırılması ve çevre kirliliğinin önlenmesi amaçlanmıştır. TK'nın alkaliler ile aktivasyonu sağlanarak standartlarda beton, tuğla ve gazbeton gibi çeşitli yapı malzemeleri için öngörülen basınç dayanımlarının üzerinde basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. 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 (SHSS) birim ağırlığı 1.59 gr/cm³, basınç dayanımı 18.51 MPa ve su emmesi %6.58 bulunmuştur. SHSS numunesinin 30 ve 80 donma-çözülme çevrimi sonunda kütle kaybı sırasıyla %3.7 ve 6.2 ve basınç dayanım kaybı sırasıyla %4.3 ve %11.5 olarak bulunmuştur. SHSS üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneylerinde numunenin 400°C sıcaklığa kadar termal stabilitesini koruduğu, 600°C sıcaklıkta ise dayanım kaybının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan agregaların genişletilerek geopolimerin yüksek sıcaklık direncini düşürdüğü belirlenmiştir.

Jueshi *et al.*, (2001) uçucu külün farklı karışık çimentolardaki (kireç-uçucu kül, kireç-uçucu kül-cüruf ve uçucu küllü Portland çimentosu) reaktivitesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar ışığında Na₂SO₄ eklenmesinin tüm bu karışık çimentolar için dayanımı artırdığı sonucuna varılmıştır. Na₂SO₄

eklemenin uçucu kül içeren çimentoların erken ve geç dayanımını önemli derecede artırdığı belirtilmiştir. Aktivasyon etkisinin ilk 3 ve 7 günlük dönemde meydana geldiği saptanmıştır. Uçucu külün öğütülmesinin aktivitesini artırdığı, ancak Na₂SO₄ eklenmesi kadar etkin olmadığı belirtilmiştir. Diğer taraftan öğütme ve Na₂SO₄ eklenmesinin birlikte uygulandığı durumlarda, tek bir aktivasyon metoduna göre daha yüksek dayanım gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca öğütülmüş yüksek fırın cürufunun uçucu küle nazaran Na₂SO₄'e hassasiyetinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak uçucu küllü Portland çimentosuna CaO eklemenin de uçucu külün aktivasyonuna katkı sağlayacağı belirtilmiştir.

Bakri *et al.*, (2011b), yaptıkları çalışmada Portland çimentonun yerine yeni bir alternatif malzeme olan uçucu kül tabanlı geopolimer beton üretmişlerdir. Uçucu küller kömür sanayisinin bir yan ürünüdür ve dünyada yaygın olarak bulunur. Ayrıca, uçucu küller, Portland çimentoya göre daha çevre dostu ve ekonomiktir. Uçucu küller, yüksek oranda silika ve alimüna içermekte ve alkali çözeltilerle, alüminosilikat jel oluşturarak kaliteli bir beton elde edilebilir. Uçucu küllerin inceliğinin artırılmasıyla, porozitede azalma ve bunun sonucunda basınç mukavemetinde artma gözlenmiştir. Ayrıca, uçucu kül tabanlı geopolimer betonlar normal betonlara göre yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklıdır. Sonuç olarak, uçucu kül tabanlı geopolimerler, normal çimentoya göre hem basınç dayanımı hem de işlenebilirlik olarak daha iyi sonuçlar vermiştir.

Diaz-Loya *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer betonlarla, Portland çimentolarından elde edilen betonların mekanik ve kimyasal özelliklerini karşılaştırmışlardır. Portland çimentoları daha yavaş dayanım kazanırken, geopolimer çimentolar daha erken ve yüksek basınç dayanım göstermiştir.

Reddy *et al.*, (2011) tarafından yapılan çalışmada Portland çimentonun çevresel etkilerini azaltmak için alternatif bağlayıcı geliştirmeye gerek olduğu

belirtilmektedir. Bu konuda, jeolojik kökenli malzeme olan ve bol miktarda silisyum ve alüminyum içeren uçucu kül kullanılarak, geopolimer beton üretilmiştir. Yapılan çalışmada, çimentonun basınç dayanımı düşük kireç bazlı uçucu kül ile sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatör karıştırılarak farklı kür şartlarında ve farklı yoğunluklarda geopolimer betonların basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak; 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç dayanımlarında en yüksek değer 16 M yoğunluktaki numunelerde elde edilmiştir.

Temuujin *et al.*, (2010) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül tabanlı geopolimer harçların agregalar kullanarak fiziksel ve mekaniksel özellikleri araştırılmıştır. Geopolimer bağlayıcıların, agrega ağırlığına oranı 1 ile 9 arasında değişmektedir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Geopolimer harçlarda agregaları bağlayıcılar güçlü bir şekilde arada tutar. Alkali aktivatör miktarını artırmadan, kum içeriğinin artırılması bağlayıcı sistem içinde geopolimerazasyon özelliklerinde azalma oluşturur. 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.

Skvára *et al.*, (2003) tarafından yapılan çalışmada kullanılan uçucu küller Çek enerji santralinden atık malzeme olarak elde edilmiştir. Geopolimerler, iri ve ince taneli agregalar, uçucu küller ve alkali çözeltiler gibi karışımlarla harç, hamur ve beton kıvamında inceleme yapılmıştır. Silis modülü 1 ile 1.6 arası elde edilmesi için bir miktar NaOH eklenmiştir. Na₂O yoğunluğu uçucu kül ağırlığının %6-10 arası değişmektedir. Bazı durumlarda, aynı zamanda kalsiyum içeren malzemeler (örneğin, yüksek fırın cürufu, alçıtaşı, kireçtaşı) beton karışımlarına ilave edilmiştir. Kalıbını alan harç karışımları laboratuvar ortamında 28 gün boyunca %40 bağıl neme sahip bir ortamda tutulmuştur. Örnekler daha sonra Na₂SO₄, MgSO₄ ve NaCl çözeltilerine bırakılarak test yapılmıştır. Uçucu küllü geopolimerler ilk 28 günde 15

ile 70 MPa arasında dayanım gösterirken, 360 günün sonunda 100 ile 160 MPa arasında değişen basınç dayanıma ulaşmıştır.

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 durulmuştur. $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranı 0.20, 0.30 ve 0.40, kür sıcaklığı 50, 65 ve 80°C'de ve 7, 28, 91, 180 günlük 3 farklı numune incelenmiştir. Bu çalışmada alkali aktivasyonlu uçucu kül tabanlı geopolimerde hamur ve harç numuneleri hazırlanmıştır. Hamur fazında SEM ve XRD cihazları ile mikroyapı analizlerini incelemiştir. Harç numunelerinin ise mekanik özellikleri belirlenmiştir. Molar oranı 0.40 olan harç numunelerin en yüksek basınç dayanımı değerini verdiği görülmüştür.

Chindapasirt *et al.*, (2011) tarafından yapılan çalışmada düşük reaktiviteli, yüksek CaO ve CaSO_4 içeren akışkan yataklardan elde edilen FBC (akışkan yatak teknolojisi) uçucu külleri kullanılmıştır. Alkali aktivatörler olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak geopolimerler üretilmiştir. Geopolimer hamurların XRD ve SEM kullanarak mikroyapı analizleri incelenmiştir. Ayrıca, basınç dayanımları da incelenmiştir. Sonuç olarak, FBC uçucu küllerin, PCC (Pulverize kömür teknolojisi) uçucu küllerle birlikte geopolimer kaynak olarak kullanılabilceği görülmüştür. PCC uçucu külleri kullanarak geopolimerlerin işlenebilirliğini ve dayanımını arttırdığı da gözlenmiştir. Sonuçta, PCC uçucu külleri, FBC uçucu külleri ve alkali aktivatörler kullanarak 30 MPa bir basınç dayanım gösteren geopolimer malzeme üretildiği görülmüştür.

Chindapasirt ve Rattanasak (2010) yaptıkları çalışmada, akışkan yataklı küllerin, pulverize kömür yanmalı uçucu küllerin kimyasal yapıları incelenerek, geopolimer malzemelerin oluşturulması 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 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1.5, 65°C kür edilip 48 saat bekletilmiştir. Ayrıca bunların XRD ve SEM aletleriyle mikroyapı özellikleri incelenmiştir. 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 mukavemet gösterdiği tespit edilmiştir.

Xu *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada akışkan yataklı alt küller kullanmışlardır. Tehlike unsuru olarak görülen CBA'nın (akışkan yataklı alt küllerin) imha edilmesi ciddi bir sorun teşkil ederken, bu atık malzemelerin geopolimer üretimi için kaynak malzeme olarak kullanılabilmesi görülmüştür. CBA külleri aktive etmek için, alkali hidroksitler veya sodyum silikat çözeltileri kullanılmış ve geopolimer hamurlar hazırlanmıştır. Bu hazırlanan numunelerde, 168 saat kür süresinde ve 40°C kür sıcaklığında 52.9 MPa en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca, bu numunelerin 800°C ve 1050°C sıcaklıklarda havaya, suya ve fırına bırakılmış ve basınç dayanımlarına bakılmıştır. En iyi sonuç, 800°C hava ortamında 65 MPa basınç dayanımı olarak bulunmuştur. Bu çalışma sonucunda, CBA geopolimerlerinin organik ve Portland çimentolar yerine, ısı kararlılığı, yangın dayanımı ve basınç dayanımı olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Vijai *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada Portland çimentonun çevreye verdiği zararlardan dolayı alternatif çimento olarak uçucu küllü yapılan geopolimer çimento üretmişlerdir. Bu uçucu küller, bol miktarda alüminyum ve silis içermektedir. Bu çalışmada geopolimer çimentonun yoğunluğu ve basınç dayanımı üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca, uçucu kül tabanlı geopolimer çimentoların farklı kürlerde basınç dayanımlarına bakılmıştır. Uçucu küllü birlikte, ince ve kaba agrega aktivatör olarak sodyum silikat, sodyum hidroksit ve bir miktarda su katılarak geopolimer beton üretilmiştir. Bütün numunelerde alkali sıvıların, uçucu küllü oranı sabit ve 0.4 olarak seçilmiştir. Ayrıca bu numuneler ortam küründe ve sıcak kürde (60°C) bırakılmış,

sonuç olarak sıcak kürdeki numunelerin ortam kürüne göre daha büyük basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. İlk 7 günde, yüksek sıcaklıktaki kürde 28.31 MPa dayanım gösterirken, 28 günün sonunda 33.22 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır.

Rattanasak *et al.*, (2011) yaptıkları çalışmada, Tayland'ın kuzeyindeki enerji santralinden elde edilen uçucu külleri 19 µm seviyesinde öğütürerek kullanmışlardır. Bu uçucu küller yüksek miktarda CaO ve Fe₂O₃ 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 klorürün 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 başlangıç ve bitiş süreleri ortalama 60 ve 130 dakika sürmektedir. Fakat %1 ve %2 oranlarında kullanılan CaCl₂ geopolimerlerin priz süresini azalttığı görülmüştür. Başlangıç priz sürelerinin 26 ila 35 dakika arasında azaldığı, bitiş sürelerinin ise 45 ila 60 dakika arasında azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca CaCl₂'ün geopolimer hamurların priz süresini hızlandırdığı, basınç dayanımına da etki ettiği tespit edilmiştir. %1 oranında CaCl₂ kullanılmasının basınç dayanımını artırdığı, fakat %2 oranında CaCl₂ kullanıldığında ise basınç dayanımını değiştirmediği görülmüştür. Sonuç olarak 25.8 MPa basınç dayanımı göstermiştir.

Wongpa *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada bağlayıcı malzeme olarak, pirinç kabuğu külü ve uçucu kül kullanmışlardır. Alkali aktivatör olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Bu malzemelerle birlikte, ince ve kaba agregalar kullanarak SiO₂/Al₂O₃ oranları farklı olan geopolimer betonlar üretilmiştir. Bu numunelerin, 90 günlük basınç dayanımları ve su geçirgenlikleri araştırılmıştır. Basınç dayanımlarının, su geçirgenliklerinin ve elastisite modüllerinin, karışım

oranlarına, özellikle de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve hamur/agrega oranlarına bağlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve hamur/agrega oranları yüksek olan numunelerin, düşük basınç dayanımı ve yüksek su geçirgenlik özellikleri olduğu görülmüştür. Aynı basınç dayanımına sahip geopolimer betonların, sıkıştırılmış betonlara göre daha yüksek su geçirgenlik katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Sathonsaowaphak *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada, linyitin atık ürünü olan dip külleri, geopolimer kaynak olarak kullanmışlardır. Geopolimerizasyonun aktivitesi için, sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Atık küllerin inceliği, alkali/kül oranı, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve sodyum hidroksitin yoğunluğu gibi parametreler incelenmiştir. Eklenen suların, sodyum hidroksitin ve süperakışkanlaştırıcıların, işlenebilirliğe ve dayanıma etkisi üzerinde çalışılmıştır. Geopolimer harçlar yapılırken, kullanılan küller 15.7 mikron seviyesinde öğütülmüştür. Ayrıca parametreler değiştirilerek hazırlanan numunelerden 24–58 MPa arasında basınç dayanımları elde edilmiştir. Geopolimerlerin suyla birleşmesiyle oluşan harçların süperakışkanlaştırıcılara göre daha etkili olduğu ve süperakışkanlaştırıcılarla oluşturulan harçların basınç dayanımını azalttığı görülmüştür. Ayrıca, sodyum hidroksitin eklenmesiyle geopolimer harçların dayanımında değişiklik olmazken, işlenebilirliği ise artırdığı gözlenmiştir.

Hardjito *et al.*, (2005) uçucu kül tabanlı geopolimer betonlar üzerinde çalışmışlardır. Malzeme kaynağı olarak, düşük kalsiyum içeren F tipi uçucu küller kullanılmıştır. Sodyum hidroksit çözeltisi, katı sodyum hidroksite bir miktar su ilave edilerek hazırlanmıştır. Ayrıca, bir miktar su ve naftalin sülfat tabanlı süper akışkanlaştırıcılar kullanarak, taze geopolimer betonların işlenebilirliğinin arttığı tespit edilmiştir. Çözeltilere, uçucu kül katılmadan karıştırılmış ve karıştırma süresinin artmasıyla, işlenebilirliğin azaldığı gözlenmiştir. Daha uzun karıştırma sürelerinde, yüksek basınç dayanımı ve yüksek yoğunlukta numuneler elde edilmiştir. Bu karışımlar sonucunda, sertleşmiş betonlarda polimerizasyon sürecinde olumlu katkı sağlanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, uçucu kül tabanlı geopolimer betonların

dayanım olarak iyi sonuçlar verdiği görülmüş ve 40-65 MPa arasında basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.

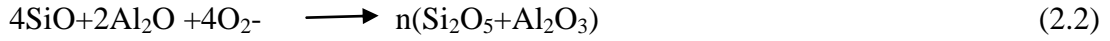
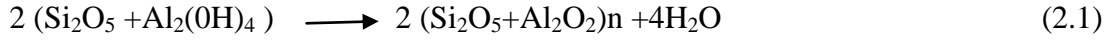
Song *et al.*, (2005) yaptıkları çalışmada beton kanalizasyon borularında, sülfürik asit probleminin uzun vadede etkili olmadığı belirtilmiştir. Geopolimer bağlayıcılar aside dirençli olarak ifade edilmiş ve dolayısıyla kanalizasyon borusu üretimi için bir alternatif bağlayıcı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer betonların 8 haftaya kadar %10 sülfürik asit çözeltilerine dayanıklı olup olmadığı incelenmiştir. F tipi uçucu kül tabanlı geopolimer betonlar, başlangıçta 23°C'den 70°C'ye kadar çeşitli kür sıcaklıklarında 24 saat bekletilmiştir. Bu deneyler sonucunda 53-62 MPa arasında 28 günlük basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Asit hacminin yüzey alanına oranı sabit tutularak, bu numunelerin %10 sülfürik asite daldırıldıktan sonra 7, 28 ve 56 günlük deneyler yapılmıştır. ASTM C267 standartlarına göre test edilmiş, kütle kaybı ve basınç dayanımında azalma olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, geopolimer betonlarda %3'den daha az kütle kaybının olduğu ve sülfürik aside karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, geopolimer numunelerin yapısal olarak sağlam olduğu ve tamamen sülfürik asit ile nötralize edilmiş olmakla birlikte, halen önemli bir yük kapasitesi taşıdığı belirlenmiştir.

Wang ve Cheng (2003), enerji santralinin atık maddesi olan uçucu kül kullanarak geopolimer malzeme üretme konusunda çalışmışlardır. Üretilen numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri, basınç dayanımları ve yangın dayanımları incelenmiştir. Numunelerin 60°C sıcaklıkta ve oda sıcaklığında özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, 60°C sıcaklıkta priz sürelerinin, oda sıcaklığına göre daha az olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, bu numunelerin su emme oranlarının oda sıcaklığına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Basınç dayanımları 48 saatlik kalıplarda bekletildiğinde artmakta ve yaklaşık 64.4 MPa dayanım elde edilmektedir. Ancak 48 saatten sonra uçucu kül tabanlı geopolimerlerin dayanımında azalma görülmektedir. Ayrıca geopolimer malzemelerin, oda sıcaklığı ve 60°C sıcaklıkta yangın dayanımının benzer sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, bu geopolimer

malzemeler, yüksek basınç dayanımı ve iyi yangın dayanımı göstermekte ve yapı malzemesi olarak kullanılabilir olduğu gözlenmiştir.

Ahmari *et al.*, (2012) yaptıkları çalışmada bakır madeni atıklarını kullanarak, geopolimer tuğla üretimi amaçlanmıştır. Madeni atıklara, alkali aktivatör olan sodyum hidroksit katılarak belli bir basınç altında ve belli sıcaklıkta kür edilerek geopolimer tuğlalar üretilmiştir. Kille üretilen tuğlalar yüksek sıcaklıklarda elde edilirken, bakır madeni atıklarıyla üretilen geopolimer tuğlalar alkali aktivatörlerden dolayı düşük sıcaklıkta elde edilerek, çevresel ve ekolojik dengeye önemli yararlar sağlanmıştır. Yapılan çalışmada, dört ana faktör olan sodyum hidroksit yoğunluğu (10 ve 15 M), su içeriği (%8-18), basınç dayanımı (0-35 MPa) ve kür sıcaklıklarının (60–120°C), madeni atıklı geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, sodyum hidroksit yoğunluğu yüksek olan (15 M) geopolimer tuğlaların, basınç dayanım değerleri daha yüksek elde edilmiştir. Kür sıcaklıklarının da geopolimerizasyona ve dayanıma etkisi vardır. En yüksek basınç dayanımı 90°C kür sıcaklığında elde edilmiştir.

Ravikumar *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu küllü üretilen geopolimer betonların ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) ile oluşturulan geopolimer betonların, farklı oranlarda sodyum hidroksitle karıştırılarak; basınç dayanım değerleri incelemiştir. Yüksek basınç dayanımı elde etmek için, malzemelerin içerikleri, en uygun kür sıcaklık ve süreleri belirlenmiştir. Aktivatörlerin yoğunluklarının, aktivatör ve bağlayıcıların oranlarının basınç dayanımı üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir. Yüksek fırın cürufu ile elde edilen geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri, uçucu küllü üretilen geopolimer betonlarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca uçucu küllü geopolimer betonların ve yüksek fırın cürufu geopolimer betonların en uygun kür sıcaklıklarındaki basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. Uçucu küllü geopolimer betonlarda, 75°C’de maksimum basınç dayanımı değeri elde edilmiştir.



Buhar fazında gerçekleşen bu iki reaksiyon, denklem (2.1, 2.2), 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).

Beton numuneler 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlardaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Beton numuneler üretildikten sonra %60 nem oranında 75 °C sıcaklıkta 72 saat buhar küründe bekletildikten sonra çıkarılarak laboratuvar ortamında deney gününe kadar bekletilmiştir. Benzer şekilde Brough ve Atkinson (2002) tarafından yapılmış aktivasyon çalışmasında, cüruf 1.5 M (Na₂O).(SiO₂) solüsyonu ile aktive edildiğinde dayanımın hızlı bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. 80°C'de 12 saatlik ısıtma kürünün yüksek dayanıma neden olduğu belirlenmiştir (Sağlık, 2009).

Davidovits (1994), geopolimer çimentolar, yüksek alkali içeren malzemelerin polimerizasyonu ile elde edilen, üç boyutlu zeolitik yapılardır. Geopolimer çimentolar, oda sıcaklığında hızlıca sertleşmiş ve 20°C sıcaklıkta 4 saat sonunda 20 MPa basınç dayanım değeri elde edilmiştir. 28 günün sonunda ise 70-100 MPa aralığında değişen basınç dayanım değeri elde edilmiştir. Ayrıca bu geopolimer bağlayıcılar atık maddeleri değerlendirerek bağlayıcı malzemeler üretmek bakımından, önemli bir yere sahiptirler. Bu malzemelerin eşsiz özelliklerinin, erken yüksek dayanımı ve düşük büzülmenin yanında, donma çözünmeye, sülfat etkisine ve korozyona karşı dayanıklı oldukları belirtilmiştir. Ek olarak, bu geopolimer çimentoların hava kirliliğinin azalmasında da önemli katkısının olduğu belirtilmiştir. Bu malzemeler, Portland çimentolarının CO₂ emisyonunu %80 oranında azaltmakta ve gelecekte küresel ısınma sorununa önemli bir katkı sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Qiao *et al.*, (2009) yeni bir puzolanik malzemede kimyasal aktivatörlerin etkisini araştırmak için, mekanik ve termal muamele görmüş ince taneli (<14 mm) uçucu küllü malzemeyi incelemişlerdir. Uçucu kül ince halde öğütölmüş, ısıı işlem (800°C) görmüş ve Ca(OH)₂ ile karıştırılarak, partiköllerin aktive edilmesi için Na₂SO₄, K₂SO₄, Na₂CO₃, K₂CO₃, NaOH, KOH ve CaCl₂ kimyasalları kullanılmıştır. Sonuç olarak; termal yöntem görmüş uçucu küllü numunelerin; öğütölmüş uçucu küllü numunelerden daha reaktif olduğunu belirtmişlerdir. Na₂CO₃ katkısının; 28 günlük kür süresinde Ca(OH)₂ tüketimini ve basınç dayanımını arttırdığını açıklamışlardır.

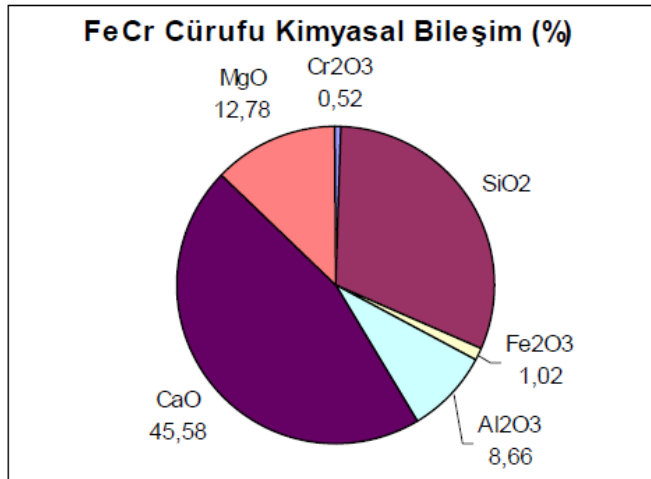
Si:Al molar oranının 1 olduğu sistemlerde zeolit kristaline benzeyen tuğla seramik ve yangından koruyucu ürünler elde edilebilir. Bu oran 2 olduğunda yine seramik amorf arası yapıda geopolimer çimento ve beton sentezlenebildiği gibi biraz daha ileri teknoloji ile radioaktif atıkların istiflenmesi için gerekli yapılar üretilebilmektedir. Si:Al oranının 3 olduğu durumlarda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta fırın kaplamaları, cam 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 kullanılabilecek yangın ve ısı dayanımı yüksek nano kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabilmektedir (Davidovits, 2008; Arıöz vd, 2009).

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Atık Malzeme Olarak Elazığ Ferrokróm Cürufu ve Kimyasal Kompozisyonu

Cüruflar, çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Demir ve çelik cürufu dışındaki metalurjik cüruflar ikiye ayrılabilir. Bunlar, demir-alaşımı cürufları ve demir içermeyen cüruflardır. Örneğin, çinko, bakır, kurşun ve nikel cürufları demir içermeyen cüruflardır. Ferrokróm (FeCr) cürufu ve Silikoferrokróm (SiFeCr) cürufu ise demir-alaşımı cüruflarıdır.

Ferrokróm 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

3.2. Elazığ Ferrookrom Fabrikası

Elazığ ferrookrom fabrikası'nın kuruluş amacı; bölgede büyük rezervelere ulaşan kromit cevherini satış şartlarına uygun olarak ham veya işlenmiş halde pazarlanabilir bir ürün haline getirip değerlendirmektir. Elazığ ferrookrom fabrikası, Elazığ-Bingöl karayolu üzerinde Elazığ'dan yaklaşık 60 km uzaklıkta olup Elazığ-Kovancılar ilçesi yakınında bulunmaktadır. Hammadde olarak kullanılan maddeler, %42-47 Cr_2O_3 içeren parça kromit cevheri (25-125 mm) yanında, Cr_2O_3 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 geçirgenliğini 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).

Ark-direnç fırınlarının ergitme için gerekli, yaklaşık tüm işlem enerjisi birleşik enerji şebekesinden sağlanan 3 fazlı elektrik enerjisidir. Bir ton ferrookrom üretimi için gereken 4000-4500 kWh elektrik, maliyeti etkileyen önemli bir faktördür. Bir ton ferrookrom için gerekli 470 kg metalurjik kok'un başlıca görevi, krom cevheri bünyesindeki bağlı oksijeni karbonmonoksit gazı halinde gaz fazına geçirerek uzaklaştırmak, cevheri indirgemektir. Sonuç olarak, ferrookrom, krom cevheri ve indirgeyici kok'un yüksek sıcaklıkta ergitilip kalıplanması suretiyle elde edilir. Şu anda fabrika 150.000 ton/yıl ferrookrom üretim kapasitesi ile çalışmaktadır. Ortaya çıkan cüruf, ürünün yaklaşık 1.5 katıdır (Taşdemir, 2006).

3.3. Günümüze Kadar Çimento Teknolojilerinin Gelişimi

İlk çağlarda inşaat teknolojisinin en büyük sorunu bağlayıcı madde olmuştur. Doğal taş, kerpiç ve tuğla duvarların ilk bağlayıcı harcı çamurdur. Çamuru bağlayıcı olarak nitelemek elbette doğru değildir. Prehistorik devirde alçı, bitüm ve bir oranda kireç denenmiştir. Ancak buluşlar oldukça kısır kalmıştır, en büyük zorluk yüksek sıcaklıkların elde edilmesi olmuştur. Havada yakılan ateşler ile 400-800°C'ın üstüne çıkmak olanaksızdır. Bu nedenle alçıtaşından alçı elde etmek nispeten kolaydır, zira gerekli sıcaklık sadece 190°C'dır. Alçı harcı Mısır'daki Sakkara ve Keops piramitlerinin derzlerinde dolgu maddesi olarak kullanılmıştır (Akman, 2003).

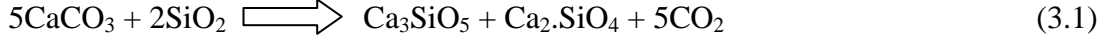
Geçmişte esas amaç, puzolanik reaksiyon sayesinde çimentonun ana taşıyıcıları olan kalsiyum silikat ve alüminatları elde edebilmek, böylece suda çözülmeyen daha yüksek dayanımlı bir bağlayıcı elde etmektir. Bu puzolanik etki metakaoline dönüşen pişirilmiş kilin (tuğlanın) kirece katılması ile Yunan medeniyetinden çok önce sağlanabilmiştir. Örneğin Çayönü'nde, İsrail'in Yiftah-El ve Ürdün'ün Jericho bölgelerinde yapılan kazılarda çok yüksek dayanımlı (35 MPa'a kadar), parlak, iyi sıkışmış yer döşemeleri bulunmuştur (Malinowski *et al.*, 1991).

Sadece kil, kireç veya alçıdan oluşturulan harçların suya dayanıklı olmadıkları hatırlanacak olursa, Çatalhöyük'teki harçların büyük bir olasılıkla volkanik kül içeren topraklarla yapılmış olduğu görülmektedir. Girit'te, Rodos'ta ve birçok yerde 3-4 bin yıl önce yapılmış olan su yapıları ve mozaik işleri de bugün hala dayanıklılığını korumaktadır. Bu yapılarda da puzolan ve söndürülmüş kireçten oluşan bağlayıcılar kullanılmıştır. Ancak, puzolan tanımına giren malzemelere "puzolan" isminin verilmesi ve o tür malzemelerin harç ve beton yapımında yaygın olarak kullanımı, MÖ 300 yılı civarında Romalılar tarafından başlatılmıştır (Malinowski *et al.*, 1979).

Romalılar volkanik külü, volkanik küllü toprağı veya pişirilmiş kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirerek, su içerisinde de sertleşebilen bağlayıcı hamur elde etmişlerdir. Bu tür bağlayıcıların içerisine taş parçaları gömerek, bugünkü betona benzer betonlar yapmışlardır. Osmanlılar zamanında yaygın olarak kullanılan “Horasan harcı” da kilden yapılan ve pişirilen tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmüş durumdayken söndürülmüş kireçle birleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. Portland çimentosu ilk olarak 1824 yılında üretildiğine göre, yukarıda anlatılan ve puzolan içeren harçlardaki ve betonlardaki puzolanik malzeme, bu malzemenin “Portland çimentolu betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılması” tanımına girmemektedir. Dolayısıyla, ince taneli durumdaki puzolanik malzemenin beton yapımında katkı maddesi olarak kullanımı 1900’lü yıllarda başlamıştır (Erdoğan vd, 2007).

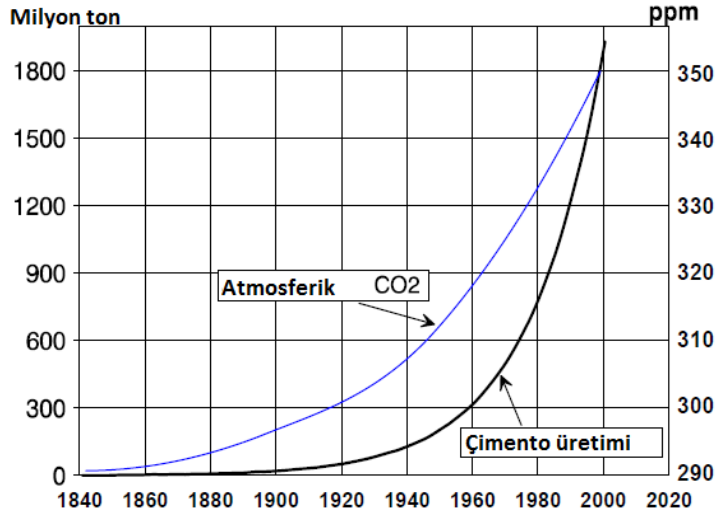
3.4. Çimento Üretiminin Çevreye Verdiği Zararlar

Çevrenin korunması ve tasarıma yönelik sürdürülebilir çalışmalar bütün endüstriler için kaçınılmaz hale gelmiştir. Çimento endüstrisi bunun için bir istisna değildir. Çimento endüstrisi her yıl atmosfere yayılan CO₂’nin %5-7’ine sahiptir. Bu oranla çimento üretimi doğadaki en fazla CO₂ yayınına sebep olan kaynaklar arasındadır. Bu endüstri için en acil kaygılardan biri küresel ısınmadır. İnsan kaynaklı CO₂ yayını ve diğer sera gazı yayını atmosferde sıcaklık artışının esas sebebini oluşturmaktadır. Bu nedenle doğadaki CO₂ emüsyonunda azalma yapmak gerekmektedir. Bu azalma geleneksel çimento üretim tekniklerinin yerine alternatif çimento bağlayıcıların gelişmesiyle elde edilebilir. Bu amaca ulaşmadaki temel problem çimento klinkeri üretimindeki mevcut kimyasal süreçtir. Söz konusu kimyasal süreç kalker ve silikanın kalsiyum silikata dönüştüğü dönüştüğü Denklem 3.1 bağıntısında verilen aşağıdaki kimyasal reaksiyon ve CO₂ üretimi üzerine kuruludur (McNulty, 2009).

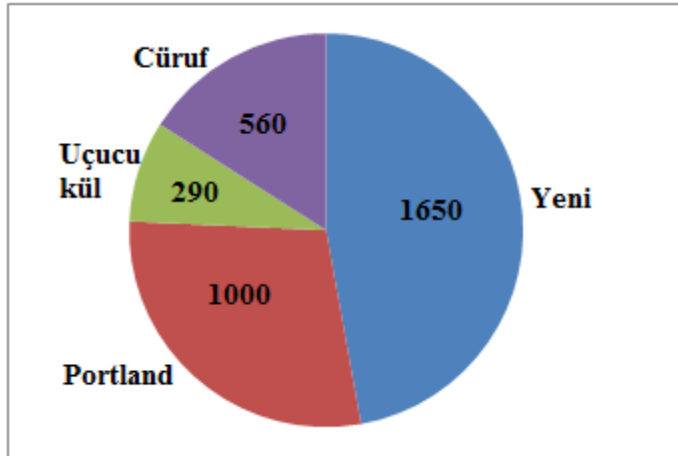


Denklem 3.1’de görüldüğü üzere her ton çimento üretimi için yaklaşık olarak 597 kg CO₂ açığa çıkarmaktadır. Bu kimyasal süreç çimento üretimindeki toplam CO₂ salınımının %50’sine tekabül etmektedir. Alternatif enerji kaynaklarının CO₂ salınımını düşürmesine rağmen, gerekli CO₂ salınımının azalması sadece Normal Portland çimentosu üretim tekniklerinin değiştirilmesiyle değil, hibrit enerji ile çimento üretimi, karbon yakalama-tutma ve kireçtaşı içermeyen bağlayıcılarla da sağlanabilir. Alternatif çimento bağlayıcıları üzerine yapılan daha önceki çalışmalar, CO₂ emüsyonunu azaltma metotları üzerinde umut verici olduklarını göstermiştir (Mcnulty, 2009).

Geopolimer çimentolar Portland çimentolardan farklı durumlarda üretilebilirler. Geopolimerler yüksek yakıt giderleri ile yüksek sıcaklık fırınları gerektirmezler. Aynı zamanda fabrika ve malzeme yatırımı gerektirmezler. Doğal olarak oluşan alkali-silika-alüminatlar ve alümino-silikatların (jeolojik kaynakları bütün kıtalar üzerinde erişilebilenler) termal işlemi sürdürülebilir geopolimerik hammadde imkânı sağlamaktadır. Geopolimer çimento üretimi enerji tüketimini önemli derecede azaltır. Düşük CO₂ salımlı geopolimerik çimentoları tanımlamak sadece çevresel bakımdan değil, ayrıca inşaat ve yapı sektöründe çimento ve beton endüstrisinin CO₂ emüsyonunu %80 oranında düşürmektedir. Atmosferik CO₂ konsantrasyonu ile dünya Portland çimento üretiminin yıllara göre değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Ayrıca 2015 yılı için toplam çimento üretiminin 3500 milyon ton olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 3) (Davidovits, 1994).



Şekil 2. Atmosferik CO₂ konsantrasyonu ile dünya PÇ üretiminin yıllara göre değişimi.



Şekil 3. 2015 yılı için çimento çeşitleri dağılımı (toplam 3500 milyon ton).

Avustralya’da Portland çimentolarının çevresel etkileri ve geopolimer gelişimleri incelenmiştir. Bu geopolimer kaynakların maliyet ve çevresel etkileri hesaplanmış ve normal Portland çimentolara göre taşıma ve enerji kaynağı olarak daha iyi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, geopolimer çimento üretimlerinin, Portland çimentolara göre %44-64 arasında sera gaz emisyonlarında azalma gözlenmiş ve Portland çimentolara alternatif olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir (McLellan *et al.*, 2011).

Portland çimento üretimlerinde yıllık 13.5 milyar ton CO₂ havaya verilmektedir. Atmosfere salınan CO₂ gazlarının %5'i bu üretimle oluşmaktadır. Bu oldukça önemli bir sorundur. Bu Portland çimento üretiminde oldukça büyük bir ısıya ihtiyaç vardır. Fakat geopolimer çimentolar, alkali aktivatörler kullanılmasıyla, düşük miktarda enerjiye ihtiyacı olduğundan, bu sorun büyük ölçüde azalmıştır (Diaz-Loya *et al.*, 2010)

Portland çimentosunun dünyadaki yıllık tüketimi 130 milyon ton olup, bu çimento ile yılda dünyada bir milyar ton beton tüketildiği bilinmektedir. Bununla birlikte, kullanılan agrega ve suyun tükenmesi göz ardı edilse bile çimentonun üretimi esnasında ortaya çıkan CO₂'in ve diğer sera etkisi yapıcı gazların çevreye verdiği zarar değerlendirildiğinde, çimentonun beton üretiminde kullanılıp kullanılmaması veya sürdürülebilir bir malzeme olup olmaması başlıca bir tartışma konusu olmaktadır (Davidovits, 2008).

Günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzeme normal Portland çimentosuyla oluşturulmaktadır. Tüketimdeki bu yüksek oran enerji, ekonomik ve çevresel problemleri de ortaya çıkarmıştır. Dünyada toplam CO₂ yayılımının %7'sinin çimento üretiminden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu yüzden Portland çimentosuna alternatif çimentolar üretmek güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Ayrıca çimento üretimi, yüksek sıcaklıkta (1400-1500°C) gerçekleşebildiği için önemli ölçüde enerji tüketimi ve dolayısıyla yüksek maliyetlerle elde edilmektedir.

3.5. Alkali Aktivatörler

Shi ve Day (2001), yaptıkları çalışmada doğal puzolanların puzolanik reaktivitelerinin aktivasyonunu araştırmak üzere üç metot uygulamışlardır. Bunlar; doğal puzolanların uzatılmış öğütülmesi (mekanik metot), puzolan içeren çimento

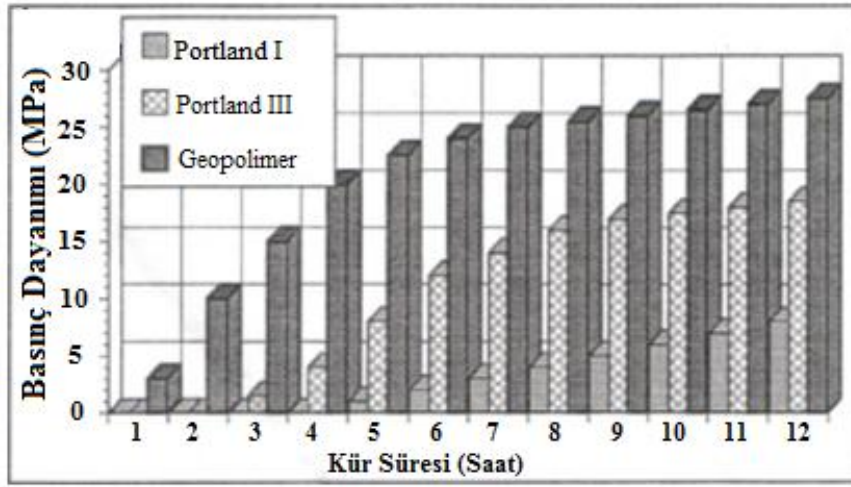
hamurunun yüksek sıcaklıkta kür edilmesi (termal metot) ve Na_2SO_4 ve CaCl_2 gibi kimyasal aktivatörlerin kullanılması (kimyasal metot) olarak gerçekleştirilmiştir. Doğal puzolanların reaktiviteleri %80 doğal puzolan ve %20 hidrate kireç karışımı üzerinden değerlendirilmiştir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$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

Fernandez ve Palomo (2005) çalışmalarında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak bir günlük kürden hemen sonra basınç dayanımının 90 MPa çıktığını tespit etmişlerdir.

3.6. Geopolimer

Geleneksel polimerler rastgele düzenlenmiş tetrahedral Al-O ve Si-O birimleri içeren X-Ray amorf alüminosilikatlardır. Geopolimerler reaktif katı alümino-silikat numuneleri ve alkali silikat solüsyonunun yüksek alkali şartlarında reaksiyonu ile oluşurlar. Geopolimer çimentoların zararlı atıkların bertarafı için, yapı malzemelerine alternatif olarak ve yanmaz paneller olarak kullanılması önerilmektedir. Bu organik alüminosilikat polimerler ile organik moleküllerin başarılı karıştırılmaları yeni ve ilginç özellikteki malzemelerle sonuçlanmıştır. Fakat kendi kimyalarındaki uyumsuzluklar, bu alandaki ilerlemeleri engellemektedir (Mackenzie and O'leary, 2009).

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. Şekil 4’de Portland çimentosu ve geopolimer çimentonun priz süresine bağlı olarak basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler verilmektedir (McNulty, 2009).



Şekil 4. Normal Portland çimentosu ile geopolimer çimentoların basınç dayanımları ile kür süresi arasındaki ilişki.

Geopolimerik bağlayıcılar (alkali aktive edilmiş malzemeler, alkali inorganik polimerler, alkali bağlı seramikler ve çimentolar) reaktif alümino-silikat malzemelerin alkali aktivasyonu ile alüminosilikat bağlarından oluşan bağlayıcılardır. Metakaolin ısı işlem uygulanmış killer, küller veya doğal puzolanlar gibi bazı malzemeler bu reaktif özelliği gösterirler. Çünkü cam gibi belirli miktarlarda yüksek enerjili fazlar içerirler. Killer termal aktivasyon işlemiyle reaktif malzemelere dönüştürülebilirler. Bu aktivasyon işlemi içerisindeki kil minerallerinin dehidratasyonu ile yüksek enerjili kararsız ve amorf olan katı malzemeler oluşur. İşlenmemiş killer bile reaktif özellik gösterebilirler (Buchwald *et al.*, 2009a).

Geopolimerler; uçucu kül, metakaolin, öğütölmüş yüksek fırın cürufu gibi katı alüminosilikat esaslı malzemeler ile alkali metal hidroksit ve silikat solüsyonunun aktivasyonu ile oluşmuş alüminosilikat bağlayıcı malzeme sınıfıdır. Bu bağlayıcıların yüksek performanslı kullanımı, çevre dostu olması ve Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olmalarından dolayı yaygın bir cazibeye sahiptirler (Thakur and Ghosh, 2009).

İzotermal kalorimetri teknolojisini kullanarak alkali-metakaolin sistemlerinin geopolimerizasyon işleminin üç aşamada (yıkım, polimerizasyon, sabitleme) meydana geldiği söylenebilir. Sıvı aktivatörlerin alkali konsantrasyonun, alkali silika solüsyon modülünün ve reaksiyon sıcaklığının farklı aşamalarda farklı etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Geopolimerizasyon periyodu alkali içeriği arttıkça kısalabilir, yani kullanılan alkali silika solüsyonunun modülü düşürülerek yapılabilir. Optimum reaksiyon sıcaklığının reaksiyon oranını ve hammadde reaksiyon derecesini arttırdığı söylenebilir. Geopolimer malzemelerin mühendislik çalışmalarında yaygın bir şekilde uygulanabilir malzemeler olması için geopolimerizasyon hızı/ölçüsü ile reaksiyon parametreleri (sıcaklık, partikül boyutu, türü ve aktivatör konsantrasyonu) arasında nicel çalışmalar gereklidir (Yao *et al.*, 2009).

Geopolimerler, inorganik polimer malzemelerdir. Geopolimerler, alümina-silikat oksitler ve alkali metal silikat çözeltiler arasında kimyasal reaksiyona girerler. Ayrıca, geopolimerlerin mukavemetleri doğal enerji kaynaklarına bağlıdır. Bu doğal enerji hammaddeleri, uçucu kül, metakaolin ve cüruf gibi malzemelerdir. Bunlar kaolin kil gibi, kalsin olmayan malzemelere göre daha yüksek basınç dayanımı göstermektedirler (Bakri *et al.*, 2011b).

Alkali aktivasyon ve alkali çimento karışımlarının gelişiminin önemli adımlarını özetleyen bazı referanslar Çizelge 1’de verilmiştir (Sağlık, 2009).

Çizelge 1. Alkali aktivasyon ve alkali çimento karışımlarının gelişimi

| | 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 |
| Majumder <i>et al.</i> | 1989 | $C_{12}A_7$ -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 |

Geopolimerler, uçucu kül, cüruf, kaolin, metakaolin vb. bağlayıcılar ile sodyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi alkali çözeltilerin karışımından elde edilebilirler. Bu bağlayıcılarla aktivatörlerden elde edilen yapı geopolimer hamuru olarak da adlandırılır. Tek bir malzemedan veya birkaç farklı malzemenin kombinasyonundan da geopolimer elde edilebilir (Xu and Deventer, 2002). En çok kullanılan alkali aktifleştiriciler sodyum silikat-sodyum hidroksit ile sodyum silikat-potasyum hidroksittir (Palomo *et al.*, 1999; Xu and Deventer, 2000; Van Jaarsveld *et al.*, 2002; Swanepoel and Strydom, 2002). Geopolimerlerin kimyasal bileşimi zeolite çok benzer olmasına rağmen, geopolimerler amorf mikroyapıya sahiptir (Xu and Deventer, 2000). Geopolimerler polimerik Si-O-Al-O kafesinden oluşmakta olup, bu kafes de SiO₄ ve AlO₄ bileşiklerinden oluşmaktadır (Swanepoel and Strydom, 2002).

Geopolimerlerin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Li *et al.*, 2004).

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

Geopolimer bağlayıcılar yapım, ulaşım gibi birçok sahada test edilmiştir. Yüksek mekanik performans, yüksek yüzey sertliği (4~7 Mohs skalası), ısı kararlılığı, mükemmel dayanıklılık ve aside karşı yüksek dayanıklılık özellikleri geopolimerlerin başlıca özellikleridir. Geopolimerik çimento 1200°C'ye varan yüksek sıcaklıklara mükemmel derecede dayanabilmekte, ayrıca 50 kW/m²'ye kadar da yangın dayanıklılığına sahip olabilmektedir. Ayrıca ısı artışından dolayı duman çıkışı yoktur (Li *et al.*, 2004).

Sertleşmiş geopolimerik malzemelerin mikroyapısı, Mısır'daki piramitlerin, Roma'daki amfi tiyatronun mikroyapısına çok benzerdir. Sonuç olarak birçok uzman bu eski yapıların inşasının doğal taşların yapılışından ziyade geopolimerizasyon esasına dayandığını düşünmektedir. Birçok bilim adamı, eski zamanlarda geopolimer teorilerinin olup olmadığını ve eski yapıların bu teoriler üzerine kurulup kurulmadığını belirlemek için araştırmalar yapmaya devam etmektedirler (Li *et al.*, 2004).

Davidovits doğal kayaç yapısına benzer özellikte, içinde Al ve Si bulduran alkali ortamda doğal oluşumlu kayaçların bağlayıcılık kazandığı bir reaksiyon sonucu olduğundan pek çok toprak mineral esaslı malzemelerin patentine sahiptir. Yüksek fiziksel özellikler gösteren inorganik kimya ürünlerine içinde bolca barındırdığı toprak mineralleri ve termoset polikondensasyon reaksiyonlu polimer kimyasıyla benzer reaksiyonlarla elde ediliyor olmasından dolayı geopolimer adını uygun görmüştür (Davidovits, 2008).

Geopolimerler özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerin birbirleri arasında polikondensasyon sonucu oluşan kovalent zincir bağlar kurması ile oluşmaktadır. Geopolimerin en iyi özellikler gösterdiği ürünler ise 750°C'de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltilisinin, düşük ısıda (40-100°C) fırınlanmasıyla elde edilebilmektedirler (Davidovits, 2008). Geopolimer gördüğü ısıl işlemler sonrası monolitik (yekpare taş) seramik yapıya ulaşmaktadır (Zeybek, 2009).

Hardjito *et al.*, (1987) ana malzeme olarak iki farklı uçucu kül, alkali aktifleştirici olarak da sodyum silikat-sodyum hidroksit çözeltilerini kullanarak geopolimerik beton üretmişlerdir. Bu betonları fırında farklı sıcaklıklarda kür etmişler ve sonuç olarak Portland çimentolu betonda olduğu gibi karışımdaki su miktarının geopolimerik betonun işlenebilirliğini etkilediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar karışımdaki su miktarının ne kadar yüksek olursa Na_2O 'nun SiO_2 'ye olan molar oranının da o kadar yüksek olacağını belirtmiş, ancak $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranındaki artışın sertleşmiş betonun basınç mukavemeti üzerinde etkisinin ise önemsiz olduğunu görmüşlerdir. Priz deneyleri sonucunda uçucu küllü taze geopolimerik betonun karıştırıldıktan en az 120 dakika sonra kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Sertleşmiş betonda ise $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranının uçucu küllü geopolimerik betonun basınç mukavemetini önemli derecede etkilediği belirtilmiştir. Sertleşmiş uçucu küllü geopolimerik betonun özelliklerini etkileyen diğer önemli faktörlerin ise kür sıcaklığı ve kür süresi olduğu gözlemlenmiştir. Kür sıcaklığı ne kadar yüksek olursa basınç mukavemetinin de o kadar yüksek olduğu, uzun süre kür edilen uçucu küllü geopolimerli betonun en azından 48 saate kadar olan basınç mukavemetinde bir artış meydana geldiği görülmüştür. Araştırmacılar uçucu küllü geopolimerik betonda, kür sıcaklığı ve kür süresinin sadece kimyasal reaksiyonunu hızlandırıcı olarak rol oynamadığını aynı zamanda reaksiyonun varlığını açıkladığını belirtmişlerdir. Bundan dolayı 60°C 'de 24 saat kür edilen geopolimerik beton numunelerin kürden sonra çok az mukavemet kazandığı belirtilmiştir (Arıöz vd., 2009).

3.6.1. Geopolimer kimyası

Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların oluşumu ve sertleşme reaksiyon mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır, ancak hammaddenin yanı sıra alkali aktivatör türüne bağlı olduğu düşünülmektedir. Glukhovsky *et al.*, (1981)'e göre alkali aktivasyon mekanizması hammaddenin düşük kararlı yapısal bileşiklere ayrılmasını ve pıhtılaşma yapıları ile yoğunlaşmış yapıların oluşması arasındaki etkileşimi kapsayan ard arda oluşan reaksiyonlardan meydana gelmektedir. İlk adım Si-O-Si ve Al-O-Si kovalent bağlarının kopmasından oluşur. Bu olay alkali solüsyonunun pH'sı

yükseldiği zaman meydana gelir. Böylece bu gruplar koloit fazına dönüşür. Sonrasında pıhtılaşmış yapının oluşumunu sağlayan etkileşimler yıkılmış ürünlerin tahribatıyla oluşur ve yoğunlaşmış üçüncü faz oluşur (Şekil 5) (Torgal *et al.*, 2008).



Şekil 5. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları

Geopolimerler, iki ana bileşenden olan, ince kuru tozlardan ve alkali sıvılardan oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler uygun oranlarda karıştırılarak, kalıplara dökülüp incelenmiştir. Alkali sıvı olarak sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanarak alümino silikat reaksiyonları sonucunda geopolimer elde edilmiştir. Ayrıca geopolimerlerin fiziksel özellikleri de incelenmiştir. Bu geopolimerlerin en önemli özelliği, fiziksel özellik olarak ayrıştırılmış ve çamura benzer katı atıkları oldukça kısa bir sürede yumuşatma özelliğidir. Fiziksel özelliğine ek olarak, geopolimerler kimyasal etkilere karşı da dayanıklıdır. Ayrıca kimyasal etkilere karşı geopolimerler en iyi asit direnci göstermektedir. Sonuç olarak, geopolimer ve inorganik bağlayıcıların, fiziksel özellik olarak hızlı mukavemet göstermesi ve kimyasal özellik olarak asidik koşullarda dayanıklılık göstermesi gelecekteki uygulamalar için önemini gün geçtikçe arttırmaktadır (Comrie *et al.*, 1988).

Karışım içerisindeki alkali tuzların da etkisiyle geopolimerizasyon süreci ekzotermik bir reaksiyondur. Bu süreçte su moleküllerinin dehidratasyonu geopolimer polikondensasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Kullanılacak olan temel hammadde mineral kompozisyonu, incelik modülü, her malzemede olduğu gibi geopolimerik ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Bazı malzemelerden basınç dayanımı düşük olan karışımlar elde edilirken, uygun oranlarda Al-Si bileşiği bulunduran ve serbest kalsiyum oranının düşük olduğu mineral kompozisyondaki uçucu küllerle (F tipi uçucu kül) yüksek dayanıklılık özellikleri olan malzemeler elde edilebilmektedir. Fırınlanmamış kaolin kili ise daha düşük basınç dayanımı vermektedir. Seramik malzeme üretiminde de uygulandığı gibi hammaddeye uygulanan fırınlama işlemi; boşluk suyunun ve karbonlu bileşiklerin ayrışmasını sağlamakta ve kompozisyon içerisindeki mineral element ve bileşiklerin enerji düzeyinin yükselmesi ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamakta böylece üretilecek ürünün reolojik özelliklerini iyileştirmektedir. Birçok araştırmada ham maddenin düzensiz özelliklerinin deneysel çalışmaya etkisini azaltarak geopolimer kimyasını tanımlayabilmek için sadece kimyasal yapısı iyi bilinen killer kullanılmıştır. Ancak ham maddede ön iyileştirme yapılsa dahi aluminosilikat minerallerin kimyasal ve yapısal özellikleri farklı sonuçlar verebilir. İstenilen jel kompozisyonunu sağlamak için geopolimer çözelti içerisindeki Al çözünümü azaldığında, kaolinit ya da Alüminyum elementi eklenebilir. Alüminatların yavaş reaksiyon vermesi sayesinde tepkimenin tüm ana bileşenleri arasında bağlanma reaksiyonları gerçekleşmektedir. Ancak yalnızca yüksek alüminat içeren kaolinit ağırlıklı bir karışımın zayıf malzeme özellikleri göstereceği belirtilmiştir (Zeybek, 2009).

Polisialatlar kristal yapıda iken polisialat silokso daha amorf yapıdadır. Polisialat yapıyı veren genel formül ise Denklem 3.2 bağıntısında verildiği gibidir (Davidovits, 1994; Xu and Deventer, 2000; Palomo *et al.*, 1999; Roy, 1999; Davidovits, 1999; Arıöz vd., 2009)



Burada;

M: katyon (Na, K gibi),

n: polikondensasyon sayısı,

z: üç boyutlu polikondensasyon ağ yapı tekrar sayısıdır.

Geopolimer tepkimesine giren ve oluşan molekül grupları aşağıdaki gibidir (DAVIDOVITS, 2008):

- Si-O-Si-O-siloxo, poly (siloxo) (camsuyu alkalı-silikatlar) bağlayıcılık kazandırıcı hammadde
- Si-O-Al-O- sialate, poly (sialate)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly (sialate-siloxo)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly (sialate-disiloxo)
- P-O-P-O- phosphate, poly (phosphate)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly (phospho-sialate)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone

Geopolimer kaynağı olarak kullanılan Al ve Si içerikli malzemelerin alkali çözeltilerle tepkimesinden en iyi sonuçlar metakaolin esaslı geopolimerlerde görülmekle beraber, Metakaolin > Zeolit > Cüruf > Uçucu kül > Puzolan > Kaolin sıralamasına göre azalmaktadır (Panagiotopoulou *et al.*, 2007).

Silis dumanı (SiO₂) ve korindon (Al₂O₃) geopolimer tepkimesine yatkın bileşiklerdir. Geopolimer işleme bu alumino-silikat oksitlerin alkali hidroksit tuzlarda çözünmesi ile başlamaktadır. Kullanılan jeolojik malzemenin incelik modülünün yüksek olması

ile alüminyum ve silisyumlu moleküllerin çözünürlük düzeyi tepkimeyi etkilemektedir (Van Jaarsveld *et al.*, 1997). Alümino-silikat jel çözeltinin oluşum süreci ham maddelere uygulanan kür sıcaklığına ve süresine bağlıdır (Zeybek, 2009).

Kullanılan ham maddedeki Al-Si oranlarına göre geopolimerin fiziksel özellikleri değişiklik göstermektedir. İstenilen özellikleri kazandırmak için ham maddenin kimyasal özelliklerini iyi tespit ederek karışımlar oluşturulabilir. Örneğin; polisialat kristallerinin arasına sudaki hidroksil iyonlarının kimyasal olarak bağlanmasıyla ısı direnci yüksek kaplama malzemeleri üretilmektedir (Davidovits, 2008).

3.6.2. Geopolimerin molekül yapısı ve kimyasal mekanizmasını tespiti için ışın deneyleri

Bugüne kadar yapılan araştırmalarda alternatif çimentonun yapı ve özellikleri hakkında birçok veri elde edilmiştir. X ışığı kırınım yöntemi (XRD) ve Al ve Si'nin atom dizilişi (MAS-NMR) alüminosilikatların yapısı hakkında bilgi vermektedir. XRD sonuçları 27-29°'de yarı kristal amorf yapı gösteren difüz ışık halkası pik sonuçlar vermiştir. Al atomunun atomsal diziliş testleri, tetrahedral koordine alüminyum kompleksleri 55 milyonda bir birim pik gösteren sonuçlar vermiştir (McNulty, 2009).

XRD yöntemi X ışınının malzemeye yönlendirildiği tahribatsız bir metottur. Böylelikle malzemenin yapısı belirlenebilir. Atomların numune yüzeyi üzerinde dağılması, kırınan X ışınlarının girişimi ile belirlenir. Eğer yüzey atomları eşit aralıklıysa kristal malzemelerde olduğu gibi çıkan spektrumlar ayırıcı girişimlerin bulunduğu sivri tepeler içerir ve sonrasında yapı Bragg kanunu kullanılarak belirlenir (McNulty, 2009).

MAS-NMR bir katı içerisinde atomların gerçek dizilişini belirlemede kullanılan bir tekniktir. Bu katı hal nükleer manyetik rezonans spektroskopisinin özel bir tipidir. Bu yöntemde numune aletin içine belirlenmiş bir açıda yerleştirilir. Malzeme içerisindeki çekirdeklerin etkileşmesinden kaynaklanan kimyasal değişimler atomun çevresini ve madenin çevresini belirlemede yardımcı olurlar. Geopolimer oluşumunda ise yapı hakkında en yararlı bilgiler Al ve Si, MAS-NMR spektrumundan elde edilir. Bu verileri kullanarak geopolimerlerin yapıları belirlenir. Bu yöntem sonucunda yapının kimyasal ve fiziksel özellikleri daha iyi anlaşılır (McNulty, 2009).

Maden moleküllerinin uzay kafes dizilimlerini gelişmiş teknoloji nükleer ve optik ışın cihazları ile incelemek mümkündür. Malzeme molekülleri ya da atomları arasındaki mesafe atom ya da iyon enerji düzeylerine bağlı olarak 10^{-10} – 10^{-9} m arasında değişmektedir. Sırasıyla armstrong ve nanometre olarak isimlendirilen bu SI birimlerindeki molekül mesafelerini ve dizilişi gözlemlemek için geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ya da taramalı elektron mikroskobundan (SEM) yararlanılır. Böylece atom ya da moleküllerin kafes yapısı ve boşluk durumu değerlendirilmektedir. Hidrotermal priz alma koşullarında termoset priz alan geopolimer yapısı ise kristalleşmekte ve gönderilen 3 \AA dalga boyunda Na-K-polisialat-silokso geopolimer partikülleri $2\theta=26\text{--}28^\circ$ kırınımını vermektedir. XRD uygulaması ile geopolimerin amorf yapıya ulaşan süreci izlenebilir. Geopolimer gerekli sıkıştırma ve kür işlemleri uygulandıktan sonra monolitik yani parçalı olmayan tek tip taş bir yapı oluşturur. Sert geopolimer yapıya uygulanan farklı açılardaki ışınların yansıma frekanslarının gösterdiğine göre, geopolimerin doğadaki zeolit kayaçlarla benzer yapıda olduğu belirtilmiştir (Arıöz vd, 2009).

3.7. Geopolimer Türleri

Geopolimerin sertleşme aşamasında pH düzeyindeki azalma da önemlidir. Geopolimerin ısı işlem sıcaklığı arttıkça, hamurun pH düzeyi düşmektedir. 85°C 'de

pH 10.5 iken, 700°C'de pH 7.5'e düşmektedir. Isıl kür sıcaklığının yüksek olduğu işlemlerde pH düzeyini dengelemek için K_2O/SiO_2 molar oranı arttırılmaktadır. Geopolimer hamurunun genel pH düzeyi 10-12 arasındadır. pH düzeyi düşük geopolimer geliştirmek, onun yaygın kullanımını arttıracaktır. Tanımlanmış bazı geopolimer çeşitleri aşağıdadır: (Davidovits, 2008)

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

3.7.1. Alkali silikatlar (siloksonat-silikat çözeltisi) Si/Al=1:0

Alkali aktive edilmiş bileşikler konusunda Portland çimentosuna alternatif olarak son 20 yıldır yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Yüksek mukavemetli farklı kombinasyonu, gelişmiş yangın ve kimyasal direnci malzeme bilimi, kimya mühendisliği ve inşaat mühendisliği alanındaki birçok araştırmacıyı cezbetmiştir. Alkali aktive edilmiş alümino silikatların mekanik özellikleri Portland çimentosunda olduğu gibi sıklıkla araştırılmıştır. Pekçok çalışmada alkali silikatların oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altındaki davranışları incelenmiştir. Hidrojenli özellikleri, klorür difüzyonu ve ısı özellikleri gibi diğer parametreleri birçok çalışmada araştırılmıştır (Zuda *et al.*, 2009).

Zuda *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada, 1000°C'ye kadar yüksek ısıların, ilki kuvars kumu agregalı, ikincisi elektriksel porselen agregalı olan iki alkali aktive edilmiş bileşikler üzerindeki genişleme etkisini incelemişlerdir. Her iki malzemenin termal gerilme ve sıcaklık fonksiyonlarının çalışılan bütün sıcaklık oranlarında düzenli bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Elektriksel porselen agregalı bileşiklerin karşılaştırıldıkları kuvarslar gibi hem daha yüksek ısıl dayanımları hem de daha yüksek mekanik bir davranış sergiledikleri görülmüştür. Alkali aktive edilmiş alümino silikatların hidrasyon süresindeki hacimsel değişimleri de incelenmiştir; kuruma ve otojen hacimsel büzülme daima ciddi bir tehlike oluşturmuştur. Her durumda dikkate değer (%25'e kadar) ısıl büzülme gözlemlenmiştir. Alkali aktive edilmiş alümino silikatlar, sıcak makinalara komşu duvarlar, zeminler gibi yüksek sıcaklıkların görülebileceği endüstriyel yapılarda, borularda veya kimyasal işlem teknelerinde, kömür buharlaştırma damarları gibi özel yüzey kaplamalarında, nükleer santrallerde güvenlik amaçlı, tünel veya şaft duvarlarında ve yangın koruma kaplamalarında olduğu gibi bir çok uygulamada kullanılabilir. Bütün bu durumlarda yüksek sıcaklıklardaki hacimsel değişimler önemli rol oynayabilir. Ani yük değişimleri, negatif yüklemeler veya yapının farklı kısımlarındaki termomekanik uyumsuzluğun ciddi zararlara yol açabileceği belirtilmiştir.

Geopolimer hamurunun işlenebilirliğini ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan en önemli bileşen, alkali silikat ya da siloksonat olarak da bilinen, kum içerisindeki kuartz mineralini oluşturan silikat moleküllerinin alkali tuzlar etkisinde eritilmesi ve suda çözünmesi ile elde edilen camsuyudur. Bu ifadenin kimyasal reaksiyonu Deklem 3.3 verilmiştir (Zeybek, 2009).



Bir diğer üretim formülü ise Denklem 3.4'de verilmiştir:



Analitik kimya, geopolimer üretiminde önemli bir bileşen olan çözünür silikatları 19. yüzyılda ortaya çıkarmıştır. İlk olarak Glauber tarafından (oleum silisium) silis yağı olarak isimlendirilen çözünür silikat bitki külleri içindeki potasyum karbonat ile kuartz kumunun birlikte ergitilmesi ile üretilmiştir (Zeybek, 2009).

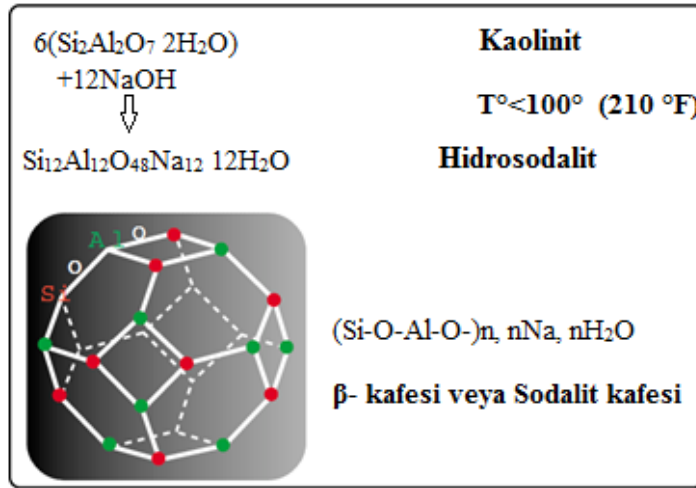
Alkali silikatlar zeolit sentezi, silika jel (silikon) ve geopolimer üretiminde önemli bir hammaddedir. Ürün sınıflandırmasında $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranı belirleyicidir. Molar oranın 0.5 olduğu sodyum ortosilikat Na_4SiO_4 formülüne sahip iken, molar oranı 2 olan sodyumdisilikat ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) genellikle yoğun üretilen ticari bileşiktir. Geopolimer çalışmalarında kullanılan sodyum metasilikatın (Na_2SiO_3) molar oranı ise 1'dir (Arıöz vd., 2009).

Kracek (1930) tarafından hazırlanan bacalı sistem kimyasal faz diyagramına göre 1300–1400°C'de gerçekleşen yüksek teknoloji sistemde silikat üretim bacasının çeşitli sıcaklıklardaki aşamalarında farklı ürünler elde edilir. 1500°C'de kristobalit, 850°C'de tridimit ve kuartz elde edilirken; 1200°C'de %50 SiO_2 içeren karışımda alkali silikatlar oluşmaya başlamaktadır. Bacalı üretimle 3 tip alkali silikat elde edilmektedir. Bunlar alkali silikat oranının 3.5 olduğu nötral Na camı, bu oranın 2 olduğu alkali Na camı ve bu oranın 4'e yaklaştığı K-potasyum camıdır. Bacalı üretim ürünlerinin tercih sebebi olan beyaz granüllerin elde edilmesi, özellikle deterjan endüstrisi için önemlidir (Arıöz vd., 2009).

Suda çözünürlük geopolimer üretimi için önemlidir. Geopolimerin Na veya K bazlı olması alkali silikatların suda çözünürlüğünü farklı etkilemektedir. Yapılan nükleer manyetik rezonans deneyleri sodyum bazlı ve $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranının 3 olduğu camın suda çözünürlüğü 60°C'de %50 iken, potasyum bazlı 2.5 molar oranlı camın 48 saat içinde %100'ünün suda çözüldüğünü göstermektedir. Çünkü potasyum bazlı sistemde kuartzın tamamı alkali silikata dönüşmektedir. Dolayısıyla potasyum bazlı alkali silikat kullanımının geopolimer hamuru özelliklerini olumlu yönde etkileyeceği belirtilmiştir (Davidovits, 2008).

3.7.2. Kaolinit/hidrosodalit esaslı geopolimerler Si/Al=1

Alüminosilikat kaolinit NaOH ile 100-150°C'de reaksiyona girer ve hidrate sodalite (tekto alüminosilikat) veya hidrosodalite dönüşür (Şekil 6) (Davidovits, 1994).

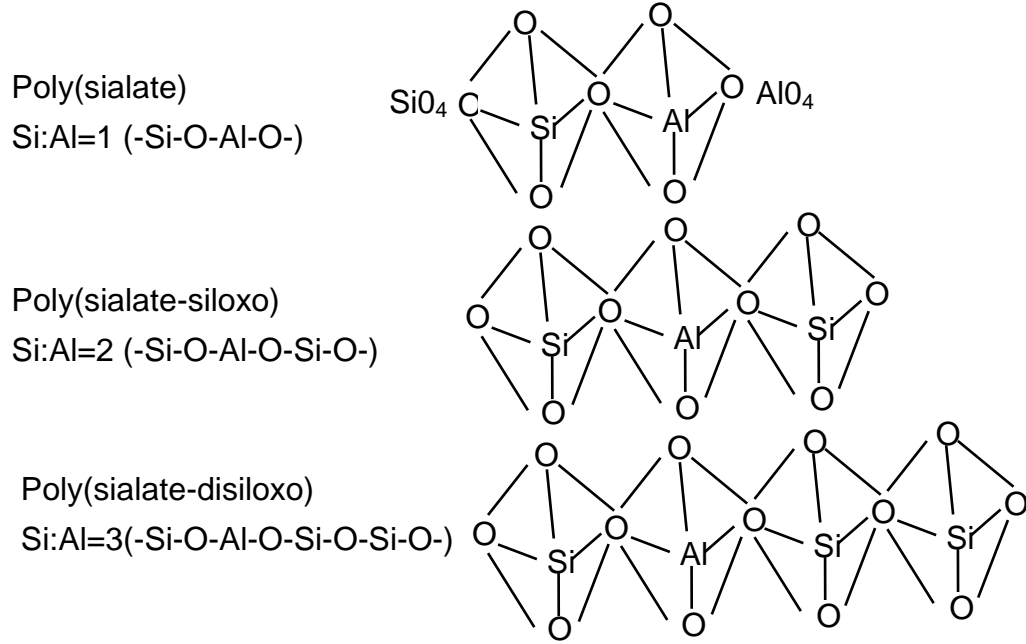


Şekil 6. Hidrosodalit oluşumu

Hidrosodalit oluşumunu engelleyerek kaolinit yerine kalsine kaolin kullanarak bir çeşit zeolit elde etmişlerdir. 100°C'de konsantre NaOH solüsyonu içerisinde çeşitli fillosilikatlardan (kaolinit, montmorilimit, hollosit) hidrosadalit sentezini gerçekleştirmişlerdir (Davidovits, 1994).

Doğal kaolinit/kuvars kumu (50/50 ağırlık oranı) karışımına NaOH eklenir ve karıştırılır. Kaolinit içerisindeki 1 M Al_2O_3 için 2 mol veya daha az NaOH eklenmelidir. Ayrıca 1 gr NaOH için 1-1.5 gr su eklenmelidir. Aynı mekanizma farklı poli (sialete) nanokompozit malzemelerle sonuçlanacak poli (alüminosilikat) malzemelerle meydana gelebilir. Na-PS-Kuvars nanokompozitler poli (sialete) matrisi ile kuvars kum kristalleri arasında yüzeylerarası reaksiyonlardan kaynaklanabilir. Kuvars yüzeyinin üzerindeki Si-O-Si siloksan ağları silonal Si-OH'a

hidrolize olur. Bu silanoller şekildeki kaoliniti çevreleyen sialatler veya poli sialatlerle yoğunlaşırlar (Şekil 7) (Davidovits, 1994).



Şekil 7. Geopolimer türleri

Endüstriyel uygulamalar için geliştirilen malzemelerde yer alan geopolimerik bileşikler kristal değildir (Davidovits, 1994).

Malzeme kompozisyonu içinde bulunan Al ve Si oksitli bileşiklerin geopolimer oluşturan 3 boyutlu bağ yapısına ulaşabilmesi için moleküllerin bağ yapma özellikleri iyi değerlendirilmelidir. Alüminyumun 3 silisyumun 4 değerlikli olması oksijen bağlarının kovalent bağ ya da iyonik bağ olarak gerçekleşeceği kimyasal analizle gözlenmeli ve seçilecek malzemenin karışım oranları ve uygulanacak ısıl işlemler buna göre belirlenmelidir. Kaolinit kilinin mineral kompozisyonu zeolit kristallerini elde etmek için oldukça uygun iken; 100°C altında geopolimer sentezi alüminyumun oluşturduğu hidroksil iyonlarının bağlı olduğu cipsit kristallerinden dolayı oldukça zordur. Kaolinit kili kimyasal yapısı (3.5) bağıntısında verilmiştir (Zeybek, 2009):



Kaolinit içerisindeki alüminyum ve silisyum oksit kompozisyonu önemlidir. Kaolinit kili alkali tuzlarla kararlı reaksiyonlar vermemektedir (Davidovits, 2008). Yüksek pH'lı ortamda kaolinit kili içerisindeki alüminyum molekülleri ayrışmaktadır. Daha çok kankrinit tipi zeolitlerin sentezinde kullanılan kaolinit kili ile geopolimerizasyon 150°C ısıda 30 MPa buhar presi ile üretilmiş panellerde sağlanmıştır. 150°C ısı kil içindeki dehidroksilasyonu sağlamakta ve Al-OH-Si-O bağları arasındaki su molekülleri buharla birlikte ayrışmaktadır. Oluşan ürün sentetik polisialat hidrosodalittir. Mikro moleküler yapı jeolojik feldispatoit kayaçları ile aynıdır. Panel presle üretilen malzemenin iç kısmı 100°C'ye kadar ısınmadığı için hegzagonal kaolinit kristalleri oluşurken yüzeyde amorf yapı vardır (Arıöz vd., 2009).

3.7.3. Metakaolonit esaslı geopolimerler

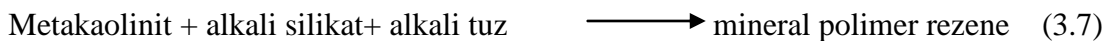
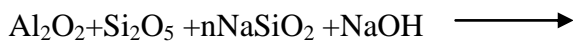
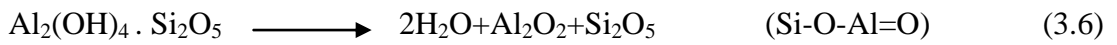
İkincil fazların (ilit, kuvars) metakaolinin geopolimer reaksiyonları üzerindeki etkileri, biri saf kaolinitten diğeri ise Cezayir'in Tamazert bölgesinden elde edilmiş iki metakaolin kıyaslanarak araştırılmıştır. Geopolimerizasyon metakaolin ile alkali sodyum silikat solüsyonunun oda şartlarında karıştırılması ve 50°C'de kür edilmesiyle elde edilmiştir. Ürünler X-Işını kırınım yöntemiyle tanımlanmıştır. Sonuçlara göre ikincil fazlar, bu çalışmada uygulanan konsantrasyonlar geopolimerizasyon reaksiyonlarını engellememiştir. Geopolimerler, alkalilerin veya toprak alkalilerin alüminosilikatlar ile aktivasyonu sonucu elde edilen kötü düzenlenmiş polimerik alüminosilikat malzemelerdir. Geopolimerler iyi ısı, kimyasal ve mekanik özelliklerinden ve çevreye zararsız çimento gibi bir bağlayıcı malzeme olmasından dolayı yoğun ilgi odağındadırlar (Duxson *et al.*, 2007a). Geopolimerizasyon, metakaolin gibi alüminosilikat ile yüksek alkali silikat solüsyonu arasında ekzotermik reaksiyondan oluşur (Davidovits, 1994).

Polimerizasyonun temel adımı katı alümino-silikat oksitinin MOH (M: Alkali metal) solüsyonu içinde çözünmesiyle oluşur. Çözünmüş Al ve Si komplekslerinin parçacık yüzeyinden parçacıklar arası boşluklara yayılması silikat solüsyonunu ve Al, Si

kompleksleri arasında oluşan polimerizasyon reaksiyonlarından meydana gelen jel fazının oluşumu ve son olarak jel fazının sertleşmesi ile sağlanır (Xu and Van Deventer 2002).

Alkali ve alkali silikat solüsyonuyla aktive edilmiş metakaolin geopolimerizasyon işlemi ortaya konulmuştur. Alkali konsantrasyonu, alkali silika solüsyonunun modülü ve reaksiyon sıcaklığının geopolimerizasyon üzerindeki etkileri X-Ray kırınım yöntemi, Al/Si MAS NMR yönteminin yanı sıra izotermal kalorimetre ile ortaya konulmuştur. Sonuçlar metakaolinin alkali aktivasyonu altında geopolimerizasyonu makul bir şekilde; (I) yıkım, (II) polimerizasyon, (III) sabitleme gibi 3 adımda gerçekleşmiştir. KOH solüsyonu içerisindeki geopolimerizasyon oranı, NaOH solüsyonunkinden fazladır ve II. adım boyunca maksimum 15 Mol/L KOH solüsyonuna erişir. Geopolimerizasyonun derecesi aktivatör içerisinde silikat anyonlarının varlığına bakmaksızın alkali içeriğinin artmasıyla artmıştır (Yao *et al.*, 2009).

Kaolinit 750°C sıcaklıkta fırınlığında dehidroksilasyona uğrar ve su molekülleri ayrıştığında alümino-silikat oksitler elde edilir. Metakaolinit olarak adlandırılan bu yapı (3.6, 3.7) bağıntılarında gösterilmiştir (Davidovits, 2008).



Metakaolinit tanecik büyüklüğü kaolinit killerinden daha büyüktür. Bu durumun fırınlama etkisiyle kil taneciklerinin genişlemesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Metakaolinit molekül bağ yapısı dehidroksilasyon sonrası kaolinden farklı ve kaoline göre daha kararlı bir Al-O-Si bağ yapısına sahiptir. Dehidroksilasyondan daha sonra metakaolin içerisinde oluşan Van-der Walls kuvvetlerine bağlı olarak 4, 5 ve 6 koordinatlı alüminyum bağları oluşmaktadır (Davidovits, 2008).

Metakaolinit esaslı geopolimer sentezi ile yüzey sertliği yüksek olan ürünler, ısı dayanımı yüksek malzemeler ve yüzey pürüzlülüğü az olan seramik ürünler elde edilebilmektedir (Davidovits, 2008).

Metakaolinit ile üretilen geopolimerin priz alma süresini, $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ molar oranı etkilemektedir. 80°C 'deki sentezde 1.23 $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ molar oranında 1 saatte priz alırken, bu oran 2'yi geçtiğinde uygun sertliğe 4 saatte ulaşılmaktadır (Davidovits, 2008).

3.7.4. Kalsiyum esaslı geopolimerler Si/Al=1-3

Kireç ve kil esaslı su geçirgenliği düşük malzeme üretimi M.Ö. 1500 yıllarındaki Mısır uygarlığına kadar dayanmaktadır. Tarihi kalıntılar üzerinde yapılan çalışmalarda Mısırlı Yusuf peygamberin, kuraklığa karşı su kaynaklarını korumak için kireç ve kil esaslı geçirgenliği düşük malzeme geliştirdiği belirtilmektedir. Metakaolinit ile kireç taşının etkileşiminden oluşan bu tarihi harç malzeme üzerinden alınan örneklerle uygulanan ışınlı deneyleri kaplamanın hidratasyona uğramış geopolimerizasyon ürünü olduğunu göstermektedir (Davidovits, 2008).

Yüksek fırın cürufu ve polialatların kullanımı ile erken dayanımı yüksek beton üretiminde kalsiyum esaslı geopolimerizasyon kimyası kullanılmıştır. Dökme demir ve çelik üretiminin yan ürünü olan yüksek fırın cürufunu, Portland çimentosu, NaOH

ve KOH gibi alkali tuzlar, camsuyu ve sitrikasit ile pH'ı 12 olan ortamda aktive edilerek hem erken dayanımı 4 saatte 30 MPa düzeyinde olan, hem de hacimsel genişmeye uğramayan geopolimer betonu üretilmiştir (Arıöz vd., 2009).

3.7.5. Kayaç esaslı geopolimerler Si/Al=1-5

Doğal jeolojik oluşumlu kil kayaçlar geçirimsizliklerinin yüksek olması yönü ile radyoaktif atık depolama sistemlerinde kullanıma uygundur. Yüksek ve düşük değişken pH'lı radyoaktif çözeltiler hapsedildikleri malzemeyi delerek depolardan sızmakta ve yeraltı sularının kirlenmesi tehditini oluşturmaktadırlar. Özellikle Portland çimentolu beton esaslı depolar oldukça kolay aşınmakta, yeraltı suyuna karışan sızıntılar oluşmakta, ayrıca iptal olmuş nükleer santralin atıkları çimentonun hidrotermal reaksiyonunun da etkisi ile sürekli ısınan nükleer bombalara dönüşmektedir. Patlamadan sonra Portland çimentolu betonla kaplanan Çernobil santrali bunun en korkunç örneğidir ve bilim adamlarına göre hala tehlike arz etmektedir (Arıöz vd., 2009).

Kil kayaçların esasları olan feldispatitler ve kumu oluşturan kuvarz yeryüzünde en çok bulunan toprak madenleri olmakla birlikte kimyasal potansiyelleri tam olarak bilinmemektedir. Düşük ve yüksek pH'lı ortamlarda oluşan radyoaktif çözeltilere dayanabilecek malzemelerin her iki ortamda da kararlı davranması gereklidir. Çeşitli feldispat kayaçları ve kuvarzın etkileştirilmesinden üretilen geopolimer radyoaktif nükleotid eşlenik ve eşlenik olmayan çözeltileri radyoaktif sızıntıyı önleyici özellikte depolama amacıyla kullanılabilirler. Radyoaktif elementler geopolimer monomerlerin çerçeve yapısında hapsedilmektedir. Böylece uzun süre radyoaktif sızıntı ya da ısınma oluşmamaktadır. Diğer geopolimer oluşumlarından farklı olarak kayaç esaslı geopolimer sentezinde farklı tipteki kayaçların asit içerisinde çözünümü söz konusudur. Cs, Co, Sr, Tc, U ve Cr gibi radyoaktif elementlerin düşürülmüş enerjili atık izotopları asit çözeltilerinde reaktifliklerini tamamen yitirmekte, ancak yine de hiperalkalin çözeltiler oluşturmaktadır. Çözünmüş alümino-silikat kaynağı

kayaç daha sonra alkali tuz ve silikat çözeltilerin etkisi ile geopolimere dönüşmektedir (Arıöz vd., 2009).

Geopolimer betonu, Portland çimentolu betona göre 2–3 kat daha fazla çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca potasyum polisialat esaslı geopolimerlerin donma-çözülme dayanımları da daha iyidir. Doğaya zarar veren arsenik, sülfirik asit, radyoaktif atıkların tutulmasında geopolimer kayaç yapısı gelecek vaatetmektedir. Geopolimit 50 ticari ismindeki K-poli-sialat formülü ile pH düzeyinin 1.5–3 arasında olduğu Kanada'daki uranyum ve arsenik atıkların kapsülasyonu araştırılmış ve geopolimer matris yapısının bozulmadan radyoaktif mineralleri hapsedebileceği gözlenmiştir (Zeybek, 2009).

Geleneksel Portland çimentosundan farklı olarak geopolimerik çimentolar kirece dayalı değildir ve asidik solüsyonlar tarafından çözülmüş değildirler. Portland esaslı çimentolar, (sade ve cüruf karıştırılmış) asitli ortamlarda tahrip olmuşlardır. Kalsiyum alüminat, üretim için pahalıdır ve %30-60 oranında ağırlık kaybettiği için (tahrip olduğu için) tatmin edici değildir. Geopolimerik çimentolar, Potasyum-Poli (sialat-siloxo) türü, geopolimit %5-8 arasında kayıptan sonra kararlı kalırlar. Bu asit dirençli çimentolar oda sıcaklığında hızlıca sertleşirler ve 20°C'de 4 saat sonra hidrolik bağlayıcı harçlara uygulanan standartlara göre test edildiğinde 20 MPa'a kadar basınç dayanımı gösterirler. 28 günlük nihai basınç dayanımlarının 70-100 MPa aralığında olduğu tespit edilmiştir (Davidovits, 1994).

Geopolimer ve geopolimerizasyon fikri, gelişmiş malzeme gerektiren bilim ve teknolojide kabul görmüştür. Geopolimerler üç boyutlu polimerik yapılarla sonuçlanan polimerik alümino-silikatlar ve alkali silikatların geosentezinden meydana gelirler. Çimento ile ilgilenen bilim adamları şunu kabul etmelidir ki, tehlikeli alkali-agrega reaksiyonu meydana getirmeyen %9.2 veya da fazla alkali içeren çimentolar var olan kodlara ve ilkelere uymayabilir ve farklı bir isimlendirmeye ihtiyaç duyar. Onları geopolimer çimentolar, geopolimerik

çimentolu bileşikler, geoçimentolar veya poli (sialete) çimentolar gibi isimlerle ifade etmek, diğer çimentolu bileşiklerden farklı olarak onların eşsiz özelliklerini vurgular (Davidovits, 1994).

3.7.6. Silis esaslı geopolimerler (silokso-siloksonat bağı) Si/Al>5

Mavi emaye kaplamalı silis esaslı fayanslar M.Ö. 3000 yıllarında Mısır piramitlerinde kullanılmıştır. Emaye kaplama fayans teknolojisi 1000°C sıcaklık gerektirmekle birlikte emayeleşmenin vereceği parlaklık silis esaslı geopolimer ile 200°C'de gerçekleşmektedir. Bu kimyasal sistemin eski Mısırlılar tarafından da keşfedildiği düşünülmektedir. Silis esaslı malzemelere bir diğer örnek ise, M.Ö 200'lü yıllarda Hun saldırılarını durdurmak için Çinliler tarafından inşa edilen ve günümüze kadar dayanan Çin Seddi'dir. Çin Seddi'nin harcında %80 civarında SiO₂ içeren pirinç çentiği külü ve Ca(OH)₂ bulunmaktadır (Davidovits, 2008; Arıöz vd., 2009).

Günümüzdeki SiO₂ kaynağı ise kuvarzın 3–10 µm aralığında öğütülmesi ile üretilen silis tozu ve ferrosilikon çelik üretiminde açığa çıkan 0.05–1 µm silis dumanıdır. Silis tozu yüzey kaplaması aşınma yüzeyi ve parlak seramik yüzey üretiminde ince dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Silis dumanının çimentolu beton içinde filler ve puzolan olarak kullanımı mevcuttur. SiO₂ mükemmel bir puzolan malzemedir. Geopolimer sentezinde ise silis dumanı, NaOH ve KOH gibi alkali sodyum ve potasyum hidroksitleri ile oldukça kolay aktifleştirilebilen bir kaynaktır. Çözünür silikat ve siloksonatlar içindeki silis partikülleri nano geopolimer üretimini sağlamaktadır. Oluşan nano polisilanol geopolimer ile ısı ve yangın dayanımı yüksek paslanmaz çelik boyaları üretilbileceği gibi, yüksek ısı direnci olan seramik malzemeler de üretilir (Arıöz vd., 2009).

3.7.7. Uçucu kül esaslı geopolimerler

Uçucu kül termik santral bacalarından elde edilmiş, içi boş, küresel tanecik yapılı bir atık malzemedir. Uçucu kül tanecikleri amorf camsı yapıda mullit, hematit, magnetit, kuvarz gibi kristaller içermektedir. Oluşacak kristal tipleri kömürün çıktığı bölgeye ve baca ısısına bağlıdır. Öğütülmüş kömür teknolojisiyle ısıtılan fırınlarda 1200–1500°C baca ısısı oluşurken, gaz haline getirilmiş kömür prosesi ile 1800°C ısı oluşmaktadır. Bu teknoloji ile uçucu külün tamamı ince parçacıklı kristallere dönüşmekte ve çok daha yüksek düzeyde silika, alumina ve demir oksit içermektedir. Uçucu külü yüksek fırın cürufu ile benzer kompozisyona ulaştırmakta ve daha verimli geopolimer reaksiyonu veren bir hammadde elde edilmektedir (Zeybek, 2009).

Uçucu kül Portland çimentolu betonun içinde puzolan olarak kullanıldığında, hidrasyon enerjisini dengeleyerek içinde bulundurduğu silika ile bağlayıcı kalsiyum silikat hidrat oluşum oranını arttırmakta, alkali agrega reaksiyonunu önlemekte ve hacimsel tokluk sağlamaktadır. Uçucu külün geopolimerik üretimlerde kullanımını teşvik eden ise, özellikle F tipi uçucu küllerin içerdiği yüksek Al_2O_3 (alümina) ve SiO_2 (silika) kompozisyonudur. Baca ısısının 1200°C ve üstüne çıktığı santrallerde oluşan içi boş ince küresel yapıdaki ve camsılığın yüksek olduğu uçucu küller geopolimer sentezi için kullanışlıdır (Zeybek, 2009).

CAFA çimentosu uçucu kül ve alkali silika çözeltisi ile üretilen Amerika'da patentlendirilmiş bir üründür. 90°C'de 18 saat kür edilmiş beton örnekleri 85 MPa kadar dayanım vermektedir. Çözünür silikatın kullanılmadığı yalnızca alkali tuz içeren çözeltilerle de zeolit matrisli uçucu kül geopolimer sentezi gerçekleştirilmektedir. Ancak yüksek alkali ortam oluşturan bu karışım kullanıcıya zarar verici tehlikeli bir döküm işlemi gerektirmektedir (Davidovits, 2008).

Yüksek basınç ve dayanıklılık sağlayacak geopolimer malzemeler üretebilmekte, kullanılan uçucu kül kompozisyonunun bulundurması gereken özellikler ise şu şekilde tespit edilmiştir: (Arıöz vd., 2009).

- $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ bileşiklerinin uçucu kül kompozisyonu içindeki kütlece oranı 2–3,5 arasında olmalıdır.
- Uçucu kül kompozisyonu içinde fırınlanma etkisi görmemiş malzeme oranı %5'i geçmemelidir.
- Puzolan olarak kullanımında da gerektiği gibi CaO oranı düşük olmalıdır.
- Camsı fazdaki tanecikler daha fazla olmalıdır. Böylece alkalinasyon prosesi hızlanır ve reaksiyon derecesi artar. Mullit ve kuartz kristallerinin fazla olması ise Al-Si oranını düşürmektedir. Kompozisyon içindeki mullit miktarı kütlece %5'in altında olmalıdır.
- Uçucu külün $4\ \mu\text{m}$ 'nin altında incelikte olması, basınç dayanımını direkt artırıcı bir etkisi yoktur, ancak kalın partiküllerle de olumlu bir sonuç elde edilememektedir. Uçucu külün ortalama 10–40 μm iyi derecelenmiş kompozisyonu uygun toklukta malzemeyi sağlayacaktır.
- Kompozisyon içerisinde sülfat bileşikleri ve metal madenler bulunmamalıdır.
- Fe_2O_3 bileşiği, hematit ve magnetit kristalleri geopolimer reaksiyonunu yavaşlatmakta, düşük basınç dayanımı vermektedir.
- Kömür içindeki yanmamış karbon parçacıklarının varlığı da malzeme özelliklerini olumsuz etkileyeceğinden kompozisyon içinde fazla bulunmamalıdır (Arıöz vd., 2009).

Genel olarak ($M_n [-(\text{Si-O}_2)-\text{Al-O}]_n \cdot w \text{H}_2\text{O}$) formülü ile ifade edilen geopolimerler, yapıların ve malzemelerin çeşitli uygulamalarına sahip olan amorf üç boyutlu alüminosilikat minerallerdir. Uçucu kül içinde silika-alümina fazının varlığı, onu geopolimer sentezleri için uygun bir hammadde haline getirir. Son zamanlarda uçucu külün geopolimer içinde hammadde olarak kullanımını konu alan araştırmalar oldukça ilgi çekmektedir. Geopolimerik çimentoların gelişimi boyunca düşük basınç

dayanımlı uçucu kül esaslı geopolimerik çimentolar çok defa ifade edilmiştir. Uçucu külün mekanik aktivasyonu geliştirdiği ifade edilmiştir (Kumar *et al.*, 2007).

Kalsiyum bileşiklerinin (CaO ve Ca(OH)₂) uçucu kül esaslı geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kalsiyum bileşikleri sırasıyla %1, 2 ve 3 oranlarında uçucu külün yerine yerleştirilmiştir. Geopolimerlerin kür edilmesi işlemleri ortam sıcaklığında 20°C ve 70°C’de gerçekleştirilmiştir. Kalsiyum bileşiklerinin uçucu kül yerine yerleştirilmesi 70°C’de kür edilmiş numunelerin mekanik özelliklerini azaltırken, ortam sıcaklığında kür edilmiş numunelerin mekanik özelliklerini ise iyileştirmiştir. %3 CaO ve %3 Ca(OH)₂ eklenmiş numunelerin ortam sıcaklığında 7 günlük basınç dayanımları sırasıyla 11.8 MPa’dan 22.8 MPa’a ve 29.2 MPa’a yükselmiştir (Temuujin *et al.*, 2009).

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, davranışı ve basınç dayanımı Portland çimentolu betonlarınkine benzerdir. Uçucu kül esaslı geopolimer betonlar ayrıca mükemmel sülfat direncine sahiptirler ve çok küçük büzülmelere uğrarlar (Rangan *et al.*, 1987).

Çimento içeriği %20’den düşükse silikat çimento için çok etkili bir aktivatör olabilir. Belirli miktarda alçıtaşının eklenmesi de aktivasyon etkisini artırabilir; ancak, aşırı alçıtaşı karışım dayanımını büyük ölçüde düşürecektir. Uçucu külün, kireç-uçucu kül, kireç-uçucu kül-cüruf ve Portland-uçucu kül gibi farklı katkılı çimento sistemleri içerisinde aktivasyonu Qian *et al.* (2001) tarafından çalışılmıştır. Na₂SO₄’ün aktivasyon etkisi, uçucu kül-kireç ve uçucu kül-cüruf-kireç karışımlarının her ikisi için gösterilmiştir. Uçucu kül-Portland çimentolarının CaO ile aktivasyonu Na₂SO₄ ile aktivasyonundan daha az olmuştur (Sağlık, 2009).

3.7.8. Fosfat esaslı geopolimer

Fosfat esaslı geopolimer diş protez harcı üretiminde yapı malzemesi üretiminde kullanıldığı gibi en önemli kullanım alanlarından biri de radyoaktif atık depolama işleminde kullanılmasıdır. Fosfat esaslı geopolimer ile ilgili çalışmalar oldukça kısıtlı olmakla beraber gelecek vadede bir araştırma konusu olduğu düşünülmektedir (Davidovits, 2008).

C-geopolimer yapı blokları silikatlardır. Kimyasal olarak bağlanmış fosfat seramik/çimentolar (Mg-fosfat kompozisyonlar için) oda sıcaklığında yüksek mukavemet, düşük porozite ve iyi dayanıklılık gösteren inorganik maddelerdir. Bu özelliklerinin alümina-silikat geopolimerleriyle benzer olduğu belirtilmiştir. Daha sonra, Davidovits (2008)'in, fosfat ve fosfor-silikatın kimyasal yapısının geopolimer olarak kullanılabilirliğini araştırdığı ifade edilmiştir. Fosfor-silikatlı geopolimerin mikro yapısını inceleyerek, kristal fosfat minerallerinin, fosfor-silikat geopolimerlerin amorf malzeme ile bağlantılı bir ağ oluşturduğunu belirtmiştir (Wang and Cheng 2003).

Silisyum ve alüminyum yapı taşları sioloxo ve sialate yapılar oluşturmak için bağlantılıdır ve çeşitli yapılar üretmek için kullanılır. Benzer bir şekilde, fosfor, fosfat yapılar da oluşabilir. Geopolimerler bu üç temel yapı aralığında çeşitli zincirleri oluşturmak için bağlanabilir. Sadece sioloxo ve sialates C-geopolymeri, fosfat-fosfor-sialoxo veya P-geopolimerleri fosfor-sialate zincirleri ile oluşur (Wogh, 2011).

Mısır'da Keops piramidinin iç kısmından alınan bir örnek 1982 yılında X ışınları incelemesinde CaCO_3 (kireçtaşı) ve SiO_2 oluşan matris içinde beyaz kaplamaya kırmızı ton veren (P) fosfat molekülleri ile karşılaşmış ve bu farklı yapısında kristal

hidroksiapatitten oluşmuş bir geopolimerik sistem olduğu düşünülmüştür (Barsoum *et al.*, 2006).

3.7.9. Organik mineral geopolimer

Hidrokarbon bağ yapılı organik polimerler ile polisialat geopolimer yapısı kullanılarak üç tip malzeme sentezi yapılabilmektedir. Humik asitin jeolojik mineraller üzerinde yoğunlaşması ile poli-organo-siloksan yapısı ve kerojen elde edilebildiği gibi; organik polimerleri mineral geopolimere, karıştırma ve emdirme işlemleri ile de organo-geopolimer bileşikler elde edilir. Poli-organo-siloksan yapısı içerisindeki silikon atomu bir, iki ya da üç organik grup ile kimyasal bağ kurabilmektedir. Organo-geopolimerlerde asitik ve bazik ortam polimerizasyon işlemini katalize edebilmektedir. Asit katilizasyonu ile dehidrasyon sağlanmakta, silanol birimleri (Si-OH) 1 mol su çıkararak siloksan bağ (SiO₂) oluşumunu hızlandırmaktadır (Davidovits, 2008; Zeybek, 2009).

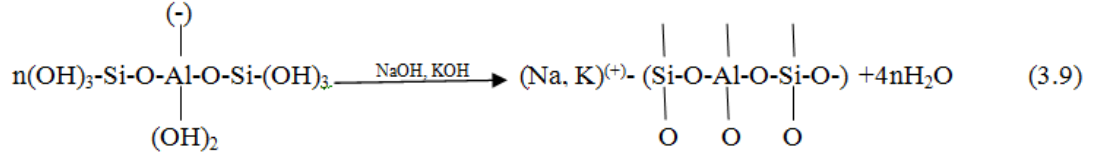
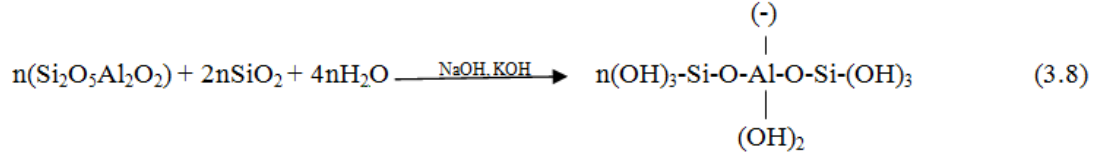
Poli metil siloksan ve poli etil siloksan ağ yapılı teknik silikonlar; elastik, kırılabilirliği düşük, soğuk ve sıcak hava koşullarına direnci olan dielektrik özellik gösteren, yüzey gerilimine direnç gösteren malzemelerdir (Davidovits, 2008). Organik polimerlerin inorganik yapıya eklenmesi malzemenin dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktadır (Zeybek, 2009).

3.7.10. Geopolimer bağlayıcılar (Çimentolar)

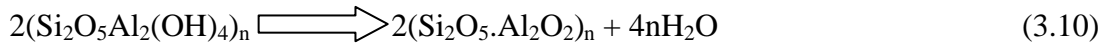
Geopolimer çimentolar, yüksek alkali içeren malzemelerin polimerizasyonu ile elde edilen, üç boyutlu zeolitik yapılardır. Bu yüksek teknoloji K Poly (sialeto-siloxo) bağlayıcılarının birçok endüstri alanı olan; otomobil ve havacılık sanayisinde, demirdışı dökümhanelerde ve plastik sanayisinde kullanılmıştır. 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 bakımından, önemli bir yere sahiptirler. Bu malzemelerin eşsiz özellikleri, erken yüksek dayanımı, düşük büzülme, donma çözünme, sülfata ve korozyona karşı dayanıklılıktır. Ek olarak, bu geopolimer çimentolar hava kirliliğinin azalmasına da önemli katkıda bulunmaktadır. Bu malzemeler, Portland çimentolarının CO₂ salımını %80 oranında azaltmakta ve gelecekte küresel ısınma sorununa önemli bir katkıda bulunacaklardır (Davidovits, 1994).

Alkali aktive edilmiş çimentolar, içerisinde alümino zengini malzemeler ile alkali silika solüsyonunun etkileştiği yapıştırma fazı olan bir dizi alt gruplar içerirler. Geopolimerler normal Portland çimentosuna göre kimyasal veya mekanik özelliklerinden ve düşük karbon salınımından dolayı bilim adamlarının ve mühendislerin ilgisini çekmektedir. Son yıllarda artan araştırmalar alternatif çimentoların farkına varılmasına öncülük etmiştir. Geopolimerlerin üretimi normal Portland çimentosuna kıyasla CO₂ emisyonunu %80 oranında azaltır. Bu azalma geopolimerlerin oluşumu ile normal Portland çimentosunun klinkeri arasındaki iki temel farklılıktan kaynaklanır. İlk olarak geopolimerizasyon normal Portland çimentosunun oluşumundaki gibi kalsinasyon aşamasına sahip değildir. Reaksiyonda gerekli olan yüksek sıcaklıkları elde etmek için fosillerin yakılmasıyla oluşan kalsinasyon aşaması, CO₂ salınımının %40'ına neden olur. İkinci olarak kalsiyum karbonat veya kalkerin normal Portland çimentosuna dönüşümü esnasında oluşan CO₂ emisyonun %50'sine tekabül eder. Bu tip CO₂ üretimi geopolimer çimentonun üretiminde yoktur. Bunun yerine (3.8 ve 3.9) denklemlerinde görülen CO₂ salınımına neden olmayan reaksiyonlarla oluşur (McNulty, 2009).



Geopolimerlerdeki alüminyum ve silikanın yaygın bir şekilde bulunan kaynaklarından biri metakaolindir. Metakaolin normal Portland çimentosu karışımına eklenen, çimentonun uzun süreli dayanımını arttıran katkı maddesi veya puzolandır. Bu malzeme feldispat gibi alüminyum silikat toprak mineral olarak başlar. Feldispat kimyasal olarak kurutulursa hidrate olmuş alümino-silikata yani $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ formülündeki kaolinite dönüşür. Kaolinitin dehidroksilasyosyon olması için 500-800°C'ye kadar ısıtılır. Kaolinitin metakaoline dönüştüğü bu reaksiyon Denklem 3.10'da verilmiştir (McNulty, 2009).



Reaksiyon boyunca silikanın alüminyuma oranı oluşan malzeme için büyük öneme sahiptir. Bu nedenle diğer silika ve alüminyum kaynakları geri dönüşümlü uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu içerir. Enerji amaçlı kömür yakılmasının yan ürünü olan uçucu kül, yaygın olarak demir üretiminin yan ürünü olan silika dioksit ve yüksek fırın cürufu içerir. Uçucu kül, alüminyum ve silisyum oksitin ikisini de içerebilir. İstenilen 2:1 silikanın alüminyuma oranını elde etmek için bu ürünler kuru çimento karışımına alkali aktivatör ilave edilmeden önce eklenmelidir. Alkali aktivatör ise yaygın olarak alkali hidroksit veya alkali silikat solüsyonudur. Alkali metal genellikle sodyum ve potasyumdur ve geopolimer yapısı için gerekli bir bileşiktir (McNulty, 2009).

Betonda bağlayıcılık sağlayan bileşen çimentodur. Diğer bağlayıcı ve rezenelerden farklı olarak çimentonun ısı kütür uygulanmaksızın oda sıcaklığında sertleşmesi ve priz alması ve içindeki toprak kompozit malzemeyle uyum göstermesi önemlidir. Portland çimentosunun muadili geopolimer çimentosundan da bu özelliği göstermesi beklenmektedir. Kalsiyum esaslı, kayaç esaslı ve uçucu kül esaslı geopolimer sentezleri ile geopolimer çimento bağlayıcılar üretilebilmekte ve oda sıcaklığında priz alması sağlanmaktadır (Davidovits, 2008; Arıöz vd., 2009).

Portland çimentosu klinkeri 3 mol CaO molekülüne 1 mol SiO₄ bağlanması ile oluşur. Geopolimer çimentosu ise 1 mol alkali oksidin (Na₂O, K₂O) 6 mol polisialat (Si-O-Al-O-Si-O) molekülünü aktive etmesi ile oluşmaktadır (Davidovits, 2008). Bu yönüyle bakıldığında geopolimer pastasının bağlayıcılık özelliğinin daha az alkali aktivasyon ile gerçekleştiği söylenilebilir. Bu da birim ürün için daha az entalpi enerjisi gerektirecektir (Arıöz vd., 2009).

Günümüzde çimentolu beton üretimi yüksek düzeyli CO₂ emisyonuna neden olması yönüyle çevreciler tarafından sorgulanan bir konudur. 1 ton çimento üretilirken çimento fırını ısıtmak için 0.55 ton, klinker oluşum reaksiyonu ile de 0.4 ton CO₂ salınımı oluşmaktadır. 1990 yılında dünyada bir milyar tonluk dünya çimento tüketimi sonucu atmosfere 1 milyar ton CO₂ bırakılmıştır. 40–100°C gibi düşük ısılarda sentezlenen geopolimer hamuru ile üretilcek beton kuşkusuz 1400–1450°C ısıda sentezlenen çimento harcına kıyasla atmosferde %80–90 daha az CO₂ oluşumuna neden olacaktır (Arıöz vd., 2009).

Metakaolinit esaslı geopolimerin ana hammaddeleri olan camsuyunu (Na veya K silikat) elde etmede kullanılan 1200°C'lik füzyon sıcaklığını sağlayacak enerji ve 750°C'de metakaolinit sinterleme işlemi için gerekli enerji hesaba katıldığında dahi; Portland çimentosu klinkeri kalsinasyonu için gerekli olan 1400°C'lik fırın sıcaklığını sağlayacak enerji ile kıyaslandığında geopolimer çimentosu 3 kat daha fazla enerji verimliliğine sahiptir. Ayrıca klinkerin kalsinasyonunda yan ürün olarak açığa çıkan CO₂ ve fırını ısıtmak için kullanılan fosil yakıtlardan ayrılan CO₂

değerlendirildiğinde aynı verimlilikte geopolimer bağlayıcı üretilirken yayılan CO₂ Portland çimento fabrikalarının yaydığından 1/5'i kadardır (Davidovits, 2008; Ariöz vd., 2009).

Uçucu kül esaslı geopolimer çimentosu ve Portland çimentosunu enerji açısından kıyaslırsak çok daha şaşırtıcı bir gerçekle karşılaşmaktayız. Termik santrallerin elektrik enerjisi üretirken açığa çıkardığı atık geopolimer hammadde olarak kullanılabilir uçucu küldür. Uçucu kül ayrıca bir sinterleme işlemi gerektirmez, böylece termik santraller aynı zamanda bir düşük CO₂ yayımlı çimento fabrikalarına dönüşmektedir (Davidovits, 2008).

Portland çimentosunun yaygın kullanılmasının sebebi kuru olarak paketlenilebilir ve sevk edilebilir olmasıdır. Geopolimer çimentosu girdileri katı hammadde olarak fırınlanmış toprak katı, sıvı alkali tuz ile sıvı alkali silikatlardır. Su ile aktive edilebilecek kuru geopolimer çimentosu ilk kez 1987 yılında denenmiştir. Kuru KOH, tepkimeye amorf silika sağlayan kalsine kil ve şist ile metakaolinit karışımı çimento esası olarak geliştirilmiştir. Daha sonraları dialumine fillosilikat ve dialumina uçucu kül ile kuru geopolimer karışımı oluşturulmuştur. Kullanıcıya zarar vermeyen ve işlenebilirliği arttırılmış geopolimer çimentosu üretimi geopolimer teknolojilerinin yaygınlığını arttıracaktır (Zeybek, 2009).

3.7.11. Zeolit tabanlı geopolimerler

Villa *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, doğal zeolit ve alkali aktivatör kullanarak ürettikleri geopolimerlerin özelliklerine, aktivatör oranlarının, kür sıcaklığının ve süresinin etkisini araştırmışlardır. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Ayrıca, 7 M sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak, sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının (0.4, 1.5, 5, 10 ve 15) 1, 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına etkisi incelenmiştir. 90 günlük kür süresinde ve 80°C veya

daha üzerindeki kür sıcaklıklarının dayanım üzerinde olumsuz etkisi vardır. 25, 40, 60 ve 80°C kür sıcaklıkları da incelenmiş, 40°C kürde en yüksek basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda (60 ve 80°C) kısa zamanda basınç dayanımları artmış, fakat düşük sıcaklıklarda (25 ve 40°C) ise uzun zamanda basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir.

3.7.12. Ferronikel tabanlı geopolimerler

Maragkos *et al.*, (2009) yaptıkları çalışmada, geopolimer olarak kullanılan, metalürjik tesislerinden elde edilen ferronikel atıkları kullanmışlardır. Bu cürufklar 80 mikron seviyesine kadar öğütülmüş, mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Ayrıca cüruf tabanlı geopolimerlerin, makro ve mikro yapılarının araştırılmasının yanısıra, farklı yoğunluklardaki (4-5,6) katı/sıvı oranlarının basınç dayanımlara etkisi araştırılmıştır. Katı/sıvı oranının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinin düzenli olarak arttığı gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 5.4 g/mL'ye sahip yoğunluktaki numunelerden elde edilmiştir. Geopolimerlerin silika yoğunluklarının da basınç dayanıma 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.

3.7.13. Pomza tabanlı geopolimerler

Allahverdi *et al.*, (2008) çalışmalarında Taftan dağı civarında ki pomza tipi doğal puzolanı ve aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃'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 Na₂SiO₃'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 puzolanların aktive edilebileceğini ve alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksitin belli oranlarda karışımının kullanılmasıyla geopolimer çimento üretilebileceği açıklanmıştır. Doğal puzolan esaslı geopolimer çimentonun kalitesinin alkali aktivatörün bileşimine, su/bağlayıcı oranına ve doğal puzolanın kalitesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

3.7.14. Geopolimer tuğlalar

Geopolimer tuğla üretimi ilk kez 1982 yılında LTGS (düşük ısıli geopolimer prizi) yöntemi ile lateritik diye de adlandırılan kırmızı kil topraktan üretilmiş ve Fransa'da patent alınmıştır. Aynı araştırmacıların kaolinitik killerden üretilen siyah yüzeyli tuğlaları da aynı senteze dayanmaktadır. Ağırlıkça %5 alkali soda (NaOH, KOH) ve kırmızı toprağın 70°C civarında bir sıcaklıkta sentezlenmesiyle üretilen geopolimer tuğlanın basınç dayanımı 900°C ısıli işleme üretilen seramik kil tuğlaların basınç dayanımından daha yüksek bulunmuştur. Ucuz enerji ile üretilebilir olması ve tek katlı binalarda kullanılacak tuğlaların standardını karşılayabilmesi nedeni ile geopolimer tuğlaların Afrika ülkelerindeki barınma sorununun çözümünde uygun bir yöntem olduğu ileri sürülmektedir (Arıöz vd, 2009).

Geopolimer tuğla üretiminde kostik soda (NaOH veya KOH) ile aktifleştirilmiş kil esaslı hammadde uygun kompaksiyon enerjisi ile preslenmektedir. Alkali soda seramik sentezinde ısıli rötrenin önüne geçmekte böylece üretilecek malzemede çatlak ve boşluklu yapı oluşmamaktadır. Bu üretim tekniği daha sağlam daha ekonomik tuğlaların üretimini sağladığı gibi yapı elemanlarında elastiklik ve bina içerisinde doğal iklimlendirme de sağlar. Geopolimer tuğla üretim örneklerinden biri de yangın dayanımı yüksek dekoratif modern seramik geopolimer tuğlalardır. Geopoly-therm ticari ismi ile Cordi geopolymer tarafından patentlendirilmiş kaplama seramikleri refrakter olarak kullanıldığı gibi yüksek ısı ve ışığa maruz kalan dekoratif yüzeylerde de kullanılmıştır. 1400°C sıcaklığa dayanan bu malzeme 80–90°C

sentezlendikten sonra yüzeyinde sırlama işlemi için 1120°C sıcaklık uygulanmaktadır (Arıöz vd, 2009).

3.7.15. Çelik lif tabanlı geopolimerler

Bazalt fiber takviyeli geopolimerik betonların mekanik özellikleri, dinamik basınç dayanımı, deformasyon ve enerji emme kapasitesi 100 mm çaplı Hopkinson basınç çubuğu sistemi kullanılarak Li ve Xu (2009) tarafından çalışılmıştır. Bazalt fiber takviyeli geopolimerik betonların mekanik özellikleri güçlü gerilme bağımlılığı göstermektedir ve gerilme oranlarıyla lineer bir şekilde arttığı belirtilmiştir. Ayrıca bazalt fiberler geopolimerik betonların deformasyon ve enerji emilim kapasitelerini önemli derecede arttırdığı yapılan çalışmada tespit edilmiştir.

Çelik liflerle güçlendirilmiş ve alkali aktive edilmiş cürüflü betonun performansını araştırdıkları çalışmalarında Bernal *et al.* (2010) betonun erken yaşlardaki mekanik ve geçirimsizlik özelliklerini; basınç, çekme, eğilme mukavemetlerini, çentikli numunelerdeki eğilme hassasiyetini, su emme ve kismayı incelemişlerdir. Çelik liflerin artmasıyla alkali aktive edilen cürüflü betonların mukavemeti azalmıştır. Ama 28 günlük kürde; eğilme mukavemeti (6.40 MPa'dan 8.86 MPa'a) ve yarmada çekme mukavemeti (3.75 MPa'dan 4.64 MPa'a) büyük ölçüde çelik liflerin artmasıyla artmıştır. Betonun su emme, kapillarite ve geçirimsizlik gibi durabilite özelliklerinin liflerin artmasıyla iyileştiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, alkali aktive edilmiş cürüflü betonun çelik lifli ya da lifsiz olarak muazzam bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir.

3.7.16. Cüruf esaslı geopolimerler

Bougara *et al.*, (2009) düşük CaO/SiO₂ oranına bağlı olarak düşük reaktivite sergileyen Cezayir cürufu üzerinde araştırmalar yapmıştır. Cüruf, mekanik olarak 250, 360 ve 420 m²/kg Blaine yüzey alanına sahip olacak şekilde öğütülerek, 20, 40 ve 60°C'de kür edilerek termal olarak ve cürufun farklı konsantrasyonlardaki NaOH

ve KOH alkalileriyle karıştırılmasıyla kimyasal olmak üzere, üç yöntemle aktive edilmiştir. Numuneler 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sürede basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Uygulanan üç metotta cürufun reaktivitesini iyileştirmiştir. Sonuçlar cürufun sıcaklık artışına karşı çok hassas olduğunu göstermiştir. İncelikteki artışın dayanım gelişiminde artışa neden olduğu gözlenmiş ve cüruf inceliğinin çimentoya nazaran daha fazla olduğu durumda daha iyi performans sağlanacağı belirtilmiştir. Cürufun alkali ile aktivasyonunun dayanım gelişiminde artışa neden olduğu belirtilmiş ancak dayanımın kontrol harcına göre düşük olduğu gözlenmiştir.

Sakulich *et al.*, (2009) çalışmalarında, geopolimer hammaddesi olarak kireçtaşı ve cüruf, alkali aktivatör olarak ise NaOH ve Na₂CO₃ kullanmışlardır. Oda sıcaklığında küre bırakılan ince agregalı beton numuneler 45 MPa basınç dayanımı ve 1 gün kür sonunda 2.5 MPa, 28 günün sonunda 4 MPa eğilme mukavemeti göstermiştir. Ayrıca, NaCl yoğunluğunun (5, 10, 15, ve 20) da basınç dayanımına etkisi vardır. En iyi basınç dayanımı %20 NaCl kullanılmasıyla 25 dakikalık kürde elde edilmiştir.

3.8. Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimerler yüksek sıcaklık etkilerine karşı dayanımı, yüksek mukavemetli ve hızlı katılma özellikleri ile geopolimerler atık arıtmada, yangın dayanıklılığında, yapı ve askeri mühendislikte hatta biyomalzemelerde kullanılmaktadır (Yao *et al.*, 2009).

Geopolimerin göstermiş olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleriyle; prekast yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykeltçilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak endüstrisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir. Ayrıca geopolimer kimyası verileri, Mısır piramitlerinin

gizemini, Roma ve Horasan harçlarının kimyasal yapısını da aydınlatılabilir (Davidovits, 2008).

Hanzlıcek *et al.*, (2009) tarafından yapılan çalışmada geopolimer bağlayıcıların, değerli tarihi yapıların restorasyonunda bağlayıcı ve onarıcı malzeme olarak kullanılmasını incelenmiştir. Baroque heykelinin güçlendirilmesi için özel geopolimer bağlayıcılar hazırlanmıştır. Heykelin kavitesindeki uygulamalar, heykelin durabilite ve stabilitesini sağlayan, görünmeyen kısımlarını estetiğini bozmadan uygulanmıştır. Dış modülasyon ve son restorasyon, klasik yöntemler ve kalsit yapıştırıcılar kullanılarak uygulanmıştır.

Sürekli kullanıma açık bulunan yerlerin (havaalanı gibi) onarılmasında geopolimer betonlar sıklıkla kullanılmaktadır (Davidovits, 1994).

Heitzmann ve Sawyer (1984) araştırmaları sonucunda geopolimerlerin Portland çimentoyla benzer şekilde özellik gösterdiği gözlenmiştir. Geopolimer çimentoların, Portland çimentolarla birlikte kullanılarak, düşük üretim maliyetli daha iyi özellik gösteren çimento malzemeleri üretilmiştir. Bu karışım %80 Portland çimento ve %20 geopolimer malzeme içermektedir. Bu üretilen çimento oldukça hızlı ve çok erken yüksek dayanım kazanma özelliği göstermiş ve inşaat sektöründe tanınmıştır. Ayrıca bu malzemenin, endüstriyel kaplamalarda ve otoban yollarda, pist onarımı için dökülen betonlarda ideal bir malzeme olduğu görülmüştür. Bu malzeme, pistte 4-6 saat arası sertleşmektedir. Fakat düz beton birkaç gün sonra sertleşmekte ve geopolimer çimentolar 4 saat sonra, yaklaşık 20 MPa basınç dayanımı göstermektedir (Davidovits 2008).

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. 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 2'de verilmektedir.

Çizelge 2. Elazığ ferrokrom cürufu kimyasal bileşimi

| Bileşim (%) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Cr ₂ O ₃ |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|--------------------------------|
| EFC | 33.80 | 25.48 | 0.61 | 1.10 | 35.88 | 2.12 |

4.1.2. Çimento

Bu çalışma kapsamında Elazığ çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 N Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun özgül ağırlığı 3.17 kg/dm³ olup kimyasal bileşimi Çizelge 3'de verilmektedir.

Çizelge 3. CEM I 42.5 N Portland çimentosu kimyasal bileşimi

| Bileşim (%) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
|------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
| CEM I 42.5 N Portland çimentosu | 19.53 | 5.25 | 3.66 | 61.68 | 2.47 | 2.91 |

4.1.3. Aktivatörler

Alkali aktivatör olarak, sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan aktivatörlerin kimyasal özellikleri Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri

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

4.1.4. Agrega

Beton numuneler için ince agrega olarak dere kumu ve kırma kum, iri agrega olarak ise dere çakılı kullanılmıştır (Şekil 8-9). 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 8. Dere agregası



Şekil 9. Kırma kum agregası

4.1.5. Karma suyu

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

4.2. Yöntem

Bu bölümde agrega özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler ile sertleşmiş beton deneylerinde kullanılan yöntemler belirtilmiştir.

4.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen dere agregası ve kırmakum 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 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 yapılan agrega deneyleri 3'er defa yapılmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Bu değerler Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

Dere agregası ve kırmakum agregalarının tane büyüklüğü dağılımı TS 3530 (1999)'a göre belirlenmiştir. Deneylerde TS 1227 (1996)'ye uygun toplama kabı, 2 mm ile TS

1226 (1996)'ye uygun 4 mm, ve 8 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.

Deneylede 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.

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.

4.2.2. EFC'nin öğütülmesi

Elazığ ferrokrom fabrikasından temin edilmiş olan malzeme nemli (%1.15) olduğundan dolayı cüruf ilk önce tartılarak, değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulmuştur. Kurutulan cüruf bilyalı değirmen ile öğütülmüş ve daha sonra elek sarsma cihazında elenerek 45 µm altında kalan EFC deneysel amaçla kullanmak üzere alınmıştır. EFC'nin öğütme işlemi Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Cürufun öğütme işlemi

4.2.3. 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 değilde 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.

Bu çalışma kapsamında her bir gruptan 3'er numune üretilerek elde edilen numunelerin basınç dayanımı, bazı fiziksel özellikler ve yangın dayanımları elde edilmiştir.

4.2.4. Karışım oranlarının belirlenmesi

Bütün karışımlarda EFC dozajı 400 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Yapılan deneysel kontrol ve literatür çalışması neticesinde silis modülü 1.35 ve ağırlıkça sodyum oksit miktarı 9.13 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla karışımda kullanılan aktivatörlerin miktarı saptanmıştır. Bu malzemelerin hacimleri 1 m^3 'den çıkarılarak toplam agrega hacmi bulunmuştur. Elde edilen agrega hacmi tane sınıflarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Karışıma giren agregaların ağırlıkları bulunurken, dere agregası ve kırmataş agregaları için hacimler özgül ağırlık ve nem yüzdeleri ile çarpılmıştır. Dere agregası ve kırmataş agregası için özgül ağırlık ve nem yüzdeleri iri ve ince tane sınıfları için ayrı ayrı bulunmuştur (Çizelge 5). Normal Portland çimentolu numunelerde geopolimer beton numunelerdeki kıvamı elde etmek için %2 oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 5. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları (1 m^3 beton için)

| Karışımlar | | Dere Agregalı Geopolimer Betonlar | Kırma Kum Agregalı Geopolimer Betonlar | Normal Portland Çimentolu Betonlar |
|---|--------|-----------------------------------|--|------------------------------------|
| EFC (kg) | | 400 | 400 | - |
| Na_2SiO_3 (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^3 | | 2360 | 2369 | 2287 |

*:Kırma kum agregalı geopolimer betonlarda 4-8 mm dane çapı için dere agregası kullanılmıştır.

4.2.5. 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. Daha sonra sırasıyla EFC, kum ve iri agregalar eklenerek karıştırılmıştır.

Yapılan literatür çalışmalarında ısıl kür işleminin, geopolimer reaksiyonlarını hızlandırdığı ve reaksiyona giren alumino-silikat miktarını arttırdığı gözlemlenmiş ve bu çalışmada kür koşulu olarak %60 nem ve 75°C sıcaklık kür koşulu seçilmiştir. Benzer şekilde Zeybek (2009) tarafından yapılan çalışmada ham maddeye uygulanan ön ısıtma ve 100°C'ye kadar olan ısıl kür işlemlerinin, geopolimer reaksiyonlarını hızlandırdığını ve reaksiyona giren alumino-silikat miktarını arttırdığı tespit edilmiştir. Brough ve Atkinson (2002), tarafından yapılmış, Sağlık (2009) tarafından özetlenmiş çalışmada ise, cüruf 1.5 M (Na₂O).(SiO₂) solüsyonu ile aktive edildiğinde dayanımın hızlı bir şekilde arttığı tespit edilmiş, 80°C'de 12 saatlik ısıl kür yapılmasının yüksek dayanımın elde edilmesine neden olduğu belirtilmiştir. 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 (Na₂O/SiO₂=0.31 olan) molar oranı Si/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 ısısı da ölçülmüştür. 60°C kür edilmiş geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellik olarak en iyi sonuç verdiği görülmüştür.

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 (Davidovits, 2008; Arıöz vd., 2009).

4.2.6. Hamur numunelerinde hidrasyon ısı ölçümü

Hamur numunelerin hidrasyon ısıları tayini Şekil 11'deki ToniCAL izotermal kalorimetre aracılığıyla ölçülmüştür. Bu yöntem hamur numunelerinin hidrasyon ısısının belirlenmesinde, ısının kesintisiz saptanması nedeni ile ToniCAL Kalorimetresi 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 11. 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 grafiiklerini verir.

Hidrasyonun gelişmesi birçok faktöre bağlı bulunmakla beraber genel olarak yıllarca devam eder. Hidrasyon olayının zamanın bir fonksiyonu olarak artması son derece önemli olup çimentonun çeşitli özelliklerinin değişmesine ve bu arada dayanımın zamana bağlı olarak artmasına neden olur. Hidrasyon hızının artması, dayanım artışına neden olur. Hidrasyon ısısının artışı ile basınç dayanımının artışı arasında paralellik gözlemlenmiştir. Betonun dökümünden sonraki ilk üç gün içerisinde hidrasyon ısısı en yüksek değere ulaşır. imentoyu 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 hidrasyon ilk saatlerde oldukça hızlı olmakta ve zaman ilerledikçe hızı yavaşlamaktadır. Çimentonun hidrasyon ısısı çimentonun belirli bir sıcaklık koşulunda hidrasyona başlayıp hidrasyon sonuna kadar açığa çıkardığı ısı miktarıdır. Hidrasyon ısısı kalori/gram (cal/g) veya joule/gram (j/g) birimleri ile ifade edilir. $1 \text{ cal/g} = 4.19 \text{ j/g}$ 'dir. Portland imentoları ilk 1 ile 3 gün arasında toplam ısılarının yaklaşık yarısını açığa çıkartmaktadır. 7 gün sonra açığa çıkan hidrasyon ısısı, toplamın yaklaşık dörtte üçü kadar ve altı ay içerisinde açığa çıkan ısı toplamın %83-%91'i kadardır. Hidrasyon hızını ve hidrasyon ısısının açığa çıkma hızını etkileyen önemli faktörler; çimentodaki ana bileşenlerin yüzdeleri, çimentoların inceliği ve hidrasyonun yer aldığı sıcaklık koşullarıdır. Çimentonun hidrasyonu hidrate olmamış kristallerinin hidrate kristaller haline dönüşmesidir. Sağlam ve dengeli olan bu kristaller çimentonun dayanımını oluştururlar. Birçok araştırmacı çimentonun hidrasyon mekanizmasını açıklamak üzere yıllardır araştırmalar yapmakta, her gün yeni buluşlar ortaya koymaktadırlar (Binici *vd.*, 2006).

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.

4.2.7. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, geopolimer beton numuneler hem dere kumu hem kırma kum ile üretilmiş olup, bu numuneler üzerinde basınç dayanımı, su emme, hacimsel yoğunluk ve yangın dayanım değerleri tespit edilmiştir. Geopolimer betonlarda elde edilen deney sonuçları normal Portland çimentosu ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

4.2.7.1. Basınç dayanımı

Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımının belirlenmesinde ASTM C39 test metodu kullanılmıştır.

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 (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$F_c = P / A_c \quad (4.1)$$

Burada;

F_c : Basınç dayanımı, MPa,

P : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

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

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.

4.2.7.2. Su emme deneyi

Numunelere ait ağırlıkça su emme oranları, TS 12390-7'de belirtildiği şekilde tespit edilmiştir. Elde edilen her bir deney sonucu 3 deneyin aritmetik ortalamasıdır. Öncelikle numuneler 24 saatlik periyotlar halinde etüvde tutulmuş ve daha sonra oda sıcaklığına geldikten sonra ağırlıkları tayin edilmiştir. Ölçülen ağırlıklar arasındaki fark en düşük olan ağırlığın $\%0,2$ 'inden az olduğunda numunenin etüv kurusu ağırlığa geldiği kabul edilmektedir. Etüv kurusu haline gelen numuneler daha sonra $21\pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki kür havuzuna bırakılıp, 72 saat sonra çıkarılmış yüzey ıslaklıkları havlu ile alınarak tartılmıştır. Daha sonra numuneler tekrar 24 saatliğine kür havuzuna bırakılmıştır. Sonrasında havuzdan çıkarılmış yüzey ıslaklığı alınan

numuneler tartılarak, birbirini izleyen iki tartım arasındaki fark büyük ağırlığın %0.2'inden az oluncaya kadar bu döngüye devam edilmiş ve doygun kuru yüzeyli numune ağırlıkları belirlenmiştir. Yangına maruz kalan numunelerin su emme oranının belirlenmesinde de yukarıda belirtilen yöntem kullanılmıştır. Bu durumdan farklı olarak, fırından çıkarılan numuneler tekrar etüvde kurutulmamış, bunun yerine oda sıcaklığına getirilerek tartım işlemi yapılmıştır. Etüv kuru ağırlık (A) ve doygun kuru yüzey ağırlık (B) tayin edildikten sonra Denklem 4.2'e göre numunenin ağırlıkça su emme oranı (m_1) tayin edilmiştir.

$$m_1 = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (4.2)$$

4.2.7.3. Yangın dayanımı

Geopolimer ve normal beton numuneler 28 gün bekletildikten sonra yangın dayanımlarını tespit etmek için fırına yerleştirilmiştir (Şekil 12). Bu numuneler maksimum sıcaklığa getirildikten sonra bir saat süreyle bu sıcaklıklarda (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C) bekletilmişlerdir. Maksimum sıcaklıkta bir saat kalan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra basınç dayanımı deneyi ve su emme deneyine tabii tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin su emme ve basınç dayanımı değerleri aynı karışım dizaynına sahip normal Portland çimentolu numunelerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 12. Yüksek sıcaklık fırını

4.2.7.4. SEM

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 saptırılamaz. Elektron mikroskopları iki çeşittir. Bunlar:

TEM (Transmitting Electron Microscope): Bu mikroskopta elektron ışını çok ince bir örneğe yönlendirilir. Elektron mikroskobunda, projeksiyon mercekleleri 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 Electron Microscope): Daha kalın örnekler elektron ışınlarının yüzeyden yansıması ile incelenebilir. Bu inceleme SEM ile yapılabilmektedir. 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 görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

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

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 ışınları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.

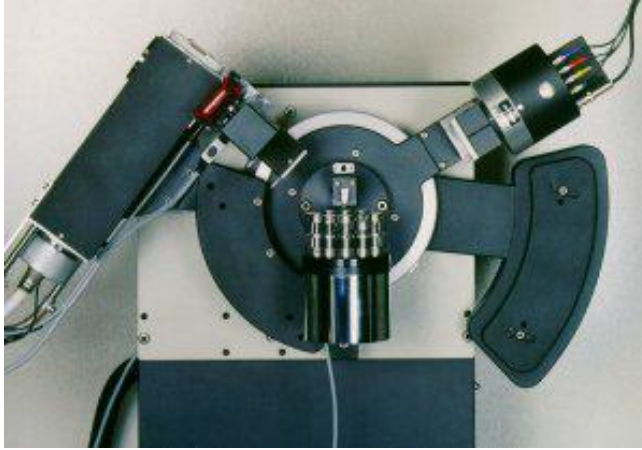
Üretilen mikroyapı özelliklerinin belirlenmesi için karışımlardan alınan parçalar üzerinde SEM ile görüntü alınmıştır. Numuneler öncelikle vakumlanmış, daha sonra 75 s süre içinde Au-Pd ile kaplanmıştır. Bu çalışma için LEO-EVO 40 adlı cihaz kullanılmıştır. SEM analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel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

4.2.7.5. XRD

Mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinde, XRD spektroskopisi olarak bilinen X-Işını Difraksiyon spektroskopisi kullanılmıştır. İsminden anlaşılacağı üzere X-ışını denilen Ultraviyole ışıandan 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 görölmektedir. Ayrıca dedektör ve ışın doğası da önemli etkenlerdir.

Çalışma prensibi olarak örneğe X-Işını göndererek kırılma ve dağılma verileri toplaması söylenebilir. Benzetme yapmak gerekirse üniversite hazırlık sınavlarındaki klasikleşmiş fizik sorularından kırılma indisi-açı soruları uygun olacaktır. Kristal yapısına göre ışını farklı açılarda ve şiddette kıran örnekler çok hassas biçimde analiz edilebilmektedir. Şekil 13'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 13. 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.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

5.1. Agregalar Deneyleri ile İlgili 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 agregası için özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneyde kuru özgül ağırlık, doygun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve 24 saatlik su emme oranları tayini iri ve ince agregası için ayrı ayrı yapılmıştır. TS 3526 'ya göre yapılan bu deneyde elde edilen sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayin deney sonuçları

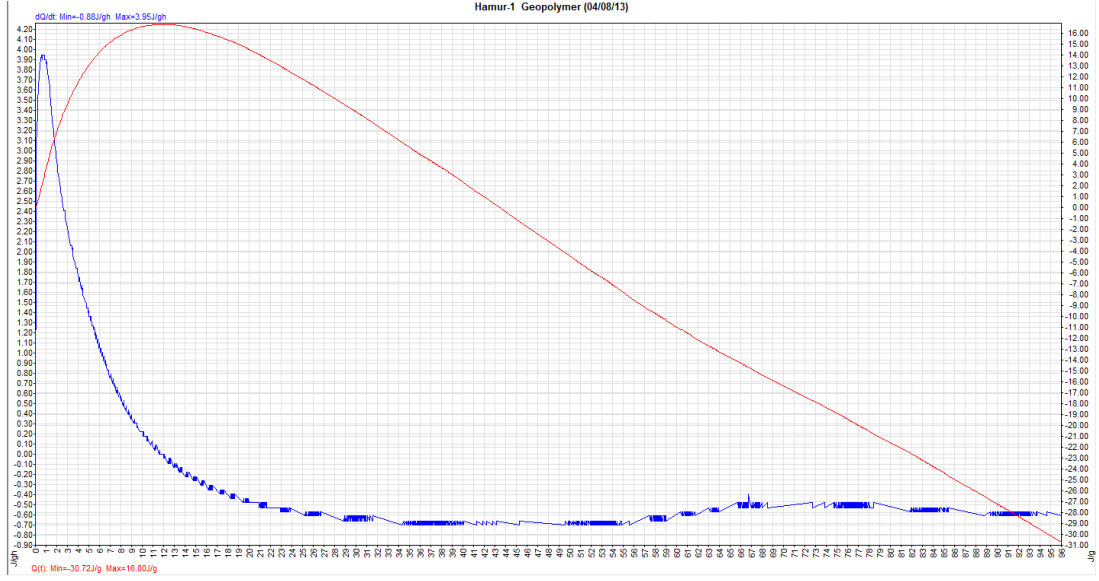
| Özellik | Dere Agregası | | | Kırma Kum Agregası | |
|--|---------------|------|------|--------------------|------|
| | 0-2 | 2-4 | 4-8 | 0-2 | 2-4 |
| Kuru özgül ağırlık (g/cm ³) | 2.34 | 2.55 | 2.60 | 2.35 | 2.57 |
| Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (g/cm ³) | 2.40 | 2.60 | 2.65 | 2.42 | 2.61 |
| Görünen özgül ağırlık (g/cm ³) | 2.57 | 2.62 | 2.68 | 2.59 | 2.64 |
| Nem oranları (%) | -2.6 | -2.0 | -1.9 | -3.0 | -1.6 |

5.2. Geopolimer ve Portland Çimentolu Hamur Numunelerin Hidratasyon Isıları

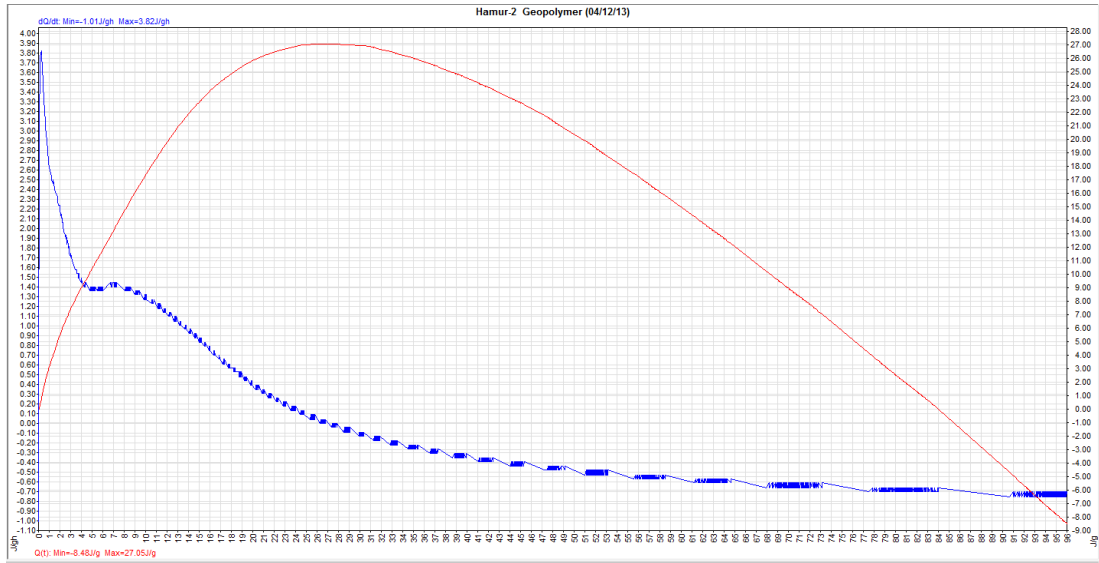
Geopolimer ve Portland çimentolu hamur numunelerin hidratasyon ısıları değerleri, farklı silis modülü ve sodyum oksit içeriğine bağlı olarak Çizelge 7’de verilmiştir. Bu numunelerin hidratasyon ısılarının zamana bağlı değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 14-26’da gösterilmiştir.

Çizelge 7. Geopolimer ve Portland çimentolu hamur numunelerin hidratasyon ısıları

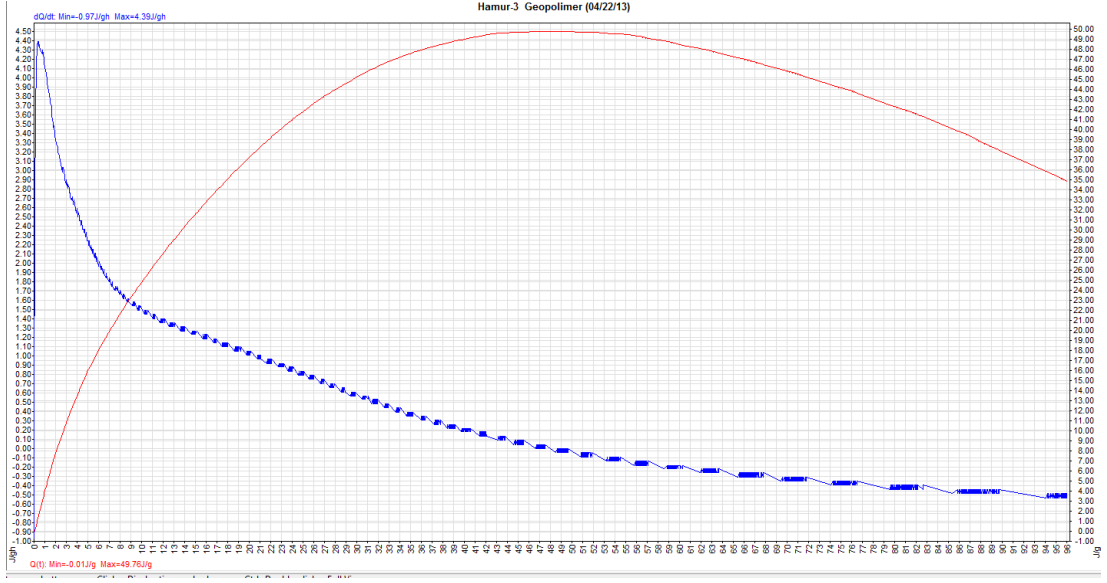
| Sıra No | Silis Modülü | Na ₂ O, (%) | Q(t), (J/g) |
|---------|-------------------------------|------------------------|-------------|
| 1 | 0.5 | 4 | 16.80 |
| 2 | 0.5 | 7 | 27.05 |
| 3 | 0.5 | 10 | 49.76 |
| 4 | 0.5 | 12 | 53.25 |
| 5 | 0.6 | 4 | 3.80 |
| 6 | 0.6 | 7 | 24.85 |
| 7 | 0.6 | 10 | 51.57 |
| 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 |



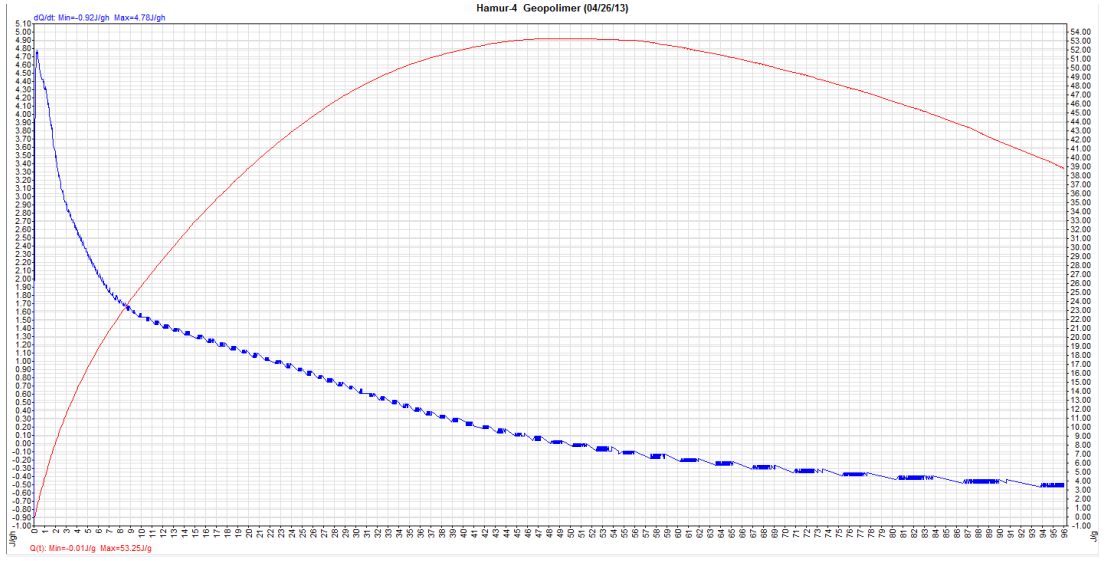
Şekil 14. 1 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



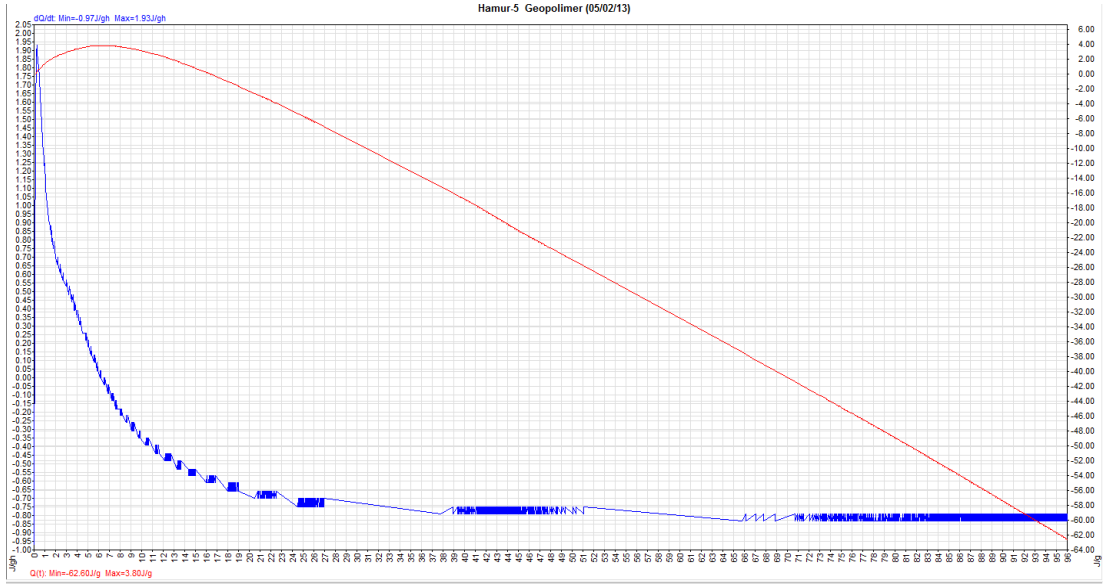
Şekil 15. 2 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



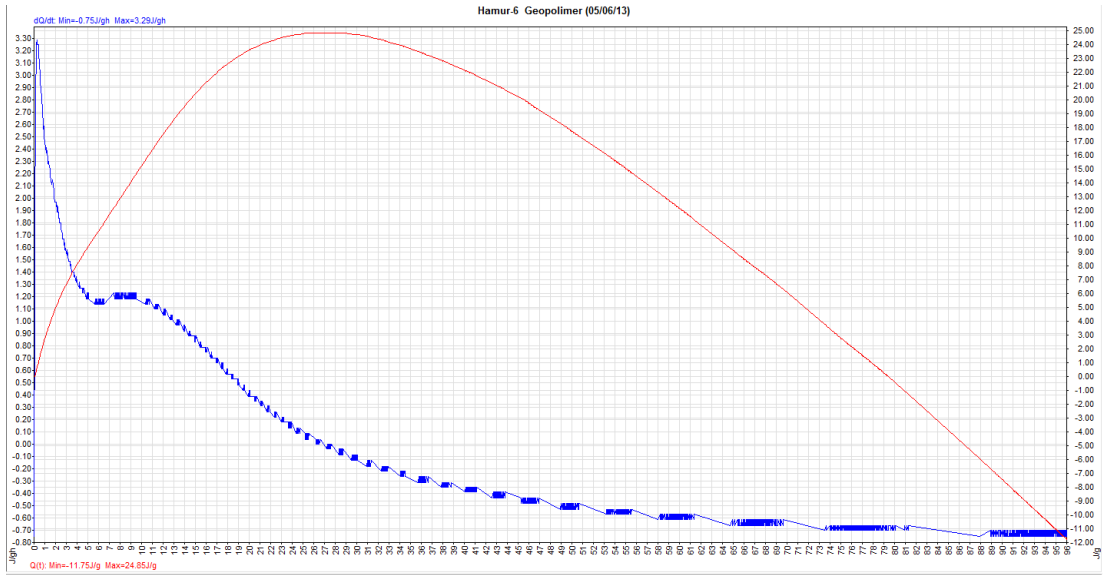
Şekil 16. 3 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



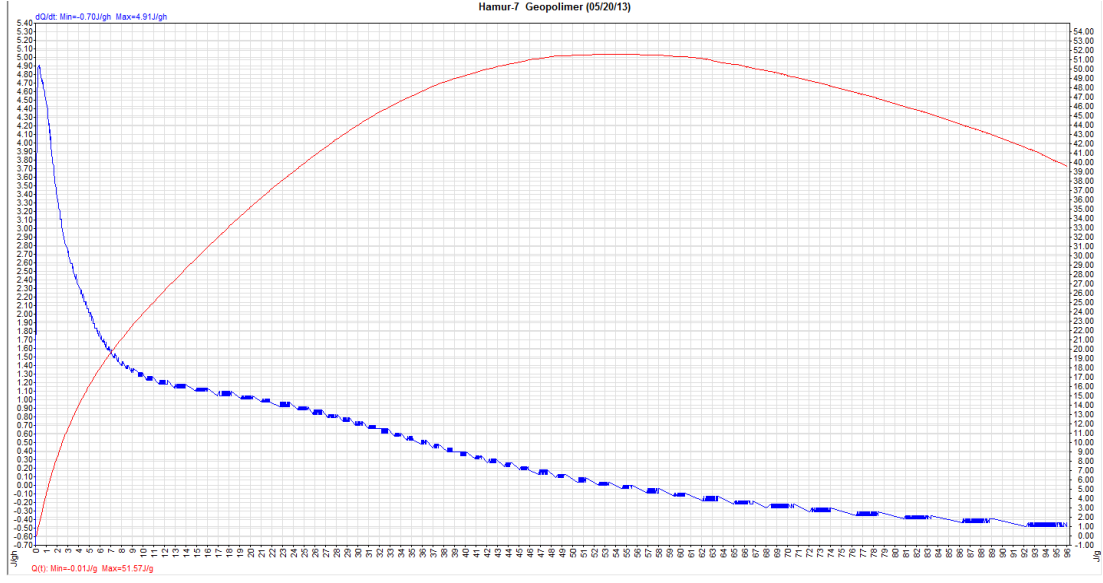
Şekil 17. 4 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



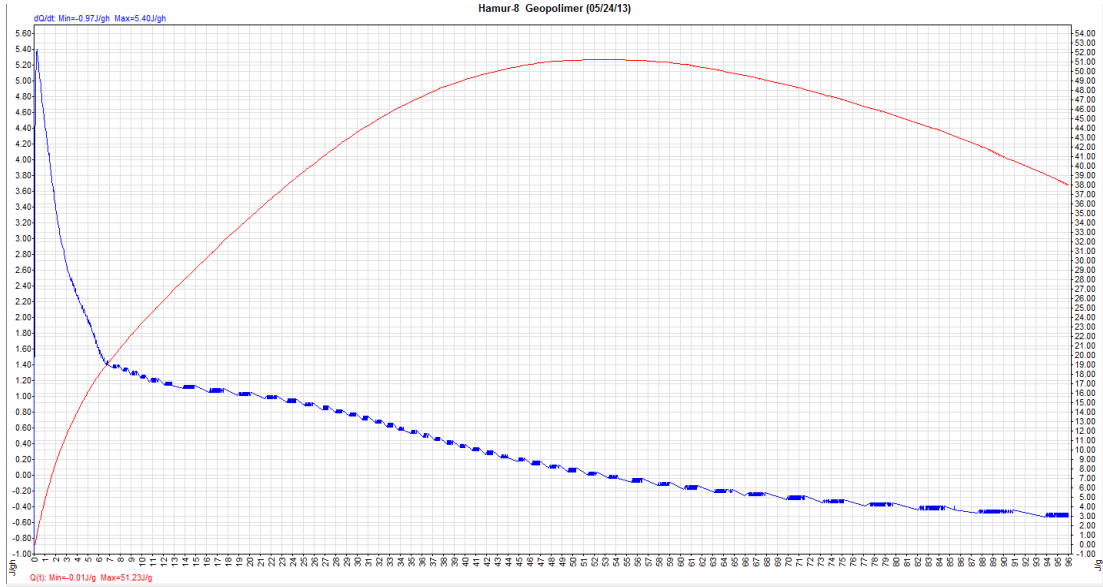
Şekil 18. 5 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



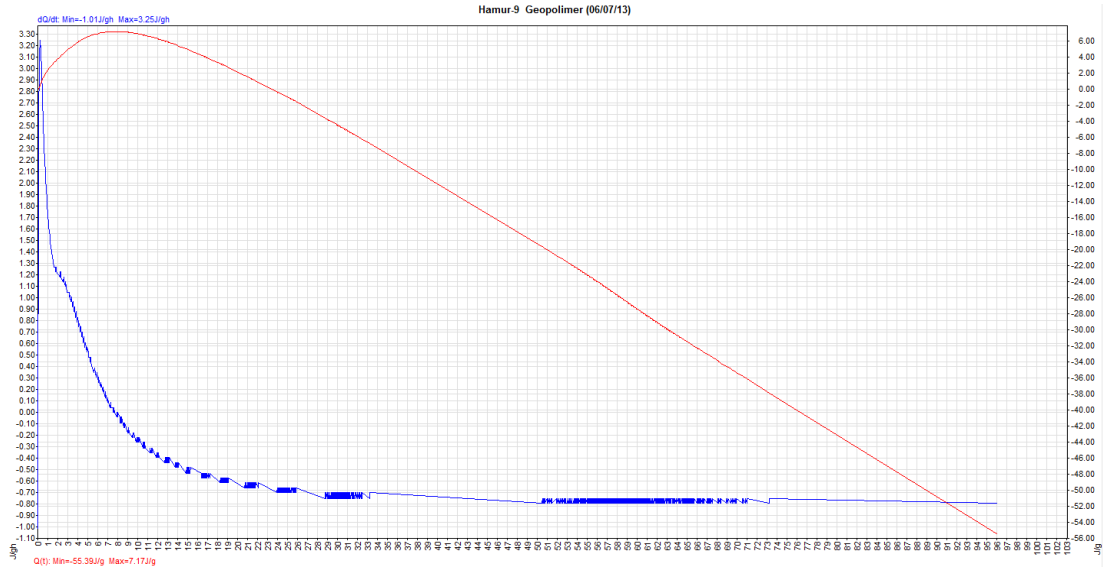
Şekil 19. 6 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



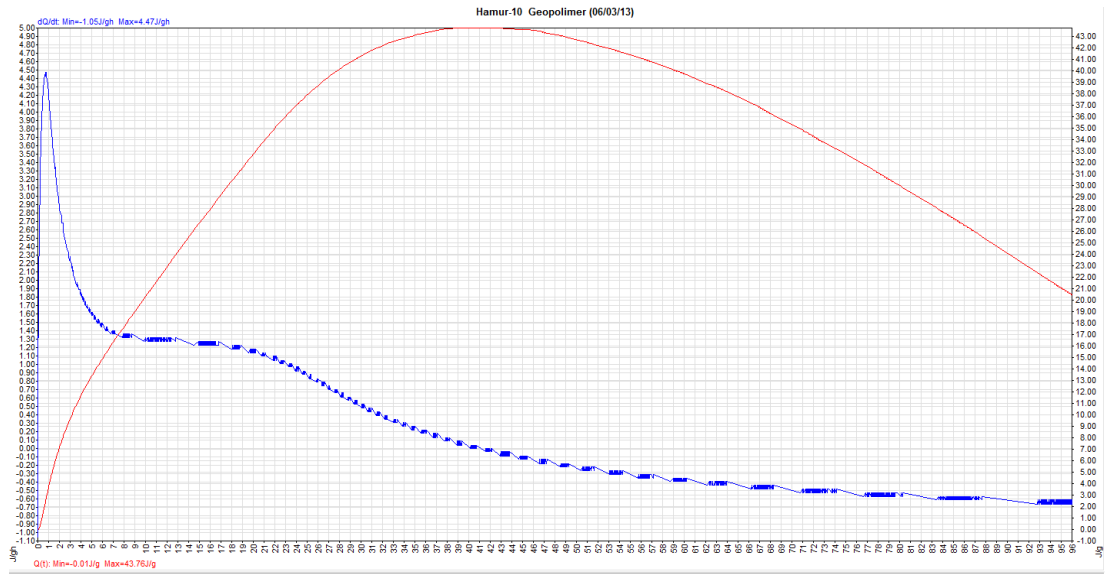
Şekil 20. 7 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



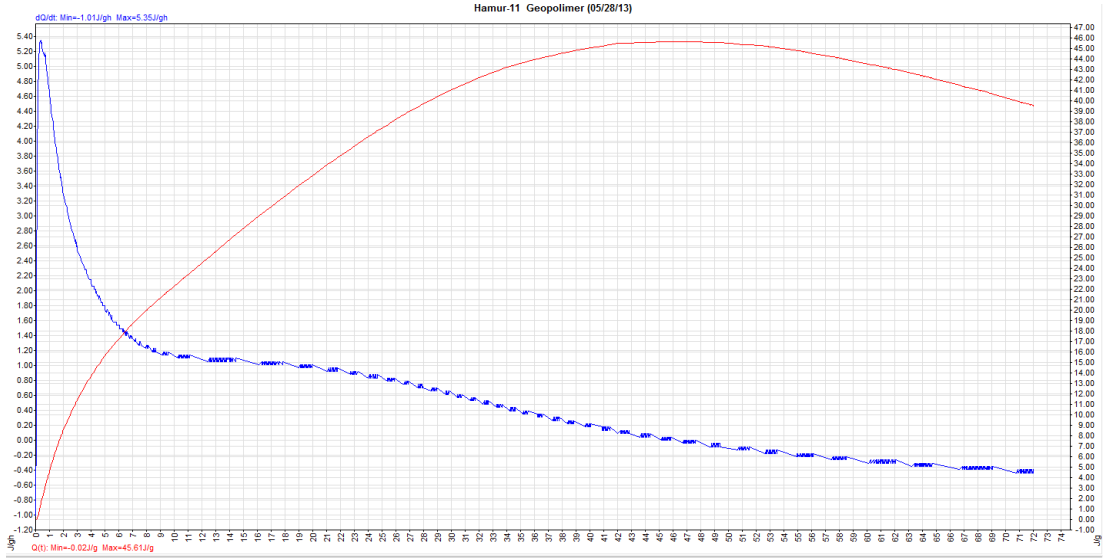
Şekil 21. 8 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



Şekil 22. 9 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



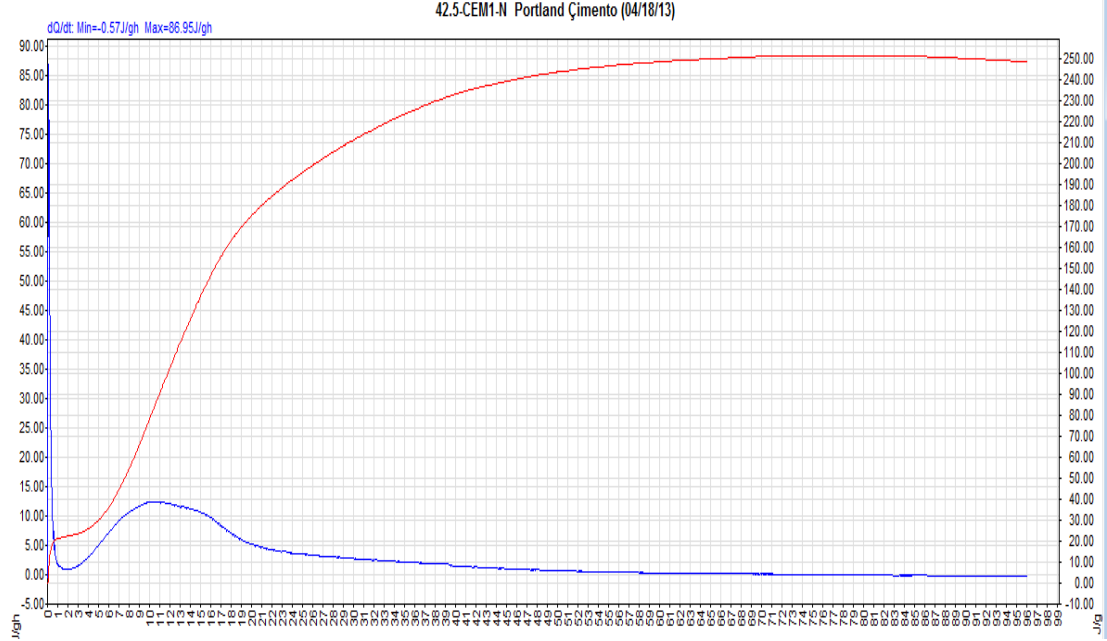
Şekil 23. 10 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



Şekil 24. 11 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



Şekil 25. 12 nolu geopolimer hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı



Şekil 26. Portland çimento hamur numunesinin zamana bağlı hidrasyon ısısı

Farklı silis modülü ve farklı Na_2O içeriklerine bağlı olarak hidrasyon ısıları değişkenlik göstermiştir. En az hidrasyon ısısı, silis modülünün 0.6 ve Na_2O içeriğinin %4 olduğu geopolimer hamur numunesinden elde edilmiştir. 0.5 silis modülüne sahip geopolimer hamur numunelerinin Na_2O içeriğinin artmasıyla hidrasyon ısısının da arttığı gözlenmiştir. Normal Portland çimentolu hamur numunelerinde 251.40 J/g hidrasyon ısısı elde edilmiştir. Ayrıca, geopolimer hamur numunelerin Portland çimentoya göre oldukça düşük ısı çıkardığı gözlenmiştir. Benzer şekilde Guo *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu kül ile alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanarak geopolimerler üretmişlerdir. Uçucu kül tabanlı geopolimerlerin, Portland çimentolara göre daha az hidrasyon ısısı açığa çıkardığını tespit etmişlerdir. Nath ve Kumar (2013) yaptıkları çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş Corex (Uluslararası çelik üretim firması Voestalpine'nin patentli ürünü) cürufunu uçucu kül esaslı geopolimerlere % 0-50 aralığında değişen oranlarda eklemiştir. Cüruf eklemenin geopolimerizasyon reaksiyonlarına etkisi izotermal kalorimetre ile incelenmiştir. Her iki cüruf için hidrasyon ısısı grafiklerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Her iki durumda da iki adet keskin tepe noktası elde edilmiştir. İlk tepe noktasının çözünme ikinci tepe noktasının ise C-S-H jel oluşumu olduğu

sonucuna varılmıştır. Toplam açığa çıkan hidrasyon ısısında ise cüruf miktarı arttıkça artma gözlenmiştir.

5.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

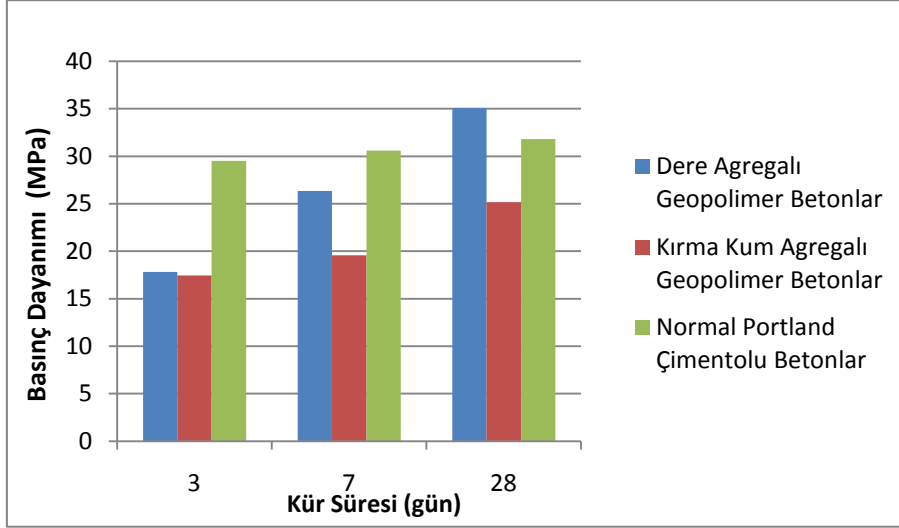
Materyal ve Yöntem bölümünde anlatıldığı şekliyle ve deney programında tasarlandığı gibi basınç dayanımı, bazı fiziksel özellikleri, yangın öncesi ve sonrası basınç dayanımları ve su emme oranları gibi bazı sertleşmiş beton deneyleri yapılmış ve bulunan sonuçlar aşağıda başlıklar altında ayrı ayrı incelenmiştir.

5.3.1. Beton numunelerin basınç dayanımı

Dere agregalı, kırma kum agregalı geopolimer beton numuneler ve normal Portland çimentolu beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde geopolimer ve normal Portland çimentolu beton numunelerinin basınç dayanım değerleri Çizelge 8’de verilerek Şekil 27’de gösterilmiştir.

Çizelge 8. 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 27. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri



Şekil 28. Beton numuneler

Deney sonuçları incelendiğinde, 3 günlük basınç dayanım değerleri referans kabul edilirse, 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. Collins ve Sanjayan (1999) yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak alkali aktive edilmiş cüruf içeren geopolimer betonlar üzerine çalışmışlardır. İki aktivatör tipi; (sodyum karbonat, sodyum hidroksit) ve sönmüş kireç ile birlikte

sodyum silikat kullanılmıştır. Taze betonda çökme, çökme kaybı, hava içeriği, akma değerleri, alkali aktive betonun mekanik özellikleri incelenerek Portland çimentosuyla üretilen betonlarla kıyaslanmıştır. Alkalilerle aktive edilmiş cürüfla üretilen betonların basınç dayanımlarının, bütün kür sürelerinde normal Portland çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanımlarından daha iyi olduğu belirtilmiştir. Guo *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu kül, alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanarak geopolimerler üretmişlerdir. $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranları 1.0, 1.5 ve 2.0 M olacak şekilde alkali aktivatörlerin silis modülleri ayarlanmıştır. Daha sonra bu aktivatörlerin Na_2O içerikleri %5–15 arasındaki basınç dayanımları incelenmiştir. Bütün numularda su kütlesi/CFA (C sınıfı uçucu kül) oranı 0.4 kabul edilmiştir. Ayrıca, karışımlarda silis modulünü ayarlamak için bir miktar saf su da kullanılmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranları 1.5 ve Na_2O içeriği %10 olan numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca 23°C ve 75°C sıcaklıkta 7 ve 28 gün kür sürelerinde basınç dayanımı olarak bakılmıştır. En iyi sonuç olarak, 23°C ve 28 günde 63,4 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Vijai *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada Portland çimentonun çevreye verdiği zararlardan dolayı alternatif çimento olarak uçucu külle yapılan geopolimer çimento üretmişlerdir. Uçucu kül tabanlı geopolimer çimentoların farklı kürlerde basınç dayanımlarına bakılmıştır. Uçucu külle birlikte, ince ve kaba agrega aktivatör olarak sodyum silikat, sodyum hidroksit ve bir miktarda su katılarak geopolimer beton üretilmiştir. Bu numuneler ortam küründe ve sıcak kürde (60°C) bırakılmış, sonuç olarak sıcak kürdeki numunelerin ortam kürüne göre daha büyük basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. İlk 7 günde, yüksek sıcaklıktaki kürde 28.31 MPa dayanımı gösterirken, 28 günün sonunda 33.22 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır.

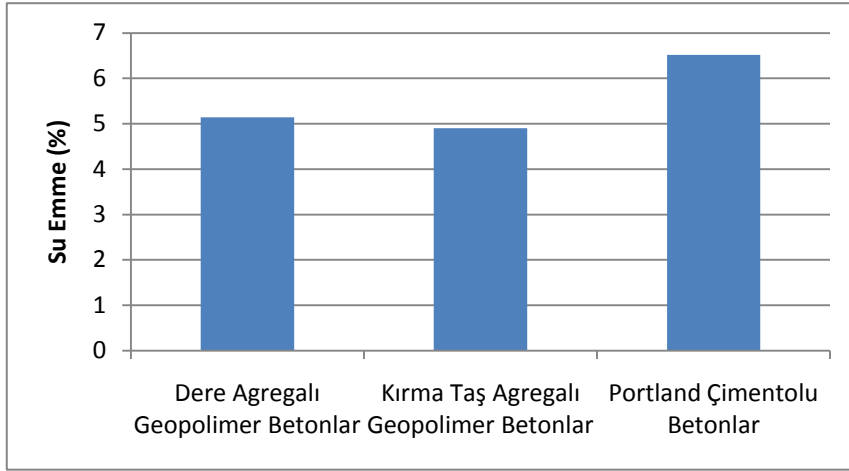
5.3.2. Beton numunelerin fiziksel özellikleri

5.3.2.1 Beton numunelerde su emme

Beton numunelerinin su emme oranları değerleri tespit edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 9'da verilerek Şekil 29'da gösterilmiştir.

Çizelge 9. Beton numunelerinin su emme değerleri

| Karışımlar | Dere Agregalı Geopolimer Betonlar | Kırma Agregalı Geopolimer Betonlar | Normal Portland Çimentolu Betonlar |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Su Emme, (%) | 5.14 | 4.90 | 6.52 |



Şekil 29. Beton numunelerinin su emme değerleri

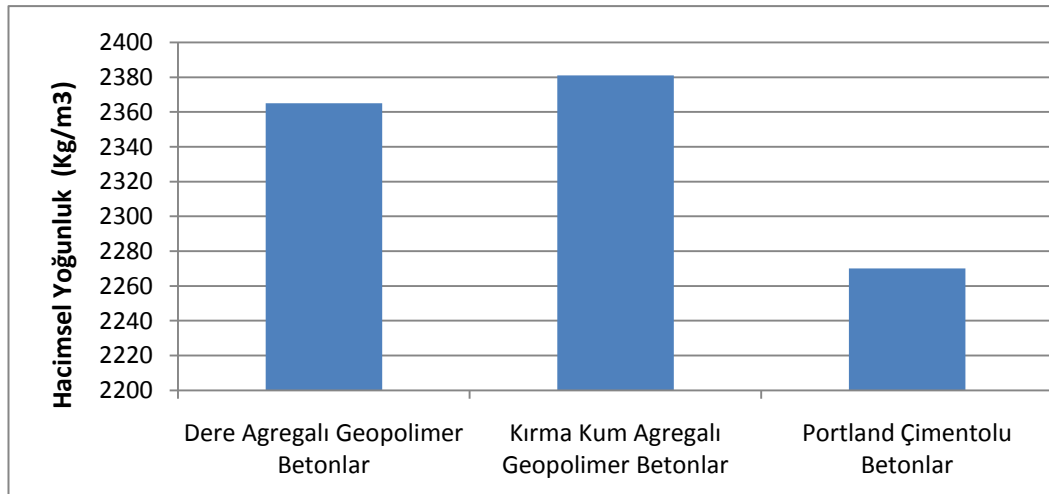
Beton numunelerinde en düşük su emme oranı değeri, kırma kum agregalı geopolimer betonlarda %4.90 olarak elde edilmiş olup, dere agregalı betonlarda ise, kırma kum agregalı geopolimer betonlara göre %0.24 oranında artış göstererek, %5.14 değerine ulaşmıştır. Maksimum su emme oranı ise %6.52 değeri ile normal Portland çimentolu beton numunelerde görülmüştür. Bakri *et al.*, (2011b) yaptıkları çalışmada geopolimerasyon sürecinde uçucu kül kullanarak geopolimer ürünlerinin üzerinde durmuşlardır. Uçucu külün ağırlığına göre %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında kaolin kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit and sodyum silikat kullanılmıştır. Numunelerin su emme miktarları incelenmiştir. Kaolinin yüzdesi artarken mukavemetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak kaolin yüzdesinin artmasıyla su emme oranında artma gözlenmiş ve su emme oranı %2.2 değerine ulaşmıştır. McNulty, (2009) tarafından 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.

5.3.2.2. Beton numunelerde hacimsel yoğunluk

Beton numunelerin hacimsel yoğunluk ve birim ağırlık değerleri Çizelge 10'da verilerek Şekil 30'da gösterilmiştir.

Çizelge 10. Beton numunelerin hacimsel yoğunluğu ve birim ağırlığı

| Karışımlar | Dere Agregalı Geopolimer Betonlar | Kırma Agregalı Geopolimer Betonlar | Normal Portland Çimentolu Betonlar |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Hacimsel Yoğunluk (kg/m ³) | 2365 | 2381 | 2270 |
| Teorik Birim Ağırlık (kg/m ³) | 2360 | 2369 | 2287 |
| Gerçek Birim Ağırlık (kg/m ³) | 2414 | 2441 | 2385 |



Şekil 30. Beton numunelerin hacimsel yoğunluk değerleri

Beton numunelerinde en düşük hacimsel yoğunluk değeri, normal Portland çimentolu betonlarda 2270 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Dere agregalı geopolimer beton numunelerde hacimsel yoğunluk değeri 2365 kg/m³ elde edilmişken, kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerde ise, 2381 kg/m³ değeri ile maksimum hacimsel yoğunluk elde edilmiştir. Benzer şekilde Arıöz vd. (2009) tarafından

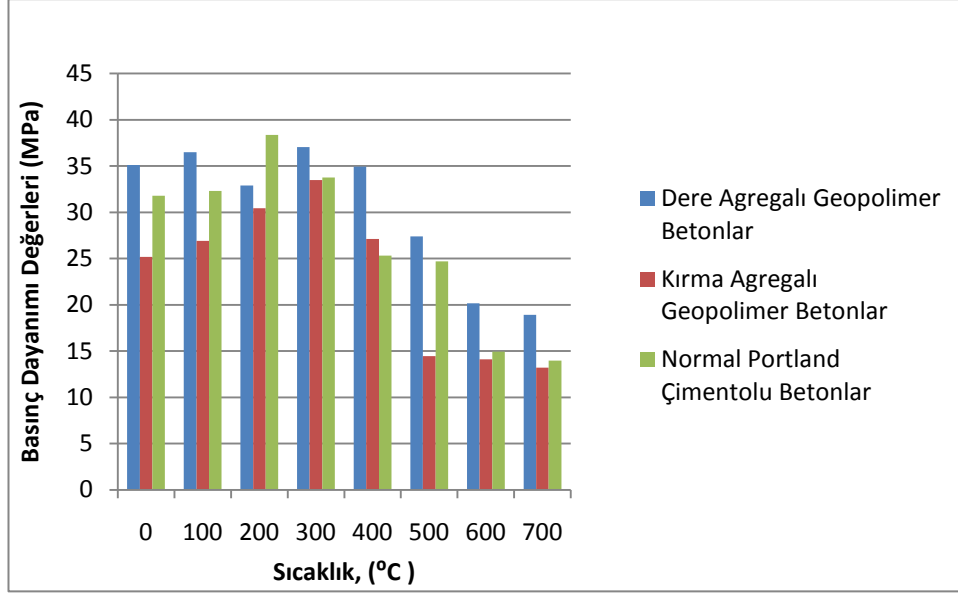
yapılan çalışmada geopolimerin bazı fiziksel özellikleri incelenmiştir. Avustralya’da üretilen geopolimer beton numunelerinin hacimsel yoğunluğunun 2350 kg/m^3 olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Portland çimentolu beton değerlerine yakın olduğu belirtilmiştir.

5.3.3. Beton numunelerin yangın sonrası basınç dayanımı

Geopolimer ve normal Portland çimentolu beton numunelerin yangın sonrası basınç dayanım değerleri Çizelge 11’de verilerek Şekil 31’de gösterilmiştir.

Çizelge 11. Beton numunelerde yangın sonrası basınç dayanımı değerleri

| Sıcaklık (°C) | Dere Agregalı Geopolimer Betonlar (MPa) | Kırma Agregalı Geopolimer Betonlar (MPa) | Normal Portland Çimentolu Betonlar (MPa) |
|---------------|---|--|--|
| 0 | 35.10 | 25.18 | 31.80 |
| 100 | 36.48 | 26.91 | 32.32 |
| 200 | 32.88 | 30.45 | 38.36 |
| 300 | 37.06 | 33.48 | 33.76 |
| 400 | 34.94 | 27.1 | 25.32 |
| 500 | 27.40 | 14.46 | 24.70 |
| 600 | 20.15 | 14.12 | 14.92 |
| 700 | 18.92 | 13.21 | 13.97 |



Şekil 31. Betonl numunelerde yangın sonrası basınç dayanımı değerleri

Kontrol numunelerine göre dere agregalı geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı değerinde 300°C'de %6 artış gösterdiği görülmüştür. Buna karşın, 700°C'de ise %46 oranında azalma görülmüştür. Kıрма kum agregalı geopolimer betonlarda ise, 300°C'de kontrol numunelerine göre %33 oranında artışla kıрма kum agregalı geopolimer betonlar için maksimum basınç dayanımı, 700°C'de %47 azalma ile minimum basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Ayrıca normal Portland çimentolu betonlarda kontrol numunelerine göre maksimum basınç dayanımı %21 oranında artışla 200°C'de görülmüş, minimum basınç dayanımı ise %57 azalma ile 700°C'de görülmüştür. Bütün karışımlarda kontrol numunelerine göre, 100 ve 300°C sıcaklıklarda basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak 300°C'ye kadar olan sıcaklıkların hem normal betonlarda hemde geopolimer betonlarda kür etkisi yaparak hidrasyon reaksiyonunu hızlandırdığı, mukavemeti arttırdığı söylenebilir. Benzer şekilde Sarker ve Meillon, (2007) yaptıkları çalışmada 800°C sıcaklığa maruz kalan uçucu kül tabanlı geopolimer betonun dayanımını incelemişlerdir. Her iki numunede 60°C'de kür edilmiş, numunelerin 175°C'ye kadar mukavemetinin arttığı, daha yüksek sıcaklıklarda ise, sıcaklıkla mukavemetin azaldığını belirlemişlerdir. 800°C'de her iki betonun mukavemetlerinin azaldığını, fakat geopolimer çimentoların dayanımlarının, Portland çimentolarının dayanımlarına göre daha yüksek sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Topçu ve Toprak (2009) geopolimerlerin 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklık etkilerine dirençli

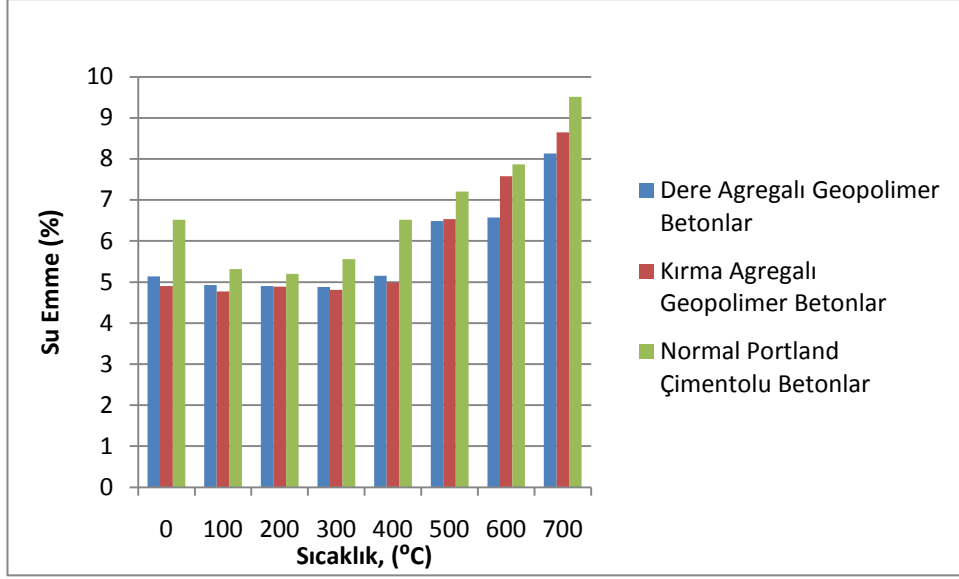
olduklarını ifade etmişlerdir. McNulty (2009) yaptığı çalışmada, iki tip Normal Portland çimentosunun yangın dayanımı ile iki çeşit geopolimer çimentosunun yangın dayanımını karşılaştırmış ve geopolimer çimentonun daha yüksek yangın dayanımı sağladığını tespit etmiştir. Li *et al.*, (2004) yaptıkları çalışmada, geopolimerler 1200°C'ye kadar önemli bir zarar görmeden yüksek sıcaklıklara dayanabildiği ve düşük ısı iletkenliği gösterdiğini belirtmiştir. Xu *et al.*, (2010) yaptıkları çalışmada geopolimerlerinin organik ve Portland çimentolar yerine, ısı kararlılığı, yangın dayanımı ve basınç dayanımı olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

5.3.4. Beton numunelerin yangın sonrası su emme değerleri

Geopolimer ve normal Portland çimentolu beton numunelerin yangın sonrası su emme oranı değerleri Çizelge 12'de verilmiş olup Şekil 32'de gösterilmiştir.

Çizelge 12. Beton numunelerin yangın sonrası su emme değerleri

| Sıcaklık (°C) | Dere Agregalı Geopolimer Betonlar (%) | Kırma Agregalı Geopolimer Betonlar (%) | Normal Portland Çimentolu Betonlar (%) |
|---------------|---------------------------------------|--|--|
| 0 | 5.14 | 4.90 | 6.52 |
| 100 | 4.93 | 4.77 | 5.32 |
| 200 | 4.90 | 4.89 | 5.20 |
| 300 | 4.88 | 4.81 | 5.56 |
| 400 | 5.15 | 4.99 | 6.52 |
| 500 | 6.49 | 6.53 | 7.20 |
| 600 | 6.57 | 7.58 | 7.87 |
| 700 | 8.13 | 8.65 | 9.51 |



Şekil 32. Betonlarda farklı yangın sıcaklıklarında su emme değerleri

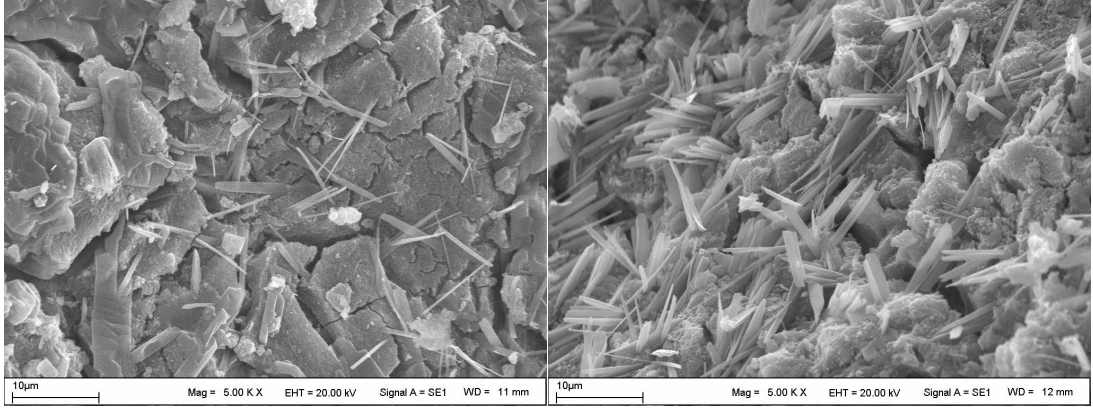
Kontrol numunelerinin su emme oranı değerleri referans kabul edildiğinde, 700°C sıcaklık için bütün karışımların su emme oranları artmıştır. Ancak 300°C sıcaklığa kadar su emme değerlerinde kontrol numunelerine göre bir miktar azalma olduğu belirlenmiştir. Bu durum basınç dayanımları değişimlerine de paralellik göstermektedir.

5.3.5. Mikroyapı analizi

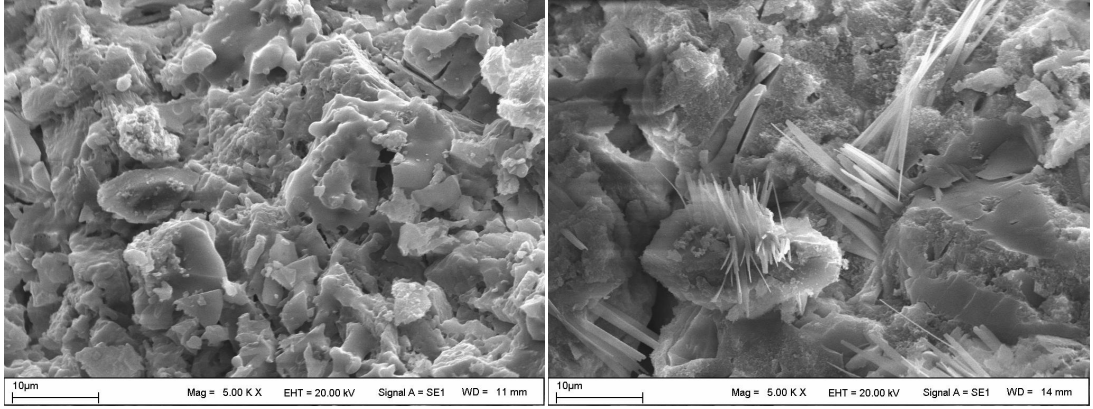
Üretilen beton numunelerin mikroyapı analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

5.3.5.1. SEM

Geopolimer ve normal Portland çimentolu betonlara ait SEM görüntüleri Şekil 33-35'de verilmiştir.

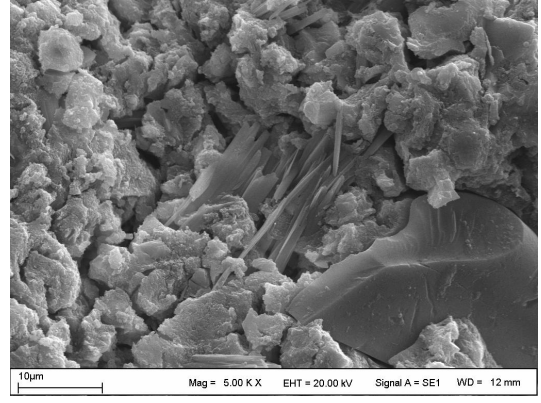
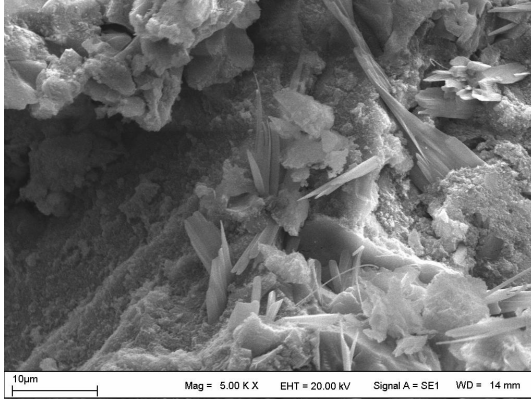


a) Lab. Ortamında Bekletilmiş numuneler b) 100°C'deki yangın sonrası numuneler



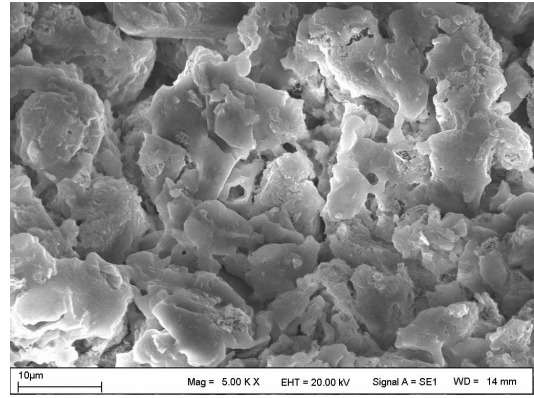
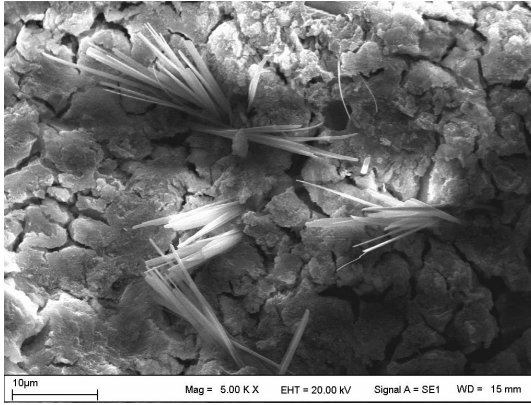
c) 500°C'deki yangın sonrası numuneler d) 700°C'deki yangın sonrası numuneler

Şekil 33. Sıcaklığın dere agregalı geopolimer beton numunelerde mikroyapı özelliklerine etkisi



a) Lab. Ortamında Bekletilmiş numuneler

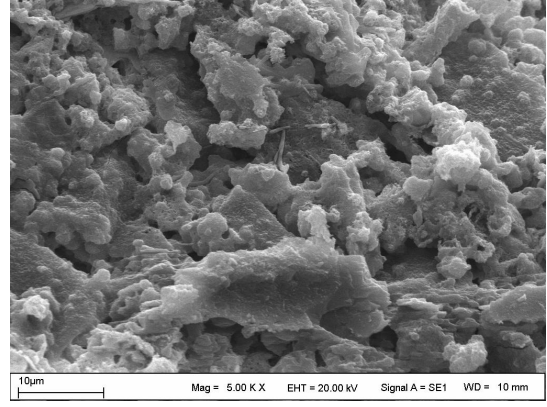
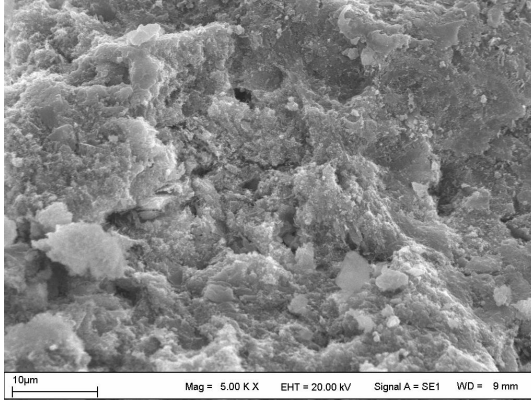
b) 100°C'deki yangın sonrası numuneler



c) 500°C'deki yangın sonrası numuneler

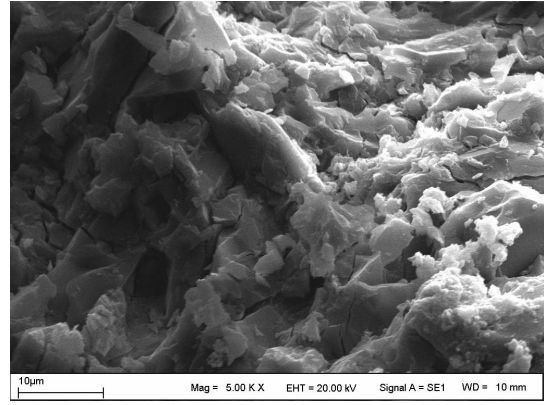
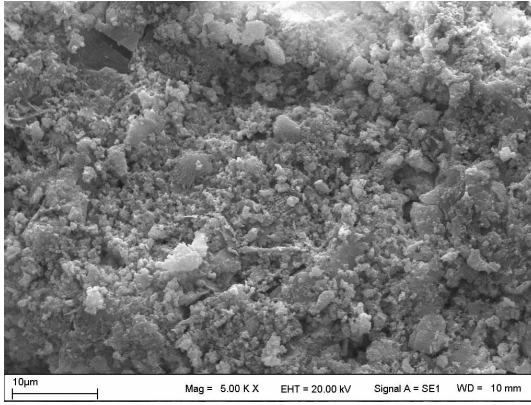
d) 700°C'deki yangın sonrası numuneler

Şekil 34. Sıcaklığın kırma agregalı geopolimer beton numunelerde mikroyapı özelliklerine etkisi



a) Lab. Ortamında Bekletilmiş numuneler

b) 100°C'deki yangın sonrası numuneler



c) 500°C'deki yangın sonrası numuneler

d) 700°C'deki yangın sonrası numuneler

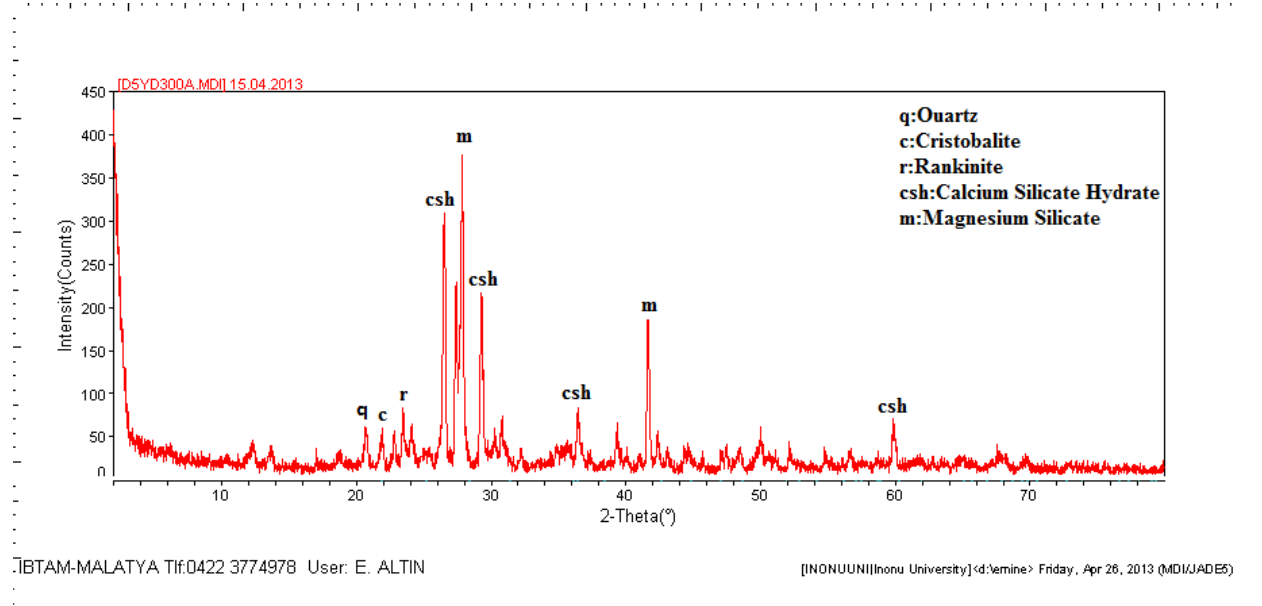
Şekil 35. Sıcaklığın normal Portland çimentolu beton numunelerde mikroyapı özelliklerine etkisi

Geopolimer beton numunelerinin mikro yapıları incelendiğinde etrenjit ve CSH jeli yapılarının olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık derecesi arttıkça bu yapılarda mikro çatlaklar oluşmuştur. Bu mikro çatlakların beton numunelerindeki basınç dayanımı değerlerinde gözlenen azalmada esas sebep olduğu düşünülmektedir. Thakur ve Ghosh, (2009) yaptıkları çalışmada, Hindistan'da Kolkata yakınlarında, Kolaghat enerji santralinden elde edilen F sınıfı uçucu kül kullanmışlardır. Geopolimer numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir. Geopolimer karışımlarda alkali içeriği arttıkça geopolimer matrisinde reaksiyona girmemiş alümino silikat jel oluşumunda yer alan uçucu kül partiküllerinin şekil ve sayılarında azalma gözlenmiştir.

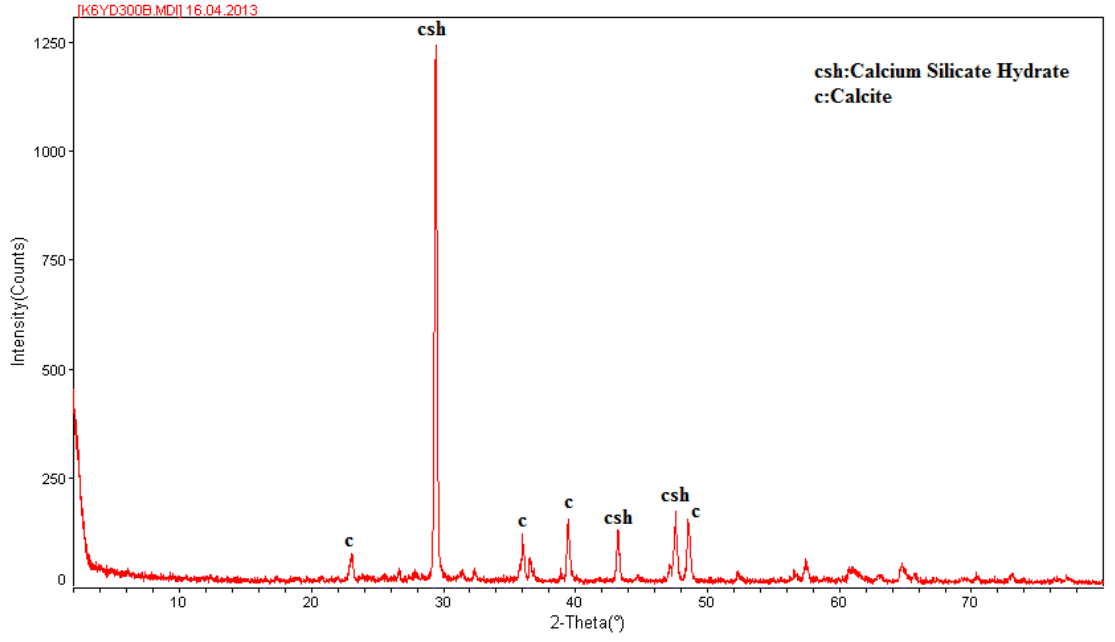
C-S-H jelleri, zayıf kristalli (amorfa yakın) kolloidal parçacıklardan oluşmaktadır. C-S-H kristalleri tipik olarak $1 \times 0.1 \times 0.01$ μm 'den daha küçüktür. Lif (fiber) şekilli bu kristallerin dağılımında bir düzen yoktur. Hidratasyon olayı devam ettikçe, C-S-H jetlerinin üretimi de devam etmekte ve çimento hamurunun dayanımı artmaktadır. Elektron mikroskopla incelendiğinde, C-S-H jelleri, üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedir. Etenjit ise hegzagonal kesitli ve çubuk şekilli (tipik boyutu $1 \times 1 \times 0.1$ μm olan) kristaller olup oldukça kararlıdır (Erdoğan, 2003).

5.3.5.2. XRD

Numunelerden alınan parçalar üzerinde XRD deneyleri yapılmıştır. Numuneler öncelikle havanda öğütölmek suretiyle mikron boyutuna kadar inceltölmüştür ve faz analizleri yapılmıştır. Geoplimer ve normal nortland çimentolu betonlara ait XRD difraktogramları Şekil 36-38'de verilmiştir.



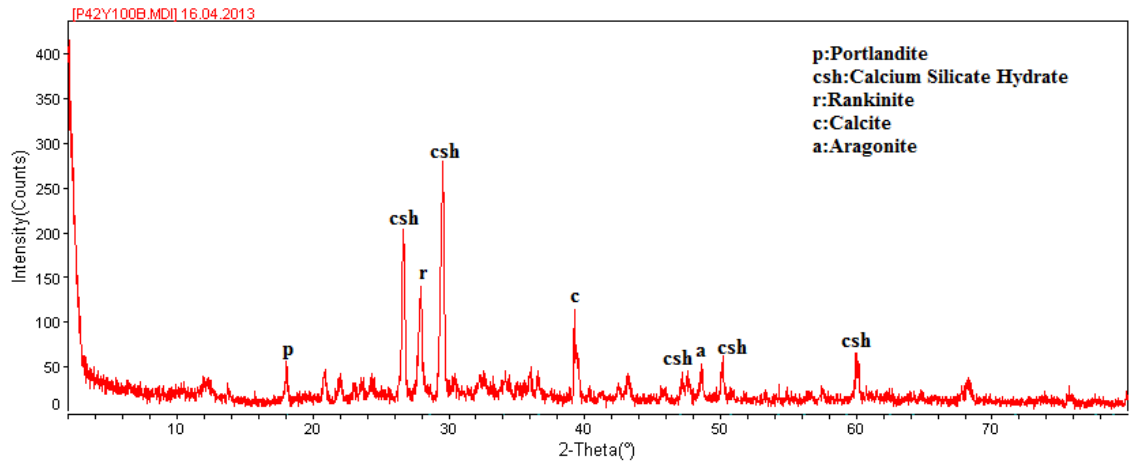
Şekil 36. Dere agregalı geopolimer beton numunelerin XRD difraktogramları



İBTAM-MALATYA Tif:0422 3774978 User: E. ALTIN

[INONUUNII]Inonu University<d:\emine> Friday, Apr 26, 2013 (MDI\JADE5)

Şekil 37. Kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerin XRD difraktogramları



İBTAM-MALATYA Tif:0422 3774978 User: E. ALTIN

[INONUUNII]Inonu University<d:\emine> Friday, Apr 26, 2013 (MDI\JADE5)

Şekil 38. Normal Portland çimentolu beton numunelerin XRD difraktogramları

Yapılan deneyler neticesinde dere agregalı geopolimer betonlarda, Quartz, Cristobalite, Rankinite, Calcium Silicate Hydrate ve Magnesium Silikat fazları, kırma kum agregalı geopolimer betonlarda ise Calcium Silicate Hydrate ve Calcite fazları, normal Portland çimentolu betonlarda ise Portlandite, Calcium Silicate Hydrate, Calcite, Rankinite, Calcite ve Aragonite fazları görülmüştür. Benzer şekilde Thakur ve Ghosh, (2009) yaptıkları çalışmada, Hindistan'da Kolkata yakınlarında, Kolaghat enerji santralinden elde edilen F sınıfı uçucu kül kullanmışlardır. Alkali aktivatör olarak, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Geopolimer numunelerin XRD difraktogramları incelenmiş ve numunelerde kuvars, mulit, magnetit, hidrosadalit, herselit fazlarını tespit etmişlerdir. Nath ve Kumar (2013) yaptıkları çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş Corex (Uluslararası çelik üretim firması Voestalpine'nin patentli ürünü) cürufunu uçucu kül esaslı geopolimerlere % 0-50 aralığında değişen oranlarda eklemiştir. Cüruf eklemenin geopolimerizasyon reaksiyonlarına etkisi incelenmiştir. Öğütülmüş Corex cürufu ve uçucu kül ile üretilmiş geopolimer numunelerde; Mülit, Kuvars, CSH ve Xonotit fazları, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile üretilmiş numunelerde ise Mülite, Kuvars, CSH ve Gelinit fazları gözlenmiştir.

C-S-H jelleri, zayıf kristalli (amorfa yakın) kolloidal parçacıklardan oluşmaktadır. Hidratasyon olayı devam ettikçe, C-S-H jetlerinin üretimi de devam etmekte ve çimento hamurunun dayanımı artmaktadır. Elektron mikroskopla incelendiğinde, C-S-H jelleri, üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedir (Erdoğan, 2003).

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle agrega numunelerinin kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık değerleri tespit edilmiştir. Hamur numunelerinde hidrasyon ısıları tespit edilmiştir. Beton numunelerinde ise basınç dayanımı (3, 7 ve 28 günlük), su emme, hacimsel yoğunluk, yangın sonrası (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700 °C) basınç dayanımı ve su emme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca beton numunelerin mikroyapı (SEM, XRD) özellikleri de incelenmiştir. Üretilen numuneler üzerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. 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 görülmüştür.
2. Beton numunelerinde en düşük su emme oranı değerleri, kırma kum agregalı geopolimer betonlarda elde edilmiş olup, dere agregalı betonlarda ise, kırma kum agregalı geopolimer betonlara göre bir miktar artış göstermiştir. Maksimum su emme oranı ise normal Portland çimentolu betonlarda görülmüştür.
3. En düşük hacimsel yoğunluk değeri, normal Portland çimentolu betonlarda elde edilmiştir.
4. Kontrol numunelerine göre, bütün karışımlarda 100 ve 300°C sıcaklıklarda basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Bütün karışımlarda 700°C'de minimum basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Geopolimer beton numunelerin normal beton numunelere göre yangına dayanımlarının daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
5. Yangın sonrasında elde edilen basınç dayanımı değerleri 13.21-38.36 MPa değerleri arasında değişmektedir..
6. Yangın sonrası su emme oranları ise genel olarak basınç mukavemeti ile ters orantılı olduğu söylenebilir

7. Geopolimer hamur numunelerinin hidrasyon ısıları normal Portland çimentolu numunelere göre oldukça düşüktür.

Geopolimer betonların yapı teknolojisinde kullanılması yeni bir fikir olmasının yanında, geride kalan on yıl içinde uygulamalarıyla eşsiz faydalar sağlamışlardır. Geopolimerler birçok çimento uygulaması için uygun olan amorf malzemelerdir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özellikler bakımından normal Portland çimentolu betonlardan daha yüksek değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Bu yeni malzemelere uygulanan yeni yöntem eksiklikleri, bu malzemeler için ilave araştırmalar ve deneylerin gerekli olduğunu göstermektedir.

7. KAYNAKLAR

- Aaron R.S., Anderson E., Schauer C., Barsoum M.W., (2009), Mechanical and Microstructural Characterization of An Alkali-Activated Slag/Limestone Fine Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 2951–2957.
- Ahmari S., Zhang L., (2012), Production of Eco-Friendly Bricks From Copper Mine Tailings Through Geopolymerization, *Construction and Building Materials*, 29, 323-331.
- Akman S., (2003), Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426,48.
- Allahverdi A., Mehrpour K., Kani E.N., (2008), Taftan Pozzolan-Based Geopolymer Cement, *IUST International Journal of Engineering Science*, 19, 1-5,
- Anuar K.A, Ridzuan A.R.M., Ismail S., (2011), Strength Characteristic of Geopolymer Concrete Containing Recycled Concrete Agregate, *International Journal of Civil Environmental Engineering*, Vol: 11, No: 01,81-85.
- Arıöz Ö., Tuncan M., Tuncan A., Kavas T., (2009), Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi (Tübitak Projesi), Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Eskişehir.
- ASTM C39/C39M, (1999), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *American Society for Testing and Materials Information Handling Services*.
- Bakri A.M.M.A., Mohammed H., Kamarudin H., Niza K., Zarina Y., (2011a), Review On Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Without Portland Cement, *Journal of Engineering and Technology Research* ,Vol:3(1), 1-4.
- Bakri A.M.M.A., Kamarudin H., Mohamed H., Ruzaidi C.M., Rafiza A.R., Faheem M.T.M., Izzat A.M., (2011b), Properties and Microstructural Characteristics of Geopolymers Using Fly Ash With Different Percentages of Kaolin At Room Temperature Curing, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, ISSN 1991-8178, 824-828.
- Barsoum M.W., Ganguly A., Hug G., (2006), Microstructural Evidence of Reconstituted Lime Stone Blocks in the Great Pyramids of Egypt, *J. American Ceramic Society*, 89 (12), 3788-3796.
- Bernal S., Gutierrez R.D., Delvasto S., (2010), Performance of an Alkali-Activated Slag Concrete Reinforced with Steel Fibers, *Construction and Building Materials*, 24, 208-214.
- Binici H., Çağatay İ.H., Kaplan H., (2006), Çimentonun Hidratasyon Isısının Ölçümünde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 207-216.
- Bondar D., Lynsdale C.J., Milestone N. B., Hassani N., Ramezaniyanpour A.A., (2011), Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, 33, 251-260.

- Bougara A., Lynsdale C., Ezziane K., (2009), Activation of Algerian Slag in Mortars, *Construction and Building Materials*, 23, 542–547.
- Brough A.R., Atkinson A., (2002), Sodium Silicate-Based Alkali-Activated Slag Mortars: Part I. Strength, Hydration and Microstructure, *Cement and Concrete Research*, 32, 865–879.
- Buchwald A., Vicent M., Kriege R., Kaps C., Monzó M., Barba A., (2009a), Geopolymeric Binders with Different Fine Fillers , Phase Transformations at High Temperatures, *Applied Clay Science*, 46, 190-195.
- Buchwald A., Hohmann M., Posern K., Brendler E., (2009b), The Suitability of Thermally Activated Illite/Smectite Clay As Raw Material for Geopolymer Binders, *Applied Clay Science*, 46, 300–304.
- Cheng T.W., Chiu J.P., (2003), Fire-Resistant Geopolymer Produced by Granulated Blast Furnace Slag, *Minerals Engineering*, 16, 205–210.
- Chindaprasirt P., Rattanasak U., (2010), Utilization of Blended Fluidized Bed Combustion (FBC) Ash and Pulverized Coal Combustion (PCC) Fly Ash in Geopolymer, *Waste Management*, 30 , 667–672.
- Chindaprasirt P., Rattanasak U., Jaturapitakkul C., (2011), Utilization of Fly Ash Blends From Pulverized Coal and Fluidized Bed Combustions in Geopolymeric Materials, *Cement and Composites*, 33, 55-60.
- Collins F.G., Sanjayan J.G., (1999), Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 455–458.
- Comrie D.C., Paterson J.H., Ritcey D.J., (1988), Applications of Geopolymer Technology To Waste Stabilization, in *Proceedings Geopolymer'88* (Eds: J Davidovits and J Orlinski), Compiegne, France, 107-124.
- Davidovits J., (1994), 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.
- Davidovits J., (1999), Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology, *Geopolymer'99 International Conference*, France, pp: 9-40.
- Davidovits J., (2008), *Geopolymer Chemistry and applications*, Saint Quantin, France.
- Diaz E.I., Loya P.D., Candidate Erez N. Allouche Ph.D., P.E., (2010), Engineering Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *International Concrete Sustainability Conference*, Dubai, UAE.
- Diop M.B., Grutzeck M.W., Molez L., (2011), Comparing the Performances of Bricks Made with Natural Clay and Clay Activated By Calcination and Addition of Sodium Silicate, *Applied Clay Science*, 54,172-178.
- Erdoğan, T.Y., (2003), Beton, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayını, 741, Ankara

- Erdoğan T., Erdoğan Y., (2007), Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyum ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, pp:23-34.
- Fernandez A., Palomo J., (2005), Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder Effect of The Activator, *Cement and Concrete Research*, 35, 1984–1992.
- Glukhovskiy V.D., (1981), Slag-Alkali Concretes Produced From Fine-Grained Aggregate, *Kiev: Vishcha Shkolay*.
- Guo X., Shi H., Dick W.A., (2010), Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer, *Cement Concrete Composites*, 32, 142–147.
- Hanzlicek T., Steinerová M., Straka P., Perná I., Siegl P., Švarcová T., (2009), Reinforcement of the Terracotta Sculpture by Geopolymer Composite, *Materials and Design*, 30, 3229-3234.
- Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J., Rangan B.V., (2005), Introducing Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Manufacture and Engineering Properties, *30th Conference on Our World In Concrete Structures*, Singapore, pp: 271-278.
- Jones P. T., Pontikes Y., Elsen J., Cizer Ö., Boehme L., Gerven T.V., Geysen D., Guo M., Blanpain B., (2011), 2nd International Slag Valorisation Symposium, Leuven, pp:1-17.
- Jueshi Q., Caijun S., Zhi W., (2001), Activation of Blended Cements Containing Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, 31, 1121–1127.
- Komnitsas K.A., (2011), Potential of Geopolymer Technology Towards Green Buildings and Sustainable Cities, *Procedia Engineering*, 21, 1023–1032.
- Komnitsas K., Zaharaki D., Perdikatsis V., (2009), Effect of Synthesis Parameters on The Compressive Strength of Low-Calcium Ferronickel Slag Inorganic Polymers, *Journal of Hazardous Materials*, 161, 760-768.
- Kong D.L.Y., Sanjayan J.G., (2010), Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete, *Cement and Concrete Research*, 40, 334-339.
- Kumar R., Kumar S., Mehrotra S.P., (2007), Towards Sustainable Solutions for Fly Ash Through Mechanical Activation Resources, *Conservation and Recycling*, 52, 157–179.
- Lee S., Seo M.D., Kim Y.J., Park H.H., Kim T.N., Hwang Y., Cho S., (2010), Unburned Carbon Removal Effect on Compressive Strength Development in a Honeycomb Briquette Ash-Based Geopolymer, *International Journal of Mineral Processing*, 97, 20–25.
- Li W., Xu J., (2009), Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Geopolymeric, *Materials Science and Engineering*, 505, 178-186.

- Li Z., Ding Z., Zhang Y., (2004), Development of Sustainable Cementitious Materials, *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, 55-76.
- 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., Vorobiev Y., (2009), Synthesis and Characterization of a Concrete Based on Metakaolin Geopolymer, *Inorganic Materials*, Vol. 45, No. 12, 1429–1432.
- Mackenzie K.J.D., O'Leary B., (2009), Inorganic Polymers (Geopolymers) Containing Acid–Base Indicators As Poss Colour-Change Humidity Indicators, *Materials Letters*, 63, 230–232.
- Malinowski R., (1979), Concrete and Mortar in Ancient Aqueducts, *Concrete International* 1, 66-67.
- Malinowski R., Garfinkel Y., (1991), “Prehistory of Concrete”, *ACI Concrete International*, March, 62-68.
- Maragkos I., Giannopoulou I. P., Pnias D., (2009), Synthesis of Ferronickel Slag-Based Geopolymers, *Minerals Engineering*, 22 ,196–203.
- McLellan B.C., Williams R.P., Lay J., Riessen A.V., Corder G. D., (2011), Costs And Carbon Emissions For Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement, *Journal of Cleaner Production*, 19, 1080-1090.
- McNulty E., (2009), Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement, Department of Chemistry, *The Catholic University of America*.
- Nath S.K., Kumar S., (2013), Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*, 38, 924-930.
- Nazari A., Bagheri A., Riahi S., (2011), Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash, *Material Science and Engineering*, 528, 7395-7401.
- Nugteren H.W., Butselaar O.V.C.L., Izquierdo M., (2009), High strength geopolymers produced from coal combustion fly ash, *Global NEST Journal*, 2, 155-161.
- Olivia M., Nikraz H., (2012), Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, *Materials and Design*, 36 ,191-198.
- Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T., (1999), Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Panagiotopoulou C.H., Kontori E., Perraki T.H., Kakali G., (2007), Dissolution of aluminosilicate minerals and by products in alkaline media, *Journal of materials science*, 42, 2967-2973.
- Qiao X.C., Cheeseman C.R., Poon C.S., (2009), Influences of Chemical Activators on Incinerator Bottom Ash, *Waste Management*, 29, 544-549.

- Rangan B. V., Hardjito D., Wallah S. E., Sumajouw D.M.J., (1987), Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Faculty of Engineering and Computing*, Curtin University of Technology.
- Rattanasak U., Pankhet K., Chindaprasirt P., (2011), Effect of Chemical Admixtures on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume:18, 364.
- Ravikumar D., Peethamparan S., Neithalath N., (2010), Structure and Strength of NaOH Activated Concretes Containing Fly Ash or GGBFS As The Sole Binder, *Cement Concrete Composites*, 32 ,399–410.
- Reddy B., Siva K., Reddy K., Naveen K., Varaprasad J., (2011), Influence of Curing Condition on Compressive Strength of Cement Added Low Lime Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *Journal of Engineering Research and Studies*, 103-109.
- Rovnanik P., (2010), Effect of Curing Temperature on The Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer, *Construction and Building Materials*, 24, 1176–1183,
- Roy D.M., (1999), Alkali-activated cements Opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, Volume 29, 2, 249-254.
- Russell M., Basheer P.A.M., Rao J.R., (2005), Potential use of spent mushroom compost ash as an activator for pulverised fuel ash, *Construction and Building Materials*, 19, 698–702.
- Sağlık A.Ü., (2009), Alkali-Silica Reactivity And Activation of Ground Perlite-Containing Cementitious Mixtures, PhD thesis, *Middle East Technical University, Ankara*.
- Sakulich A. R., Anderson E., Schauer C., Barsoum M.W., (2009), Mechanical and Microstructural Characterization of An Alkali-Activated Slag/Limestone Fine Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 2951–295.
- Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Pimraksa K., (2009), Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 44–50.
- Shi C., Day R.L., (2001), Comparison of Different Methods for Enhancing Reactivity of Puzolans, *Cement and Concrete Research*, 31, 813-818.
- Skvára F., Losar J., Bohunek J., Marková A., (2003), Alkali-Activated Fly Ash Geopolymeric Materials, *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*, Durban, South Africa.
- Song X. J., Marosszeky M., Brungs M., Munn R., (2005), Durability of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Against Sulphuric Acid Attack, *10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components*, LYON , France.
- Swanepoel J.C., Strydom C.A., (2002), Utilisation of Fly Ash in A Geopolymeric Material, *Applied Geochemistry*, 17(8), 1143-48.

- Taşdemir A., (2006), Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Kristal Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Temuujin J., Riessen A.V., Williams R., (2009), Influence of Calcium Compounds on The Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes, *Journal of Hazardous Materials*, 167, 82–88.
- Temuujin J., Riessen V.A., MacKenzie K.J.D., (2010), Preparation and Characterisation of Fly Ash Based Geopolymer Mortars, *Construction and Building Materials*, 24 ,1906-1910.
- Thakur R.N. and Ghosh S., (2009), 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.
- Thokchom S., Ghosh P. , Ghosh S., (2009), Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid, *International Journal of Natural Sciences and Engineering*, 77-82.
- Topçu İ.B., Toprak M.U., (2009), Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, Vol: XXII, No:2, 153-164.
- Torgal F. P., Gomes J. G., Jalali S., (2008), Alkali-Activated Binders: A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products, *Construction and Building Materials*, 22, 1305–1314.
- Torgal F., Moura D., Ding Y., Jalali S., (2011), Composition, Strength and Workability of Alkali-Activated Metakaolin Based Mortars, *Construction and Building Materials*, 25, 3732-3745.
- TS 1114, (1986), Hafif agregalar-beton için, *TSE, Ankara*.
- TS 1226 ISO 3310-2, (1996), Deney elekleri - teknik özellikler ve deneyler - Kısım 2: Delikli metal levhalı deney elekleri, *TSE, Ankara*.
- TS 1227 ISO 3310-1, (1996), Deney elekleri - teknik özellikler ve deneyler-Kısım 1: Tel örgülü deney elekleri, *TSE, Ankara*.
- TS 3526, (1980), Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini, *TSE, Ankara*.
- TS 3527, (1980), Beton agregalarında ince madde oranı tayini, *TSE, Ankara*.
- TS 3530 EN 933-1, (1999), Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: tane büyüklüğü dağılımı tayini- eleme metodu, *TSE, Ankara*.
- TS 706 EN 12620, (2003), Beton agregaları, *TSE, Ankara*.
- TS 802, (1985), Beton karışımı hesap esasları, *TSE, Ankara*.
- TS EN 12390-1, (2002), Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, *TSE, Ankara*.

- TS EN 12390-7, (2010), Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, *TSE, Ankara*.
- TS EN 1744-1, (2000), Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler- bölüm 1: kimyasal analiz, *TSE, Ankara*.
- Van Jaarsveld J.G.S., Van Deventer J.S., Lorenzon L., (1997), Factors Effecting the Immobilisation of Metals in Geopolymerised Fly Ash, Part 1 Theory and Applications, *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669.
- Van Jaarsveld J.G.S., Van Deventer J.S.J., Lukey G.C., (2002), The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite-based Geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73.
- Vargas A. S.D., Molin D.C.C.D., Vilela A. C.F., Silva F. J., Pavão B, Veit H., (2011), 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.
- Vijai K., Kumutha R., Vishnuram B.G., (2010), Effect of Types of Curing on Strength of Geopolymer Concrete, *International Journal of the Physical Sciences*, Vol: 5(9), 1419-1423.
- Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gómez L., Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation of Natural Zeolite, *Construction and Building Materials*, 24 ,2084–2090, (2010).
- Villarreal M.S., Ramírez A. M., Bulbarela S., Tirado J. R. G., Araiza J.L.R., Ávalos 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).
- Vizcayno C., Gutiérrez R.M., Castello R., Rodriguez E., Guerrero C.E., (2010), Pozzolan Obtained by Mechanochemical and Thermal Treatments of Kaolin, *Applied Clay Science*, 49, 405-413.
- Wang J. W. and Cheng T.W., (2003), Production Geopolymer Materials by Coal Fly Ash, *Proceedings of the 7th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, Taiwan, pp:263-266.
- Wogh, A.S., (2011), Phosphote Geopolymers, *Developments in Strategic materials and computational desingn II*, Vol. 32, Naperville, 91-103.
- Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., (2010), Chindapasirt P., Compressive Strength, Modulus of Elasticity, and Water Permeability of Inorganic Polymer Concrete, *Materials and Design*, 31, 4748–4754.
- Xu H., Van Deventer J.S.J., (2000), The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals, *Int. J. Miner. Process*, 59, 247–266.
- Xu H., Van Deventer J.S.J., (2002), Geopolymerisation of Multiple Minerals, *Minerals Engineering*, 15(12), 1131-39.

- Xu H., Li Q., Shen L., Wang W., Zhai J., (2010), Synthesis of Thermostable Geopolymer From Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Bottom Ashes, *Journal of Hazardous Materials*, 175, 198–204.
- Yao X., Zhang Z., Zhu H., Chen Y., (2009), Geopolymerization Process of Alkali–Metakaolinite Characterized By Isothermal Calorimetry, *Thermochimica Acta*, 493, 49-54.
- Yazıcı A., Kaya M., (2003), Ferrokrom Curufunun Karakterizasyonu, *F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(4), 539-548.
- Yılmaz, A., Süttaş İ., (2008), Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, *İMO Teknik Dergi*, 294, 4455-4470.
- Yunsheng Z., Wei S., Zongjin L., (2010), Composition Design and Microstructural Characterization of Calcined Kaolin-Based Geopolymer Cement, *Applied Clay Science*, 47, 271–275.
- Zeybek O., (2009), Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir.
- Zuda L., Cerny R., (2009), Measurement of Linear Thermal Expansion Coefficient of Alkali-Activated Aluminosilicate Composites up to 1000°C, *Cement & Concrete Composites*, 31, 263–267.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Fatih KANTARCI

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya, 29.05.1988

Adres: İnönü Üniversitesi, Merkez Kampüsü, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

E-Posta: fatih.kantarci@inonu.edu.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniveristesi

Mesleki Deneyim ve Ödüller: İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi (2011, devam ediyor)