

Agrega türünün uçucu kül ve tuğla tozu esaslı geopolimer harç özelliklerine etkisi

Effect of aggregate type on fly ash- and brick powder-based geopolymer mortar properties

Merve TOKDEMİR¹ , Kambiz RAMYAR² , Adil GÜLTEKİN*³ 

¹Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 35040, İzmir

²Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir

³Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce

• Geliş tarihi / Received: 18.08.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 27.12.2023

Öz

Bu çalışmada, kum türünün uçucu kül ve atık tuğla tozu esaslı geopolimerlerin bazı özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda pomza agregası ve CEN standart kumu kullanılarak üretilen geopolimer harçların birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dirençleri incelenmiştir. Harçların üretilmesinde, defolu tuğlaların öğütülmesi ile elde edilen tuğla tozu, F sınıfı uçucu kül, sodyum silikat ve sodyum hidroksit; harçların kürlenmesinde ise laboratuvar tipi hava dolaşimli etüv ve ev tipi mikrodalga fırın kullanılmıştır. Etüv küründe, numuneler 48 saat boyunca 90°C’de kürlenirken mikrodalga küründe 300 watt güç seviyesinde, uçucu kül için 20 dakika, tuğla tozu için 30 dakika kürlenme yapılmıştır. Alüminosilikat ve agrega türünden bağımsız olarak, etüv kürü ile daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşıldığı, pomza agregası ile üretilen harçların basınç dayanımlarının, CEN kumu kullanılan harçlardan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, yüksek sıcaklık direnci bakımından mikrodalga kürünün daha avantajlı olduğu, etüv kürü ile üretilen harçların yüksek sıcaklık etkisi ile dayanım kaybı yaşadıkları ancak mikrodalga kürü uygulanan harçların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra basınç dayanımlarının genel olarak yükseldiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Geopolimer, Mikrodalga kürü, Pomza, Tuğla tozu, Yüksek sıcaklık direnci

Abstract

In this study the effect of aggregate type on some properties of fly ash- and waste brick powder-based geopolymers was investigated comparatively. In this context, unit weight, compressive strength, and high-temperature resistance of geopolymer mortars prepared with pumice aggregate and standard CEN sand were examined. In the preparation of mortars, the brick powder obtained by grinding waste bricks, Class F fly ash, sodium silicate and sodium hydroxide were used. A laboratory-type oven and a household microwave oven were used for curing. Oven and microwave curing were applied at 90°C for 48 hours and at 300-watt power level for 20 (for fly ash) or 30 (for brick powder) minutes, respectively. It was determined that the aggregate type significantly affects the geopolymer mortar properties. Regardless of the aluminosilicate and aggregate type, higher compressive strengths were achieved with oven curing, and the compressive strengths of the mortars produced with pumice aggregate were lower than those of the mortars prepared with CEN sand. On the other hand, microwave curing was more advantageous in terms of high-temperature resistance. Oven-cured mortars lost strength upon exposure to the high temperature, but the compressive strength of mortars subjected to the microwave curing generally increased after exposure to high temperatures.

Keywords: Geopolymer, Microwave curing, Pumice, Brick powder, High-temperature resistance

*Adil GÜLTEKİN; adilgultekin@duzce.edu.tr

1. Giriş

1.1. Introduction

Küresel ısınma kaynaklı iklim değişikliği, günümüzde en önemli çevre sorunlardan birisidir. Sera gazı emisyonu, küresel ısınmaya neden olan esas faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Karbondioksit ise sera gazlarının büyük bölümünü oluşturmaktadır. Çimento sektörünün, küresel CO₂ salımının %7-10'undan sorumlu olduğu düşünülmektedir (Moradikhou vd., 2020). Üretim tekniğine göre değişmekle birlikte, kireçtaşının kalsinasyonu ve kullanılan yakıt birlikte düşünüldüğünde, 1 ton Portland çimentosu için yaklaşık olarak 1 ton CO₂ salımı yapılmaktadır (Al Bakri vd., 2012). Son yıllarda birçok araştırmacı, Portland çimentosuna alternatif bağlayıcılar hakkında çeşitli araştırmalar yapmıştır. Bunlardan bir tanesi de geopolimerlerdir. Geopolimer üretiminde, alüminosilikat malzemeler ile aktivatör çözeltileri birlikte kullanılır ve oluşan reaksiyon, geopolimerizasyon olarak isimlendirilir (Soares vd., 2021). Geopolimerler, hızlı sertleşme ve dayanım kazanma, erken yüksek dayanım (Izquierdo vd., 2009); yüksek yangın, asit ve alkali direnci, düşük sünme ve rötre ve ucuzluk gibi özellikleri ile her geçen gün daha da ilgi çekmektedir (Dhasmana & Singh, 2023). Geopolimer üretiminde alüminosilikat olarak kaolin, metakaolin, dolomit gibi doğal hammaddelerin (Farhan vd., 2020) veya silis dumani, uçucu kül, kırmızı çamur, cüruf ve pirinç kabuğu külü gibi tarımsal/endüstriyel atıkların kullanılması mümkündür (Ren vd., 2021). Geopolimer üretiminde, sodyum silikat, potasyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi farklı alkali malzemeler kullanılmaktadır. Ancak sodyum silikat ve sodyum hidroksitin birlikte kullanımının, genellikle daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmasını sağladığı bildirilmiştir (Soares vd., 2021).

Geopolimer üretiminde ortam şartlarında kürlenme, su ve etüv kürü gibi farklı yöntemlerin kullanılması mümkün olsa da araştırmalar, etüv kürüne tabi tutulan geopolimerlerin erken yaş basınç dayanımlarının, havada ve suda kürlenene kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğunu, sıcaklık artışının geopolimer dayanımını arttırdığını göstermiştir (Sun vd., 2021). Buna göre, sıcaklık artışı ile birlikte alüminosilikatların çözünmesi ve geopolimer jelinin oluşumu hızlanmaktadır. Genellikle 60-120°C sıcaklıklarda uygulanan etüv kürlenmesinin geopolimerlerin erken yaş dayanımlarını arttırdığı bilinmektedir (Nawaz vd., 2020). Yüksek sıcaklık kürü, sadece mekanik özellikler değil durabilite özellikleri üzerinde de etkilidir. Yapılan çalışmalar, sıcaklık kürünün, yüksek sıcaklık ve asit direnci gibi konularda da olumlu etkilerinin olduğunu ortaya koymuştur (Zhang vd., 2020; Metekong vd., 2021).

Etüvde uygulanan geleneksel kürlenmede kür sürelerinin uzun olduğu, 6 saatten daha uzun kür sürelerinin üretim sürecini yavaşlattığı ve pratik olmadığı bilinmektedir. Yapılan araştırmalar, geopolimer üretiminde etüv kürü yerine alternatif bir yöntem olarak mikrodalga teknolojisinin kullanılabileceğini göstermiştir (Graytee vd., 2018). Mikrodalga kürlenmesi ile daha hızlı ve homojen bir ısıtma etkisi yaratılmakta (Chindaprasirt vd., 2013), daha homojen bir içyapı elde edilmekte, buna bağlı olarak da geopolimerlerin mekanik özellikleri gelişmektedir (Somaratna vd., 2010). Mikrodalga kürünün kısa sürelerde, yüksek basınç dayanımlarına sahip geopolimerlerin üretimine olanak sağlamasına rağmen bu konuda az sayıda çalışma yürütülmüştür. Khaleel vd. (2021), Durak (2021), Suwan vd. (2021), Guan vd. (2023), Shi vd. (2016) uçucu kül; El-Feky vd. (2020) yüksek fırın cürufu, Nadeem vd. (2020) doğal toprak, Shi vd. (2020) metakaolin, Hong ve Kim (2019) taban külü, Tan vd. (2020) metakaolin ve geri dönüştürülmüş agrega tozu, Kastiukas vd. (2020) ise uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı-mikrodalga kürlü geopolimer/alkali aktive malzemeler üzerinde çalışmıştır. Tüm bu çalışmalar, mikrodalga kürünün geopolimer üretiminde alternatif bir kür yöntemi olabileceğini göstermiştir. Konu hakkındaki çalışmaların önemli bir kısmının uçucu külle yapıldığı, geriye kalan çalışmaların ise genellikle yüksek fırın cürufu ve metakaolin üzerinde yoğunlaştığı, atık tuğlalardan elde edilen atık tuğla tozu esaslı geopolimerlerin mikrodalga küründeki performansının göz ardı edildiği tespit edilmiştir.

Agregalar, betonun hacimce yaklaşık olarak %75'ini oluşturmakta olup dayanım ve durabilite özelliklerine önemli derecede etki etmektedir (Erdoğan, 2021). Beton üretiminde agrega olarak kireçtaşı, bazalt, andezit, ve granit gibi agregaların kullanılması mümkündür (Neville, 2011). Yüksek sıcaklıklara maruz kalacak betonlarda, kullanılan agreganın mineralojik bileşiminin de dikkate alınması önerilmektedir. Silis, dolomit ve bazalt gibi agrega türlerinin yüksek sıcaklıklarda çeşitli kimyasal ve fiziksel dönüşümlere uğraması buna örnek gösterilebilir (Medeiros vd., 2023). Pomza, genişletilmiş perlit ve kil keramzit gibi hafif agregaların yüksek sıcaklığa karşı iyi bir dirence sahip oldukları bilinmektedir (He vd., 2016). Ayrıca hafif agregaların yüksek poroziteye sahip olmaları, bu malzeme ile üretilen betonların da ağırlıklarını azaltmaktadır. En yaygın kullanılan hafif agregalardan biri olan pomza, açık renkli, volkanik kökenli bir malzeme olup 500-900 kg/m³

aralığında yığın yoğunluğa sahiptir. Pomzanın betonda kullanımı Roma İmparatorluğu dönemine kadar uzanmaktadır (Neville, 2011).

Bu çalışmada agrega türünün, etüv ve mikrodalga kürü kullanılarak üretilen uçucu kül ve atık tuğla tozu esaslı geopolimer harçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, pomza agregası kullanılarak, CEN standart kumyla üretilen geleneksel geopolimer harçlardan daha düşük birim hacim ağırlık (BHA) değerlerine sahip harçlar üretilmiş; bunların basınç dayanımları, yüksek sıcaklık dirençleri ve ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiş ve birbiriyle kıyaslanmıştır. Kürlemede etüv kürü veya mikrodalga kürü kullanılmış, mikrodalga kürünün üretim hızı, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Materyal

2.1.1. Material

Çalışmada alüminosilikat olarak İzmir’de faaliyet gösteren İzdemir Enerji Termik Santrali’nden temin edilen F sınıfı uçucu kül ve defolu tuğlaların kırılarak öğütülmesi ile elde edilen tuğla tozu kullanılmıştır. Tuğla tozunun üretilmesi aşamasında, defolu tuğlalar çeneli kırıcıda kırılarak boyutları küçültülmüş, devamında bu parçalar gezege hareketli bilyeli öğütücüde 500 rpm’de 4 dakika öğütülmüştür. Uçucu kül ve tuğla tozuna ait kimyasal bileşim ile bazı fiziksel özellikler Tablo 1’de, SEM görüntüleri ise Şekil 1’de sunulmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde uçucu külün farklı boyutlardaki küresel taneciklerden, tuğla tozunun ise açısız ve köşeli parçacıklardan oluştuğu görülmektedir.

Aktivatör çözeltisi, %98 saflığa sahip pelet şeklindeki sodyum hidroksit ve %10 Na₂O, %23.2 SiO₂ ve %66.8 H₂O içeren sodyum silikat çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit peletleri, sodyum silikat çözeltisi içerisinde karıştırma yöntemi ile çözündürülmüş ve elde edilen çözelti 24 saat dinlendirildikten sonra kullanılmıştır. Pomza agregası ile yapılan denemelerde, uçucu kül esaslı harçlar için en yüksek basınç dayanımlarının 1.50 Ms oranı (aktivatör çözeltisindeki SiO₂’nin Na₂O’ya ağırlıkça oranı) ve %10 Na₂O (aktivatör çözeltisindeki Na₂O’nun alüminosilikata ağırlıkça oranı) içeriği ile elde edildiği belirlenmiştir. Tuğla tozu esaslı karışımlarda ise bu değerler etüv ve mikrodalga kürü için sırasıyla 1.75 Ms-%10 Na₂O ve 1.50 Ms-%10 Na₂O’dur. Pomza agregası ile yapılan denemelerle belirlenen bu aktivatör parametreleri kullanılarak CEN standart kumu içeren karışımlar da hazırlanmış ve bunlar agrega türünün etkisinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

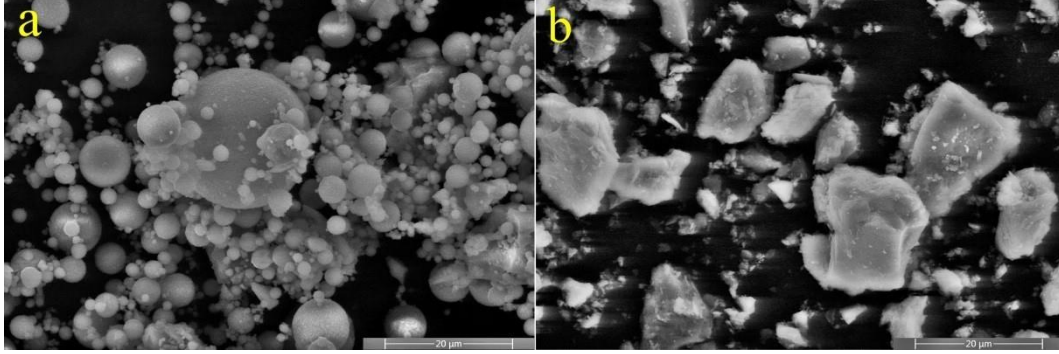
Harç karışımlarının üretilmesinde agrega olarak gradasyonu Şekil 2’de verilen, 2.20 özgül ağırlık ve %2.29 su emme kapasitesine sahip pomza agregası ve özgül ağırlığı 2.60 olan CEN standart kumu, su olarak ise Bomova şehir şebekesi suyu kullanılmıştır. Pomza agregası kuru yüzey-doygun durumda, CEN kumu ise su emme kapasitesinin çok düşük olmasından dolayı (~%0.15) temin edildiği biçimde (1350 g olarak poşetlenmiş) kullanılmıştır.

Tablo 1. Alüminosilikatlara ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler
Table 1. Chemical composition and some physical properties of aluminosilicates

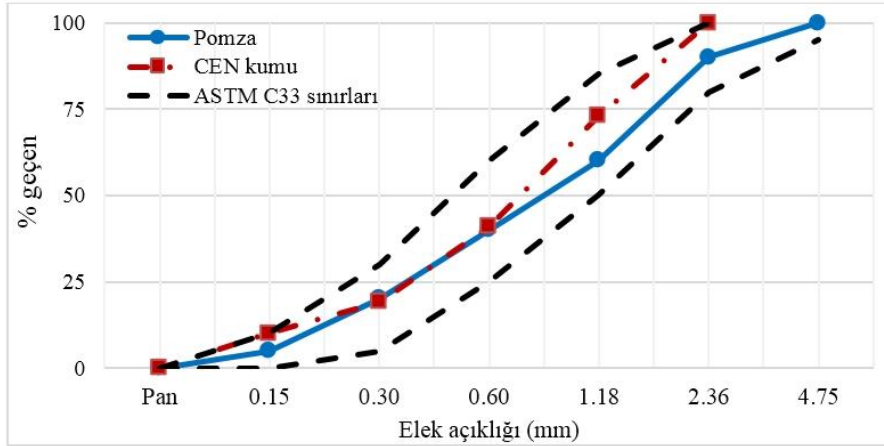
Bileşen	F sınıfı uçucu kül (%)	Atık tuğla tozu (%)
SiO ₂	52.15	66.42
Al ₂ O ₃	23.97	15.74
CaO	5.23	3.28
Fe ₂ O ₃	9.84	6.25
MgO	2.43	2.76
SO ₃	0.35	0.22
Na ₂ O	1.64	0.45
K ₂ O	2.10	2.94
P ₂ O ₅	0.51	-

Tablo 1. Devamı Alüminosilikatlara ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler
Table 1. Continue Chemical composition and some physical properties of aluminosilicates

Bileşen	F sınıfı uçucu kül (%)	Atık tuğla tozu (%)
Kızdırma kaybı(%)	1.30	1.04
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık	2.41	2.72
45 µm elek bakiyesi (%)	14.3	8.65



Şekil 1. Alüminosilikatlara ait SEM görüntüleri (a) uçucu kül ve (b) öğütülmüş tuğla tozu
Figure 1. SEM micrographs of aluminosilicates (a) fly ash and (b) ground brick powder



Şekil 2. Agrega gradasyonları
Figure 2. Gradations of aggregates

2.2. Metot

2.2. Method

2.2.1. Karışımların hazırlanması

2.2.1. Preparation of mixtures

Çalışma kapsamında üretilen karışımlar otomatik harç mikserinde hazırlanmıştır. Sırasıyla kum, alüminosilikat malzeme, aktivatör çözeltisi ve su (karışımda var ise) 0.1 g hassasiyetli tartı ile tartılarak mikser kabına koyulmuştur. Mikser 90 saniye boyunca 60 rpm'de çalıştırılmış sonrasında kabın çeperine yapışan malzemeler yaklaşık 10 saniyede sıyrılmıştır. Devamında malzemeler 90 saniye boyunca 120 rpm'de karıştırılmıştır. Sürenin bitiminde harçların yayılma çapları TS EN 459-2'ye uygun olarak belirlenmiştir.

Basınç dayanımı, birim hacim ağırlık ve yüksek sıcaklık dirençlerinin tespit edilmesinde 50 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. Yayılma çaplarının belirlenmesinin hemen ardından karışımlar 2 tabaka halinde

kalıplara yerleştirilmiş ve her tabaka sarsma tablasında 25 düşüşle sıkıştırılmıştır. Devamında harçların üst yüzeyleri bir spatula yardımıyla düzeltilmiş ve kürlenme işlemine geçilmiştir.

2.2.2. Kürlenme

2.2.2. Curing

Çalışma kapsamında etüv ve mikrodalga olmak üzere iki farklı kür yöntemi kullanılmıştır. Etüv kürü, hava dolaşimli laboratuvar tipi etüvde, mikrodalga kürü ise maksimum çıkış gücü 800 watt olan ev tipi mikrodalga fırında gerçekleştirilmiştir. Etüv küründe, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri tamamlanan harçlar, kalıpları ile birlikte etüve yerleştirilmiş ve 48 saat boyunca 90°C'de kürlenmiştir. Bu sürenin sonunda kalıplar etüvden alınmış, numune sıcaklıkları oda sıcaklığına ulaşınca kadar laboratuvar ortamında bekletilmiş, oda sıcaklığına ulaşan numuneler kalıptan çıkartılmıştır.

Mikrodalga kürü uygulanan numunelerin teknik olarak kalıpları ile fırına yerleştirilmesi mümkün olmadığından bu numuneler mikrodalga fırında kürlenmeden önce, prizini tamamlayana ve kalıptan alınabilecek duruma gelene kadar etüvde ön kürlenmeye tabi tutulmuştur. Mikrodalga fırınların çalışma prensibinde su önemli bir yere sahip olduğundan ön kürlenme yapılacak numuneler etüve yerleştirilmeden önce, yüksek sıcaklığa dayanıklı fırın torbaları ile kaplanmış ve ön kürlenme bu biçimde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Ön kürlenme süresi, deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiş olup bu sürenin uçucu kül esaslı harçlarda 2 saat, tuğla tozu esaslı harçlarda ise 3 saat olduğu tespit edilmiştir. Ön kürlenmede, numunelerin sadece kalıptan alınabilecek duruma gelmeleri amaçlanmış olup, bu işlemin sonunda numunelerin basınç dayanımlarının yaklaşık olarak 2-3 MPa olduğu belirlenmiştir. Ön kürü tamamlanarak kalıptan çıkarılan numuneler, mikrodalga fırınının döner tablasına yerleştirilmiş ve 300 watt güç seviyesinde kürlenmiştir. Kür sürelerinin sonunda numuneler fırından çıkarılmış ve ortam sıcaklığına ulaşınca kadar laboratuvar şartlarında bekletilmiştir. Yapılan ön denemelerde mikrodalga kürüne tabi tutulan uçucu kül ve tuğla tozu esaslı karışımlar için en uygun kür sürelerinin sırasıyla 20 ve 30 dakika olduğu tespit edildiğinden çalışmada bu süreler kullanılmıştır.



Şekil 3. Mikrodalga kürünün uygulama aşamaları (a) fırın torbasına sarılı taze harçlar, (b) etüv ön kürlenmesi ve (c) ön kürlenmesi tamamlanan harçların mikrodalga döner tablasına yerleşimleri

Figure 3. Stages of microwave curing (a) wrapped fresh mortars with oven bag, (b) oven pre-treatment and (c) mortars on microwave turntable after oven pre-treatment

2.2.3. Basınç dayanımının belirlenmesi

2.2.3. Compressive strength

Basınç dayanımlarının belirlenmesinde 2000 kN kapasiteli pres kullanılmış olup yükleme hızı 0.9 kN/s'dir. Her seriden en az üç adet numune deneye tabi tutulmuş ve bunların ortalaması basınç dayanımı olarak kaydedilmiştir.

2.2.4. SEM incelemeleri

2.2.4. SEM investigations

SEM incelemeleri, Ege Üniversitesi Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, "Thermo Scientific Apreo S" marka ve model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, incelemeye tabi tutulmadan önce kaplama cihazı kullanılarak altın-paladyum film tabakası ile kaplanmıştır. Reaksiyon ürünlerinin morfolojilerinin tespit edilebilmesi amacıyla tüm incelemeler hamur numuneler üzerinde yapılmış olup hamurlar, harç karışımları ile aynı malzeme ve yöntemler ile üretilmiş, yalnızca kum kullanılmamıştır.

2.2.5. Yüksek sıcaklık direnci

2.2.5. High-temperature resistance

Yüksek sıcaklık direnci, 1000°C yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değişiklikleri incelenerek belirlenmiştir. Bu kapsamda laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır. Fırının sıcaklık artış hızı yaklaşık olarak 20°C/dakika iken hedef sıcaklıktaki yakma süresi 3 saattir. Süre sonunda fırın kapatılmış, numunelerin fırın içinde soğumaları beklenmiş, oda sıcaklığına soğuyan numuneler basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneylerine tabi tutulmuştur.

2.2.6. Ultrases geçiş hızı ölçümleri

2.2.6. Ultrasonic pulse velocity

Ultrases geçiş hızı ölçümleri, Proceq marka cihaz kullanılarak, 50 mm ayrıtlı küp harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler yapılırken, döküm yönüne göre yanlarda kalan pürüzsüz yüzeyler kullanılmıştır.

2.2.7. Karışımlar

2.2.7. Mixtures

Çalışma kapsamında üretilen karışımlara ait malzeme miktarları ve yayılma çapları Tablo 2'de gösterilmiştir. Harçlar üretilirken, karışımların kalıplara rahat bir şekilde yerleştirilebilmesi amaçlanmıştır. Uçucu kül esaslı karışımlarda aktivatör çözeltisinde bulunan su, işlenebilirlik için yeterli gelmiş olup ilave su kullanılması gerekmemiştir. Ancak tuğla tozu esaslı üç karışımda, yerleştirme ve sıkıştırma sorunlarının ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu nedenle bu üç karışıma farklı oranlarda su ilavesi yapılmıştır. Tuğla tozu parçacıklarının pürüzlü yüzeyli, köşeli ve açısız tanelerden oluşmasının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Belirtilen karışım oranlarına sahip harçlarda herhangi bir yerleştirme ve sıkıştırma sorunu yaşanmamıştır.

Tablo 2. Harç karışımlarına ait malzeme miktarları ve yayılma çapları

Table 2. Ingredients and flow diameters of mixtures

Agrega türü	Alümino-silikat	Ms oranı	Na ₂ O (%)	Kür tipi	Kür rejimi	Alümino-silikat	Malzeme miktarı (g)			Yayılma çapı (mm)	
							Agrega Pomza	Agrega CEN kumu	Aktivatör çözeltisi		
Pomza					90°C	450	1350	-	311.5	-	155
CEN kumu	Uçucu kül	1.50	10	Etüv	48 saat	450	-	1350	311.5	-	230
Pomza				Mikro-	300 watt	450	1350	-	311.5	-	155
CEN kumu				dalga	20 dakika	450	-	1350	311.5	-	230

Tablo 2. (Devamı) Harç karışımlarına ait malzeme miktarları ve yayılma çapları
Table 2. (Continue) Ingredients and flow diameters of mixtures

Agrega türü	Alümino-silikat	Ms oranı	Na ₂ O (%)	Kür tipi	Kür rejimi	Alümino-silikat	Malzeme miktarı (g)		Aktivatör çözeltilisi	İlave su	Yayılma çapı (mm)
							Pomza	Agrega CEN kumu			
Pomza		1.75		Etüv	90°C	450	1350	-	353.7	20	134
CEN kumu	Tuğla tozu		10		48 saat	450	-	1350	353.7	-	145
Pomza		1.50		Mikro-dalga	300 watt	450	1350	-	311.5	50	135
CEN kumu					30 dakika	450	-	1350	311.5	20	140

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Birim hacim ağırlık değerleri

3.1. Unit weights

Çalışma kapsamında üretilen harçların taze BHA'ları ile kütleme sonrasındaki BHA değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Hem uçucu kül hem de tuğla tozu esaslı karışımlarda, pomza agregası ile üretilen harçların BHA değerlerinin beklenildiği üzere CEN standart kumu ile üretilen harçlardan daha düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Bu durum pomza agregasının özgül ağırlığının, standart CEN kumundan daha düşük seviyelerde olmasından kaynaklanmakta olup CEN kumu ile üretilen uçucu kül esaslı harçtaki taze BHA değer artışı %7.6'dır. Tuğla tozu esaslı harçlarda ise bu değerler 1.50 ve 1.75 Ms oranlı karışımlar için sırasıyla %6.7 ve %7.8'dir.

Aynı agregat türü ile üretilen harçlarda, alüminosilikat malzemenin BHA değerine etkisi incelendiğinde, uçucu kül ile üretilen harçların BHA değerlerinin, tuğla tozu esaslı harçlardan bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Beklenildiği üzere kütleme sonrasında BHA değerlerinde suyun buharlaşmasından kaynaklı olarak düşüşler görülmüştür. Genel anlamda mikrodalga kürüne tabi tutulan numunelerdeki ağırlık kayıpları, etüv küründekinden daha yüksektir. Buna farklı etkenlerin sebep olduğu düşünülmektedir. Öncelikle etüv küründe numuneler kalıpları ile birlikte kürlenmiş olup bu durum numuneden buharlaşan su miktarını azaltmıştır. İkinci bir etken ise mikrodalga küründe, etüv küründen daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmasıdır. Bunlara ek olarak etüv kürü ile üretilen numunelerin daha yoğun bir yapıya sahip olması, bu nedenle de suyun buharlaşabileceği açık boşluk miktarının azalmasının da durum üzerinde belirli bir seviyede etkili olduğu tahmin edilmektedir.

Tablo 3. Harçların BHA değerleri

Table 3. Unit weights of mortar mixtures

Alümino-silikat	Ms oranı	Kür tipi	Agrega türü	Taze BHA (kg/m ³)	Kür sonrası BHA (kg/m ³)	BHA azalış oranı (%)
Uçucu kül	1.50	Etüv	Pomza	2166	2115	2.4
			CEN kumu	2330	2269	2.6
	1.50	Mikrodalga	Pomza	2166	2105	2.8
			CEN kumu	2330	2220	4.7
Tuğla tozu	1.75	Etüv	Pomza	2126	1973	7.2
			CEN kumu	2292	2203	3.9
	1.50	Mikrodalga	Pomza	2150	1986	7.6
			CEN kumu	2294	2190	4.5

3.2. Basınç dayanımı

3.2. Compressive strength

Çalışma kapsamında farklı kür yöntemleri ile üretilen harçlara ait basınç dayanımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde agrega ve alüminosilikat türünden bağımsız olarak tüm serilerde, etüv kürlemesinin daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmasını sağladığı görülmektedir. Etüv kürüyle, pomza ve CEN kumu kullanılarak üretilen uçucu kül esaslı harçlarda, mikrodalga kürüne kıyasla %66 ve %82 daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Tuğla tozu esaslı harçlarda ise bu değerler sırasıyla %76 ve %61'dir.

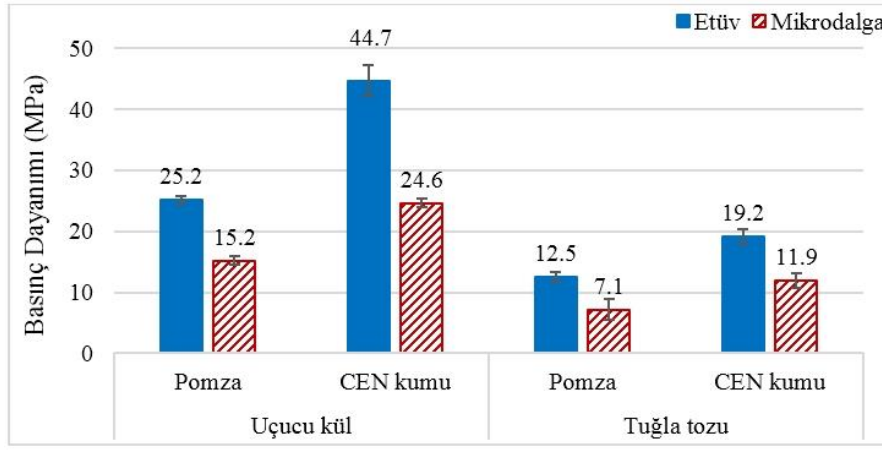
Alüminosilikat türünün basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise tüm serilerde, uçucu kül esaslı harçların basınç dayanımlarının, aynı agrega türü ve kür yöntemiyle üretilen tuğla tozu esaslı harçlardan daha yüksek seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Etüv kürüyle üretilen uçucu kül esaslı harçların basınç dayanımları, pomza ve CEN kumu kullanılan serilerde, tuğla tozu esaslı harçlardan sırasıyla %102 ve %133 daha yüksek iken bu değerler mikrodalga kürüyle üretilen harçlarda %114 ve %107'dir.

Tüm serilerde en yüksek basınç dayanımı değerine uçucu kül esaslı-etüv kürü ile üretilen ve CEN kumu içeren karışımda 44.7 MPa ile ulaşılmışken, en yüksek basınç dayanımına sahip mikrodalga kürlü karışım 24.6 MPa ile CEN kumu içeren uçucu kül esaslı harçtır. Etüv küründe daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılması, bu çalışmadaki karışımlar ve kür rejimleri dikkate alındığında, etüv küründe alüminosilikatların çözünürlüklerinin muhtemelen daha yüksek olması ve daha fazla miktarda jelin oluşmasından kaynaklanmaktadır. [El-Feky vd. \(2020\)](#), mikrodalga kürü sırasında, artan kür süresinin, numunedeki suyun buharlaşma hızını arttıracak ve bunun da reaksiyonların devamı için gereken suyun azalmasına neden olarak geopolimerizasyonu olumsuz etkileyebileceğini belirtmiştir. Benzer bir çalışmada [Graytee vd. \(2018\)](#) mikrodalga kürü ile geopolimer üretimi sırasında suyun hızlı bir şekilde buharlaşmasının boşluk miktarını arttıracak ve bunun da bir iç gerilme yaratarak mikroçatlak ve dayanım düşüşlerine neden olabileceğini ifade etmiştir. Bu çalışmada mikrodalga küründe, etüv küründen daha yüksek sıcaklıklara çıkılmasının, mikrodalga kürüne tabi tutulan serilerde bulunan suyun daha hızlı bir şekilde buharlaşmasına neden olduğu ve bunun da dayanımı olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

Tuğla tozunun, alkali aktivasyon sırasındaki etkinliği, parçacık boyutu, amorf faz miktarı, aktivatör dozajı ve bileşimi, kür sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu aşamada rol oynayan diğer etkenler ise tuğla üretim sürecinde kullanılan hammadde ve pişirme sıcaklığıdır ([Rovnanik vd., 2018](#)). Yapılan çalışmalar geri dönüştürülmüş tuğla tozunun reaktivitesinin, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi puzolanik malzemelerden daha düşük seviyelerde olduğunu ortaya koymuştur ([Ye vd., 2022](#)).

Atık tuğla tozu esaslı geopolimerlerin basınç dayanımlarının, geopolimer üretiminde sıklıkla kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi alüminosilikatlarınkine daha yakın değerler alabilmesi için, bu malzemelerle üretilen geopolimer kompozitlerden daha uzun kür sürelerine ihtiyaç duyduğu da bilinmektedir. Örneğin [Reig vd. \(2013\)](#) atık tuğla tozu kullanılarak üretilen ve 0.45 su/bağlayıcı oranına sahip alkali aktive harçların, 7 gün boyunca 65°C sıcaklıkta kürlenmesi ile yaklaşık olarak 30 MPa basınç dayanımına ulaşabildiğini raporlamıştır. Benzer şekilde [Tuyan vd. \(2018\)](#) Na₂O içeriği, Ms oranı, kür rejimi ve su/bağlayıcı oranının, atık tuğla tozu esaslı geopolimer harçların özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve çalışma kapsamında elde edilen en yüksek basınç dayanımı olan 36.2 MPa için 5 gün-90°C kür rejiminin kullanılması gerektiğini belirlemiştir. Sunulan bu çalışmada, tuğla tozu esaslı harçların, uçucu kül esaslı harçlardan daha düşük basınç dayanımlarına sahip olmasının, tuğla tozunun reaktivitesinin uçucu külden daha düşük olmasından ileri geldiği düşünülmektedir.

Aynı alüminosilikat ve kür türü kullanılarak üretilen harçlarda, kum türünün basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, CEN kumu kullanılan serilerin dayanımlarının, pomza kullanılan serilerinkinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun ise CEN kumunun en büyük tane boyutunun pomza agregasından daha düşük olması ve pomza agregasının boşluklu yapısı nedeniyle daha zayıf karakterde olmasından kaynaklanmaktadır.



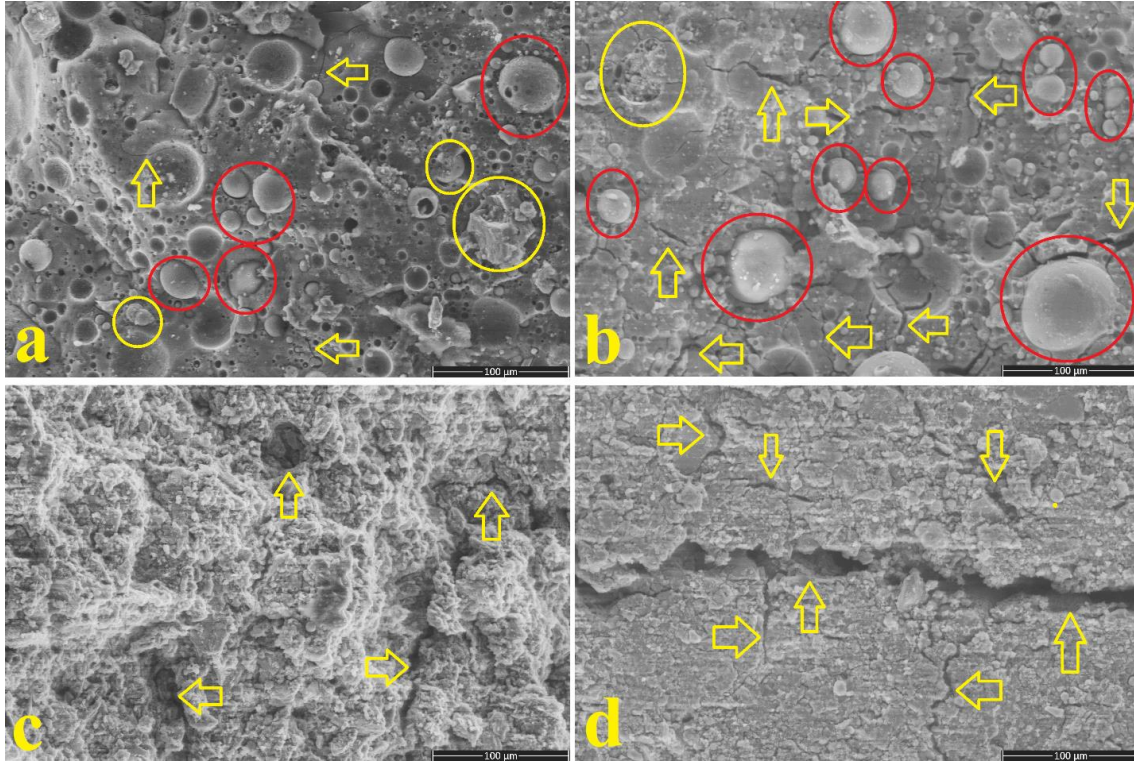
Şekil 4. Harç numunelerin basınç dayanımları
Figure 4. Compressive strengths of mortars

3.3. SEM incelemeleri

3.3. SEM investigations

Çalışma kapsamında üretilen geopolimer hamurların SEM görüntüleri Şekil 5'te sunulmuştur. Reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş tanecikler sırasıyla kırmızı ve sarı çemberlerle gösterilmişken, çatlak ve boşluklar sarı oklarla işaretlenmiştir. Uçucu kül esaslı hamurların, tuğla tozu esaslı hamurlardan daha yoğun yapıda oldukları belirlenmiş olup, aralarındaki dayanım farkının da bundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Etüv kürü ile üretilen uçucu kül esaslı hamur incelendiğinde yapıda reaksiyona girmemiş veya kısmen reaksiyona girmiş tanecikler ile bazı boşluk ve çatlakların yer aldığı görülmektedir. Mevcut çatlakların bir kısmının, numunenin hazırlanması sırasında oluştuğu tahmin edilmektedir. Mikrodalga kürü ile üretilen uçucu kül esaslı hamurun içyapısı, etüv kürü ile üretilen numuneye benzemekle birlikte daha fazla sayıda reaksiyona girmemiş tanecik ve daha geniş ve derin çatlaklar içermektedir. Bu çatlak ve boşluklar nedeniyle mikrodalga kürü ile üretilen harçların basınç dayanımları, etüv kürü ile üretilenlerden daha düşük seviyededir. Uçucu kül esaslı hamurlara benzer şekilde, mikrodalga kürü ile üretilen tuğla tozu esaslı hamur, etüv küründe üretilenden daha fazla sayıda ve daha geniş/derin çatlaklar içermektedir. Bu da mikrodalga kürü, tuğla tozu esaslı harcın basınç dayanımının, etüv küründe üretilenden daha düşük olmasına neden olmaktadır.

Farklı alüminosilikatların farklı aktivatörlerle birlikte kullanılması sonucunda üretilen geopolimer kompozitlerin dayanım-mikroyapı ilişkisi çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. [Duxson vd. \(2005\)](#) farklı Si/Al (1.15, 1.40, 1.65, 1.90 ve 2.15) oranlarına sahip metakaolin esaslı geopolimer hamurların içyapısını incelemiş ve içyapının dayanım üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmacılar Si/Al oranının basınç dayanımı açısından optimum değer olan 1.90'a kadar yükselmesi ile daha homojen, daha az boşluk ve daha az çatlak içeren bir matris elde edildiğini, bunun da dayanım üzerinde olumlu etkisinin olduğunu vurgulamıştır. [Shi vd. \(2016\)](#) aynı süre ve sıcaklıklarda kürlenmiş uçucu kül esaslı geopolimerlerde kür tipinin içyapı ve dayanım üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmada mikrodalga ve etüv kürü ile üretilen hamurların SEM görüntüleri ve basınç dayanımları ele alınmış, daha az boşluklu içyapıya sahip mikrodalga kürü numunenin, daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu vurgulanmıştır. Benzer bir çalışmada [Somaratna vd. \(2010\)](#) uçucu kül esaslı geopolimerlerin SEM görüntülerini incelemiş ve mikrodalga kür süresinin artışı ile daha fazla sayıda uçucu kül taneciğinin reaksiyona katılarak daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmasını sağladığını ve bu durumun da SEM görüntüleri ile kanıtlandığını raporlamıştır. Sunulan bu çalışmada da, etüv kürü ve mikrodalga kürü ile üretilen uçucu kül ve tuğla tozu esaslı geopolimer hamurlardan, içyapısı daha yoğun ve homojen olan, daha az sayıda çatlak içerenlerin daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu belirlenmiştir.



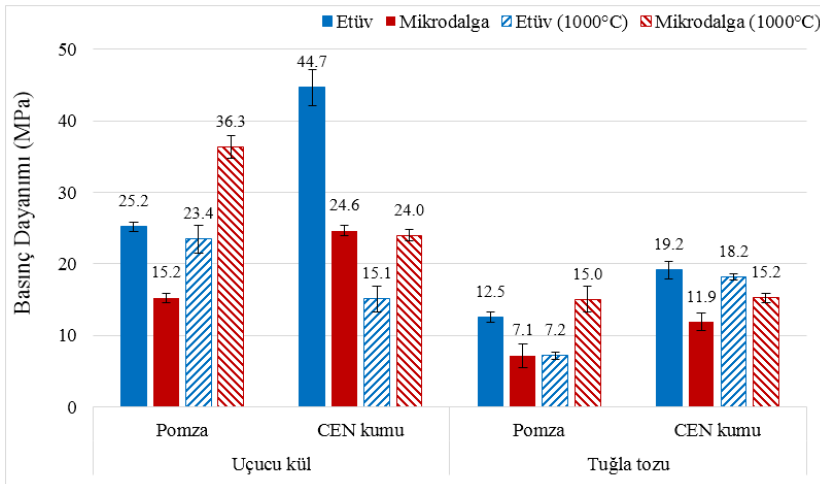
Şekil 5. Hamurlara ait SEM görüntüleri (a) etüvde kürlenmiş uçucu kül esaslı, (b) mikrodalgada kürlenmiş uçucu kül esaslı, (c) etüvde kürlenmiş tuğla tozu esaslı ve (d) mikrodalgada kürlenmiş tuğla tozu esaslı

Figure 5. SEM images of paste specimens (a) oven-cured fly ash-based, (b) microwave-cured fly ash-based, (c) oven-cured brick powder-based and (d) microwave-cured brick powder-based

3.4. Yüksek sıcaklık direnci

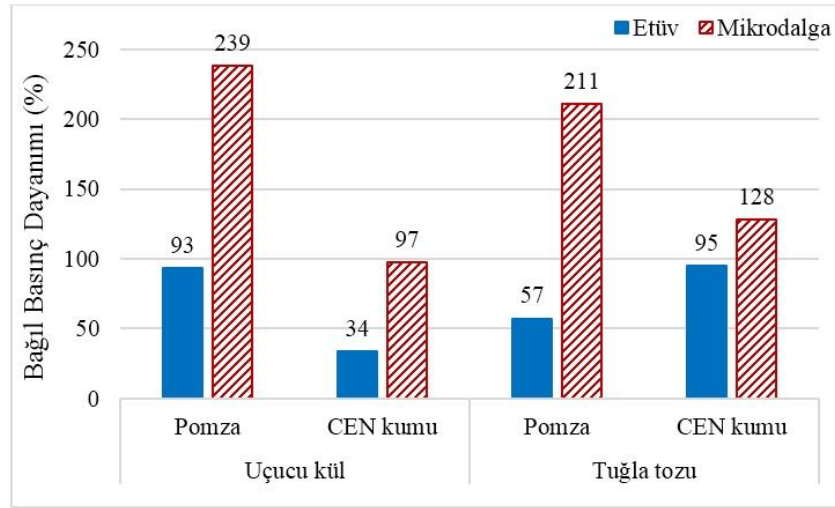
3.4. High-temperature resistance

Çalışma kapsamında üretildikten sonra 1000°C'ye maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ve yüksek sıcaklık öncesindeki durumlarına oranla bağlı dayanımları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde etüv kuru ile üretilen tüm serilerde, yüksek sıcaklığın basınç dayanımlarında azalmalara neden olduğu, mikrodalga kuru ise bu durumun tam tersinin görüldüğü belirlenmiştir. Pomza agregası kullanılarak, mikrodalga kuru ile üretilen uçucu kül ve tuğla tozu esaslı karışımların basınç dayanımları, yüksek sıcaklık etkisi sonrasında %139 ve %111 oranında artmıştır. Ayrıca aynı kuru tipi ve alüminosilikat türü ile üretilen harçlarda, genellikle pomza agregası kullanımının yüksek sıcaklık etkisiyle ya da daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmasını sağladığı ya da daha düşük seviyedeki basınç dayanımı kayıplarına neden olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Yüksek sıcaklığın basınç dayanımına etkisi

Figure 6. Effect of high-temperature curing on compressive strength



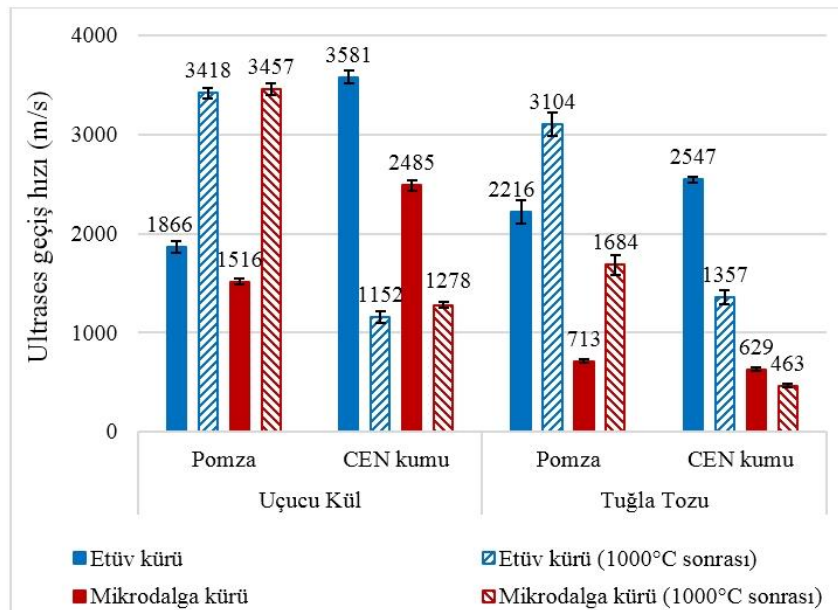
Şekil 7. Numunelerin bağıl basınç dayanımları
Figure 7. Relative compressive strengths

3.5. Ultrases geçiş hızı

3.5. Ultrasonic pulse velocity

Çalışma kapsamında üretilen harçların yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve sonraki ultrases geçiş hızları Şekil 8’de gösterilmiştir. Kür türü ve alüminosilikat türünden bağımsız olarak pomza agregası içeren harçların ultrases geçiş hızlarının, yüksek sıcaklık etkisinden sonra yükseldiği, CEN kumu içeren harçlarda ise bu durumun tam tersinin geçerli olduğu belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisinden sonra ultrases geçiş hızının artması ve bazı karışımlarda dayanım artışı görülmesi, matriste filler etkisi gösterecek yeni kristal yapıların oluşması ve/veya matriste densifikasyonun görülmesinden kaynaklanabilir. Farklı alüminosilikat ve farklı aktivatörler kullanılarak üretilen geopolimerlerin yüksek sıcaklık direnci üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. [Payakaniti vd. \(2020\)](#) uçucu kül esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklık direncini incelemiş ve 800°C’ye maruz bırakılan numunelerde yeni zeolit ve nefelin piklerinin ortaya çıktığını, sıcaklık artışı ile bunların XRD pik şiddetlerinin arttığını; yeni ortaya çıkan bu ürünlerin dayanım artışına yol açabileceğini belirtmiştir. Araştırmacı ayrıca yüksek sıcaklık etkisiyle görülen dayanım artışlarının bir nedeninin de devam eden geopolimerizasyon olduğunu vurgulamıştır.



Şekil 8. Harç numunelerin ultrases geçiş hızları
Figure 8. Ultrasonic pulse velocities of mortar specimens

Tiffo vd. (2020) de benzer bir çalışma yürütmüş, alüminyum hidroksit ve alüminyum oksihidroksit ikamesi içeren kaolin esaslı geopolimerlerde, yüksek sıcaklık etkisiyle ortaya çıkan dayanım artışlarının yeni oluşan kristal fazlardan ve densifikasyondan kaynaklandığını ifade etmiştir. Cheng-Yong vd. (2017) ise bir tanesi geopolimer hamur, diğeri geopolimer köpük hamur olmak üzere iki farklı uçucu kül esaslı geopolimerin yüksek sıcaklık direncini incelemiş ve 800°C etkisinden sonra köpük hamurun, geopolimer hamurdan daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olduğunu vurgulamıştır. Bunun nedeni olarak ise geopolimer hamurda yeni oluşan kristal fazların iç gerilmelere sebep olması ancak köpük hamurda yeni oluşan kristal fazların boşluklara ilerleyebilmesi ve burada filler etkisi yaratması gösterilmiştir. Sunulan bu çalışmada mikrodalga kürüyle üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisiyle dayanım kaybı yaşamadıkları, hatta bazı karışımlarda ciddi oranlarda dayanım kazandıkları görülmüştür. Bu etkinin pomza agregası içeren harçlarda çok daha net olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bunun sebebinin pomza agregası içeren harçların daha boşluklu olması ve yeni oluşan kristal yapıların bu boş alanları kullanarak iç gerilme yaratmadan filler etkisi göstermelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

4. Conclusion

Bu çalışmada agrega türünün, mikrodalga ve etüv kürü ile üretilen tuğla tozu ve uçucu kül esaslı geopolimer harçların birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kullanılan malzeme ve uygulanan deneyler göz önüne alındığında aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

Alüminosilikat türünden bağımsız olarak, pomza agregası ile hazırlanan harçların taze birim hacim ağırlık değerleri, CEN kumu ile hazırlanan harçlardan daha düşüktür. Pomza agregasının boşluklu yapısı ve düşük birim hacim ağırlığı bu farkın esas nedenidir. Aynı agrega türü ile üretilen uçucu kül ve tuğla tozu esaslı harçların birim hacim ağırlık değerleri ise birbirine çok yakındır.

Agrega ve alüminosilikat türünden bağımsız olarak, etüv kürü ile elde edilen basınç dayanımları, mikrodalga küründen daha yüksektir. Bu durumun, alüminosilikatların etüv küründeki çözünürlüklerinin, mikrodalga küründekinden daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu kapsamda pomza ve CEN kumu ile üretilen uçucu kül esaslı harçlarda, etüv kürlemesi ile mikrodalga kürüne kıyasla sırasıyla %66 ve %82 daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Tuğla tozu esaslı harçlarda ise bu değerler %76 ve %61 olarak kayda geçmiştir.

Aynı kür ve agrega tipi ile üretilen uçucu kül ve tuğla tozu esaslı harçların basınç dayanımları kıyaslandığında, uçucu kül esaslı harçların basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Pomza ve CEN kumu içeren etüv kürü uçucu kül esaslı harçların basınç dayanımları sırasıyla %102 ve %133 oranlarında daha yüksekken mikrodalga kürü serilerde bu oranlar %114 ve %107'dir.

Aynı kür tipi ve alüminosilikat türü ile üretilen harçlardan, CEN kumu içerenlerin basınç dayanımları, pomza agregası kullanılanlardan daha yüksektir. İki agrega türü arasındaki dayanım farkının, bu durumun ana nedeni olduğu ayrıca iki agrega arasındaki gradasyon farkı ve en büyük tane boyutunun da bu durum üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Mikrodalga kürü ile üretilen harçların yüksek sıcaklık dirençlerinin, etüv kürü ile üretilenlerden daha yüksek olduğu, etüv kürü ile üretilen harçların 1000°C'ye maruz kaldıktan sonra basınç dayanımlarının azaldığı ancak mikrodalga kürü ile üretilen harçlarda genellikle bu durumun tersinin geçerli olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu makale, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Tezli Yüksek Lisans programında öğrenimine devam eden Merve TOKDEMİR'in devam eden yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Yazarlar makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkürlerini sunar.

Yazar katkısı*Author contribution*

Merve TOKDEMİR: Literatür taraması, deney tasarımı, deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi, sonuçların analizi ve yorumlanması, makale yazımı. Kambiz RAMYAR: Deney tasarımı, sonuçların analizi ve yorumlanması, makale yazımı & redaksiyon. Adil GÜLTEKİN: Literatür taraması, deney tasarımı, sonuçların analizi ve yorumlanması, makale yazımı.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Yazarlar, bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini ve bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan ve taahhüt ederler.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Al Bakri, A. M. M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A. R. & Zarina, Y. (2012). The processing, characterization, and properties of fly ash based geopolymer concrete. *Reviews on Advanced Materials Science*, 30, 90-97.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard specification for concrete aggregates* (ASTM Standart No. ASTM C33/C33M-18). American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org/c0033_c0033m-18.html
- Cheng-Yong, H., Yun-Ming, L., Abdullah M. M. A. B. & Hussin, K. (2017). Thermal resistance variations of fly ash geopolymers: foaming responses. *Scientific Reports*, 7, 45355. <https://doi.org/10.1038/srep45355>
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. & Taebuanhuad, S. (2013). Role of microwave radiation in curing the fly ash geopolymer. *Advanced Powder Technology*, 24, 703-707. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2012.12.005>
- Dhasmana, A. & Singh, S. P. (2023). Long-term mechanical characteristics of fibre reinforced metakaolin-based geopolymer concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 93(3), 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.030>
- Durak, U. (2021). Ön bekleme süresi ve mikrodalga kürünün geopolimer harç numunelerin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Ankara International Conference on Scientific Research* (ss. 186-194), Ankara.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M. & van Deventer, J. S. J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>
- El-Feky, M. S., Kohail, M., El-Tair, A. M. & Serag, M. I. (2020). Effect of microwave curing as compared with conventional regimes on the performance of alkali activated slag pastes. *Construction and Building Materials*, 233, 117268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117268>
- Erdoğan, T. Y. (2021). *Beton* (7. basım). ODTÜ Yayıncılık.
- Farhan, K. Z., Johari, M. A. M. & Demirboğa, R. (2020). Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: a review. *Construction and Building Materials*, 264, 120276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120276>

- Graytee, A., Sanjayan, J. G. & Nazari, A. (2018). Development of a high strength fly ash-based geopolymer in short time by using microwave curing. *Ceramics International*, 44, 8216-8222. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.001>
- Guan, X., Luo, W., Liu, S., Hernandez, A. G., Do, H. & Li, B. (2023). Ultra-high early strength fly ash-based geopolymer paste cured by microwave radiation. *Developments in the Built Environment*, 14, 100139. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100139>
- He, K-c., Guo, R-x., Ma, Q-m., Yan, F., Lin, Z-w. & Sun, Y-l. (2016). Experimental research on high temperature resistance of modified lightweight concrete after exposure to elevated temperatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 5972570. <https://dx.doi.org/10.1155/2016/5972570>
- Hong, S. & Kim, H. (2019). Effects of microwave energy on fast compressive strength development of coal bottom ash-based geopolymers. *Scientific Reports*, 9, 15694. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52160-2>
- Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H. & Fernández-Pereira, C. (2009). Coal fly ash-slag-based geopolymers: microstructure and metal leaching. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.063>
- Kastiukas, G., Ruan, S., Liang, S. & Zhou, X. (2020). Development of precast geopolymer concrete via oven and microwave radiation curing with an environmental assessment, *Journal of Cleaner Production*, 255, 120290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120290>
- Khaleel, F., Atiş, C. D., Durak, U., İlkentapar, S. & Karahan, O. (2021). The effect of microwave curing on the strength development of Class-F fly ash-based geopolymer mortar, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 37(1), 118-129.
- Medeiros, W. A., Parsekian, G. A., & Moreno, A. L. (2023). Residual mechanical properties of hollow concrete blocks with different aggregate types after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 377, 131085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131085>
- Metekong, J. V. S., Kaze, C. R., Deutou, J. G., Venyite, P., Nana, A., Kamseu, E., Melo, U. C. & Tatietsé T. T. (2021). Evaluation of performances of volcanic-ash-laterite based blended geopolymer concretes: mechanical properties and durability. *Journal of Building Engineering*, 34, 101935. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101935>
- Moradikhou, A. B., Esparham, A. & Avanaki, M. J. (2020). Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 251, 118965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118965>
- Nadeem, M., Ul Haq, E., Ahmed, F., Rafiq, M. A., Awan, G. H. & Zain-ul-Abdein, M. (2020). Effect of microwave curing on the construction properties of natural soil based geopolymer foam. *Construction and Building Materials*, 230, 117074. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117074>
- Nawaz, M., Heitor, A. & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction - recent developments. *Construction and Building Materials*, 260, 120472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th edition). Pearson.
- Payakaniti, P., Chuewangkam, N., Yensano, R., Pinitsoontorn, S. & Chindaprasirt, P. (2020). Changes in compressive strength, microstructure and magnetic properties of a high-calcium fly ash geopolymer subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 265, 120650. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120650>
- Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R. & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste, *Construction and Building Materials*, 43, 98-106. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031>
- Ren, B., Zhao, Y., Bai, H., Kang, S., Zhang, T. & Song, S. (2021). Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: a critical review. *Chemosphere*, 267, 128900. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128900>
- Rovnaník, P., Rovnaníková, P., Vyšvaril, M., Grzeszczyk, S. & Janowska-Renkas, E. (2018). Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 188, 924-933. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.150>

- Shi, H., Ma, H., Tian, L., Yang, J. & Yuan, J. (2020). Effect of microwave curing on metakaolin-quartz-based geopolymer bricks. *Construction and Building Materials*, 258, 120354. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120354>
- Shi, S., Li, H., Fabian, M., Sun, T., Grattan, K. T. V., Xu, D., Basheer, P. A. M. & Bai, Y. (2016). Alkali-activated fly ash manufactured with multi-stage microwave curing. *Sustainable Construction Materials and Technologies. Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies* (pp.1-9), Las Vegas.
- Soares, J. C., Dias, D. P., de Carvalho, E. A. & de Azevedo, J. S. (2021). Determination of shear strength by Iosipescu (V-notch) method of metakaolin-based geopolymeric resins activated by different silicate and hydroxide combinations. *Construction and Building Materials*, 275, 122120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122120>
- Somararatna, J., Ravikumar, D. & Neithalath, N. (2010). Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing. *Cement and Concrete Research*, 40, 1688–1696. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.010>
- Sun, Y., Zhang, P., Hu, J., Liu, B., Yang, J., Liang, S., Xiao, K. & Hou, H. (2021). A review on microwave irradiation to the properties of geopolymers: mechanisms and challenges. *Construction and Building Materials*, 294, 123491. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123491>
- Suwan, T., Paphawasit, B., Fan, M., Jitsangiam, P. & Chindapasirt, P. (2021). Effect of microwave-assisted curing process on strength development and curing duration of cellular lightweight geopolymer mortar. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(9), 1040-1048. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1885702>
- Tan, J., Cai, J., Huang, L., Yang, Q., Mao, M. & Li, J. (2020). Feasibility of using microwave curing to enhance the compressive strength of mixed recycled aggregate powder based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 262, 120897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120897>
- Tiffo, E., Mbah, J. B. B., Belibi, P. D. B., Djobo, J. N. Y. & Elimbi, A. (2020). Physical and mechanical properties of unheated and heated kaolin-based geopolymers with partial replacement of aluminium hydroxide, *Materials Chemistry and Physics*, 239, 122103. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122103>
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012). *Yapı kireci - bölüm 2: deney yöntemleri* (TSE Standart No. TS EN 459-2). Ankara, Türk Standartları Enstitüsü.
- Tuyan, M., Andiç Çakır, Ö. & Ramyar, K. (2018). Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B*, 135, 242-252. <https://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>
- Ye, T., Xiao, J., Duan, Z. & Li, S. (2022). Geopolymers made of recycled brick and concrete powder – a critical review. *Construction and Building Materials*, 330, 127232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127232>
- Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K. & Shi, X. (2020). Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. *Construction and Building Materials*, 262, 120924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120924>