

Kalsine edilmiş zeolit esaslı geopolimerlerin basınç dayanımına mineral katkı olarak cürufun etkisi

The effect of slag as mineral admixture on the compressive strength of calcined zeolite-based geopolymer

Sevgi ÖZEN* 

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Rize

• Geliş tarihi / Received: 15.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2022

Öz

Geopolimerler, yeşil bağlayıcı malzeme olarak adlandırılan ve başlangıç hammaddeleri olarak doğal veya atık malzemeleri içeren yapı malzemeleridir. İnşaat sektöründeki potansiyel uygulamaları bilimsel olarak oldukça araştırılmış olmasına rağmen, doğal malzeme esaslı geopolimerlerin yaygın kullanımları sınırlı kalmıştır. Bunun temel nedeni, doğal malzeme esaslı geopolimerlerin düşük erken basınç dayanım değerlerine sahip olmaları ve dolayısıyla oda koşullarında erken dönemde yeterli kürlenme sağlayamamalarıdır. Bu sorunu aşmak için öncelikle klinoptilolit içeren tuf 900°C’de kalsinasyon işlemine maruz bırakılmış, ardından mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu eklenmiştir. Elde edilen geopolimerlerin mukavemet gelişimi, basınç dayanım analizleri kullanılarak saptanmıştır. Mikro yapısal incelemeler, XRD ve SEM analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kalsinasyon işleminin erken dönemde mukavemeti artırdığı ve cüruf katkısıyla basınç dayanımının daha da iyileştiği belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre 900°C’de kalsine edilmiş yüksek fırın cürufu katkılı geopolimerin 28 günlük basınç dayanım değeri 46 MPa olarak saptanmıştır. XRD analizi sonucunda, malzemenin kalsinasyon başarısının amorf faz ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, SEM/EDX analizi ile geopolimer jelin en iyi cüruf katkılı geopolimerde geliştiği ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Cüruf, Geopolimer, Kalsinasyon, Klinoptilolit

Abstract

Geopolymers, referred to as green binder materials, are construction materials that incorporate natural or waste materials. Despite extensive scientific research on their potential applications in the construction sector, widespread utilization of natural material-based geopolymers has remained limited. The primary reason for this limitation is their low early compressive strength values, which consequently hinder achieving adequate curing under ambient conditions. To overcome this challenge, the tuff containing clinoptilolite was subjected to a calcination process at 900°C, followed by the addition of blast furnace slag as a mineral admixture. The strength development of the synthesized geopolymers was compared through compressive strength analyses. Microstructural examinations were conducted using XRD and SEM analyses. The analysis results demonstrated that the calcination process enhanced the early strength development, and the addition of slag further improved the compressive strength. As a result of XRD analysis it has been determined that the success of material calcination is associated with the amorphous phase. According to the analysis results, the compressive strength of the high blast furnace slag blended geopolymer, calcinated at 900°C, was determined as 46 MPa after 28 days. Moreover, the SEM/EDX analysis revealed that the geopolymer gel exhibited the best performance in the presence of slag additives.

Keywords: Slag, Geopolymer, Calcination, Clinoptilolite.

* Sevgi Özen, sevgi.ozen@erdogan.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Türkiye'nin de içinde yer aldığı Kyoto Protokolü gereği CO₂ ve sera etkisine neden olan gazların salınımının azaltılmasına yönelik çalışmalar inşaat sektörü üzerinde büyük bir baskı oluşturmaktadır. Bunun nedeni çimento ara maddesi olan klinker üretiminin CO₂ salınımını arttıran en önemli endüstriyel faaliyetlerden biri olmasıdır. Ayrıca çimento üretimi yüksek enerji gerektiren bir işlemdir. Gerek en önemli sera gazı olan CO₂ salınımının kontrol altına alınması, gerekse ekonomik nedenler dolayısıyla inşaat sektöründe çimento üretimi için yeni çözümler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda Portland çimentonun yerini alabilecek sentetik alumina silikat malzeme olan geopolimer çimento alternatif yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alkalilerle aktive edilmiş malzemeler yani geopolimerler geliştirilmiş, ileri teknoloji sentetik alumina silikat malzemelerdir. Geopolimer malzemenin kimyasal bileşimi doğal zeolitlere benzer ancak yapısı kristal yerine amorfur (Palomo vd., 1999; Xu & van Deventer 2000). İlk kez Gluchovskij tarafından "gruntosilikat" ya da "gruntoçimento-geoçimento" olarak adlandırılan bu yenilikçi ve alternatif malzeme, Davidovits tarafından "geopolimer" olarak tanımlanmıştır (Glukhovsky, 1967; Davidovits 1994). Ayrıca geocement (Krivenko, 1994), hidroseramik (Bao vd., 2005), inorganik polimer beton vb. olarak isimlendirilmişlerdir. Geopolimerizasyon sürecinde alumino silikat malzemenin belli sıcaklıklarda alkalin solüsyonlar ile (sodyum silikat, sodyum hidroksit, sodyum karbonat) kimyasal reaksiyonları sonucu üç boyutlu Si-O-Si bağlarından oluşan polimerik yapılar meydana gelmektedir (Moon vd., 2014; Nadoushan vd., 2016). Bu polimerik yapıların oluşumu hammaddenin çözünmesi, iyonların göçü, parçacıklar arasında jel oluşumu, moleküllerin yeniden düzenlenmesi ve parçacıkların sertleşmesi süreçlerini takiben meydana gelmektedir (Luukkonen vd., 2018). Jel fazı oluşumu esnasında alüminosilikat hammadde ile alkali çözelti arasındaki reaksiyon eşliğinde alkali metaller yeniden düzenlenmektedir. Tüm bu reaksiyonların neticesinde yüksek mekanik mukavemete sahip sertleşmiş geopolimer ürünler meydana gelmektedir.

Çimentosuz bağlayıcı malzeme olan geopolimerlerle ilgili çalışmalar son dönemde büyük oranda artmıştır. Uçak ve taşıt endüstrisi, tarihsel yapıların restorasyonu, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, yangına ve ağır iklim şartlarına dayanıklı duvar kaplaması üretimi gibi pek çok potansiyel kullanım alanı olan geopolimerlerin günümüzde özellikle Portland çimentonun yerini alabileceği düşünülmektedir. 1 ton Portland çimento üretimi ile karşılaştırıldığında geopolimer çimento %80-90 oranında CO₂ salınımını düşürebilmektedir (Davidovits, 1994). Şuan tüm dünyada çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımının %7 civarında olduğu düşünülürse Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı malzemelerin üretilmesi konusunun aciliyeti anlaşılabilir. Ayrıca çimento üretimi yüksek enerji gerektiren bir süreç olduğundan ekonomik değildir. Geopolimerlerin Portland çimentosuna göre avantajları ise yüksek basınç dayanım, kimyasal koşullar altında yüksek dayanıklılık, düşük geçirgenlik, düşük CO₂ salınımı, atıkların geri dönüşümü olarak tanımlanabilmektedir.

Geopolimer üretiminde doğal ya da atık pek çok hammadde başlangıç malzemesi olarak kullanılabilir. Örnek olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, puzolanlar, zeolitler, metakaolin verilebilmektedir. Bunlar arasında endüstriyel atık malzemeler yüksek teknik özelliklerinden dolayı tercih edilse de bu malzemelerin temini uzun vadeli tedarik açısından birtakım problemler oluşturmaktadır. Bu nedenle geopolimerlerin sadece atık malzemeler ile değil doğal malzemeler ile de kullanımı tavsiye edilmektedir (Almutairi vd., 2021). Bu doğal malzemelerden zeolitler geopolimer hammaddesi olarak oldukça umut vaat eden hammaddeler arasında bulunmaktadır.

Dünya zeolit rezervinin %40'ının Türkiye'de olduğu bilinmekle beraber bunlardan pek azı ekonomik olarak işletilmektedir. Bunun en büyük nedeni özellikle iç pazar açısından tüketim alanlarının sınırlı oluşudur. Türkiye'deki zeolitlerin, büyük hacimlerdeki malzemenin değerlendirilmesine olanak sağlayan inşaat sektöründeki kullanımı da yeterli değildir. Ayrıca zeolit mineralinin inşaat endüstrisindeki kullanımının yaygınlaştırılması malzemenin mekanik özellikleri konusundaki teknik verilerin artmasına bağlıdır. Ancak literatürde zeolitlerin geopolimerik malzeme olarak kullanımı ile ilgili son derece kısıtlı bilimsel veriler bulunmaktadır (Bondar vd., 2011; Nikolov vd., 2017; Nikolov vd., 2020). Kısıtlı olan çalışmalarda ise zeolitlerin geopolimer hammaddesi olarak sahip olduğu düşük erken dayanım, yüksek alkali solüsyon ihtiyacı, ıslıkür ihtiyacı gibi dezavantajları giderilebilmiş değildir. Bu durum zeolitlerin uygulamada kullanım potansiyellerini engellemektedir.

Bu çalışma kapsamında literatürde saptanan bu eksiklikten dolayı, Türkiye'de yaygın zeolit türlerinden olan klinoptilolit, reaktivitesinin artırılması amacıyla öncelikle kalsine edilmiştir. Kalsinasyon işlemi ile kristalen yapıya sahip olan klinoptilolitın amorf faza dönüştürülerek geopolimerleşmenin erken döneminde reaksiyona girmesi hedeflenmiştir. Ayrıca reaksiyon miktarını daha da artırmak için sisteme yüksek fırın cürufu mineral katkı olarak eklenmiştir. Bu müdahale sonucunda, uygulamada kullanılabilir nitelikte klinoptilolit-esaslı geopolimer üretimi sağlanmıştır. Özetle bu çalışma ile doğal malzeme esaslı geopolimerlerin yaygın kullanımlarının geliştirilmesi için klinoptilolit içeren tüfün kalsinasyon işlemi ve mineral katkı olarak cüruf etkisi incelenmiş olup, elde edilen bulguların, gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel sağlayacağı düşünülmektedir.

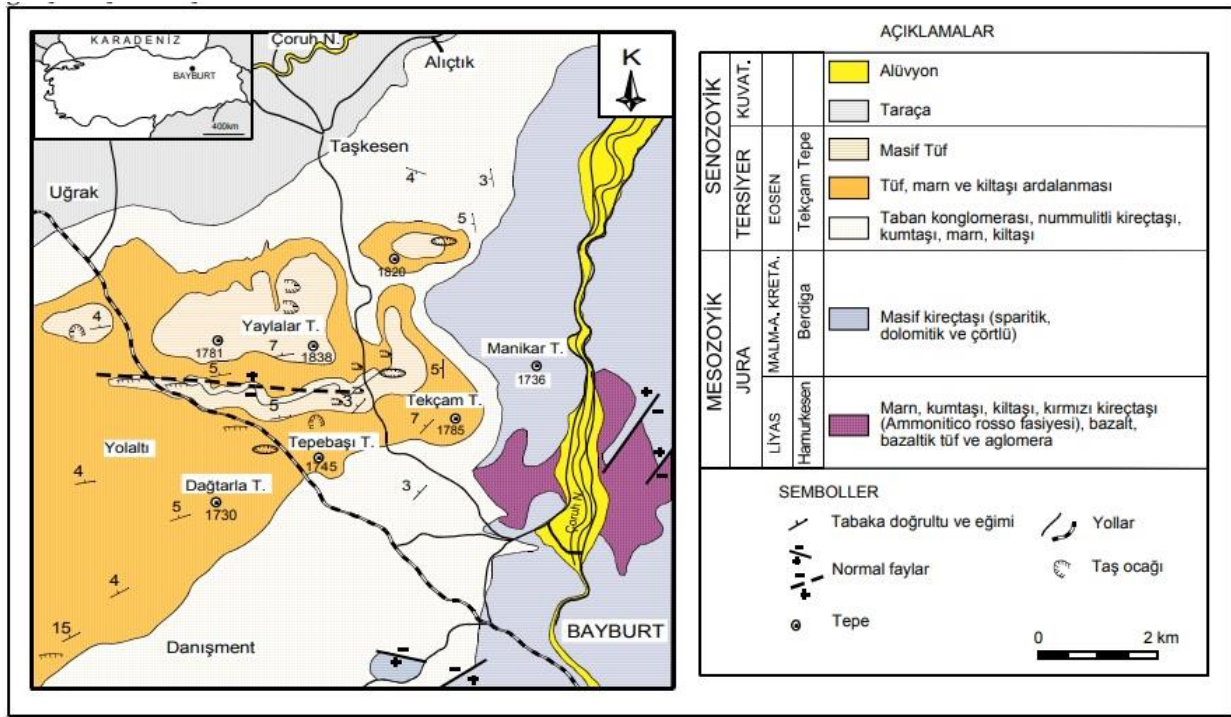
2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1. Başlangıç hammaddesi ve aktivatörler

2.1. Starting material and activators

Yapılan çalışmada geopolimer başlangıç malzemesi olarak klinoptilolit içeren tüf (Bayburt tüfü) kullanılmıştır. Bayburt Taşı olarak da bilinen bu endüstriyel hammadde kolay işlenebilmelerinden ötürü bölgede yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Bölge ekonomisinde ticari öneme sahip olan klinoptilolit içeren tüf ve tüfitler Eosen yaşlı ve dasitik bileşimlidirler (Şekil 1). Bayburt tüfü çökeltme ile eş zamanlı asidik bir volkanizma neticesinde oluşan kalkalkalin-alkalen ya da alkalen karakterli volkanoklastik ve sedimanterlerdir (Arslan vd., 2005).



Şekil 1. Bayburt yöresinin jeolojik haritası (Arslan vd., 2005)

Figure 1. Geologic map of Bayburt region (Arslan vd., 2005)

Alkaliler ile aktive edilerek geopolimer üretmek için karışımlarda sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmış olup kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sodyum hidroksitin saflığı %98,3'dür. Sodyum hidroksit pellet şeklinde temin edilmiş olup analizlerde kullanılmadan önce laboratuvar ortamında 10 Molarlık sulu çözelti haline getirilmiştir. Cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat ise sulu çözelti olarak temin edilmiştir.

Tablo 1. Alkali aktivatörlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri
Table 1. Chemical and physical properties of alcali activators

	Sodyum silikat	Sodyum hidroksit
Molekül formülü	Na ₂ SiO ₃	NaOH
Molekül ağırlığı (g/mol)	39,27	182
Yoğunluk (g/cm ³)	2,09	1,25-1,41
Renk	Beyaz	Beyaz
SiO ₂ (%)	27,7	
Na ₂ O (%)	9,8	
H ₂ O(%)	62,5	

2.2. Malzeme karakterizasyonu

2.2. Material characterization

Araziden alınan tüf örneği laboratuvar ortamında önce çeneli kırıcı ile küçültülmüş ardından Bond tipi bilyeli değirmen ile malzemenin %90'nı 45 mikron elekten geçecek şekilde öğütülmüştür. Tane boyut dağılımı elek analizi ile saptanmıştır. Başlangıç hammaddesinin kimyasal kompozisyon tayini X-ışını floresans (XRF) yöntemi ile yapılmıştır. 10 gr olarak toz haline getirilmiş hammadde pellet şekline dönüştürülüp XRF cihazında kimyasal taraması yapılmıştır.

Bayburt tüfünün faz içeriği hangi mineralleri içerdiğinin yanında bu fazların miktarlarının saptanması olarak da yapılmıştır. Fazların miktarlarının sayısal olarak tespiti hammaddenin davranışını yorumlamada önem arz etmektedir. Kantitatif XRD çekimleri edilen okumalar 3'ten 80°C'ye kadar olacak şekilde 2θ açısı ile 40 kV ve 30 mA değerlerinde yapılmış ve sonuçlar sayısal olarak elde edilmiştir (PANaltical X'Pert Pro cihazı X'Pert High Score Plus 3.0, Philips PW1730).

2.3. Kalsinasyon

2.3. Calcination

Klinoptilolit içeren tüf geopolimer sentezinden önce malzemenin reaktivitesini arttırmak amacıyla kül fırınında 900°C'de saatte 10°C artış olacak şekilde 1 saat süre ile kalsine edilmiştir.

2.4. Numune hazırlama

2.4. Sample preparation

Geopolimer sentezi için başlangıç hammaddesi (Bayburt tüfü) Hobart mikserle boşaltılmış, NaOH alkali aktivatörü mikserle eklenmiş ve karışım 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından karışıma sodyum silikat eklenip karışım 3 dakika daha karıştırılmıştır. Üretilen geopolimer hamuru 5x5x5 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. 7, 28 ve 90 gün boyunca oda koşulunda kür edilmiştir. Geopolimer üretiminde tüf/aktivatör oranı 1.85, Na₂SiO₃/NaOH oranı ise 1.5 olarak kullanılmıştır.

2.5. Deneysel yöntemler

2.5. Analytical methods

Üretilen geopolimer hamurları üzerinde ASTM C39 (2018) standardına uygun olarak basınç dayanım analizleri yapılmıştır. Her bir basınç dayanım deneyi için 3 adet küp numuneden elde edilen sonuçların ortalamaları kullanılmıştır. Başlangıç hammaddesinin ve üretilen geopolimerlerin içerisinde bulunan ya da geopolimerleşme esnasında oluşan fazları saptamak amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizi Rigaku MiniFlax II serisi X-ışınları difraktometresi yardımıyla CuKα ışınması kullanılarak 30kV ve 15mA'da yapılmıştır. Tarama hızı ise 10°/dk'dır. Üretilen geopolimerlerin yarı-kantitatif kimyasal analizleri SEM/EDX analizi ile yapılmıştır. SEM/EDX analizinden önce örnekler altın ile kaplanmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Malzeme karakterizasyonu

3.1. Characterization of materials

Başlangıç hammaddesinin mineralojik içeriği Tablo 2’de verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere Bayburt Taşı %58 oranında klinoptilolit içermektedir. Klinoptilolit zeolit türü bir mineral olup geopolimerik yönden oldukça aktif olduğu bilinmektedir. Başlangıç hammaddesinin içerisinde %17 miktarda olduğu görülen kuvars ise geopolimerik yönden aktif değildir (Allahverdi vd., 2008). K-feldispatın ise klinoptilolit kadar olmasa da geopolimerleşmeye katıldığı ve reaksiyon esnasında aktif bir rol oynadığı bilinmektedir (Xu & van Deventer 2002). Tablodan Bayburt tufunun %25 oranında K-feldispat içerdiği görülmektedir. Tüm bu mineralojik bilgiler dahilinde hammaddenin geopolimerik yönden aktif olacağını sonucuna varılabilir.

Tablo 2. Başlangıç hammaddesinin kantitatif XRD (QXRD) analiz sonucu
Table 2. Quantitative XRD (QXRD) analysis of starting material

Mineralajik kompozisyon (%)	B-1
Klinoptilolit	58
Kuvarz	17
K-Feldispat	25
Toplam	100

Bayburt tufunun kimyasal analiz sonucu Tablo 3’te verilmiştir. Tablo incelendiğinde SiO₂ ve Al₂O₃ değeri toplamının % 70,9 olduğu gözükmektedir. Aslında bu değer geopolimerleşme için alt sınırlarda olan bir değerdir. SiO₂ ve Al₂O₃ değerlerinin toplamının %85 dolayında olması daha istenilen bir durumdur. Ancak Tablo incelendiğinde başka bir oksit değerinin yüksek olduğu görülmektedir. CaO değeri yaklaşık %9 civarındadır. Feldispattan geldiği düşünülen bu Ca değerinin geopolimerleşmede etkili olduğu bilinmektedir.

Tablo 3. Başlangıç hammaddesinin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri
Table 3. Chemical composition and physical properties of starting material

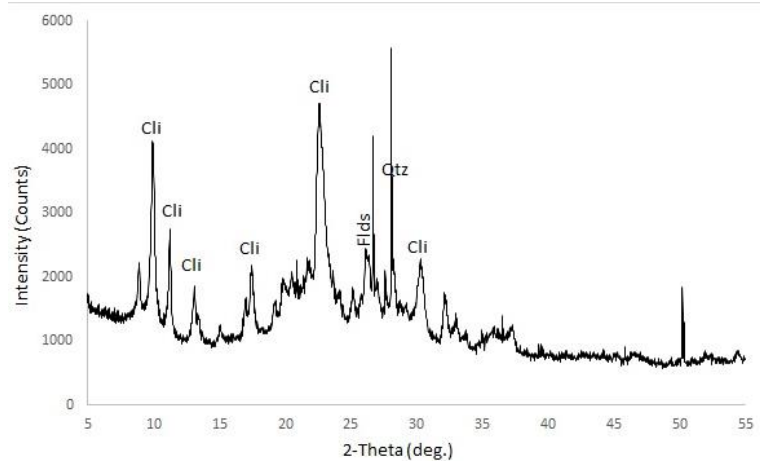
Kimyasal kompozisyon (%)	B-1
SiO ₂	55.2
Al ₂ O ₃	15.7
Fe ₂ O ₃	3.1
CaO	9.4
MgO	1.2
Na ₂ O	0.4
K ₂ O	1
MnO	0.4
L.O.I.	13.6
Total	100.00
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık	2.11
İncelik (<45µm,%)	90.00

3.2. Başlangıç hammaddesi ve kalsine edilmiş hammaddenin XRD analizi

3.2. XRD analysis of starting material and calcined raw material

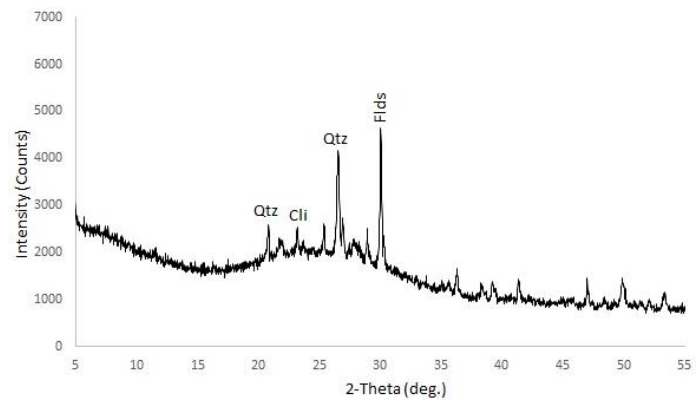
Klinoptilolitler geopolimerik yönden aktif malzemelerdir. Ancak bütün doğal malzemelerde olduğu gibi düşük erken dayanıma sahiptirler. Bunun nedeni kristalen yapıya sahip olmalarıdır. Bu yapılarından dolayı alkali solüsyonlarla reaksiyona girmeleri gecikmekte ve böylece erken dönemde düşük basınç dayanım değerlerine sahip olmaktadır. Bu sorun malzemelerin kalsinasyon edilmesi ile aşılabilmektedir. Kalsinasyon neticesinde klinoptilolitlerin kristal faz yapısı bozularak amorf faza dönüştürülebilmekte ve böylece erken dönemde geopolimerik reaksiyona katılmaları sağlanabilmektedir.

Bu çalışma ile yapılan kalsinasyon işleminin başarılı olup olmadığını anlamak amacıyla kalsinasyondan önceki klinoptilolit içeren hammadde (B-1) ve kalsinasyondan sonraki söz konusu hammaddenin (B-1-900°C) XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 2’de B-1 hammaddesinin kalsinasyondan önceki XRD grafiği görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kristal yapıya işaret eden klinoptilolit, feldispat ve kuvarz pikleri görülmektedir. Şekil 3’de ise kalsinasyon işleminden sonraki XRD grafiği görülmektedir. Bu grafiğe göre neredeyse tüm kristal yapı çökmüş ve amorf yapıda olan camsı faza işaret eden 2θ açısının 20° ile 35° arasında olan kambur eğri görülmektedir. Bu nedenle XRD analizi neticesinde, klinoptilolit esaslı geopolimerin kalsinasyon başarısı amorf faz varlığı ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 2. B-1 hammaddesinin XRD analiz grafiği (Cli: klinoptilolit; Flds: feldispat; Qtz: kuvars)

Figure 2. XRD analysis of B-1 raw material (Cli: clinoptilolite; Flds: feldspar; Qtz: quartz)



Şekil 3. 900°C’de kalsine edilmiş B-1 hammaddesinin (B-1-900°C) XRD analiz grafiği (Cli: klinoptilolit; Flds: feldispat; Qtz: kuvars)

Figure 3. XRD analysis of calcined B-1 raw material at 900°C (B-1-900°C) (Cli: clinoptilolite; Flds: feldspar; Qtz: quartz)

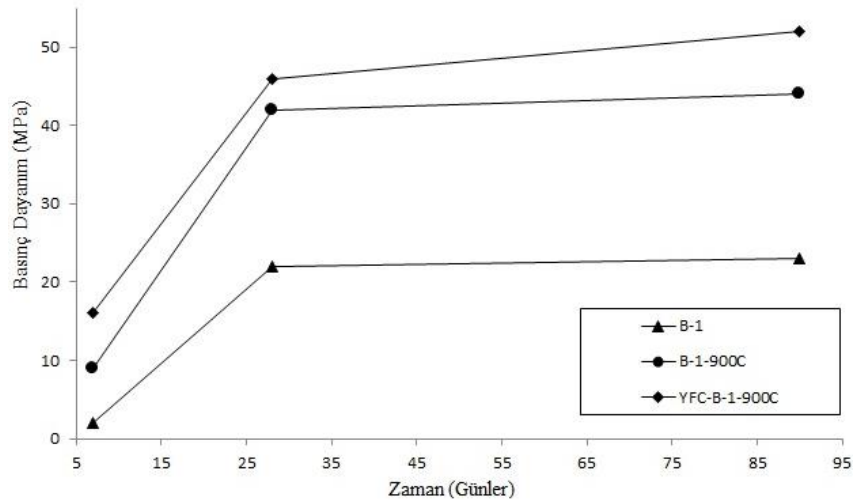
3.3. Basınç dayanım analizi

3.3. Compressive strength analysis

Mukavemet analizleri esnasında öncelikle başlangıç malzemesinin yani klinoptilolit içeren Bayburt tufünün 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Yukarıda bahsi geçtiği üzere doğal malzemeler yapılarında ihtiva ettikleri kristalen mineraller dolayısıyla geç reaksiyona girip geç dayanım vermektedirler. Diğer bir deyişle erken dayanım değerleri oldukça düşüktür. Şekil 4 incelendiğinde 7 günlük basınç dayanım değerlerinin oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bayburt tufü esaslı geopolimerin erken dayanım alamadığını görülmektedir. Ancak kür süresi uzadıkça mukavemet kazanmakta ve 90 günlük basınç dayanımının 23 MPa olduğu görülmüştür.

B-1 hammaddesinin kalsinasyon işlemi neticesinde (B-1-900°C) erken dönemdeki basınç dayanımının (7 günlük) oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Söz konusu bu artışın 28 günlük ve 90 günlük basınç dayanım sonuçlarında daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuca dayanarak kalsinasyon işleminin erken dönem basınç dayanım değerlerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. B-1-900°C geopolimerinin 90 günlük basınç dayanımı 44 MPa'dır.

Bu basınç dayanım değerlerinin daha da iyileştirilip iyileştirilemeyeceğini görmek için kalsine edilmiş klinoptilolit içeren tufün içerisine ağırlıkça %10 miktarında yüksek fırın cürufu eklenmiştir. Şekil 4'ten görüldüğü üzere yüksek fırın cürufunun her yaşta basınç dayanımını iyileştirdiği yani geopolimerlerin mukavemetleri üzerinde pozitif etkisinin olduğu görülmüştür. YFC-B-1-900°C geopolimerinin 90 günlük basınç dayanım değeri 52 MPa olarak ölçülmüştür.



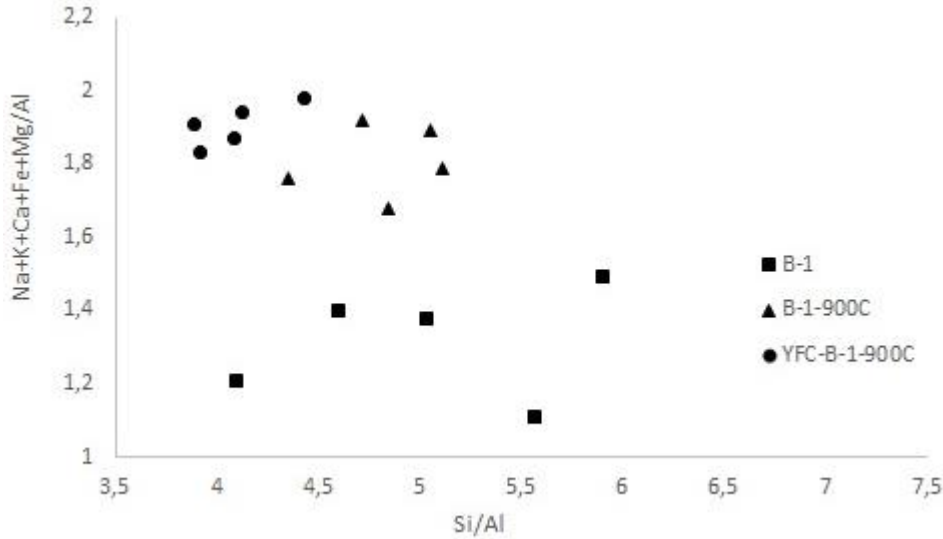
Şekil 4. B-1, B-1-900°C, YFC-B-1-900°C geopolimerlerinin basınç dayanım analizi (7, 28, 90 günlük)

Figure 4. Compressive strength analysis of B-1, B-1-900°C, YFC-B-1-900°C (7, 28, 90 days)

3.4. SEM/EDX analizi

3.4. SEM/EDX analysis

Sentezlenen geopolimerlerin yarı-kimyasal SEM/EDX analiz sonuçları Şekli 5'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde sonuçların üç bölge olarak yoğunlaştığı görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere B-1 geopolimeri düşük Na+K+Ca+Fe+Mg/Al olarak karakterize edilebilmektedir. B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerleri ise yüksek Na+K+Ca+Fe+Mg/Al değerlerine sahiptirler. B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerleri kendi aralarında kıyaslandığında ise YFC-B-1-900°C geopolimerinin düşük Si/Al değerine B-1-900°C geopolimerinin ise yüksek Si/Al değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda -1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerlerinin benzer değerlerde Si/Al oranlarına sahip olduğu ancak B-1 geopolimerinin Si/Al değerlerinin oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu veriye dayanarak geopolimerik jelin B-1 örneğinde iyi derecede gelişmediği, ancak B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerlerinde iyi derecede geliştiği sonucuna varılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. B-1, B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerlerinin yarı-kantitatif SEM/EDX analiz sonuçları

Figure 5. Semi-quantitative SEM/EDX analysis of B-1, B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolymers

4. Sonuç ve öneriler

4. Conclusion and recommendations

Bu araştırmada, klinoptilolit içeren tuf malzemesi 900°C sıcaklıkta kalsinasyon işlemine tabi tutulmuş ve sonrasında yüksek fırın cürufü mineral katkısı olarak eklenmiştir. Geopolimerlerin mukavemet gelişimi basınç dayanımı analiziyle incelenmiş ve XRD ve SEM analizleri ise mikro yapısal incelemeler için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kalsinasyon işleminin erken aşamalarda mukavemeti artırdığını ve cüruf katkısının basınç dayanımını daha da iyileştirdiğini göstermektedir. SEM/EDX analizi, cüruf katkılı geopolimerin en iyi jel gelişimine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Yaygın bir zeolit türü olan klinoptilolitlerin diğer doğal malzemelerde görüldüğü gibi düşük erken dayanım değerleri kalsinasyon neticesinde iyileştirilebilmektedir.
- 7 günlük basınç dayanım değeri (erken dönem) 2 MPa olan B-1 geopolimerinin 900°C'de kalsine edilmesinin ardından 7 günlük mukavemeti 9 MPa olarak saptanmıştır.
- Bu değer sisteme yüksek fırın cürufü eklenmesi neticesinde daha da arttırılabilmektedir. YFC-B-1-900°C geopolimerinin 7 günlük basınç dayanım değeri 19 MPa'dır.
- Bu sonuçlara dayanarak erken dönemde mukavemet kazanamayan doğal malzemelerin kalsinasyon ve mineral katkı eklenmesi neticesinde dayanımlarının yükseltilebildiği ve böylece yerinde dökülen beton uygulamalarında kullanılabilirliği gösterilmiştir.
- XRD analizi neticesinde kristal yapının çöküp, amorf yapıdaki camsı faza işaret eden kambur eğri saptanarak klinoptilolit esaslı geopolimerin kalsinasyon başarısı amorf faz varlığı ile ilişkilendirilmiştir.
- Geopolimer jelin benzer değerlerde Si/Al oranlarına sahip olan cüruf katkılı geopolimerde iyi derecede geliştiği ortaya konulmuştur (SEM/EDX).

İleriki çalışmalar olarak klinoptilolit dışında başka minerallerin kalsine edilerek geopolimerik davranışlarının incelenmesi ve birbirleriyle kıyaslanması önerilmektedir. Böylece kalsinasyon işleminin geopolimerleşme üzerindeki etkilerinin daha detaylı olarak anlaşılması mümkün olabilecektir.

Teşekkür / Katkı belirtme*Acknowledgement*

Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederim.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., & Zeyad, A.M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>.
- ASTM C39 / C39M-18 (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18.
- Bao Y., Grutzeck M.W., & Jantzen C.M. (2005). Preparation and properties of Hydroceramic Waste Forms made with simulated Hanford low-activity waste. *Journal of the American Ceramic Society*, 88, 3287-3302. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00775.x>.
- Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., & Ramezani pour, A.A. (2011). Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 25, 4065-4071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.044>.
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State, Technical University, Kiev, Ukraine.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2006). Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators. *Materiales de Construcción*, 56(281), 51-65. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i281.92>.
- Glukhovskiy, V. (1967) Budivelnik Publish, Kiev.
- Krivenko, J., Skurchinskaya, L., Lavrinenko, O., Starkov, E., & Konalov, E. (1994). Physico-chemical bases of radioactive wastes immobilization in a mineral-like solidified stone, in: P.V. Krivenko (Ed.), Alkaline Cements and Concretes, Proceedings of the 1st International Conference, VIPOL Stock Co., Kiev, Ukraine, pp. 1095-1106.
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>.
- Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K.H., Kim, K.S., & Monteiro, P.J.M. (2014). Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders. *Cement and Concrete Composites*, 53, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.010>.
- Nadoushan, M.J. & Ramezani pour, A.A. (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.086>.
- Nikolov, A., Nugteren, H., & Rostovsky, I. (2020). Optimization of geopolymers based on natural zeolite clinoptilolite by calcination and use of aluminate activators. *Construction and Building Materials*, 243, 118257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118257>.

- Nikolov, A., Rostovsky, I., & Nugteren, H. (2017). Geopolymer materials based on natural zeolite. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.03.001>.
- Xu, H. & van Deventer, J.S.J. (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247-266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5).
- Xu, H. & van Deventer, J.S.J. (2002). Factors affecting the geopolymerization of alkali-feldspars. *Minerals and Metallurgical Exploration*, 19, 209- 214. <https://doi.org/10.1007/BF03403271>.