



FARKLI KÜR YÖNTEMLERİYLE ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN BAZI DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ÇİMENTO HARÇLARIYLA KIYASLANMASI

Adil GÜLTEKİN^{1*}, Kambiz RAMYAR²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

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

Anahtar Kelimeler

Öz

*Geopolimer Harç,
Mikrodalga Kürü,
Alkali-silis
Reaksiyonu,
Aşınma Direnci,
Kılcallık.*

Bu çalışmada, mikrodalga kürü ile üretilen uçucu kül, pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı geopolimer harçların bazı durabilite özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar geleneksel etüv kürü ile üretilen serilerle kıyaslanmıştır. Bu kapsamda alkali-silis reaksiyonu direnci, kılcal su emme hızı, aşınma direnci deneyleri yapılmış, ayrıca hamur mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu ile incelenerek durabilite-içyapı ilişkisi irdelenmiştir. Geopolimer harçların durabilite özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla, incelenen harca benzer basınç dayanımına sahip portland çimentolu harçlar üretilmiş ve iki sistemin durabilite konusundaki avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır. Geopolimer harçlarda alkali-silis reaksiyonundan kaynaklanan bir genleşme yaşanmadığı ve geopolimer harçların aşınma dirençlerinin, çimento harçları ile kıyaslanabilecek seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Kılcallık deneyi ve taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde elde edilen bulgular, alüminosilikat tipi ve kür yönteminin kılcal su emme hızı üzerinde etkili olduğunu; pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı geopolimer harçların kılcal yolla hızlı bir şekilde su emebildiklerini, bunun da boşluklu mikro yapıdan kaynaklandığını göstermiştir.

COMPARISON OF SOME DURABILITY PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS PRODUCED WITH DIFFERENT CURING METHODS WITH CEMENT MORTARS

Keywords

Abstract

*Geopolymer Mortar,
Microwave Curing,
Alkali-silica Reaction,
Abrasion Resistance,
Sorptivity.*

In this study, some durability properties of microwave-cured fly ash-, pumice-, perlite-, and burnt clay-based geopolymer mortars were investigated comparatively with those of the conventional oven-cured geopolymer mortars. In this context, alkali-silica reaction, sorptivity and abrasion resistance tests were carried out, and the microstructures of the pastes were examined using scanning electron microscope to investigate the relationship between durability and microstructure. In order to compare the durability properties of geopolymer mortars, portland cement mortars with similar compressive strength were produced. Results indicated that geopolymer mortars exhibit no expansion due to alkali-silica reaction, while their abrasion resistance was comparable to that of the cement mortars. The sorptivity test and scanning electron microscope examinations revealed that the type of aluminosilicate and curing method influence the capillary water absorption rate. Pumice-, perlite-, and burnt clay-based geopolymer mortars demonstrated rapid water sorptivity. The fact was attributed to the presence of considerable amount of pores in the microstructure, as provided by electron microscope images.

Alıntı / Cite

Gültekin, A., Ramyar, K., (2024). Farklı Kür Yöntemleriyle Üretilen Geopolimer Harçların Bazı Durabilite Özelliklerinin Çimento Harçlarıyla Kıyaslanması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(4), 821-834.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Gültekin, 0000-0002-5267-5312
K. Ramyar, 0000-0003-2200-2691

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	25.05.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	11.09.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	10.11.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: adilgultekin@duzce.edu.tr, +90-0380-542-11-33

COMPARISON OF SOME DURABILITY PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS PRODUCED WITH DIFFERENT CURING METHODS WITH CEMENT MORTARS

Adil Gultekin^{1†}, Kambiz Ramyar²

¹ Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Duzce, Turkiye

² Ege University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Izmir, Turkiye

Highlights

- Durability properties of geopolymer mortars produced by microwave and oven curing as well as counterpart cement mortar mixtures were investigated comparatively.
- Alkali-silica reaction, abrasion and sorptivity were examined.
- No expansion caused by alkali-silica reaction was observed in geopolymers unlike cement mortars.
- It was determined that geopolymer microstructure affects the strength and durability properties.

Graphical Abstract

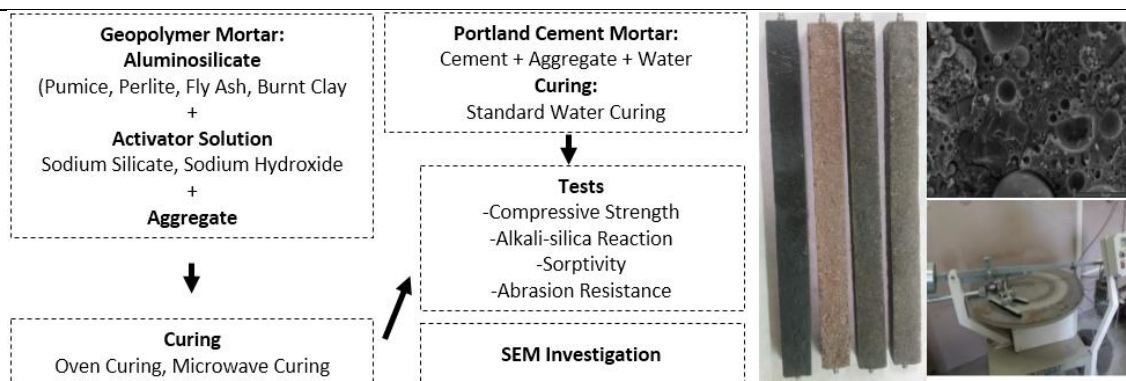


Figure 1. Summary of the Experimental Study, ASR Specimens, SEM Image and Bohme Abrasion Device

Purpose and Scope

This study investigated the durability properties of microwave-cured geopolymer mortars. The comparative analysis presented the influence of aluminosilicate type and curing method on these properties.

Design/methodology/approach

Alkali-silica reaction, abrasion resistance and sorptivity properties of cement and geopolymer mortars were determined in accordance with ASTM C1260, TS 2824 EN 1338 and ASTM C1585 Standards, respectively. In the production of geopolymer mortars, fly ash, pumice, perlite and burnt clay were used as aluminosilicate, sodium silicate and sodium hydroxide were utilized as activator solution. For curing, a laboratory-type oven and a household microwave oven with 800 W output capacity were used.

Findings

The results of the alkali-silica reaction experiment revealed that cement mortars exhibited length extensions ranging from 0.75% to 0.88%, depending on the water/cement ratio. In contrast, the minimal expansions observed in geopolymer mortars were attributed to the effect of hot water rather than alkali-silica reaction. While the abrasion resistance of geopolymer mortars was influenced by both aluminosilicate type and curing method, it was generally similar or higher than those of cement mortars. SEM images revealed the presence of numerous relatively small pores within the microstructure of pumice-, perlite-, and burnt clay-based geopolymer mortars. Consequently, these mortars exhibited high water absorption during the initial stages (ten minutes) of the sorptivity test.

Originality

Existing literature on the using of microwave technology in geopolymer production remains limited, with a predominant focus on mechanical properties and commonly used aluminosilicates such as fly ash, slag, and metakaolin. This study fills a gap by comparatively examining the durability properties of geopolymers produced with microwave curing, utilizing two natural aluminosilicates (pumice and perlite) that have been overlooked in prior research efforts.

[†] Corresponding author: adilgultekin@duzce.edu.tr, +90-0380-542-11-33

1. Giriş (Introduction)

Portland çimentosu ile üretilen geleneksel beton, dünyada yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Ancak çimentonun üretimi sırasında hem yüksek miktarda enerji harcanmakta hem de doğaya önemli miktarda karbondioksit salımı yapılmaktadır (Khalid ve Shobha, 2024). Araştırmalar, bir ton Portland çimentosu üretimi için doğaya yaklaşık olarak bir ton karbondioksit salındığını ve bunun küresel karbondioksit salımının %8'ine yakın bir değer olduğunu göstermiştir (Kanagaraj vd., 2023). Çimento üretiminin neden olduğu bu ekonomik ve çevresel sorunların azaltılması amacıyla alternatif bağlayıcı arayışları hızlanmıştır. Bunun neticesinde de düşük enerji tüketimi ve düşük karbondioksit salımı ile üretilebilen, sürdürülebilirlik açısından birçok avantaja sahip, çimentoya kıyasla daha çevreci geopolimerler ortaya çıkmıştır (Diksha vd., 2023).

Geopolimer üretiminde uçucu kül, cüruf, metakaolin (Amin vd., 2022), volkanik kül, zeolit veya doğal puzolan (Acar vd., 2020) gibi alüminosilikat toz malzemeler, alkali veya asit çözeltileri ile birlikte kullanılır (Ng vd., 2018). Ancak çoğu çalışmada aktivatör çözeltisi üretiminde sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit ve potasyum silikat tercih edilmiştir (Pradhan vd., 2022). Geopolimerizasyon sonucu ortaya çıkan reaksiyon ürünleri ve mikro yapının, çimentonun hidratasyon ürünleri ve mikro yapısından farklı niteliklerde olduğu bilinmektedir. Bu da geopolimerlerin kimyasal saldırı, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık gibi etkilere karşı gösterdiği direncin farklı olmasını sağlamaktadır. Çimentonun hidratasyon ürünü olarak ortaya çıkan kalsiyum hidroksit, etrenjit ve monosülfat gibi bileşenlerin, geleneksel betonun durabilite özelliklerini olumsuz etkilediği, ancak düşük kalsiyum içerikli alüminosilikatlarla üretilen ve alkali iyon olarak sodyum kullanılan geopolimerlerin N-A-S-H olan ana reaksiyon ürünlerinin, bu konuda geopolimerlere avantaj sağladığı bildirilmiştir (Zhang, 2024).

Alkali-silis reaksiyonu (ASR), kaynağı genellikle çimento olmak üzere portland çimentosuyla üretilen betonun bünyesine giren alkalilerin, agregada yer alan reaktif silisle reaksiyona girmesi ile oluşur. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan jel, su emerek şişme özelliği nedeniyle betonda hasar oluşturur (Thompson vd., 2019). ASR, portland çimentolu betonlarda karşılaşılabilecek muhtemel önemli bir durabilite sorunu olarak değerlendirilmektedir. Bu betonlarda, çimentonun reaksiyon ürünü olan kalsiyum hidroksitin boşluk çözeltilerinin pH seviyesini koruyarak zararlı reaksiyonun devamında görev aldığı bilinmektedir. Ancak düşük kalsiyum içeriğine sahip malzemelerle üretilen geopolimerlerin boşluk çözeltilerinin, çimentolu sistemlerin boşluk çözeltilerinden farklı bir nitelikte olduğu, bunun da geopolimerlerde ASR kaynaklı genleşmelerin çok daha düşük seviyelerde kalmasını sağladığı bildirilmiştir (Lei vd., 2020). Geopolimer ve alkali-aktif malzemelerde, alkali bileşenler ile agregada arasında oluşması muhtemel reaksiyon, kullanılan malzeme, karışım oranı ve agregada reaktivitesi gibi farklı faktörlerden etkilenmektedir (Shi vd., 2015). Geopolimer ve alkali-aktif malzemelerin ASR direncini belirlemek üzere çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları, kullanılan deney yöntemlerinin geçerliliğini irdelerken (Shi vd., 2015; Pouhet vd., 2016), diğer çalışmalar genleşme miktarlarını belirlemiş ve çimento esaslı malzemeler ile kıyaslamıştır. Lei vd. (2020) F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer betonların ASR kaynaklı genleşme değerlerinin, geleneksel betonunkinden çok daha düşük seviyelerde olduğunu belirlemiştir. Benzer bir çalışmada Li vd. (2006) uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin kombinasyonu ile üretilen geopolimer harçların ASR kaynaklı bir genleşme göstermediğini raporlamıştır.

Betonda hasar oluşturması muhtemel diğer bir etken de aşınmadır. Aşınmanın, sert parçacıkların yarattığı sürtünme etkisiyle beton yüzeyinde meydana gelen kütle kaybı olarak tanımlanması mümkündür. Betonun aşınmaya karşı gösterdiği direnç, hamur, agregada ve arayüzey geçiş bölgesinin kalitesi ile ilgilidir. Farklı özellik ve derişimdeki alkali çözeltiler kullanılarak, çeşitli alüminosilikatlarla üretilen geopolimer yapı malzemelerinin aşınma dirençleri çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir (Pradhan vd., 2022). Jacob vd. (2020) metakaolin esaslı geopolimer betonların aşınma dirençlerini belirleyerek geleneksel betonla kıyaslamıştır. Badkul vd. (2021), sodyum hidroksit derişiminin, yüksek fırın cürufu ikameli uçucu kül esaslı geopolimer betonların aşınma direncine etkisini Cantabro deneyi ile araştırmış ve elde ettiği sonuçları geleneksel beton ile kıyaslamıştır. Araştırmacılar uygun bir tasarım ile üretilen geopolimer betonların aşınma dirençlerinin, geleneksel beton ile kıyaslanabilecek düzeyde olabileceğini raporlamıştır. Benzer bir çalışmada Al-Azzawi (2019) metakaolin ikamesinin uçucu kül esaslı geopolimer harçların aşınma direncine etkisini araştırmıştır. TS 2824 EN 1338 Standardı baz alınarak yapılan araştırmanın sonucunda metakaolin ikame oranındaki artışın, aşınma direncine olumlu katkı yaptığı sonucuna ulaşılmıştır.

Betonun nem iletim karakteristiği, durabilite üzerinde etkili olan diğer bir önemli etkidir. Geopolimer betonların geçirimsizlik, su emme ve kılcal su emme özellikleri, geleneksel betona benzer şekilde durabilite karakteristiğinde dikkate alınmalıdır. Bu özellikler, dış ortamdaki zararlı çözeltiler veya zararlı bileşenlerin beton bünyesine girmesi ve betonun hacimsel stabilitesi üzerinde etkilidir (Pradhan vd., 2022). Adam vd. (2009), alkali-aktif yüksek fırın cürufu esaslı betonlar ile uçucu kül esaslı geopolimer betonların kılcallık özelliğini incelemiş, elde ettiği sonuçları geleneksel betona ait sonuçlarla kıyaslamış ve üretilen tüm seriler arasından en düşük kılcallık değerinin uçucu kül esaslı geopolimer betonda gözlemlendiği raporlamıştır. Shaikh (2014), farklı sodyum silikat/sodyum hidroksit

oranları ve sodyum hidroksit derişimleri ile üretilen uçucu kül esaslı geopolimer betonların kılcal su emme hızlarını belirlemiş ve sonuçları geleneksel beton ile karşılaştırmıştır. Araştırmacılar, geopolimer betonların kılcal su emme hızlarının, geleneksel betonunkinden daha düşük olduğunu ve aktivatör özelliklerinin durum üzerinde etkisinin bulunduğunu belirlemiştir.

Geopolimer üretiminde ortam kürlenmesi, etüv kürü ve buhar kürlenmesi gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır (Nurruddin vd., 2018). Ancak son zamanlarda sunmuş olduğu avantajlar nedeniyle mikrodalga teknolojisinin geopolimer ve alkali aktive malzeme üretiminde kullanımı hakkında çalışmalar yapılmaktadır. Geleneksel kürlenme yöntemine kıyasla daha düşük ısı kaybı ile daha hızlı ve homojen bir ısıtma etkisinin sağlanması, enerji tasarrufu, hacimsel bir ısıtma etkisinin yaratılması, daha yüksek mekanik özelliklere ulaşmanın mümkün olması mikrodalga teknolojisinin geopolimer üretimindeki avantajları olarak özetlenebilir. Tüm bunlara rağmen mikrodalga kürü ile geopolimer üretimi konusundaki çalışmalar limitlidir ve genellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun kullanımı incelenmiştir (Aschoff vd., 2024). Ancak bunlar dışında kalan endüstri/tarım atığı veya doğal malzemeler kullanılarak mikrodalga kürü ile üretilen geopolimerler hakkında da bazı çalışmalar yapılmıştır. Ekiz Barış (2024) doğal puzolan esaslı geopolimer üretiminde mikrodalga teknolojisinin kullanılabilirliğini incelemiştir. Gültekin (2024) mikrodalga kürü ile üretilen tuğla tozu esaslı geopolimer harçların dayanımlarını incelemiştir. Nadeem (2020) ise doğal toprak kullanılarak üretilen geopolimer köpük malzemeler üzerine bir çalışma yürütmüştür. Yapılan bu çalışmalarda, mikrodalga kürünün geopolimer üretimi için yenilikçi ve farklı avantajlara sahip bir kürlenme yöntemi olabileceği ortaya koyulmuştur. Shi vd. (2016), uçucu kül esaslı alkali aktive hamur üretiminde mikrodalga kürü kullanılması ile etüv kürüne kıyasla daha düşük enerji sarfiyatı yapılmasına rağmen daha yüksek basınç dayanımlarına ve daha az boşluklu bir içyapıya ulaşıldığını göstermiştir. Somaratna vd. (2010) ise etüv ve mikrodalga kürünün etkinliğini incelemiş, 6, 8 ve 10 M derişimli aktivatör çözeltileri ile üretilen geopolimer harçlarda, mikrodalga kürü ile daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşıldığını raporlamıştır. Bunun nedeni olarak ise etüv küründe numunenin öncelikle dış kısmının ısındığını, sonrasında ısının iç kısımlara ilerlediğini, bunun homojen olmayan bir ısıtma etkisi ile homojen olmayan bir içyapıya neden olduğu ayrıca termal gradyanların da dayanım azalmasında payı olduğunu belirtmiştir.

Her ne kadar mikrodalga kürü, geopolimer üretimi için umut vadetse de bu konudaki çalışma sayısı limitlidir. Ayrıca mikrodalga kürü ile geopolimer üretimini konu alan çalışmaların büyük bölümünde, mekanik özelliklere odaklanılmış olup mikrodalga kürlü geopolimerlerin durabilite özellikleri hakkında çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, mikrodalga kürü ile üretilen pomza, perlit, pişirilmiş kil ve uçucu kül esaslı geopolimer harçların bazı durabilite özellikleri incelenmiş ve alüminosilikat türü ile kür tipinin bu özellikler üzerindeki etkisi kıyaslamalı bir şekilde sunulmuştur. Bu amaçla hem mikrodalga hem de etüv kürü ile üretilen geopolimer harçlar kullanılmış ve bunların alkali-silis reaksiyonu direnci, kılcal su emme hızları ve aşınma dirençleri incelenmiştir. Ayrıca farklı su/çimento oranları kullanılarak, üretilen geopolimer harçlara benzer dayanıma sahip portland çimentolu harçlar hazırlanarak elde edilen sonuçlar çimentolu sistemlerle kıyaslanmış, geopolimerlerin bu konudaki avantaj veya dezavantajları irdelenmiştir. Geopolimer hamurlar üzerinde gerçekleştirilen SEM incelemeleri ile de durabilite-içyapı ilişkisi ortaya koyulmuştur.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Malzeme (Material)

Çalışmada alüminosilikat olarak İzmir’de faaliyet gösteren bir firmadan temin edilen ve laboratuvarında öğütülerek üretilen pomza ve perlit tozu, kaolinin 600°C’de 1 saat ısıtma maruz bırakılması ile elde edilen pişirilmiş kil ve düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül kullanılmıştır. Bu malzemelere ait kimyasal bileşim ile bazı fiziksel özellikler sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de paylaşılmıştır. Aktivatör çözeltisinin hazırlanmasında %98 saflıktaki sodyum hidroksit peletleri ile ağırlıkça %10 Na₂O, %23.2 SiO₂ ve %66.8 su içeren sodyum silikat çözeltisi birlikte kullanılmıştır. Sodyum hidroksit peletleri, sodyum silikat çözeltisinin içinde çözdürülmüş ve elde edilen karışım 24 saat dinlendirilmiştir. Çimento harçlarının hazırlanmasında ise CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Basınç dayanımı, kılcal su emme ve aşınma direnci deneyleri için hazırlanan numunelerde TS EN 196-1 Standardı’na uygun CEN standard kumu, ASR genleşmelerinin belirlenmesi için hazırlanan numunelerde ise ASTM C1260’ta (2014) belirtilen elek aralıklarında, reaktif olduğu önceki çalışmalardan bilinen bazalt agregası kullanılmıştır.

Tablo 1. Alüminosilikatlara Ait Kimyasal Bileşim (Chemical Composition of the Aluminosilicates)

BİLEŞEN (%)	POMZA	PERLİT	PİŞİRİLMİŞ KİL	UÇUCU KÜL
SiO ₂	71.48	73.20	73.65	44.23
Al ₂ O ₃	13.26	11.65	16.24	19.60
Fe ₂ O ₃	1.06	1.26	0.79	7.79
CaO	0.49	0.84	0.32	4.81
MgO	0.15	0.06	0.16	2.00
Na ₂ O	2.77	2.81	0.07	1.17
K ₂ O	6.23	4.35	0.19	1.70
SO ₃	<0.01	<0.01	0.79	0.14
KIZDIRMA KAYBI	4.51	5.10	5.35	17.36

Tablo 2. Alüminosilikatlara Ait Bazı Fiziksel Özellikler (Some Physical Properties of the Aluminosilicates)

ÖZELLİK	POMZA	PERLİT	PİŞİRİLMİŞ KİL	UÇUCU KÜL
d ₁₀ (µm)	2.78	3.37	2.15	5.50
d ₅₀ (µm)	13.9	22.9	13.2	25.6
d ₉₀ (µm)	48.0	119.0	84.9	194.0
ÖZGÜL AĞIRLIK	2.36	2.26	2.67	2.35
BLAİNE ÖZGÜL YÜZEY ALANI (cm ² /g)	7634	4946	8680	3506

2.2. Geopolimer Harçların Üretilmesi (Production of Geopolymer Mortars)

Her iki harç türünün hazırlanmasında da laboratuvar tipi harç mikseri kullanılmıştır. Geopolimer harçlar hazırlanırken sırasıyla kum, alüminosilikat, aktivatör çözeltisi ve karışımda var ise su mikser kabına koyularak 90 saniye boyunca 62.5 RPM'de karıştırma yapılmıştır. Kabin çeperine yapışan malzeme bir spatula kullanılarak sıyrılmış ve mikser, 90 saniye daha 62.5 RPM'de çalıştırılmıştır. Taze harçlar kalıplara iki tabakada yerleştirilmiş ve her tabaka sarsma tablasında 25 düşüş yaptırılarak sıkıştırılmıştır. Kürlenme için etüv ve mikrodalga kürü olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Etüv küründe, kalıplara yerleştirilen harçlar, sıkıştırma işleminden hemen sonra kalıpları ile birlikte etüve yerleştirilmiş ve etüv çalıştırılmıştır. Etüv sıcaklığı, kür sıcaklığına ulaştıktan sonra kür süresi başlatılmış, kür süresi tamamlanan numuneler etüvden çıkartılmış ve oda sıcaklığına soğuyana kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Mikrodalga küründe ise kalıpların mikrodalga fırına yerleştirilmesi teknik olarak mümkün olmadığından farklı bir yöntem izlenmiştir. Yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri tamamlanan harçlar, kalıpları ile birlikte yüksek sıcaklığa dirençli-nem geçirmez fırın poşetleri ile kaplanmış ve etüvde önkürleme yapılmıştır. Deneme yanılma yöntemi ile belirtilen önkürleme süresi (uçucu kül esaslı harçlarda 5.5, pomza ve perlit esaslı harçlarda 4, pişirilmiş kil esaslı harçlarda 3 saat) sonunda priz alan numuneler kalıplarından çıkartılarak mikrodalga fırına yerleştirilmiş ve mikrodalga kürü uygulanmıştır. Her iki kür tipinde de numuneler oda sıcaklığına ulaştıktan sonra bekletilmeksizin sertleşmiş hal deneylerine geçilmiştir. Tüm deneyler için üçer numune hazırlanmış ve bunların ortalaması raporlanmıştır.

2.3. Çimento Harçlarının Üretilmesi (Production of Cement Mortars)

Çimento harçlarının üretiminde sırasıyla kum, çimento ve su mikser kabına koyulmuş, mikser 90 saniye boyunca 62.5 RPM'de çalıştırdıktan sonra kabin çeperine yapışan malzemeler bir spatula ile sıyrılmış ve 90 saniye daha aynı hızda karıştırma yapılmıştır. Harçlar kalıplara iki tabaka halinde yerleştirilmiş ve her tabaka sarma tablası kullanılarak 25 düşüşle sıkıştırılmıştır. Kalıplara yerleştirilen harçlar laboratuvar şartlarında bekletilmiş, 24 saat sonra kalıplarından çıkartılarak 27 gün boyunca standart su kürüne tabi tutulmuştur. Tüm deneyler için üçer numune hazırlanmış ve bunların ortalaması raporlanmıştır.

2.4. Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi (Determination of Compressive Strengths)

Harçların basınç dayanımları, 2000 kN kapasiteye sahip beton presi ile belirlenmiş olup yükleme hızı 0.9 kN/s olarak ayarlanmıştır. Deneylerde her seri için üçer adet 50 mm ayrıtlı küp numune kullanılmıştır.

2.5. Alkali-silica Reaksiyonu Deneyleri (Alkali-silica Reaction Tests)

Harçların ASR dirençleri 25x25x285 mm boyutlarında pimli numuneler kullanılarak ASTM C1260-14 (2014) Standardı baz alınarak belirlenmiştir. Üretilen numuneler 80°C'de sodyum hidroksit çözeltisine maruz bırakılmış

ve belirli aralıklarla boy uzamaları yüzde cinsinden belirlenmiştir. Ayrıca geopolimerlerdeki muhtemel genişmelerin alkali-silis reaksiyonundan kaynaklanıp kaynaklanmadığının tespit edilmesi için birer seri geopolimer harç 80°C'deki şebeke suyunda bekletilerek sıcak suda ortaya çıkan boy uzama değerleri okunmuştur.

2.6. Aşınma Direnci Deneyleri (Abrasion Resistance Tests)

Harçların aşınma dirençleri, 71 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılarak, TS 2824 EN 1338 (2005) Standardı baz alınarak belirlenmiştir. Aşınma deneyine başlamadan önce numunelerin hacimleri dijital bir kumpas ile belirlenmiş ve numuneler Böhme aşınma cihazına yerleştirilerek üzerlerine 294 N'luk bir kuvvet uygulanmıştır. 20 g zımpara tozu cihaz izine dökülmüş ve cihaz çalıştırılmış, 22 turdan sonra cihaz durdurulmuş, döner tabla ve numune temizlenmiş, numune 90° döndürülerek yeniden cihaza yerleştirilmiş ve yeni zımpara tozu dökülerek deneye devam edilmiştir. Belirtilen şekilde uygulanan 16 çevrim sonunda numunelerin hacimleri yeniden belirlenmiş ve toplam hacim kayıpları tespit edilmiştir.

2.7. Kılcal Su Emme Deneyleri (Sorptivity Tests)

Harçların kılcal su emme hızları ASTM C1585 (2020) standardı baz alınarak 40x40x160 mm prizmatik numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin alt bölümleri likit plastik kullanılarak yaklaşık olarak 1 cm yüksekliğinde kaplanmış ve devamında nem transferinin engellenmesi amacıyla numunelerin su ile temas edecek alt yüzeyi (40x40 mm) dışındaki tüm yüzeyleri poşetle sıkı bir şekilde sarılmıştır. Alt yüzeyi su ile temas eden numunelerdeki ağırlık değişimleri 6 saat boyunca belirli aralıklarla ölçülerek $I-\sqrt{s}$ (su emme-zaman) grafikleri çizilmiştir. Bu noktalara en uygun doğrunun eğimi ise kılcal su emme (birincil) hızının belirlenmesinde kullanılmıştır.

3. Kullanılan Karışımlar (Mixtures)

Çalışma kapsamında durabilite özellikleri belirlenecek sekiz adet geopolimer harca ait karışım oranları, kür rejimleri ve basınç dayanımları Tablo 3'te sunulmuştur. Bu karışımlar önceki çalışmalarda (Gultekin ve Ramyar, 2022) üretilen toplam 180 karışım içerisinde seçilmiş olup mikrodalga kürü ile üretimde her alüminosilikat için üç farklı mikrodalga kür süresi (5, 10 ve 15 dakika) ve üç farklı güç seviyesinde (450, 600 ve 800 watt) kürlenmiştir. Sonrasında 8 adet karışım seçilmiş olup, her alüminosilikat için aynı karışım oranları ile üretilen karışımlar biri etüv, diğeri mikrodalga olmak üzere iki farklı kür rejimine tabi tutulmuş, böylece karışım tasarımından bağımsız olarak kür tipinin etkinliği incelenmiştir. Ayrıca, kullanılan her geopolimer harç serisi için, o harç serisinin basınç dayanımına yakın bir dayanıma sahip çimento harcı da üretilmiş, böylece benzer basınç dayanımına sahip iki farklı sistemin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Çimento harçları, S/Ç oranına göre kodlanmış olup bunlara dair bilgiler de Tablo 3'te verilmiştir. Çalışma özeti ve bazı görsel materyaller ise Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Özeti, ASR Numuneleri, SEM Görüntüsü Örneği ve Böhme Aşınma Cihazı (Summary of the Experimental Study, ASR Specimens, SEM Image and Bohme Abrasion Device)

Tablo 3. Kullanılan Harçların Özellikleri (Properties of Mortar Mixtures)

ALÜMİNO-SİLİKAT	MS ORANI - Na ₂ O (%)	MALZEME* (g)		ETÜV KÜRÜ		MİKRODALGA KÜRÜ		KOD	BASINÇ DAYANIMI (MPa)	EŞDEĞER ÇİMENTO HARCININ	
		AKTİVATÖR	SU	SICAKLIK (°C)	SÜRE (SAAT)	GÜÇ (W)	SÜRE (DK.)			S/Ç ORANI	BASINÇ DAYANIMI (MPa)
UÇUCU KÜL	1.0-12	274.2	15	60	72	-	-	Uk-E	54.4	0.50	52.4
POMZA	1.6-8	266.2	60	120	24	-	-	Pm-E	26.3	0.80	27.4
PERLİT	1.6-8	266.2	42	120	24	-	-	Pr-E	23.6	0.85	22.7
PIŞİRİLMİŞ KİL	2.0-8	320.0	-	120	24	-	-	Pk-E	29.1	0.75	29.2
UÇUCU KÜL	1.0-12	274.2	15	-	-	450	15	Uk-M	24.0	0.85	22.7
POMZA	1.6-8	266.2	60	-	-	600	15	Pm-M	27.8	0.80	27.4
PERLİT	1.6-8	266.2	42	-	-	450	15	Pr-M	36.5	0.65	37.2
PIŞİRİLMİŞ KİL	2.0-8	320.0	-	-	-	450	15	Pk-M	33.6	0.70	32.3

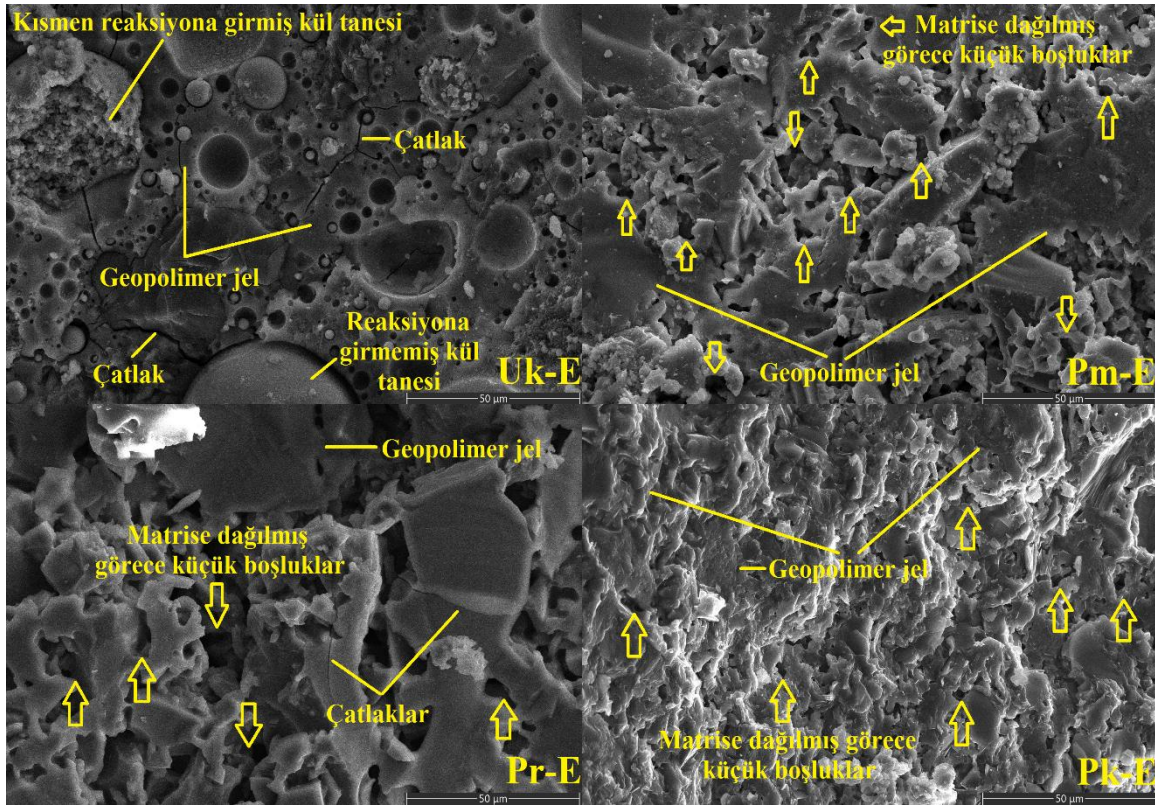
*: Tüm harç karışımlarında alüminosilikat 450 g, CEN kumu ise 1215 g kullanılmıştır.

4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussions)

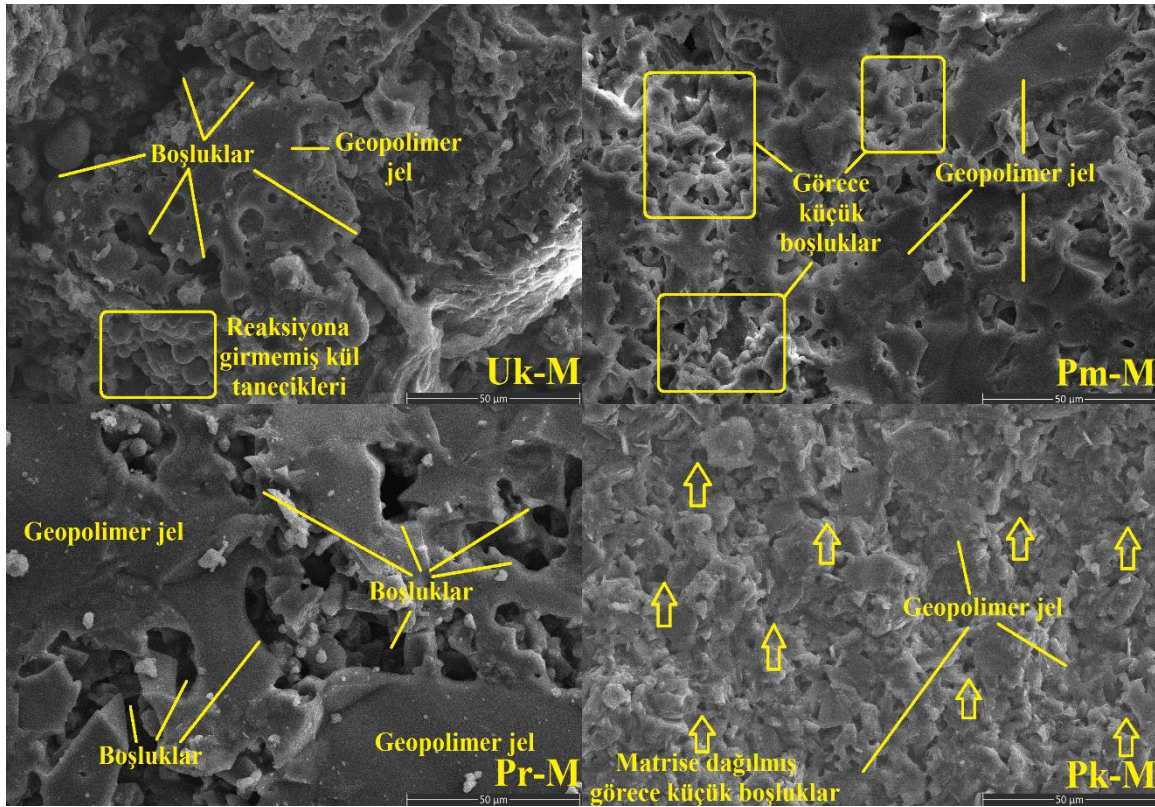
4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri (SEM Investigations)

Etüv kürü ile üretilen geopolimer hamurlara ait SEM görüntüleri Şekil 2'de sunulmuştur. Bu hamurlara ait görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde, uçucu kül esaslı hamurun daha az sayıda çatlak ve boşluk içerdiği ve daha dolu bir içyapıya sahip olduğu görülmektedir. Bunların yanı sıra reaksiyona girmeyen veya kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül tanecikleri de mevcuttur. Hamur bünyesinde yer alan çatlakların bir kısmının da mikro yapı incelemesi için numunenin hazırlanması sırasında oluştuğu düşünülmektedir. Bu hamura ait harç karışımının, geopolimerler içerisinde en yüksek basınç dayanımına (54.4 MPa) sahip olması bu içyapıdan kaynaklanmaktadır. Pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı hamurlarda ise daha boşluklu bir yapı dikkat çekmektedir. Bu hamurlarda matrisin her yanına dağılı, boyutları 15-20 µm'ye varabilen, görece küçük çok sayıda boşluk bulunmaktadır. Ayrıca uçucu kül esaslı hamurdakinin aksine, geopolimer jel yapısı daha çok üst üste binmiş-kayalık benzeri- tabakalı bir yapıya sahiptir. Bu hamurlara ait harçların birbirine yakın ve görece düşük basınç dayanımlarına (23.6-29.1 MPa aralığında) sahip olmasının, belirtilen mikro yapıdan ileri geldiği düşünülmektedir.

Mikrodalga kürü ile üretilen geopolimer hamurlara ait SEM görüntüleri Şekil 3'te sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde ve aynı alüminosilikat kullanılarak etüv kürüyle üretilen hamurlarla kıyaslandığında yine iki farklı durum ortaya çıktığı görülmektedir. Mikrodalga kürü ile üretilen uçucu kül esaslı hamur yapısında, etüv kürü ile üretilen uçucu kül esaslı hamura kıyasla çok daha fazla sayıda uçucu kül taneciğinin reaksiyona girmediği, mikro yapının homojen ve yoğun bir yapıda olmadığı ve çok sayıda geniş ve derin boşluğun bulunduğu tespit edilmiştir. Bu da basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. Ancak pomza ve perlit esaslı hamurlarda bu durumun tersi ile karşılaşılmıştır. Bu hamurlarda, etüv kürü ile üretilen serilere kıyasla daha geniş jel tabakalarının-bölgelerinin oluştuğu, boşluk miktarının ise daha az olduğu belirlenmiştir. Mikrodalga kürü ile üretilen hamur içyapısının da daha homojen bir form aldığı söylenmesi mümkündür. Tüm bunların bir neticesi olarak, bu üç hamura ait harçların basınç dayanımları, etüv kürü ile üretilen serilere kıyasla daha yüksek olmuştur.



Şekil 2. Etüv Kürü ile Üretilen Geopolimer Hamurlara ait SEM Görüntüleri (SEM Images of Oven-cured Geopolymer Pastes)



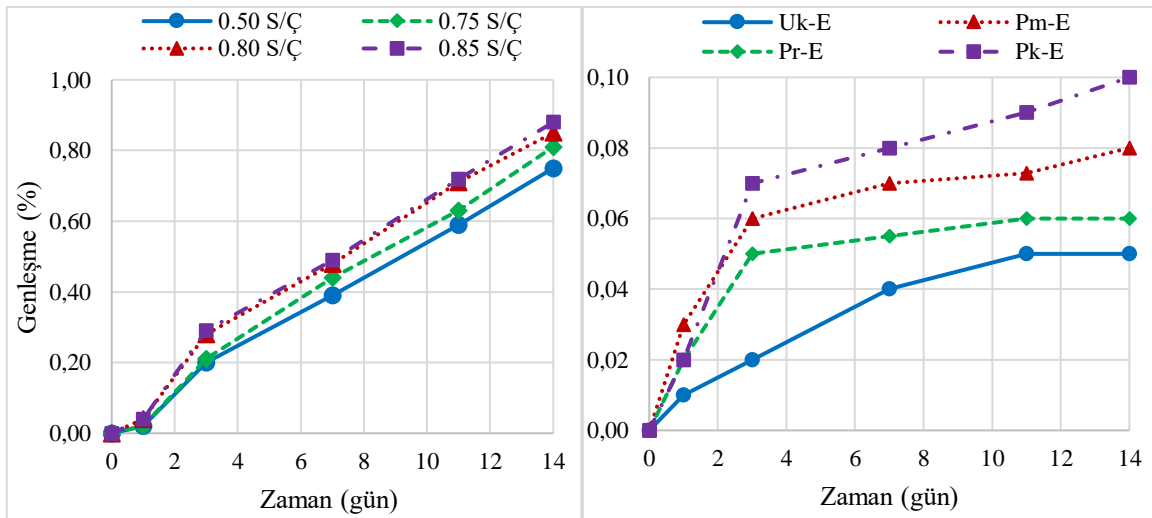
Şekil 3. Mikrodalga Kürü ile Üretilen Geopolimer Hamurlara Ait SEM Görüntüleri (SEM Images of Microwave-cured Geopolymer Pastes)

4.2. Alkali-silis Reaksiyonu Deneyi Sonuçları (Alkali-silica Reaction Test Results)

Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçların 14 günlük deney süresi sonundaki durumlarına dair fotoğraflar Şekil 4'te paylaşılmış olup numunelerde herhangi bir hasar veya çatlakla rastlanmamıştır. Harçların 14 gün boyunca yaşamış oldukları boy uzamaları ise Şekil 5'te gösterilmiştir. Boy uzaması değerleri incelendiğinde, çimento harçlarının genleşme değerlerinin %0.75-0.88 değerleri arasında değiştiği, S/Ç oranındaki artışla boy uzamalarının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca çimento harçlarında deney süresi arttıkça, genleşmeler de doğrusala yakın bir şekilde artış göstermiştir. Çimento harçları ile benzer basınç dayanımına sahip olan geopolimer harçlardaki uzamalar, çimento harcındakilere kıyasla çok düşük değerlerde kalmış olup %0.05-%0.10 aralığında değer almıştır. En yüksek basınç dayanımına sahip olan uçucu kül esaslı geopolimer harç en düşük genleşmelere sahipken, en yüksek boy değişimine sahip geopolimer harç pişirilmiş kil esaslı harçtır. Dikkat çeken diğer bir nokta ise geopolimer harçların 14 günlük genleşme değerlerinin çok önemli bir kısmının kısa vadede meydana gelmesidir. Bu bağlamda uçucu kül esaslı harçta 14 günde meydana gelen genleşmelerin yaklaşık olarak %80'i yedi günde oluşmuş, sonrasındaki genleşmeler çok daha düşük seviyede kalmış ve sabit bir değere yakınsamıştır. Pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı harçlar ise, deneyin ilk üç gününde hızlı bir genleşme göstermiş, sonrasında genleşme değerleri düşük hızlarda artmış veya neredeyse sabit kalmıştır. Geopolimer ve alkali aktive malzemelerin ASR dirençleri farklı araştırmalara konu olmuştur. Li vd. (2006) uçucu kül, metakaolin ve silis dumanı karışımından üretilen geopolimerlerin ASR direncini incelemiş ve elde edilen sonuçları farklı alkali içeriklerine sahip çimento harçları ile kıyaslamıştır. Araştırmacı çimento harçlarında, alkali içeriğine bağlı olarak farklı oranlarda genleşmeler ortaya çıktığını ancak geopolimer harçta ASR kaynaklı herhangi bir genleşme gözlemlenmediğini bildirmiştir. Başka bir çalışmada ise Lei vd. (2020) uçucu kül esaslı geopolimer betonların ASR direncini incelemiş, geleneksel beton ile kıyaslamış ve elde edilen sonuçları detaylıca irdelemiştir. Araştırmacılar bir yıllık deney süresi sonrasında yapılan polarize ışık ve elektron mikroskobu incelemelerinde geopolimer beton bünyesinde tipik ASR ürünlerine rastlanmadığı, matris ve agrega arasında ASR jeli olarak tanımlanacak bir jelin mevcut olmadığı ve güçlü bir matris-hamur bağlantısı olduğunu raporlamıştır. Bu durumun ise uçucu kül tanelerinin çözünmesi sırasında hidroksit iyonlarını tüketerek boşluk çözeltisinin pH'ını azaltmasından ileri geldiği belirtilmiş, bu çözeltide kalsiyum bulunmaması ve alüminyum mevcudiyetinin de ASR oluşmamasına katkı yapmış olabileceğini raporlamıştır.



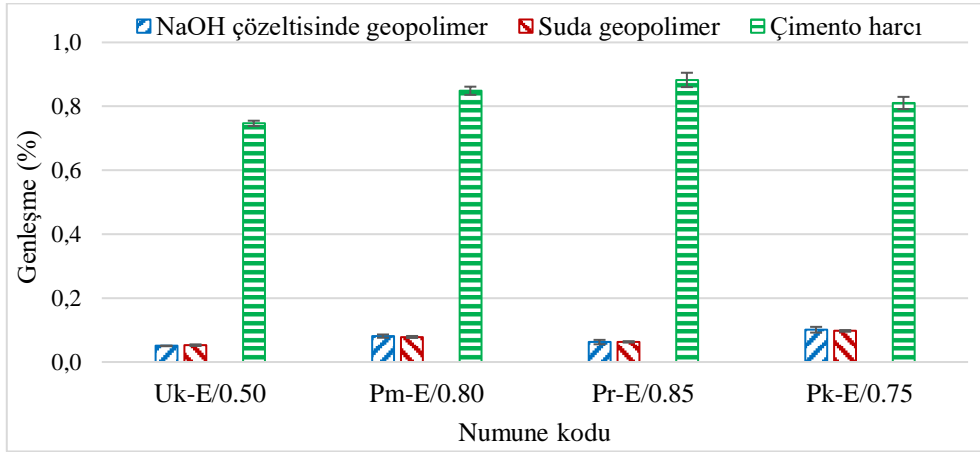
Şekil 4. Geopolimer Harçların Deney Sonrasındaki Durumları (Images of Geopolymer Mortars After Test)



Şekil 5. Harçların Alkali-Silis Reaksiyonu Deneyindeki Genleşme Değerleri (Expansions of Mortars After Alkali-silica Reaction Tests)

ASR deneylerinin 80°C'de gerçekleştirilmesi, geopolimer harçlarda ortaya çıkan düşük miktardaki genleşmelerin ASR'den farklı bir sebepten dolayı ortaya çıktığını düşündürmüştür. Bu nedenle yeni hazırlanan geopolimer harçlar 14 gün boyunca 80°C'deki şebeke suyu içerisinde bekletilmiş ve boy uzaması değerleri tespit edilmiştir.

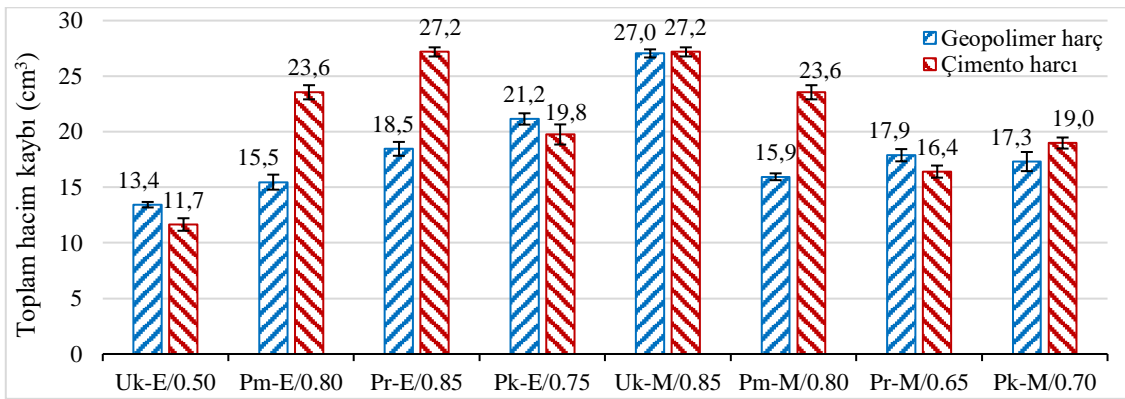
80°C'deki suda gerçekleştirilen deneylerin neticesinde elde edilen 14 günlük geopolimer harç genişmeleri Şekil 6'da kıyaslamalı bir şekilde sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde alüminosilikat türünden bağımsız olarak, 80°C'deki suda bekletilen geopolimer harçlarda meydana gelen genişmelerin, ASR deneyinde ortaya çıkan genişme değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da genişmelerin ASR'den değil, sıcak su etkisinden kaynaklanmış olabileceğini göstermektedir.



Şekil 6. Harçların 14 Günlük Toplam Genişme Değerlerinin Kıyaslanması (Comparison of 14-day total expansion values of mortars)

4.3. Aşınma Direnci Deneyi Sonuçları (Abrasion Resistance Test Results)

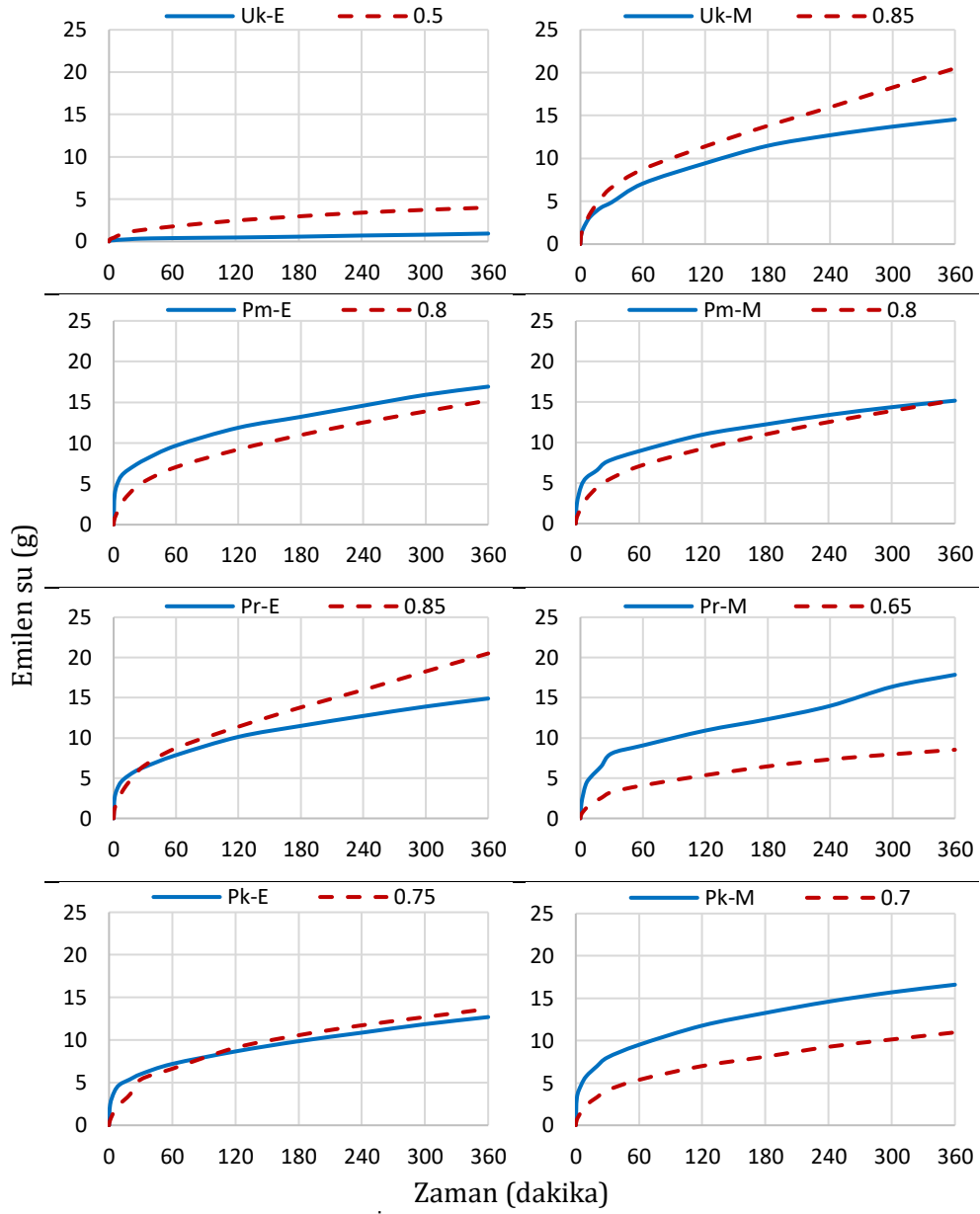
Harçların Böhme aşınma deneyinde kaybettikleri toplam hacimler kıyaslamalı olarak Şekil 7'de sunulmuştur. En düşük ve en yüksek hacim kayıplarının sırasıyla etüv ve mikrodalga kürü ile üretilen uçucu kül esaslı harçlarda ortaya çıktığı görülmektedir. Bu iki harca ait hamurların SEM görüntüleri ile de ortaya koyulduğu üzere en yoğun ve en heterojen içyapıya sahip hamurlar olması aşınma direnci üzerinde etkili olmuştur. Genel anlamda aynı alüminosilikat türü kullanılarak üretilen harçlardan, basınç dayanımı daha yüksek olanın daha düşük hacim kaybı yaşadığının söylenmesi mümkündür. Daha yüksek basınç dayanımına sahip olan harçta daha iyi bir hamur ve hamur-agrega arayüzey kalitesi olduğu, durumun da bundan ileri geldiği düşünülmektedir. Harç türünün aşınma direncine etkisi incelendiğinde, geopolimer harçlardaki hacim kayıplarının ya çimento harçlarının hacim kayıplarına yakın değerler aldığı ya da daha yüksek bir aşınma direncine sahip oldukları görülmektedir. Sonuçlar genel olarak ele alındığında ise geopolimer harçların daha yüksek bir aşınma direncine sahip olduklarının söylenmesi mümkündür. Benzer bir çalışmada Jacob vd. (2020), metakaolin esaslı geopolimerlerin, çimento esaslı betonlardan daha düşük aşınma kayıpları yaşadığını belirlemiştir. Ancak bunun aksine Al-Azzawi (2019), 53.4 MPa basınç dayanımına sahip çimento harcının Böhme aşınma direnci deneyindeki hacim kaybının, 54.7 MPa basınç dayanımına sahip uçucu kül/metakaolin esaslı geopolimer harcından %20 oranında daha az olduğunu belirlemiştir. Tüm bu sonuç ve çalışmalar, farklı malzemeler kullanılarak farklı kür şartları ve karışım oranlarıyla hazırlanan geopolimerlerin farklı özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



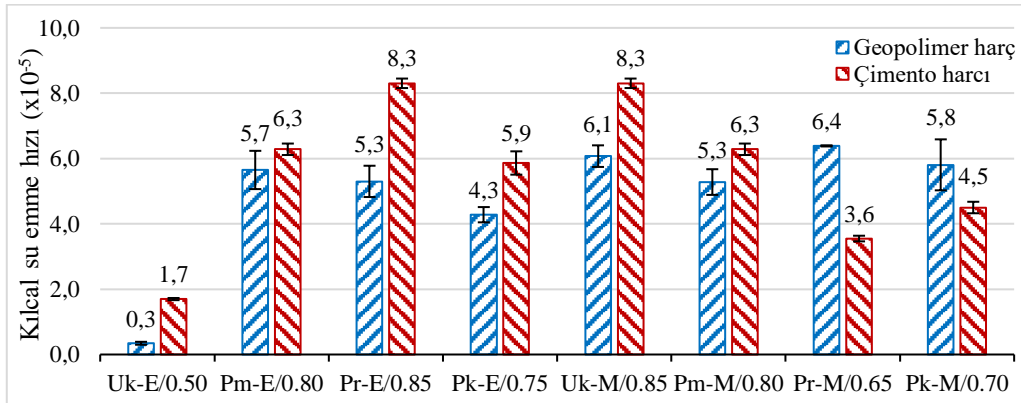
Şekil 7. Aşınma Direnci Deneyindeki Toplam Hacim Kayıpları (Total Volume Losses in Abrasion Resistance Test)

4.4. Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları (Sorptivity Test Results)

Geopolimer harçlar ve benzer dayanımdaki çimento harçlarının kılcal su emme-zaman grafikleri Şekil 8'de, kılcal su emme hızları ise Şekil 9'da kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Tüm karışımlar içerisinde en düşük kılcal su emme hızına sahip olan harç, etüv kürü ile üretilen uçucu kül esaslı geopolimer harçtır. Mikrodalga kürü ile üretilen perlit ve pişirilmiş kil esaslı harçlar dışındaki tüm geopolimer harçlar, benzer dayanımdaki çimento harçlarından daha düşük kılcal su emme hızına sahiptir. Kür tipinin kılcal su emme üzerindeki etkisi incelendiğinde ise etüv kürü ile üretilen harçların kılcal su emme hızlarının genellikle mikrodalga kürüyle üretilenlerinkinden daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Ancak bu deney ile elde edilen sonuçlardan ilginç olanı, uçucu kül dışında kalan geopolimer harçlarda, numunelerin 360 dakika sonunda emdikleri toplam su miktarının önemli bir kısmının deneyin ilk dakikalarında emilmesidir. Bu kapsamda ilk 10 dakikada ve deney sonunda emilen su miktarları ile, bu ikisinin oranı Tablo 4'te gösterilmiştir. Etüv kürü ile üretilen pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı harçlar ilk on dakikada, 360 dakikada emdikleri suyun %33-38'ini emerken bu değerler mikrodalga kürü ile üretilen serilerde %29-37 aralığında değişmektedir. Bu harçlara karşılık gelen çimento harçlarında ise değerler %18-22 arasındadır. Her ne kadar pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı harçların kılcal su emme hızları, genel anlamda karşılık gelen çimento harçlarından daha düşük olsa da bunlarda suyun çok hızlı emilmesi, bu serilerde anlamlı bir karşılaştırma yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu durumun aksine, uçucu kül esaslı harçlar çimento harçlarına benzer bir su emme karakteristiğine sahiptir. Pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı geopolimer harçların çok hızlı bir şekilde su emmelerinin SEM görüntüleri ile de kanıtlanan boşluk dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Geopolimer jel tabakaları arasına tüm yapı boyunca dağılı olan mikro ve nano boşlukların su iletiminin hızlı bir şekilde yapılmasına neden olduğu, bu şekilde de emilebilecek suyun çok hızlı bir şekilde emilmesine sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Benzer durum farklı araştırmacılar tarafından da belirlenmiştir. Hossain vd. (2020), yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, uçucu kül ve palm yağı yakıtı külü kullanarak, üç farklı alüminosilikat içeren 2 alkali-aktif harç serisi üretmiş ve bunların kılcal su emme özelliklerini çimento esaslı harç ile kıyaslamıştır. Araştırmacılar, alkali-aktif harçların kılcal su emme hızlarının, çimento harcınıninkinden daha yüksek olduğunu, alkali aktif harçların emdikleri suyun önemli bir bölümünü deneyin başlarında emdiği ifade etmiştir. Benzer bir çalışmada Yang vd. (2016), C30, C45 ve C60 olmak üzere 3 farklı beton sınıfında ürettiği cüruf esaslı alkali-aktif betonlar ile geleneksel betonların kılcallık özelliklerini kıyaslamıştır. Araştırmacılar BS-EN: 13057 Standardı'na uygun yapılan deneylerde alkali-aktif betonların, geleneksel betonlardan %153-%214 oranlarında daha yüksek bir kılcal su emme hızına sahip olduğu belirlenmiştir. Zhao and Sanjayan (2011) F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda benzer bir sonuca ulaşırken Luhar vd. (2021) bu araştırmacıların aksine F sınıfı uçucu külle üretilen geopolimer betonların kılcal su emme hızlarının, geleneksel betondan daha düşük olduğunu raporlamıştır. Geopolimer/alkali-aktif yapı malzemelerinin farklı alüminosilikat, aktivatör ve kür koşulları ile üretilmesi ve bunların mekanik özelliklerin yanı sıra durabilite özelliklerini de büyük ölçüde etkilemesi bu çelişkili sonuçların elde edilmesini açıklamaktadır. Bu çalışmada da etüv ve mikrodalga kürü kullanılarak farklı alüminosilikatlarla üretilen harçlarda, farklı sonuçların elde edilmesi şaşırtıcı değildir.



Şekil 8. Harçların Su Emme-Zaman İlişkisi (Water Absorption-Time Relationship of Mortars)



Şekil 9. Harçların Kılcal Su Emme Hızları (Rate of Absorption Values of Mortars)

Tablo 4. Kılcal Su Emme Deneyinde 10 ve 360 Dakikada Emilen Su Miktarları (Amount of Capillary Water Absorption within 10 and 360 Minutes in Sorptivity Test)

NUMUNE	EMİLEN SU MİKTARI (g)		ORAN (%)	KIYASLANAN ÇİMENTO HARCİ (S/Ç)	EMİLEN SU MİKTARI (g)		ORAN (%)
	10 DAK.	360 DAK.			10 DAK.	360 DAK.	
UK-E	0.20	0.93	21.5	0.50	0.76	4.00	19.0
PM-E	6.33	16.93	37.4	0.80	3.06	15.23	20.1
PR-E	4.90	14.90	32.9	0.85	3.70	20.50	18.0
PK-E	4.77	12.70	37.6	0.75	2.47	13.66	18.1
UK-M	3.27	14.53	22.5	0.85	3.70	20.5	18.0
PM-M	5.67	15.17	37.4	0.80	3.06	15.23	20.0
PR-M	5.14	17.85	28.8	0.65	1.80	8.53	21.1
PK-M	4.80	16.60	28.9	0.70	2.40	10.97	21.9

5. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Bu çalışmada etüv ve mikrodalga kürü ile üretilen uçucu kül, pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı geopolimer harçların kılcal su emme hızları, alkali-silis reaksiyonu genişmeleri ve aşınma dirençleri belirlenmiş, sonuçlar benzer basınç dayanımına sahip çimento harçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu ile geopolimer hamur mikro yapısı incelenmiş, içyapı-durabilite ilişkini irdelenmiştir. Kullanılan malzeme ve deney yöntemleri göz önüne alındığında;

- 14 günlük alkali-silis reaksiyonu deneyi sonunda, çimento harçlarında su/çimento oranının artışı ile artan, %0.75-%0.88 aralığında boy uzaması yaşandığı, ancak geopolimer harçlarda bu reaksiyondan kaynaklanan bir genişleme görülmediği, geopolimer harçlarda ortaya çıkan düşük seviyedeki boy değişimlerinin sıcak su etkisinden kaynaklandığı,
- Geopolimer harçlardaki aşınma kayıplarının alüminosilikat türü ve kür yöntemine bağlı olarak değiştiği ancak genel anlamda çimento harçlarına yakın veya daha düşük değerler aldığı,
- Kılcal su emme hızları kıyaslandığında, genel anlamda geopolimer harçlardaki katsayıların daha düşük olduğu, ancak pomza, perlit ve kil esaslı harçların ilk on dakikada ciddi miktarda su emmesinin yorum yapmayı güçleştirdiği,
- Etüv kürü ile üretilen uçucu kül esaslı hamurun içyapısının daha homojen ve dolu olduğu; pomza, perlit ve pişirilmiş kil esaslı hamurlarda, matrisin her yanına dağılı görece küçük boyutlu çok sayıda boşluk bulunduğu, bunun da hızlı su emmeye neden olduğu

sonuçlarına varılmıştır. Mikrodalga kürü kullanılarak farklı alüminosilikatlarla üretilen geopolimer yapı malzemelerinin durabilite özelliklerinin, farklı araştırmacılarca incelenmesinin konunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle öğütme dışında herhangi bir işlem görmeyen pomza ve perlit gibi malzemeler kullanılarak mikrodalga kürü ile üretilen geopolimerlerin durabilite özellikleri hakkında daha fazla sayıda çalışmaya ihtiyaç duyulduğunun söylenmesi mümkündür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma 119M950 proje kodu ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Acar, M.C., Şener, A., Özbayrak, A., Çelik, A.İ., 2020. Geopolimer Harçlarda Zeolit Katkısının Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 8(3), 820-832. <https://doi.org/10.21923/jesd.768565>
- Adam, A.A., Molyneaux, T.C.K., Patnaikuni, I., Law, D.W., 2009. Strength, Sorptivity and Carbonation in Blended OPC-GGBS, Alkali Activated Slag, and Fly Ash Based Geopolymer Concrete, Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction 563-568.
- Al-Azzawi, Z.H.N., 2019, Investigation of Durability Properties of Geopolymer Containing Metakaolin, Ph. D. Thesis, Erciyes University Graduate School of Natural and Applied Science, 141p.
- Amin, M., Elsakhawy, Y., Abu El-Hassan, K., Abdelsalam, B.A., 2022. Behavior Evaluation of Sustainable High Strength Geopolymer Concrete Based on Fly Ash, Metakaolin, and Slag. Case Studies in Construction Materials 16, e00976. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00976>
- Aschoff, J., Partschefeld, S., Schneider, J., Osburg, A., 2024. Effect of Microwaves on the Rapid Curing of Metakaolin- and

- Aluminum Orthophosphate-Based Geopolymers. *Materials* 17, 463. <https://doi.org/10.3390/ma17020463>
- Badkul, A., Paswan, R., Singh, S.K., Tegar, J.P., 2021. A Comprehensive Study on the Performance of Alkali Activated Fly Ash/GGBFS Geopolymer Concrete Pavement. *Road Materials and Pavement Design* 23, 1815–1835. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1926311>
- Diksha, Dev, N., Goyal, P.K., 2023. Prediction of Compressive Strength of Alccofine-Based Geopolymer Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01308-2>
- Ekiz Barış, K., 2024. Doğal Puzolan-esaslı Jeopolimer Üretiminde Mikroalga Kürünün Rolü, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 39(4), 2239-2251. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1267017>
- Gultekin, A., Ramyar, K., 2022. Effect of Curing Type on Microstructure and Compressive Strength of Geopolymer Mortars. *Ceramics International*, 48, 16156–16172. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.163>
- Gultekin, A., 2024. Compressive Strength and Microstructure of Microwave-Cured Waste Brick Powder-Based Geopolymer Mortars, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 48, 3119–3133. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01330-4>
- Hossain, M.M., Karim, M.R., A Elahi, M.M., Mohd Zain, M.F., 2020. Water Absorption and Sorptivity of Alkali-Activated Ternary Blended Composite Binder. *Journal of Building Engineering* 31, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101370>
- Jacob, A.E., Ephraim, K., Muhammad, M., 2020. Properties of Metakaolin Based Geopolymer Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 5, 10, 57-63
- Kanagaraj, B., Anand, N., Samuvel Raj, R., Lubloy, E., 2023. Techno-Socio-Economic Aspects of Portland Cement, Geopolymer, and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Composite Systems: A-State-Of-Art-Review. *Construction and Building Materials* 398, 132484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132484>
- Khalid, S.M., Shobha, M.S., 2024. Effect of Ternary Blends on Mechanical Strength, Durability and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01241-4>
- Lei, J., Fu, J., Yang, E.-H., 2020. Alkali-Silica Reaction Resistance and Pore Solution Composition of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Infrastructures* 5, 96. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5110096>
- Li, K.L., Huang, G.H., Jiang, L.H., Cai, Y.B., Chen, J., Ding, J.T., 2006. Study on Abilities of Mineral Admixtures and Geopolymer to Restrain ASR. *Key Engineering Materials* 302–303, 248–254. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.248>
- Luhar, S., Luhar, I., Nicolaidis, D., Gupta, R., 2021. Durability Performance Evaluation of Rubberized Geopolymer Concrete. *Sustainability* 13, 5969. <https://doi.org/10.3390/su13115969>
- Nadeem, M., Haq, E.U., 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>
- Ng, C., Alengaram, U.J., Wong, L.S., Mo, K.H., Jumaat, M.Z., Ramesh, S., 2018. A Review on Microstructural Study and Compressive Strength of Geopolymer Mortar, Paste and Concrete. *Construction and Building Materials* 186, 550–576. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.075>
- Nurrudin, M.F., Haruna, S., Mohammed, B.S., Shaaban, I.G., 2018. Methods of Curing Geopolymer Concrete: A Review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 5, 31–36. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- Pouhet, R., Cyr, M., Multon, S., 2016. Can Metakaolin-Based Geopolymers Suffer from Alkali-Silica Reaction. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo, Brazil.
- Pradhan, P., Dwibedy, S., Pradhan, M., Panda, S., Panigrahi, S.K., 2022. Durability Characteristics of Geopolymer Concrete - Progress and Perspectives. *Journal of Building Engineering* 59, 105100. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105100>
- Shaikh, F.U.A., 2014. Effects of Alkali Solutions on Corrosion Durability of Geopolymer Concrete. *Advances in Concrete Construction*, 2, 109–123. <https://doi.org/10.12989/ACC.2014.2.2.109>
- Shi, C., Shi, Z., Hu, X., Zhao, R., Chong, L., 2015. A Review on Alkali-Aggregate Reactions in Alkali-Activated Mortars/Concretes Made With Alkali-Reactive Aggregates. *Materials and Structures* 48, 621–628. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0505-2>
- 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, Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Las Vegas, USA.
- Somarathna, 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>
- Thompson, A., Saha, A.K., Sarker, P.K., 2019. Comparison of the Alkali-Silica Reactions of Ferronickel Slag Aggregate in Fly Ash Geopolymer and Cement Mortars. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 26, 891–904. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1686068>
- Yang, K., Yang, C., Magee, B., Nanukuttan, S., Ye, J., 2016. Establishment of a Preconditioning Regime for Air Permeability and Sorptivity of Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Composites* 73, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.019>
- Zhang, B., 2024. Durability of Low-carbon Geopolymer Concrete: A Critical Review. *Sustainable Materials and Technologies* 40, e00882. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00882>
- Zhao, R., Sanjayan, J.G., 2011. Geopolymer and Portland Cement Concretes in Simulated Fire. *Magazine of Concrete Research* 63, 163–173. <https://doi.org/10.1680/mac.9.00110>