



Orijinal Araştırma / Original Research

Alkali aktive edilmiş uçucu külün sinterlenmesi, karakterizasyonu ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi

Investigation of sintering, characterization and physical characteristics of alkali activated fly ash

Kemal Şahbudak^{a,*}^a Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sivas, TÜRKİYE

Geliş - Received: 30 Aralık/December 2020 • Kabul - Accepted: 12 Nisan/April 2021

ÖZ

Bu çalışmada, Sivas Kangal Termik Santrali'nden edilmiş uçucu külden yapılan alkali aktivasyon yani jeopolimerleşmenin ardından, farklı sıcaklıklarda sinterlenmesi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri, toz özellikleri, termal özellikleri ve faz özellikleri tartışılmıştır. Mekanik özellikler için basma testi, termal özellikler için geçirgen plaka kaynağı ölçümü, yüzey ve toz özellikleri için taramalı elektron mikroskobu ve faz analizi için X-ışınları difraksiyonu kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda, kolay bulunan ve alkali silika kaynağı olarak da kullanılabilen Na_2SiO_3 , farklı molaritelerde karıştırılarak özellikleri incelenmiştir. Uçucu külün hem jeopolimer hem de sinterlenmiş malzemenin yüzey plakası olarak ve tuğla üretiminde kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Basma mukavemeti 10 MPa, termal iletkenliği 0.0006 W/m.K, belirlenen fazlar ise kalsiyum silikat, kalsiyum alümina, amorf silika ve magnezyum alüminat ve sinterleme ürünü olan camsı kyanite yani alüminosilikat fazıdır.

Anahtar sözcük: Uçucu kül, Jeopolimer, Sinterleme, Termal iletkenlik, Mekanik özellikler.

A B S T R A C T

In this study, mechanical properties, powder properties, thermal properties and phase properties of samples produced by sintering at different temperatures after alkali activation by geopolymerization, made from fly ash obtained from Sivas Kangal Thermal Power Plant, are discussed. Compression test for mechanical properties, transient plane source measurement for thermal properties, scanning electron microscopy for surface and powder properties, and X-ray diffraction for phase analysis were used. In studies, Na_2SiO_3 , an alkali that can be found easily commercially and a source of silica, was used at different molarities and its properties were investigated. It was concluded that fly ash can be used both as a geopolymer and as a sintered material as a lateral plate as well as brick production. Compressive strength was found to be as 10 MPa, thermal conductivity is 0.0006 W/m.K, and the determined phases are calcium silicate, calcium aluminate, amorphous silica and magnesium aluminate and glassy kyanite which is a sintering product, namely aluminasilicate phase.

Keywords: Fly ash, Geopolymer, Sintering, Thermal conductivity, Mechanic properties.

Giriş

Son yıllarda enerjiye olan talebin artması, dünyada ve ülkemizde hem elektrik enerjisi üreten çok sayıda termik santrallerin kurulmasına hem de önceden kurulan santrallerin kapasitelerini arttırmalarına sebep olmuştur. Gelişen teknolojiyle birlikte büyük kapasiteli termik santrallerde özellikle toz halinde düşük kalorili ve kül oranı yüksek kömürlerin yakılması sonucu yan ürün olarak elde edilen uçucu kül miktarı artmıştır.

Endüstriyel bir atık olan uçucu külün depolanması, santralden uzak yerlere taşınması işlemleri işletme maliyetini artırdığı gibi aynı zamanda depolama işlemleri de çevresel sorunlara neden olmaktadır. Uçucu külün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin geri kazanmaya elverişli olduğuna dair ve uçucu külün ekonomik olarak değerlendirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. Ayrıca, uçucu külün, doğal "puzolan" olan amorf silika, diatomit, kireç, tras, perlit, pomza, vermiküllit,

*Sorumlu yazar/Corresponding author: kemalsahbudak@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0003-4853-6843>

volkanik tüf gibi malzemelerle birlikte farklı sektörlerde (inşaat sektörü, yapı sektörü, çimento üretimi, beton üretimi, yol ve baraj yapımı, zemin stabilizasyonu, dolgu ve enjeksiyon işlemleri vb.) kullanımı ile ilgili endüstriyel uygulamalar hem dünyada hem de ülkemizde yaygın bir şekilde görülmeye başlanmıştır.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin inşaat endüstrisi, ucuz olmalarından ve çok katlı binalara uygulanabilmelerinden dolayı çimento türevi malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Fakat iyi bilindiği üzere 1 ton çimento üretiminden atmosfere nerdeyse 1 ton CO₂ salınmaktadır (Van Oss ve Padovani, 2003). Bu sebepten ötürü betondaki çimento miktarı azaltılmalı ya da çimento türevi malzemelere alternatifler bulunmalıdır. Bu konuda bazı araştırmacılar tarafından kireç tozu, uçucu kül, doğal pozulanlar (Binici vd., 2007), cüruf (Binici vd., 2007; Binici vd., 2008; Binici vd., 2009) ve silika tozu gibi maddeler, beton içerisine çimentonun belirli bir yüzdesine karşılık kullanılmış ve betonun kullanım ömründe ve mekanik özelliklerinde bir takım iyileştirmeler gözlemlenmiştir (Zhang vd., 2011; Zhang vd., 2012a; Zhang vd., 2012b). Ayrıca önceki maddelerden bazıları özellikle uçucu kül, çimento üretiminde, kireç tozunun belirli bir yüzdesine karşılık kullanılmış ve CO₂ salınımında belirli bir azalma sağlanmıştır (Zhang vd., 2011; Zhang vd., 2012a;). Sürdürülebilir bir inşaat sektörü gelişimi için çimentonun yerine başka pozulanların kullanılabilirliği ile betondaki çimento miktarı çok fazla düşürülerek ve hatta gelecekte çimento kullanılmadan bu alanda yeni ürünlerin üretilmesi çalışmaları yapılmaktadır.

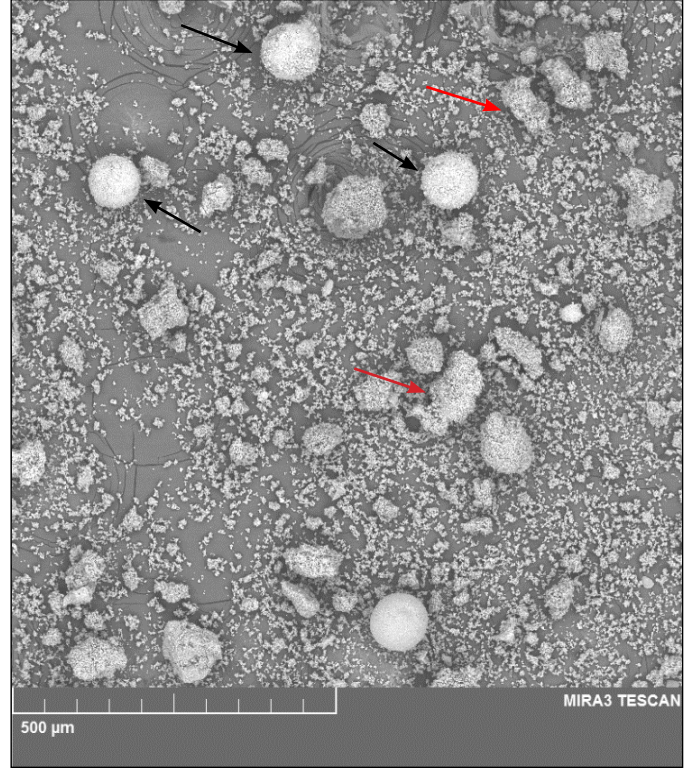
Beton üretiminde özellikle bünyesinde alimünasilikat ihtiva eden hammadde veya artıkların kullanılması mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Bunun sebebi pozulanik aktivitenin artmasıdır. Pozulan, ASTM C618 standardının betimlediği üzere bünyesinde %70'den fazla SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ içeren ve su ile karşılaştığı zaman kalsiyum hidroksit ile etkileşime geçen malzemelerdir. Termik santral curufları pozulanlara bir örnek olarak gösterilebilir (Massazza, 2001). Yapıdaki pozulanik etkileşimler sonucu standart Portland çimentosunun hidrasyonu ile oluşan portlandit ve CSH (Ca-Si-OH) fazlarından portlandit fazının azalması, CSH fazının artması ve ek olarak CASH (Ca-Al-Si-OH) fazının eklenmesi ve bu durumda mekanik özellikleri iyileştirmesi beklenmektedir (Van Oss ve Padovani, 2003; Zhang vd., 2011, Zhang vd., 2012a).

Uçucu küller farklı katyon içeriklerine göre sınıflandırılmışlardır. Yüksek silika ve alümina içeriğinden dolayı C sınıfı olarak adlandırılan uçucu küller var iken, mekanik özellik iyileştirme prosesine daha az destek sağlayan fakat daha çok bulunan ve büyük miktarlarda üretilen F sınıfı uçucu küller de ülkemizde bulunmaktadır. Üretilen hazır betonun kullanım alanını hafiflik gerektirmeyen uygulamalar ile kısıtlayacaktır.

Bu çalışmada, Sivas Kangal Termik Santrali'nden alınan uçucu kül numuneleri kullanılarak, bunların jeopolimerleşmede kullanılabilirliği, ayrıca sinterleme sonunda daha yüksek mukavemetli malzeme olarak üretilebilirliği ve bunların mekanik ve fiziksel özelliklere etkileri çalışılmıştır.

1. Malzeme ve yöntem

Çalışmada kullanılan uçucu kül, Sivas Kangal Termik Santrali'nden alınarak fraksiyonlara ayrılmıştır. Küresel tozlara sahip olduğu bilinen uçucu külün elenmesiyle 106 µm ile 38 µm aralığında tozlar taramalı elektron mikroskopunda (SEM, Tescan Mira3 XMU, Brno, Çekya) incelenmiştir. Şekil 1'de küresel morfolojide uçucu kül tozları gösterilmektedir. Küresel şekilde bulunan tozların yanı sıra yüksek sıcaklıktan dolayı aglomerasyon görülmüş kübik ve dikdörtgen benzeri gözenekli tozlar da bulunmaktadır. Ayrıca, tozların gevrek olmasından dolayı, eleme işleminde 30 µm ve altı parçacıklar da görülmüştür.



Şekil 1. Uçucu külün SEM toz morfolojisi

Şekil 1'de görülen küresel aglomera tozlar (siyah oklar) sert ve sinter aglomere tozlar olup, diğerleri sinterlenmiş köşeli tozlardır ki (kırmızı oklar) bunların öğütülmesi ekstra maliyet oluşturmaktadır.

Deneylerde kullanılan Na₂SiO₃ ise Merck firmasından temin edilmiş olup herhangi bir saflaştırma yapılmamıştır. Düşük alkali kullanımı ile maliyetin azaltılması düşünüldüğünden, 1 molar, 3 molar ve 5 molarlık çalışmalar yapılarak elde edilen numunelerin jeopolimerleşme özellikleri ve takiben mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Numune hazırlamada, 2 cm çapında, 5 cm yüksekliğinde silikon polimer kaplar kullanılarak ağızları sıkı geçme ile kapatılmış ve kür işlemlerine tabi tutulmuştur. Her bir kalıp için 10 gramlık çamurlar topluca yapılmıştır. Kuru bazda, her 10 gram uçucu kül için %40'lık Na₂SiO₃ çözeltisi farklı molaritelere sahip olacak şekilde hazırlanıp karıştırılmıştır. Toplam 50 gramlık yığınlar hazırlanarak, aynı kompozisyona sahip beşer numune üretilmiştir. Numunelerin güven aralığı ve standart sapması, her grup malzemeden 5 örnekten tekrarlı olarak yapılmış olup, standart sapma hata barları Şekil 5 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Türkiye'de çimento üretiminin yılda yaklaşık 25 milyon ton ve termik santrallerde ortaya çıkan kül miktarının ise yılda yaklaşık 15 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Uçucu külün değerlendirilmesine yönelik akademik çalışmaların yapılması hem ülkemiz ekonomisi açısından endüstriyel bir zorunluluk hem de çevresel duyarlılık açısından sosyal bir sorumluluktur. Bu makaledeki çalışmanın geliştirilerek devam ettirilmesi durumunda uçucu külün kontinü bir kalsinasyon fırında kısmi olarak sinterlendiği, ardından kısa süreli bir öğütme ile uygun toz boyutunda pozulanik bir yapının elde edildiği endüstriyel uygulamaların olabileceği düşünülmektedir. Bu durumda yapılan deneylerin endüstriyel uygulanabilirlik fizibilite çalışmalarının (950 °C'de sinterleşme maliyeti, sinterleşme sonrasında malzemenin tekrar öğütme maliyeti ve jeopolimerleşme çalışmalarında kullanılan kimyasalların maliyeti gibi maliyetlerin yanı sıra sinterleme esnasında az da olsa CO₂ salınımı vb. olumsuzluklar) yapılması gerekliliği daha da önemli hale gelmiştir.

Uçucu küllerin yüksek yüzey alanına sahip olması puzolanik aktivite için çok önemli bir avantajdır. Tozların, kömürün yanması sonucunda aşağı dökülürken reaksiyona uğramaları ve küreselleşmeleri, uçucu küllü sıvı ihtiyacı çok olan bir malzeme haline getirmiştir (Şaşmaz ve Sağıroğlu, 1994; Hodhod vd., 2020; Mahmoodi vd., 2021). Düzensiz şekilli tozların kırılması ve köşelerinden yeni tozlar oluşması ile toz boyutu aralığı olarak alınan -106+38 µm boyut aralığı sağlanamamaktadır.

Bu çalışmada, deneylerde kullanılan uçucu kül toz boyutu hem endüstriyel olarak tozların ağırlığının %40'ını içerdiği hem de sonuç ürüne toz karakteristiğini yansıtmaması açısından mümkün olduğu kadar dar bir aralıkta (-106+38 µm aralığında) tutularak uçucu külün hem jeopolimer olarak kullanılabilirliği, hem de sinterlenmiş malzemenin yüzey plakası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Uçucu külden elde edilen jeopolimer malzemenin sinterlendikten sonra yapı malzemesi olarak endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğine yönelik fizibilite çalışmalarının yapılması bir zorunluluk olup ayrı bir çalışma konusu olarak düşünülebilir.

Elde edilen tozların elementel analizi XRF (Thermo Scientific, Niton xl3t) ile ölçülmüştür (Çizelge 1). Uçucu külün, C sınıfı yani yüksek Ca ve orta Si+Al seviyesine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle Ca yani Ca(OH)₂, CaSO₄ ana fazlar gibi görülmekle birlikte, Al-Si-O türevi yapılar da beklenmektedir.

Çizelge 1. Uçucu külün XRF analizi

Element	Ağırlık (%)
Mg	4,20
Al	12,027
Si	23,36
S	13,73
K	1,133
Ca	42,25
Fe	5,30

Tozların jeopolimer öncesi XRD analizleri Rigaku® (Japonya) DMax 2200 (10-70° 2θ aralığında, 1,5408 Å Cu Kα radyasyonu ile) yapılmış ve XRD desenleri MDI JADE® 7 ile analiz edilmiştir.

Jeopolimer üretiminde mono distile su kullanılmış olup, Na₂SiO₃ artan molaritesinde benzer ürünler görülmüştür. Bu ürünler yüksek amorflikta silika, portlandit ve gismondin, yani Ca-Al-Si-OH türevli malzemeleri içermektedir.

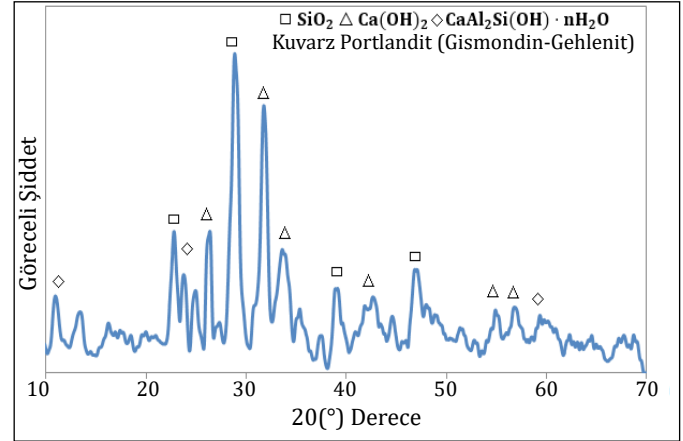
2. Bulgular ve tartışma

2.1. Jeopolimerleşme çalışmaları ve sonuçları

Farklı molaritelerde Na₂SiO₃ ile üretilen uçucu kül alkali aktive edilmiş yapılar, 1 gün %80 nemde ve 50°C'lik etüvde kürlenmiştir. Kürlenme için streç film kaplı silikon kalıplar kullanılmıştır. Numuneler birinci günün sonunda kalıplardan çıkarılarak sabit oda sıcaklığında (20°C) normal ortamda 7, 14 ve 28 gün matürleşmesi beklenmiştir. Matürleşme, jeopolimer yapıların mukavemetlerini kazanmaları için beton malzemeler gibi gerekli sürelerdir. Bu sürelerde hala nemli ortamda bulunan iyonların değişimi sayesinde hem mukavemet hem de mikroyapısal düzenlenme olmaktadır.

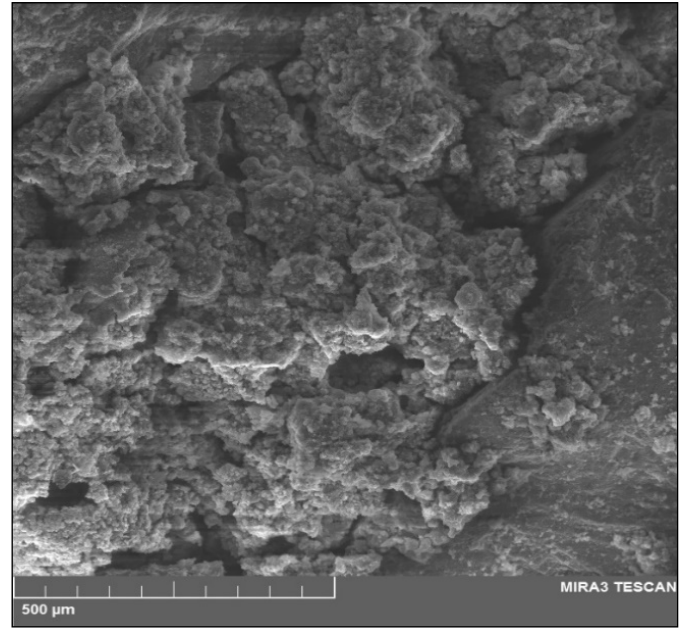
XRD deseninde düşük şiddetli yüksek geri yansımaları yani tabana inmemiş piklerin bulunması yapının amorflaşmış ve kristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 2). Amorf silika içeriği olarak gözenekli ve gözeneklerin etrafında küresel görünen çözünüp çökelmiş yapıların, Ca-Al-Si içeriği olarak da tabakalı gismondin ve gehlenit yapıları gösterilebilir. Nem içeriği de

belli miktarda olan bu jeopolimer yapıların mukavemetlerinin de artan Na₂SiO₃ molaritesi ile 1-2 MPa'dan 5-6 MPa'a kadar arttığı görülmüştür.



Şekil 2. 5M Na₂SiO₃ ile üretilmiş jeopolimer yapının XRD deseni ve değerlendirmesi

5M Na₂SiO₃ ile üretilmiş jeopolimer yapının SEM görüntüsü incelendiğinde, yapıda uçucu külün çözünme çökelme koşulları ile iyon değişimine uğramış tabakalı yapısı Şekil 3'te görülmektedir.



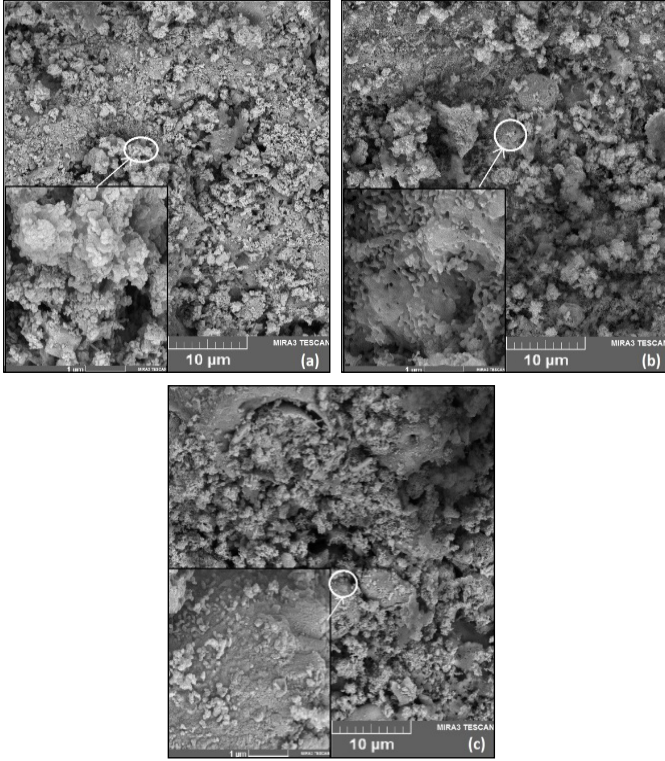
Şekil 3. Uçucu külden 5M Na₂SiO₃ ile üretilmiş jeopolimer yapının SEM görüntüsü

Şekil 3 incelendiğinde, sol üst ve sağ altta gismondin plakaları ile arada uçucu külün küresel tozlarının birbirine bağlanmış yapısı ve bunların plakayla birliktelikleri görülmektedir.

2.2. Sinterleme çalışmaları ve sonuçları

Sinterleme çalışmalarında, jeopolimer üretimi yapılan farklı Na₂SiO₃ molaritesine sahip malzemeler kullanılmıştır. Numunelerde gözenek oluşumu ve eliminasyonunu belirlemek için düşük sıcaklık sinterleme ve boyun oluşum sıcaklığı olan ve seramiklerde genel olarak bilinen 850°C, orta sıcaklık olarak 950°C ve seramik sanayisinde gözenekleri elimine etmek için kullanılan ve geleneksel seramiklerin sinterleme sıcaklığı civarı olan 1050°C sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

1M-3M-5M Na_2SiO_3 katkılı malzemelerin 950°C 'de sinterlendikten sonraki SEM yüzey morfolojileri ve boyun vermiş tozların dağılımı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. (a) 1M; (b) 3M; (c) 5M Na_2SiO_3 alkali aktive edilmiş uçucu kül yapılarının 950°C 'de sinterlendikten sonraki SEM yüzey morfolojileri

Şekil 4 incelendiğinde, her bir resimdeki alt resimler beyaz yuvarlak bölgelerin büyük büyütmelerini göstermektedir. Düşük molaritede (a) tozların birbirine bağlanması sadece boyun oluşumu şeklinde görülmektedir. $1\ \mu\text{m}$ 'dan daha küçük tozların dağılımının sağlanmasından ve çözünme çökeltme koşullarından dolayı, Ca içeren yapılar olduğu düşünülmektedir. Şekil 4 (b)'de 3M Na_2SiO_3 ile aktive edilmiş yapılarda, küreselliği bozulmuş ve çözünmüş, çökelmiş uçucu kül yapıları görülmektedir. Bununla birlikte hem camsı hem de kristalin yapılar gözenekli ve katmanlı şekilde belirlenmektedir. Şekil 4 (c)'de ise 5M Na_2SiO_3 aktive edilmiş yapının SEM görüntüsünde, yapının sinterlenmeden dolayı tam kristalin olduğu ve gözeneklerin de mikro çevrede elimine edildiği görülmektedir. Böylece birbirine daha sıkı difüze olmuş yani camsı fazın artışı ile artan bağlanma özellikleri belirlenmiştir.

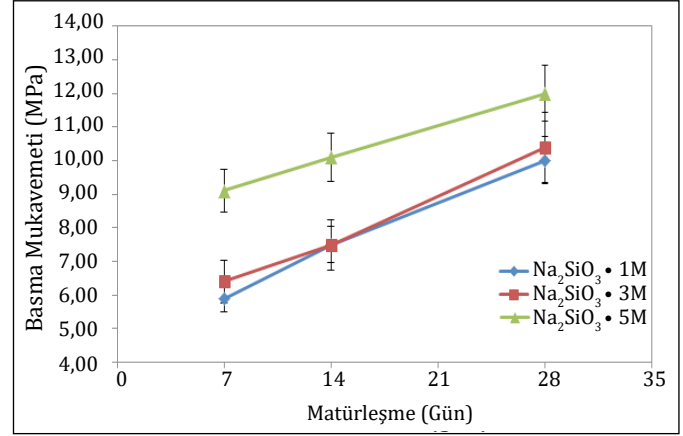
Artan Na_2SiO_3 molaritesi ile 950°C 'de sinterlenmiş yapının elementel değişiminin EDX analizi Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Artan Na_2SiO_3 molaritesi ile 950°C 'de sinterlenmiş yapının elementel değişiminin EDX analizi

Spektrum	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Toplam
1M Na_2SiO_3	61,27	0,33	1,41	3,14	7,48	23,87	2,5	100
3M Na_2SiO_3	59,83	0,76	1,12	2,68	8,01	25,57	2,03	100
5M Na_2SiO_3	59,8	1,28	1,42	2,69	10,48	22,46	1,87	100

Çizelge 2 incelendiğinde, artan Na_2SiO_3 miktarı ile Na ve Si elementlerinde görece artış, bunun yanında Ca ve Fe miktarlarında da görece azalış görüldüğü anlaşılmaktadır. Mg ve Al elementlerinde farklılık görülmemiştir, bu da bize eser miktarda olan elementlerin toplam orandan çok etkilenmediğini göstermektedir.

Uçucu külden üretilmiş jeopolimer yapıların 950°C 'de 1 saat sinterlenmesinden sonra yapılan basma mukavemeti sonuçlarının farklı alkali molaritelerine ve farklı matürleşme günlerine göre karşılaştırması Şekil 5'te verilmiştir.



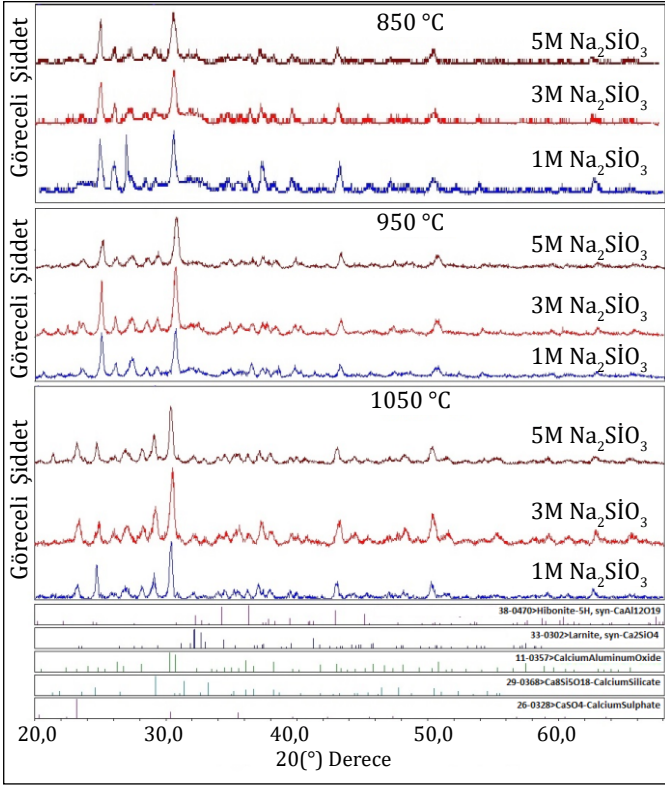
Şekil 5. Artan Na_2SiO_3 molaritesiyle 950°C 'de sinterlenmiş, malzemelerin mukavemetlerinin karşılaştırılması

Şekil 5'te artan matürleşme günü ve artan 5M'lık Na_2SiO_3 oranıyla tüm yapılarda mukavemet artmıştır. Bunun temel sebebinin de gözenek kapanması ve difüzyon artışı ile camsı yapının ve kristalliliğin artması olduğu düşünülebilir. Difüzyon artışı ile camsı fazın da tane sınırlarında viskozitesinin azalması, yapıların boyun oluşumu ile birlikte birbirine tutunabilirliğini arttırmış ve gözenekleri cam faz sayesinde elimine etmiştir.

Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş farklı molaritedeki uçucu kül yapıların faz analizi XRD deseni ile Şekil 6'da gösterilmiştir. Düşük sıcaklıkta molarite artmış olsa bile camsı faz oluşumu Na ve Si miktarı artışı ile süreklilik göstermiştir. Bu durum 30° 'ye hatta 35° 'ye kadar olan kambur şeklindeki yapıdır. Bununla birlikte, jeopolimerleşme esnasında bulunan amorf ve kristalin silikanın, yapıda farklı oksitlere difüze olarak yeni yapılar ve fazlar oluşturmuş olması da düşük şiddette bile olsa kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat yapılarının oluşmasını sağlamış olabilir. Bu tip yapılar düşük sıcaklık Ca-Si-O ve Ca-Al-O şeklinde farklı kristalliliğe sahiptir ve sıcaklık arttıkça bu tip yapıların birbirine farklı oranlarda dönüşmesi olasıdır.

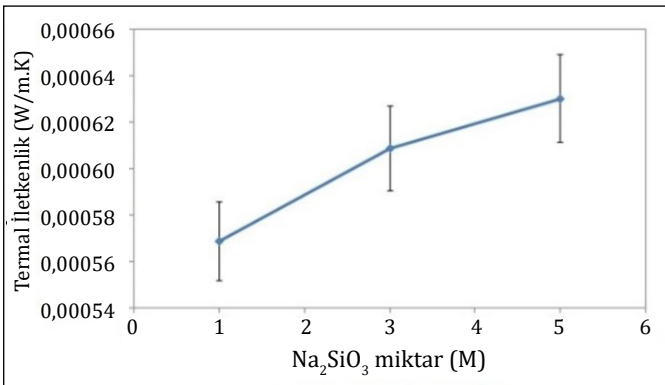
950°C 'de Şekil 6'da görülen XRD deseninde, düşük sıcaklıkta oluşan kalsiyum silikatların belli oranlarda kalsiyum alüminatlara dönüştüğü görülmüştür. Hibonit fazının düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklığa çıkarken azaldığı ve yerini düşük alüminalı, CaAl_2O_4 şeklindeki faza dönüştüğü belirlenmiştir. Yapıda hala dönüşmemiş olan CaSO_4 anhidrit fazının belirli oranda bulunduğu ve sinterlemeyi ve sülfatsızlaşmayı ve böylece mukavemetteki belirgin artışı durdurduğu düşünülmüştür.

1050°C 'de belirlenen fazlarda ise (Şekil 6), dönüşen ve farklı oksitlerle biraraya difüze olan silikanın Ca ve Al ile Ca-Si-O ve Al-Si, ayrıca Ca-Al-Si yapıları oluşturduğu da belirlenmiştir. Bu ve benzeri fazların artışı ve piklerin tabana inmesi, fazların kristalliliğinin arttığı ve sıvı fazın sadece tane sınırlarında ince bir şekilde kaldığını göstermesi açısından çok önemlidir.



Şekil 6. Farklı sıcaklık ve molaritelerde sinterlenmiş yapıların XRD analizi

Şekil 7’de 950°C’de sinterlenmiş yapıların termal iletkenliklerinin molariteye göre karşılaştırılması gösterilmiştir. Artan molarite ile artan mukavemetlerin gözenek kapanması ve hava veya boşluk içeren yapıların azalması nedeniyle olduğu öngörülmektedir. Bu nedenle artan molaritenin termal iletkenliği de katı yapının artışıyla birlikte arttığı görülse bile hala 0.0006 W/m.K gibi düşük bir değerle tercih edilebilir bir aday malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. 950°C’de sinterlenmiş yapının farklı molaritelerde termal iletkenlik grafiği

Sonuçlar

Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Farklı Na₂SiO₃ miktarlarında sadece uçucu kül kullanılarak jeopolimer yapılar 1 günlük kürlemeden sonra 28 günde 3-5 MPa basma mukavemetinde üretilmiştir. Bunun temel sebebinin ise, gözenek kapanması ile camı yapının oluşması ve puzolanik etkinin kristallığe yol açması olduğu düşünülmektedir.

2. Jeopolimerler üretildiğinde yarı amorf yarı kristal yapıda ve silika, kalsiyum hidroksit ve gismondin-gehlenit türü yapılara sahip olarak üretilmiştir. X ışınları analizinden de bu yapılar onaylanmıştır. Bu fazlar özellikle Ca(OH)₂ yapısı, portlandit şeklinde yapı malzemelerindeki temel puzolandır.

3. Üç farklı sıcaklıkta ve üç farklı molaritede sinterlenen yapıların SEM-XRD-basma ve termal iletkenlik değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre artan molarite ve sıcaklıkla hem gözeneklerin elimine edildiği, hem de kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminat tipi yapıların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak mukavemetin 10 MPa’ya kadar arttığı, termal iletkenliğin 0,006 W/m.K olarak belirlendiği görülmüştür. Sadece uçucu kül kullanıldığında bile maliyeti düşük ve yanal yüklere dayanabilen hem yapı malzemesi hem de kilit taşı gibi malzemelerin üretilmesinde önemli bir aday malzeme grubu olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

- Binici H., Aksogan, O., Çagatay, I.H., Tokyay, M., Emsen E. 2007. The effect of particle size distribution on the properties of blended cements incorporating ggbs and natural pozzolan (NP). Powder Technology, 177 (3), 140–147.
- Binici, H., Aksogan, O., Kaplan, H., Gorur, E.B., Bodur M.N. 2008. Performance of ground blast furnace slag (GBS) and ground basaltic pumice (GBP) concrete against seawater attack. Construction and Building Materials, 22, 1515–1526.
- Binici, H., Aksogan, O., Kaplan, H., Görur, E.B., Bodur, M.N. 2009. Hydro-abrasive erosion of concrete incorporating ground blast-furnace slag and ground basaltic pumice. Constructer Build Mater, 23, 804–11.
- Hodhod, O.A., Alharthy, S.E., Bakr, S.M. 2020. Physical and mechanical properties for metakaolin geopolymer bricks. Construction And Building Materials, 265, 1202-1217.
- Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., Sahmaran, M. 2021. Development of normal and very high strength geopolymer binders based on concrete waste at ambient environment. Journal Of Cleaner Production, 279, 1234-1236.
- Massazza, F. 2001. Pozzolana and pozzolanic cements. Lea’s Chemistry of Cement and Concrete, Butterworth-Heinemann, 471–636.
- Şaşmaz, A. Sağıroğlu A. 1994. Tutak Dağı Güneybatısındaki (Şebinkarahisar-Giresun) Pb-Zn yatakları. MTA Dergisi, 116, 51-64.
- Van Oss, H.G., Padovani A.C. 2003. Cement manufacture and the environment part ii: environmental challenges and opportunities. Journal of Industrial Ecology, 7(1), 93–126.
- Zhang, W., Zhang Y., Zhang, G. 2011. Single and multiple dynamic impacts behaviour of ultra-high performance cementitious composite. J Wuhan Univ. Technology-Materials Science Edition, 26 (6), 1227–1234.
- Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, G. 2012a. Continuously monitoring early hydration process of low water to binder ratio cementitious material at elevated temperatures using a newly developed non-contact resistivity measurement apparatus. Construction Build Mater, 33, 32–40.
- Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, G. 2012b. Static, dynamic mechanical properties and microstructure characteristics of ultra-high performance cementitious composite. Science and Engineering of Composite Materials, 19, 237–45.

